

Werner Vogd

Von der Physik zur Metaphysik

Eine soziologische Rekonstruktion
des Deutungsproblems der Quantentheorie

**VELBRÜCK
WISSENSCHAFT**

Werner Vogd
Von der Physik zur Metaphysik

Werner Vogd
Von der Physik zur
Metaphysik

Eine soziologische Rekonstruktion
des Deutungsproblems der Quantentheorie

**VELBRÜCK
WISSENSCHAFT**

Dieses Werk ist im Open Access unter der Creative-Commons-Lizenz
CC BY 4.0 lizenziert.



Die Bestimmungen der Creative-Commons-Lizenz beziehen sich nur auf das Originalmaterial der Open-Access-Publikation, nicht aber auf die Weiterverwendung von Fremdmaterialien (z.B. Abbildungen, Schaubildern oder auch Textauszügen, jeweils gekennzeichnet durch Quellenangaben). Diese erfordert ggf. das Einverständnis der jeweiligen Rechteinhaber.

© Werner Vogd
Publikation: Velbrück Wissenschaft
Erste Auflage 2026
Velbrück Wissenschaft in der Velbrück GmbH Verlage, 2026
Meckenheimer Str. 47 · 53919 Weilerswist-Metternich
info@velbrueck.de
www.velbrueck.de

Printed in Germany
978-3-95832-446-6

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

INHALT

Vorspiel auf dem Proszenium	
Zum Kontakt von Supertheorien (von Peter Fuchs)	7
Einleitung	11
1 Rekonstruktion der Quantentheorie auf Basis der inneren Problembezüge	17
2 Die Rolle der Mathematik	38
3 Weiterer Verlauf dieser Studie	45
I Die Entwicklung der Quantentheorie	49
II Die Suche nach Alternativen zur Kopenhagener Interpretation	117
1 Ensemble-Interpretation: Rückkehr zum Teilchenbild	119
2 Bohmsche Mechanik: Holistische Ordnungen	124
3 Viele-Welten-Interpretation: Die ψ -Funktion als einzige Realität	131
4 Entfaltungen der Paradoxie einer nicht-klassischen Theorie	142
III Normalisierung – Quantentheorie und Experimentalphysik	145
1 Die Bellsche Ungleichung und das Aspect-Experiment: Reale Verschränkung oder beobachterabhängige Kausalität	147
2 Die Quantenelektrodynamik: Diagrammatische Anschaulichkeit	151
3 Aharonov-Bohm-, Casimir- und Tunneleffekt: Seltsame Quantenfelder im leeren Raum	166
4 Variationen zum Doppelspaltexperiment: Der Kontext bestimmt, was der Fall ist	169
5 Makroskopische Quantenphänomene: Emergente, kollektive Ordnungen	179
6 Normalisierung einer Theorie, die nicht mehr mit dem Common Sense vereinbar ist	189

IV Nicht die Quantenphysik, sondern unsere Alltagswelt bleibt das Unerklärliche	201
1 Spontaner Kollaps: Rückkehr zur klassischen Realität	204
2 Zeit und Irreversibilität: Wissen macht einen Unterschied	209
3 Informationstheoretische Deutung: It from Bit	216
4 Dekohärenz: Die Natur misst sich selber	223
5 Konsistente-Geschichten-Theorie: Selektive Existenzen	234
6 Emergenz: Abschied von der Weltformel	244
7 Zusammenschau: Von der Physik zur Metaphysik?	257
V Operative Schließung von Theorie: Das Beispiel der Stringtheorie	263
Theoriebildung und operationale Schließung	275
VI Quantentheorie und Mystik	283
VII Formprobleme einer Universaltheorie – systemtheoretische Reflexionen	303
1 Wichtige Stationen der Rekonstruktion	307
2 Würdigung der Quantenphysik und ein Plädoyer gegen den Soziologismus	315
3 Die Interpretationsprobleme der Quantentheorie im Lichte systemtheoretischer Reflexion	320
Literatur	353
Video- und Audioquellen	366
Personenregister	367

VORSPIEL AUF DEM PROSZENIUM ZUM KONTAKT VON SUPERTHEORIEN

(von Peter Fuchs)

(Auf der Vorderbühne eines Provinztheaters in der Nähe Kiels erscheinen wie aus dem Nichts, akustisch begleitet von einem ›Plopp‹, zwei Personen. Die eine trägt die Maske von Werner Vogd, die andere die Maske von Peter Fuchs.)

PF: Wooow ... Das nenne ich einen standesgemäßen Auftritt!

WV: Für meine Begriffe ein bisschen zu dramatophil, zu mephistophilisch.

PF: Das musst Du gerade sagen. Dein neues Buch ist doch selbst gekennzeichnet durch eine Vorliebe für dramatische Effekte.

WV: Unfug ... ich bin Wissenschaftler und verabscheue alles Theatralische außerhalb des Theaters.

PF: Na, ich weiß nicht. Wenn man zwei Supertheorien aufeinanderprallen läßt ...

WV: Aufeinanderprallen? Nein, ich denke eher, dass das Buch eine Art behutsamer Kontaktaufnahme zwischen Theorien dieses Typs vornimmt, zwischen einer Allgemeinen Theorie der Sinnssysteme und der Quantentheorie. Das Ziel ist nicht Konfrontation oder das Wettstreifen um die Theoriekrone.

PF: Ich finde es sinnig, dass der Geist der Zeiten dafür gesorgt hat, dass Max Planck nach seiner Geburt ins Kirchenbuch der Gemeinde St. Nikolai in Kiel als Marx Planck eingetragen wurde.

WV: Das ist wieder einmal so weit hergeholt!

Und?

PF: Was ›und‹?

WV: Das Manuskript ... Hast Du es gelesen?

PF: Natürlich.

WV: Und? Wie ist Dein Eindruck?

PF: Hmm ... Erst einmal ist es für einen Wissenschaftler wie mich, der kein Physiker ist, gut lesbar, obwohl es an keiner Stelle dem Populismus huldigt, der in der öffentlichen Diskussion über Quantentheorie sein Unwesen treibt. Dann finde ich die Idee bestechend, diese Theorie mit Systemtheorie unter dem Gesichtspunkt ihrer Transklassizität zu vergleichen. Was geläufigerweise als Crux beider Theorien aufgefaßt wird, nämlich dass sie keinen ontologisch fixierbaren Gegenstand ihrer Theorie zuwebringen, wird umgedeutet als Vorzug, als typische Eigenschaft von Supertheorien, die ›super‹ sind, weil sie über ein gerütteltes Maß an Selbstreferenz verfügen. Sie gehen das Wagnis ein, sich selbst als Beobachter mitzuthematisieren.

Mir gefällt, dass Du in diesem Zusammenhang meinen Ausdruck ›Unjekt‹ aufgreifst, außerdem, dass Du die theoretische Physik als etwas auszeichnest, das zu grotesken Ergebnissen kommt im Zuge eines gnadenlos konsistenten Durchbuchstabieren der theoretischen Grundbegriffe, die zu klassischen Undenkbarkeiten führen wie der Viele-Welten-Theorie oder wie der Idee eines Blockuniversums. Das ist ähnlich bei der Systemtheorie Luhmannscher Herkunft, etwa, wenn sie das soziale Universum als unbelebt, als psychefrei, als autonom beschreibt oder mit Ausdrücken wie Polykontexturalität, Heterarchie, Hyperkomplexität belegt.

WV: Ich genieße derartige Undenkbarkeiten.

PF: Das geht mir ähnlich, wobei ich immer versuche, daran zu denken, dass dieser Genuss nur in privilegierten, zeitfrei gesetzten Positionen möglich ist, beispielsweise in einem Job wie dem unseren. Alltäglich lebende Menschen empfinden diese paradoxen Bizarrerien als absolut überflüssig, im besten Fall als Glasperlenspielerei. Diesen Vorwurf höre ich oft. Ich tröste mich dann mit Hesses ›Glasperlenspiel‹. Und natürlich mit Deinem Text, der im Kern, scheint mir, die Bedingung der Möglichkeit moderner Theoriebildung behandelt, nicht nur in der Physik, sondern eben auch im Vergleich zwischen Quantentheorie und der Allgemeinen Theorie der Sinnsysteme.

WV: In beiden Fällen geht es »heterogene Kausalitäten in multiplen Kontexten, die nur bei Beobachtung als konkrete Daten ausfallen«.

PF: Ja, Du treibst das auf die Spitze mit der Idee, dass die Wissenschaft vor ›unnötigem Weltbezug‹ geschützt werden müsse. Das ist wundervoll kontraintuitiv formuliert. Und Du fügst hinzu,

- dass Wissenschaft entlastet werden müsste von ›unmittelbaren Verwertungszwängen‹. Donnerlüttchen ...
- WV:* Danke ... Mir fällt dabei ein, dass ›Lüttchen‹ mit ›Lichting‹ zusammenhängt, also den Blitz meint, etwas Zerstörerisches. Und was vom Blitz jener Theorien getroffen wird, das ist der Common Sense.
- PF:* Na ja ... nehmen wir doch einfach das Kriegerische aus der Metapher. Als Soziologe kann ich Common Sense als funktional begreifen, als unverzichtbare Voraussetzung einer Naherfahrung des alltäglichen Lebens.
- WV:* Die Schwierigkeit liegt darin, dass Texte aus der Quantentheorie und der Systemtheorie weltanschauungsschädlich sind. Sie de-ontologisieren, was sonst in der Welt gilt, und eben nicht nur metaphorisch.
- PF:* Du schreibst ganz am Ende, dass Theorien des Typs, über den wir hier reden, dabei behilflich sein können, »in Welten ohne Grund heimisch zu werden.« Mir fällt dazu spontan Heidegger ein: »Wissenschaften bestätigen und betreiben das Grundlose des Seienden.«
- WV:* Uff ... Jetzt mußt Du nur noch von grundloser Gründigkeit reden, und ich kippe um.
- PF:* Schon gut! Ich wollte am Ende unseres kleinen Gespräches nur das rhetorische Genre des Appellativen betätigen. Dann mache ich es eben anders und sage: Du hast ein Buch geschrieben, das mich bereichert hat. Ich gratuliere.
- WV:* Man dankt. Hast Du noch was von Goethe?
- PF:* »Das Wissen beruht auf der Kenntnis des zu Unterscheidenden, die Wissenschaft auf der Anerkennung des nicht zu Unterscheidenden. Das Wissen wird durch das Gewährwerden seiner Lücken, durch das Gefühl seiner Mängel zur Wissenschaft geführt, welche vor, mit und nach allem Wissen besteht.« Ich spüre ein seltsames Kribbeln im Körper.
- WV:* Das sind die Quanten, die sich auf das wegbeamen vorbereiten, man weiß nicht, wie, aber es funktioniert.
- (Zweimal Plopp und die Protagonisten sind verschwunden.)

*In Erinnerung an
Marianne Giebeler*

Hiermit möchte ich Jonathan Harth und Till Jansen für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die äußerst anregenden Gespräche danken. Dank gebührt ebenso Dirk Baecker, Peter Fuchs und Uwe an der Heiden für wertvolle Hinweise zu den einzelnen Kapiteln.

Berlin, den 1. Juni 2013

Werner Vogd

EINLEITUNG

Warum sollte sich die Soziologie mit der Quantentheorie beschäftigen? Nichts scheint ihrem Gegenstandsbereich weiter entfernt als jene bizarren subatomaren Mikrowelten, die sich als Quantenprozesse beschreiben lassen. Mit diesen Konzepten soziale oder psychische Prozesse verstehen zu wollen, lässt sich in der Regel schnell als Pseudowissenschaft oder plumpe Esoterik entlarven. Auch Analogien zwischen Sozialforschung und Quantenmechanik in Bezug auf den Einfluss des Beobachters zeigen in der Regel nur, dass man von der Materie nicht wirklich etwas verstanden hat, also nicht einmal in der Lage ist, die komplexen quantentheoretischen Konzepte in angemessener Weise als Metapher zu gebrauchen – denn dies würde voraussetzen, die strukturellen Homologien zwischen ausgebeutetem Bild und physikalischer Problemstellung hinreichend begriffen zu haben.

Um zu erklären, dass ein Messprozess den beobachteten oder untersuchten Gegenstand stört, braucht man keine Quantentheorie. Eine solche Wechselwirkung lässt sich problemlos durch klassische Konzepte beschreiben. Dass in physikalischen Experimenten eine Messsonde das gemessene Objekt ein wenig deformiert, vielleicht zu einer Änderung von dessen Lage, Temperatur oder Ladungsverteilung führt, ist ebenso wenig verwunderlich wie die Tatsache, dass in einer sozialwissenschaftlichen Untersuchung die Fragen des Interviewers das Antwortverhalten des Informanten beeinflussen. All dies lässt sich im Sinne des Common Sense auf klassische Weise erklären. *Etwas* Substanzielles, ein identifizierbares Objekt, wirkt auf *etwas*.

Quantenphysiker sehen sich demgegenüber jedoch zu Sätzen genötigt wie:

»Quantenmechanische Materie besteht aus Wellen von nichts.«¹

»Die Logik der quantenmechanischen Sprache ist schwächer als die klassische Logik. [...] Etwas salopp ausgedrückt: Quantenlogik ist wahrer als klassische Logik.«²

»Es ist unmöglich, anzugeben, was mit dem System zwischen der Anfangsbeobachtung und der nächsten Messung geschieht. Nur

1 So etwa der Nobelpreisträger Robert B. Laughlin (2007, 93).

2 Peter Mittelstaedt (2000, 67).

im dritten Schritt [der wiederholten Messung] kann wieder der Wechsel vom Möglichen zum Faktischen vollzogen werden.«³

Diese wenigen Aussagen lassen uns eine erste Intuition dafür gewinnen, was es heißt, von einer *nicht-klassischen Theorie* zu sprechen.

Die Quantentheorie erklärt ihre Observablen nicht mehr als kausale Folge der Wechselwirkung individuierbarer Objekte. Ihre Gleichungen bestehen stattdessen aus *Operatoren* – also Kalkülen, durch deren Anwendung man Objekte generieren kann, die zueinander nicht mehr nur in kausalen, sondern auch in modalen und konditionalen Beziehungen stehen. All das, was man üblicherweise mit klassischen Variablen tun kann – addieren, subtrahieren, multiplizieren –, lässt sich auch mit Operatoren tun, doch der Formalismus der Quantentheorie führt zu einigen Besonderheiten: Quantensysteme haben eine schwächere Kausalität, eine schwächere Logik und es besteht geringere Austauschbarkeit in Verbänden, das heißt, es bestehen weniger Freiheitsgrade als in einer klassischen Beschreibung der gleichen Variablen.⁴

Wie der Philosoph Michael Esfeld feststellt, müssen wir mit der Quantentheorie zudem »die Sicht der Realität aufgeben, gemäß der physikalische Dinge durch intrinsische Eigenschaften gekennzeichnet sind und somit dem Prinzip der Separabilität genügen. An dessen Stelle sollte eine Sicht der Realität treten, die sich auf Relationen bezieht, welchen keine intrinsischen Eigenschaften zugrunde liegen.«⁵

3 Werner Heisenberg (2007, 70 f.).

4 Um es mit Mittelstaedt auszudrücken: »Quantenmechanische, statistische Kausalität ist schwächer als klassische Kausalität, die als ein selten realisierter Spezialfall erscheint, und der quantenmechanische Substanzbegriff ist schwächer als der klassische, da Quantenobjekte anders als klassische Objekte nicht Träger aller Eigenschaften sind« (Mittelstaedt 2000, 67).

5 Esfeld (2002, 209). Für jemanden, der wie Esfeld in der Tradition der ›analytischen Philosophie‹ steht, ist eine solche Schlussfolgerung erstaunlich: Hierzu ausführlicher: »Wenn es Korrelationen gibt, dann gibt es selbstverständlich Korrelata. Soweit die Quantentheorie betroffen ist, gibt es aber keine Korrelata, die unabhängig von den Korrelationen durch intrinsische Eigenschaften gekennzeichnet sind und damit unabhängig von den Korrelationen identifizierbar sind. Was die Quantenmechanik betrifft, können wir die Systeme, welche die Quantenmechanik behandelt – wie Elektronen, Protonen, Neutronen, Photonen und der gleichen – als einzelne physikalische Systeme ansehen. [...] Sofern wir uns auf die Quantenmechanik beschränken, haben wir also Korrelata, die zwar als einzelne Systeme betrachtet werden können, die aber keine Individuen sind. Was die Quantenfeldtheorie betrifft, so können wir [...] Punkte von Feldern in

Doch zurück zu unserer Ausgangsfrage: Warum sollte sich die Soziologie im Allgemeinen und die soziologische Systemtheorie im Besonderen mit der Quantentheorie beschäftigen? Im Folgenden möchten wir zumindest drei Antworten geben, die dieses Vorhaben als soziologisches Projekt rechtfertigen:

In Hinblick auf zeitgenössische Welterklärung – und möglicherweise auch in Hinblick auf metaphysische Fragen – übernimmt die moderne Physik gleichsam die Rolle der ›Leitkultur‹ und hat damit längst der Philosophie den Rang abgelaufen.

Die bisherigen Versuche einer wissenssoziologischen Annäherung an die Quantentheorie leiden darunter, dass auf grobschlächtige Weise gesamtgesellschaftliche Momente an eine komplexe und in hohem Grade durch innerwissenschaftliche Bezugsprobleme determinierte Theorieentwicklung herangetragen werden. Es ist an der Zeit, die hiermit entstandenen Fehleinschätzungen zu korrigieren.

Allein die Tatsache, dass Menschen etwas so Bizarres wie die Quantentheorie hervorbringen konnten, lässt die soziologische Frage interessant erscheinen, *wie* dies möglich wurde. Im Sinne einer Soziologie der Wissenschaft ist hier zu fragen, unter welchen Bedingungen und Voraussetzungen eine Theorie hervorgebracht werden kann, die nicht nur jeglicher Common-Sense-Anschauung spottet, sondern darüber hinaus die Konzepte der klassischen Physik radikal überschreiten lässt. Mit Thomas Kuhn ist hier zu fragen, wie sich ein solcher Paradigmenwechsel gestaltet, welche institutionellen Ausdifferenzierungen der Wissenschaft hierfür Voraussetzung sind und wie sich eine solch gewagte Theorie innerhalb der Physik stabilisieren kann.

Physikalische Denkformen stehen im Zentrum der neuzeitlichen Kultur

»Naturwissenschaft ist der harte Kern der neuzeitlichen Kultur«, denn »es sind diejenigen Erkenntnisse, die am zweifellosesten sind. Die Physik erweist sich als der harte Kern der Naturwissenschaften.«⁶

Diesen Aussagen von Carl Friedrich von Weizsäcker ist aus verschiedenen Gründen zuzustimmen. Physikalisches Wissen gilt als überprüfbares Wissen, denn »der harte Kern der Physik ist Experiment und

der Raum-Zeit als dasjenige betrachten, zwischen dem die Korrelationen bestehen« (Esfeld 2002, 212).

⁶ Weizsäcker (2009).

Mathematik«. ⁷ Allein schon der Blick auf die Hauptströmung der zeitgenössischen Philosophie bestätigt dieses Bild. Die *analytische Philosophie* verzichtet auf eine eigenständige Metaphysik und sieht ihre Rolle stattdessen weitgehend nur noch darin, zu überprüfen, ob die (Natur-)Wissenschaftler in der richtigen Weise von den Dingen sprechen. Die Ausdifferenzierung der modernen Wissenschaften hat damit zur Aufhebung der von der Antike bis Kant geltenden Einheit von Philosophie, Metaphysik und Naturerkenntnis geführt.

Demgegenüber scheuen sich große Physiker in der Regel nicht, auch zu metaphysischen und weltanschaulichen Fragen Stellung zu beziehen und die unter strengen methodologischen und mathematischen Bedingungen gewonnenen Erkenntnisse als ›große Erzählungen‹ auszubauen, die mit einer Vielzahl von kosmvisionären und teilweise auch ethischen Aussagen geschmückt sind. ⁸ Die spekulative Ausdeutung der Welt, einschließlich der anthropologischen Verortung des Menschen, wird heutzutage eher Physikern ⁹ zugetraut als Philosophen und Soziologen.

Es ist zu vermuten, dass die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation oder Everetts Viele-Welten-Theorie mehr in die Metaphernwelt der Gegenwartsliteratur ¹⁰ oder die Bilderwelten moderner Kunst ¹¹ eindringen als etwa der Kantsche Imperativ oder die Leibnizsche Monadenlehre. Die Bücher von Steven Hawking werden heute häufiger gelesen als die Werke aller Gegenwartsphilosophen zusammengenommen, und es ist zu vermuten, dass derzeit mehr Menschen seine quantenmechanisch inspirierten Ideen vom *anfangslosen Universum* in Grundzügen nachvollziehen können als die differenztheoretische Konzeption von Derridas Grammatologie oder Luhmanns Systemtheorie. ¹² Selbst für die Religion scheint der Dialog mit den Grenzgebieten der Physik heutzutage eher Transzendenz zu versprechen als das Gespräch mit der Philosophie. ¹³

Denkfiguren aus den Spezialdiskursen der Quantentheorie sind schon längst in den ›Interdiskurs‹ der Gegenwartskultur eingedrungen.

7 Weizsäcker (2009).

8 Siehe etwa die Potsdamer Denkschrift von Dürr u. a. (2005).

9 Darüber hinaus beansprucht die Neurobiologie hier einiges an Deutungsmacht. Vgl. Vogd (2010).

10 Siehe zur Aufarbeitung der Rezeption der Quantentheorie in der deutschsprachigen Literatur die Arbeit von Emter (1995).

11 Siehe zur Rezeption moderner physikalischer Konzepte im Surrealismus die Studie von Parkinson (2008).

12 Hawking (1989; 2001), Derrida (1974), Luhmann (1993).

13 Siehe hierzu etwa die Sitzungsprotokolle der Pontifical Academy of the Sciences (zum Beispiel von 2003), für die Evangelische Kirche Ewald (2006) oder von Seiten der Physik Dürr (1991; 2007).

gen.¹⁴ Man spricht von Quantensprüngen und vom Beobachtereffekt, freundet sich langsam mit der Idee der Parallelwelten an und glaubt vielleicht sogar an Quantenheilung. Inwieweit dabei die ursprünglichen Semantiken zu etwas Neuem mutieren und in metaphorischer oder allegorischer Weise auf Sinnhorizonte hinweisen, die mit dem innerphysikalischen Diskurs kaum mehr etwas gemein haben, ist eine Frage, die mit dem vorliegenden Projekt nicht angegangen werden kann. Es wird hier aber zumindest deutlich, dass die Begrifflichkeiten der Quantentheorie kontinuierlich in den semantischen Haushalt der Gesellschaft eindringen. In diesem Sinne ist es allmählich auch für die Soziologie an der Tagesordnung zu fragen, auf was sich die Gesellschaft hierbei einlässt. Jede Theorie beruht auf einer bestimmten Epistemologie. Die Quantentheorie wird üblicherweise als eine nicht-klassische Theorie betrachtet. Was bedeutet es aber generell für das Verständnis von Theorien, wenn nicht-klassische Konzeptionen in einer harten Wissenschaft wie der Physik salonfähig werden?

Ein Desiderat der Wissenssoziologie

Prinzipiell ist der Wandel der Wissenskonfigurationen in den harten Naturwissenschaften ein vielversprechender Gegenstand der *Wissens-* und der *Wissenschaftssoziologie*. Mit Thomas Kuhn treffen wir im Falle der Quantentheorie offensichtlich auf einen Paradigmenwechsel,¹⁵ entsprechend dem alte und bislang bewährte Denkfiguren durch neue Schemata ersetzt werden. Am Beispiel der Entstehung und Entwicklung der Quantentheorie können wir untersuchen, wie *Anschauung, Experiment* und *Entwicklungen der Mathematik* zueinander in produktive Wechselwirkung treten, um so eine neue Theorie voranzutreiben, die dann eine Fülle empirischer Untersuchungen inspiriert, die dann wiederum die Entwicklung, Ausdeutung und Veranschaulichung der Theorie voranbringen.¹⁶

Die *Wissenssoziologie* hat noch keinen besonders glücklichen Umgang mit der Quantentheorie gefunden. Prägend bleiben hier bislang vor allem die Arbeiten von Paul Forman zum Zusammenhang der in der Weimarer Republik vorherrschenden ideologischen Formationen und den Sprachfiguren der Quantentheorie. Forman kommt zu dem Schluss, dass die Neuformulierung der Quantentheorie als eine Anpassungsleistung der Physiker an die Kausalitäts- und Theoriefeindlichkeit der Weimarer Republik und als eine Übernahme der

14 Insbesondere Jürgen Link hat für die empirische Diskursanalyse die Unterscheidung von Interdiskurs und Spezialdiskurs fruchtbar gemacht (vgl. Link/Diaz-Bone 2006).

15 Kuhn (1988 [1977]).

16 Siehe zum Beginn der Quantentheorie insbesondere Kuhn (1978).

hiermit verbundenen mystischen, antirationalistischen und individualistischen Motive zu verstehen sei.¹⁷

In soziologischer Verkürzung werden bei Forman leider die inneren Formzwänge einer Physik, die ja vor allem aufgrund ihrer empirischen Befunde in eine Krise gekommen ist, vollkommen ausgeblendet. Das eigentliche Bezugsproblem der damaligen Physiker, nämlich dass die bisherigen klassischen Anschauungen nicht mehr tragen, um die Ergebnisse erklären zu können, wird von Forman nicht einmal als soziologische Tatsache zur Kenntnis genommen. Entsprechend scheinen für ihn die Physiker weniger durch die Kohärenzzwänge der innerphysikalischen Auseinandersetzungen denn durch die äußeren politischen Semantiken getrieben.¹⁸ Eine ideologische Kausalität wird suggeriert.

Auch James Cushing, der ebenfalls gerne in wissenssoziologischen Diskursen aufgegriffen wird, neigt viel zu stark dazu, die wissenschaftsinternen Auseinandersetzungen im Zuge der Kopenhagener Deutung politisch zu interpretieren.¹⁹ Auch bei ihm werden die physik- und theorie-inhärenten Konsistenzzwänge der Debatte außer Acht gelassen. In Hinblick auf die Bewertung dieser Debatte ist hier Luhmann zuzustimmen, dass der »Streit über externe bzw. interne Determination von Theorieinnovationen mit viel zu groben Waffen ausgefochten worden ist«. Sobald eine hinreichend ausdifferenzierte und in Hinblick auf ihre internen Kommunikationsflüsse autonome Wissenschaft entstanden ist, ist vielmehr davon auszugehen, dass das »kulturelle Milieu, das auf die Forscher einwirkt,« allenfalls »als verstärkt auftretender Anlaß für aussichtsreiche Variation aufgefasst werden« kann. »Für die Selektion dagegen und erst recht für die Stabilisierung muß die Problemlage des Faches als ausschlaggebend gesehen werden.«²⁰

Die Soziologie hat hier etwas wiedergutzumachen und einen soziologischen Blick zu entwickeln, mit dem es möglich wird, die Quantentheorie entsprechend ihrer eigenen Theoriebewegungen angemessen würdigen und reflektieren zu können.

17 Formans Thesen sind dann auch im Sonderheft ›Wissenssoziologie‹ der Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie auf Deutsch abgedruckt worden (Forman 1981). Ein Wiederabdruck dieses Aufsatzes, die deutsche Übersetzung von »Weimar Culture, Causality and Quantum Theory, 1918-1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment« und eine kritische Diskussion der Arbeiten findet sich in v. Meyenn (1994).

18 Siehe zu einer fundierten Kritik an den Forman-Thesen aus wissenschaftsgeschichtlicher Perspektive Hendry (1994).

19 Cushing (1994).

20 Luhmann (1998, 592).

Von der Quantentheorie lernen?

Die Quantentheorie ist heute mehr als 100 Jahre alt und hat immer noch nicht zu einer einheitlichen Interpretation oder Deutung gefunden. Dennoch lässt sich ihre Bedeutung kaum unterschätzen. Sie hat die Physik zur Anerkennung einer nicht-klassischen Theorie gezwungen, in der die klassischen Observablen nicht mehr kontextfrei oder *beobachterunabhängig* behandelt werden können. Sie hat zur Anerkennung komplexer Reflexionsverhältnisse gezwungen und stellt die klassische monokontexturale Logik infrage. Sie fordert dazu heraus, über komplexere, möglicherweise mehrwertige Reflexionssysteme nachzudenken. Nicht zuletzt wird mit ihr das Verhältnis zwischen Reduktionismus und Emergenz virulent.

Gerade die Tatsache, dass die Quantentheorie trotz ihres Erfolges als einer physikalischen Universaltheorie in Hinblick auf ihre Anschaulichkeit und physikalische Bedeutung mehr Fragen als Antworten aufwirft, sollte Wissenschaftlern anderer Disziplinen zu denken geben. Von der Quantentheorie lernen, heißt damit vor allem zu begreifen, was es heißt, sich auf komplexe Gegenstände einzulassen. Eine exakte Wissenschaft zu beobachten, wie sie den Common Sense überwindet, um sich stattdessen auf seltsame Weltbeschreibungen einzulassen, kann auch Psychologen, Sozial- oder Wirtschaftswissenschaftler inspirieren, sich sowohl ein wenig mehr Verrücktheit als auch die theoretischen Konsequenzen zuzutrauen, welche die Untersuchungsgegenstände ihnen abverlangen.

1 Rekonstruktion der Quantentheorie auf Basis der inneren Problembezüge

Für die Quantentheorie fehlt eine wissenssoziologische Rekonstruktion, die sich gleichsam *rekonstruktiv* von der Innenperspektive her gesehen den Problemlagen der Theoriebildung annähert. Es fehlt eine soziologische Rekonstruktion, welche die *Bezugsprobleme* in den Vordergrund stellt, die durch die Physik erzeugt werden und die Lösungen nahelegen, die wiederum neue Bezugsprobleme für die Physik hervorrufen. Erst auf diesem Wege kann ein Verständnis der Theorieentscheidungen und -bewegungen gewonnen werden. Auf diese Weise kann es schließlich auch gelingen, die bis heute andauernden Auseinandersetzungen um die angemessene Deutung der Quantentheorie als immanente Folgeprobleme der Theorieentwicklung, gleichsam als Konsequenz der *Theorieform* zu rekonstruieren. Anders als die Wissenschaftsgeschichte, die das Augenmerk vor allem

auf Denkkollektive sowie biografische und historische Kontingenzen legt – aber auch anders als die üblichen in den Lehrbüchern anzutreffenden Selbstbeschreibungen der Physik –, können durch eine solchermaßen informierte soziologische Analyse die Probleme der *Form* (quanten-)physikalischer Theoriebildung genauer in den Blick genommen werden.

Die hohe innerphysikalische Prominenz bizarrer Weltkonzepte – man denke hier etwa an die Viele-Welten-Theorie,²¹ entsprechend der jeder einzelne Mensch in unzähligen Kopien in alternativen Geschichten vorkommt, oder ein Blockuniversum, in dem Vergangenheit und Zukunft gleichzeitig existieren²² – erscheint aus dieser Perspektive vor allem als Suche nach schlüssigen Antwortmöglichkeiten auf die Folgeprobleme quantentheoretischer Theoriebildung. Eine gewinnbringende soziologische Analyse kann und sollte ihr Augenmerk entsprechend auf die *inneren Zwänge* der Quantenphysik legen. Sie kann nun beginnen, diese als *kommunikative Probleme* eines hochgradig ausdifferenzierten Teilsystems der Wissenschaft zu begreifen.

Es geht dann also um die Frage, wie sich Wissenschaft in angemessener Form selbst konditionieren, d. h. den eigenen Betrieb in Anbetracht überfordernder Komplexität programmieren kann. Wissenschaft kann hier nicht anders vorgehen als zu simplifizieren. Entsprechend generiert sie eine eigene, vereinfachende Welt aus »selbstgemachten Daten« und Gegenständen, in der sich innerhalb der »zahllosen kombinatorischen Möglichkeiten nach Ergebnissen« und Beziehungen suchen lässt,²³ von denen sich dann einige halten lassen und andere eben nicht.

Experimentalsysteme und ›epistemische Dinge‹

An dieser Stelle lohnt es sich, ein wenig ausführlicher auf das Verhältnis von theoretischer Physik und Experimentalphysik einzugehen.²⁴

Das Verhältnis von Theorie und Experiment lässt sich dabei in abstrakter Form als die *Engführung* auf etwas Bestimmtes beschreiben, das dann eben genau durch den Prozess dieser Kanalisierung als *reflektiertes* und *falsifizierbares* Wissen erscheint. Wissen erzeugt hiermit zugleich immer seine eigene Grenze mit, denn all das, was jenseits der Praxis seiner Erzeugung liegt, bleibt außerhalb dieser

21 Siehe Hugh Everett (1957).

22 So dann bei Steven Hawking. Siehe zur Diskussion etwa José Soler Gil (2007).

23 Luhmann (1998, 37off.).

24 Bei den folgenden Ausführungen zur Experimentalphysik handelt es sich um überarbeitete Abschnitte aus Kapitel III.3 aus Vogd (2010).

Grenze, bleibt im Bereich des Nicht-Wissens. Allein schon aus Komplexitätstheoretischen Überlegungen kann Wissen niemals alles mitbedenken. Die Ökonomie der Wissensproduktion und Wissensanwendung verlangt es, die Komplexität der Welt auszublenden. Der Schlüssel zu diesem – üblicherweise als reduktionistisch bezeichneten – Vorgehen ist das Experimentalsystem. Der Forscher baut sich hier eine Modellwelt auf, deren Randbedingungen weitestgehend konstant gehalten werden können und die es ihm erlaubt, systematisch in Dialog mit dieser Welt zu treten.

Von den *science studies* im Allgemeinen und an dieser Stelle explizit von Hans-Jörg Rheinberger können wir aus dem Blickwinkel der modernen Wissenschaftsgeschichte einiges über die Eigendynamik von Experimentalsystemen lernen.²⁵ Es zeigt sich dabei immer deutlicher, dass auch die harten Naturwissenschaften der ins Extrem überpointierten Popperschen Falsifikationslogik in ihrer eigentlichen Praxis nicht wirklich folgen können.²⁶ Es verhält sich auch in der Spitzenforschung keineswegs so, dass ein kluger Kopf eine Theorie aufstellt, um dann ein Experiment zu entwickeln, mit dem die deduktiv aus eben dieser Theorie abgeleiteten Hypothesen überprüft werden.²⁷ Vielmehr liegt der Forschungspraxis zunächst ein Experimentalsystem zugrunde, das aufgrund konstanter Randbedingungen so stabil ist, dass man systematisch Fragen an dieses stellen kann. Dabei weiß man allerdings in den meisten Fällen noch nicht, was man

25 Rheinberger (2006).

26 Popper plädiert zwar streng für eine deduktive Überprüfung von theoretischen und empirischen Ableitungen aus Hypothesen. Aber genauso deutlich (mindestens so deutlich wie bei Feyerabend) verweist er darauf, dass die Hypothesen selber nur induktiv, das heißt spielerisch, experimentell und zufallsabhängig, wie Rheinberger es sich nur wünschen kann, gewonnen werden können.

27 Wie Rheinberger hinweist, hat nicht zuletzt »Ludwik Fleck, der lange Zeit vernachlässigte Zeitgenosse Poppers, [...] unser Augenmerk auf den Werkstattcharakter der biomedizinischen Forschung im 20. Jahrhundert gelenkt und gezeigt, daß – im Gegensatz zu Poppers Behauptung – Wissenschaftler im Normalfall gerade nicht einzelne Experimente im Rahmen einer wohldefinierten Theorie ausführen. Ein Forscher hat es also Fleck zufolge in aller Regel nicht mit Einzelexperimenten zu tun, die eine Theorie und nur sie prüfen sollen, sondern mit einer Experimentalanordnung, die er so entworfen hat, daß sie ihm Wissen zu produzieren erlaubt, das er noch nicht hat. Noch wichtiger ist, daß der experimentierende Forscher mit Experimentalarrangements arbeitet, die für gewöhnlich keineswegs scharf definiert sind und die auch keine klaren Antworten liefern. [...] Ein solcher Prozess wird nicht etwa bloß durch endliche Zielgenauigkeit begrenzt, sondern ist von vornherein durch Mehrdeutigkeit charakterisiert: er ist nach vorne offen« (Rheinberger 2006, 24 f.).

für Antworten bzw. Antwortklassen zu erwarten hat. Vielmehr entsteht mit dem System – so Rheinberger – ein Dialog, in dem die *nicht* erwarteten Antworten neue Fragen erzeugen, die man wiederum an dieses spezifische Experimentalsystem stellen kann. Die Genese von Wissen erscheint nun als eine *Koevolution* zwischen Experiment und Theoriebildung.

In dieser Beziehung steht am Anfang die Intuition, wie ein gutes Experimentalsystem aussehen könnte, während am Ende des Forschungsprozesses dieses Experimentalsystem den Forscher nahezu automatisch zu den richtigen Fragen führt. In seiner Forschungslogik ist dieser Prozess eher dialogisch, induktiv und abduktiv angelegt und folgt dabei kaum dem idealtypischen Popperschen Format eines deduktiv hypothesentestenden Designs:

»Als die kleinsten vollständigen Arbeitseinheiten der Forschung sind Experimentalsysteme so eingerichtet, daß sie noch unbekannte Antworten auf Fragen geben, die der Experimentator ebenfalls noch gar nicht klar zu stellen in der Lage ist. [...] Experimentalsysteme sind nicht Anordnungen zur Überprüfung und bestenfalls zur Erteilung von Antworten, sondern insbesondere zur Materialisierung von Fragen. In einer unauflösbaren Verquickung bringen sie sowohl die materiellen Einheiten hervor als auch die Begriffe, die sich in diesen verkörpern. [...] Im Gegensatz zur cartesianischen Illusion anfänglich klarer distinkter Ideen ist das Einfache in einer ›nicht-cartesianischen‹ Epistemologie von vornherein überhaupt nicht vorhanden.«²⁸

Mit Rheinberger perpetuiert sich der Prozess naturwissenschaftlicher Forschung dadurch, dass Erkenntnisse fortwährend in technische Dinge umgewandelt werden (die dadurch im Sinne konstanter Randbedingungen routinisierbar sind), während die jeweiligen Erkenntnisobjekte als ›epistemische Dinge‹ in der eigentümlichen Schwebelage des Dialogischen gehalten werden, also weder vornherein kognitiv durch Theorie noch technisch als Objekt angeeignet worden sind. Produktive Forschung entsteht in diesem Sinne vor allem als ein Spannungsfeld zwischen Technik und Kreativität, das dann zugleich die Bedingungen dafür schafft, testbare wissenschaftliche Hypothesen zu produzieren, die dann den gängigen wissenschaftlichen Präsentations- und Publikationsformaten entsprechen.

Für die Quantenphysik ist an dieser Stelle vor allem auf die wichtigen Studien zur Teilchen- und Hochenergiephysik von Andrew Pickering und später Knorr-Cetina hinzuweisen, in denen deutlich

28 Rheinberger (2006, 25).

wird, wie sich Großtechnologien, soziale Organisationsformen und Theorieentwicklung verzahnen.²⁹

Rekonstruktion der Quantentheorie im Wechselspiel von Anschauung, Experiment und mathematischer Entwicklung

Ein wichtiger Schritt dieser Arbeit wird darin bestehen, eine für unsere Fragestellung angemessene Rekonstruktion der Quantentheorie zu erzeugen, mit der die Bezugsprobleme, welche durch die Experimentalphysik aufgespannt wurden, und die Bezugsprobleme, welche die Theoriebildung generiert, systematisch miteinander in Beziehung gesetzt werden können.

Die Rekonstruktion dieses Prozesses sollte auf einem *mittleren Abstraktionsniveau* das Wechselspiel von *Anschauung, Experiment und mathematischen Entwicklungen* rekonstruieren. Mit Peter Fuchs können wir dabei die Unterscheidung von *empirisch/mathematisch* als die »Leitdifferenz bzw. die Form der Physik« ansehen.³⁰ Dies bedeutet, dass in der Physik das Beobachtete eine mathematische Repräsentanz findet und entsprechend die mathematischen Formalismen und die empirischen Untersuchungen sich wechselseitig instruieren und vorantreiben.

Nun gilt aber mit Bauberger, dass eine »reine Mathematik keinen Bezug zur Welt« hat, denn ihre Formsprache ergibt sich allein durch ›innere‹ Formzwänge, nicht jedoch durch die Notwendigkeit, mit einer wie auch immer zu beschreibenden ›physikalischen‹ Welt zu korrelieren. »Damit Physik eine Bedeutung hat, braucht sie eine Semantik, die die Variablen in den physikalischen Gleichungen in eine Beziehung setzt zu Objekten in der physikalischen Welt. Insofern setzt die Physik eine Ontologie voraus, obgleich sie keine direkten ontologischen Aussagen macht.«³¹

Hinter den Begriffen stecken also *nolens volens Anschauungen*. Diese erscheinen als Phänomenalisierungen von *etwas*, wovon ein sinnliches Konzept besteht. Diese Anschauungen können in der Kommunikation der Physiker als *fungierende Ontologie* vorausgesetzt werden, wodurch wiederum Anschlussfähigkeit sichergestellt werden kann, indem untereinander vorausgesetzt werden kann, dass der jeweils Andere das ›Welthaftige‹ der vorgetragenen Argumente begrift.³² Um Missverständnisse zu vermeiden: Wir argumentieren

29 Pickering (1984) und Knorr-Cetina (2002).

30 Fuchs (2009).

31 Stefan Bauberger (2009, 56).

32 Peter Fuchs hat den Begriff ›fungierende Ontologien‹ als eine besondere Art von Fiktionen eingeführt, die eine tatsächliche, konkrete und erfahrbare Wirklichkeit erzeugen. Gleichzeitig existieren sie aber nicht

nicht im Sinne positivistischer Denkfiguren oder im Sinne eines naiven Realismus. Das hier angedeutete Problem weist vielmehr darauf hin, dass jedes noch so abstrakte Konzept für die beteiligten Psychen, die als Medium der Kommunikation beteiligt sein müssen, in der einen oder anderen Form (und sei es nur als Grafik) als Anschauungen phänomenologisiert bzw. ontologisiert. Auch wenn diese unzutreffend oder gar falsch sein mögen, gilt hier, dass nur die wahrgenommene *Gestalt* als sinnvoll erlebt werden kann.

Mit der modernen Quantentheorie wird jedoch die physikalische Anschauung zum Problem, was jedoch nicht den Befund aufhebt, dass sie – wie auch immer geartet – weiterhin als Medium für die Theoriebildung vorausgesetzt werden muss. Als Einstein seine Relativitätstheorie schuf, konnte er noch eine Reihe von Gedankenexperimenten und Vorstellungen verwenden (beispielsweise die Reise auf einem Lichtstrahl oder die Vorstellung des gekrümmten Raums, der durch Materiekumpen eingedellt wird). Seine Theorie ist insofern anschaulich geblieben, als sie weiterhin in klassischen Begriffen nachvollziehbar ist. Man kann sich leicht einen gekrümmten Raum vorstellen, ebenso die Bewegung des Lichts auf einem Strahl. Dem quantenmechanischen Formalismus, wie er in revolutionärer Weise zunächst von Heisenberg mit seiner Matrizenmechanik formuliert wurde, entspricht demgegenüber zunächst keine gegenständliche Anschauung. Den Verzicht auf Elektronenbahnen kann man sich nicht vorstellen.

Der Verlust von Anschaulichkeit hat jedoch seit Beginn der Quantentheorie dazu geführt, neue Formen der Anschauung zu entwickeln. Zu nennen sind hier etwa die Versuche, es mit Teilchen- oder Wellenmodellen als alleinigem Erklärungsprinzip zu versuchen, oder das Bemühen, beides entsprechend dem Komplementaritätsprinzip zu verbinden (so dann Niels Bohr). Entsprechend letzter Variante habe man keine andere Wahl, als die Phänomene durch die beiden klassischen Beschreibungsweisen der Teilchen- und der Wellenphysik zu charakterisieren, wohl wissend, dass diese sich wechselseitig ausschließen. Ebenso lässt sich die Anschauung durch geometrische Figuren wiedergewinnen, die man aus der quantenmechanischen Mathematik generieren kann. Zu denken ist hier etwa an die berühmten Feynman-Diagramme, bei denen man sich die Vorgänge durch Darstellungen veranschaulicht, die darauf beruhen, dass man Pfeile aneinanderreicht und den resultierenden Vektor aufzeichnet.

All dies sind Versuche, wie sich mit einer nicht-klassischen Theorie umgehen lässt, deren zentrale Konzepte auf ›Wahrscheinlich-

voraussetzungslos *qua* Substanz, sondern werden erst durch die Beobachtungsoperationen konstituiert (vgl. Fuchs 2004, 111).

keitsamplituden beruhen (›Wellen von nichts‹), die aus verschiedenen Gründen (z. B. der Interferenz) nicht in konventionelle statistische Konzepte – die ja ihrerseits auf klassischen Anschauungen beruhen – überführt werden können.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass insbesondere die Arbeit der Physiker eine ist, die im Medium von Texten, das heißt in Form wechselseitiger Lektüre stattfindet. Sie wird in Form sprachförmiger Propositionen reflektiert und aufeinander bezogen. In seinen Texten liest der Physiker Theorie, um anschließend mit seinem Schreiben Theorie zu variieren. Darüber hinaus treten die Texte (Sätze, Begriffe und Sprache) in ein Verhältnis zur Mathematik (Gleichung und Zahl) und Experimentalsystemen (Verzahnung technischer Konditionierungen mit dem Zufall). Theoriearbeit bleibt dabei aber primär begrifflich-semantische Arbeit. Sie arbeitet an der Verschiebung und Neukonfiguration von Bedeutung.

Rekonstruktion auf einem mittleren Abstraktionsniveau

Um zu illustrieren, was mit einem mittleren Abstraktionsniveau der Rekonstruktion gemeint ist, versuchen wir die Beschreibungsdichte von oben und unten einzugrenzen.

Auf der einen Seite sind allzu abstrakte Beschreibungen zu vermeiden. Hierzu zählen etwa die bereits geschilderten wissenssoziologischen Verkürzungen, in denen die ideologischen Zeitströmungen der jeweiligen Epoche – der jeweilige Zeitgeist – für die Ausprägung einer physikalischen Semantik verantwortlich gemacht wird. Auf diese Weise lässt sich nicht einmal annäherungsweise ein Verständnis davon gewinnen, um was es in der Quantenphysik überhaupt geht. Aber auch die Zurechnung der Theoriebewegung auf Denkschulen und »Denkkollektive«³³ mag zwar im Einzelfall durchaus interessante und lesenswerte Studien liefern,³⁴ doch üblicherweise wird hier übersehen, dass gerade im Falle der Quantentheorie die untersuchten Diskursgemeinschaften keineswegs semantisch geschlossene Formationen darstellen. Schon die Kopenhagener Deutung zeigt sich bei genauerem Hinsehen keineswegs als ein epistemisch einheitliches Gebilde.³⁵

33 Ludwik Fleck (1980).

34 Gut durchgeführt ist etwa die Untersuchung zur wissenschaftlichen Einbettung von David Bohm und Richard Feynman, anhand der sich dann im Falle von Bohm durchaus zeigen lässt, dass ein von politischen Lagerungen erzwungener Bruch im Denkkollektiv sich auch auf die Theoriebildung aufzeigen lässt (Forstner 2007).

35 Man denke hier etwa an Einstein, der im engen Diskurszusammenhang

Ebenso bleiben die inneren Zwänge der mathematischen und physikalischen Theoriebildung in der Regel unterbewertet. Beispielsweise kann eine bestimmte theoretische Option zunächst eine Randposition darstellen, dann aber im Wechselspiel zwischen neuer mathematischer Beweisführung und erweiterten Möglichkeiten der Experimentalphysik wieder mehr Beachtung finden.³⁶

Auf der anderen Seite darf die soziologische Rekonstruktion der Quantenphysik jedoch auch nicht allzu konkret an ihre physikalische und mathematische Formulierung angeschmiegt sein, denn auf diesem Wege sieht man den ›Wald vor lauter Bäumen‹ nicht. Die entscheidenden Weichenstellungen innerhalb der Entwicklung der Quantentheorie kommen nicht in den Blick, wenn die Aufmerksamkeit vollkommen davon absorbiert ist, die mathematischen Darstellungen nachzuvollziehen.

Zum einen geht es also darum, sich nicht allzu sehr in der Sprache der Mathematik zu verlieren, weil hierdurch eine weitergehende Reflexions- und Rekonstruktionsarbeit blockiert wird. Zugleich sollte jedoch die mathematische Hürde kein Hindernis darstellen, die Grundoperationen der Quantenmechanik verstehen zu wollen. Um hier eine Mitte zu finden, halten wir uns an die Auffassung des Physikers Richard Feynman, dass man mathematische und physikalische Gedanken sehr wohl richtig verstehen kann, auch wenn man selbst nicht in der Lage ist, die damit verbundenen Rechnungen durchzuführen.³⁷ Konkret bedeutet dies: Wir müssen *verstehen lernen*, was es etwa *bedeutet*, mit *Operatoren* und *imaginären Zahlen* zu rech-

mit den Quantenphysikern der ersten Generation stand und die Quantentheorie erheblich mitgeprägt hat und der gerade deshalb mit ihr unzufrieden war, weil er sie in Hinblick auf ihre epistemischen Konsequenzen genauso gedeutet hat wie Heisenberg. Demgegenüber lässt sich Max Born erwähnen, der die Kopenhagener Deutung zwar wesentlich mitträgt, sie jedoch vollkommen anders – nämlich weiterhin entsprechend einer ›klassischen‹ Statistik interpretiert. Vgl. Weizsäcker (1994, 495 ff.).

36 So etwa die Bohmsche Mechanik mit der experimentellen Bestätigung des Bell-Theorems. Vgl. Bohm (2010).

37 »Wie sich eine Subtraktion bewerkstelligen lässt, ist im Grunde nicht schwer zu begreifen – solange man sie nicht wirklich auszuführen braucht. Und damit sind wir bei mir und meiner Aufgabe angelangt: Ich erkläre Ihnen, was die Physiker machen, wenn sie das Verhalten der Natur vorhersagen, aber ich lehre Sie keine Tricks, mit denen sie *effizient* arbeiten. [...] Die Physikstudenten kostet es sieben Jahre, solche Tricks zu erlernen. Genau an dem Punkt werden wir uns sieben Jahre Physikstudium schenken: insofern als ich Sie anhand dessen, was wir wirklich machen, in die Quantenelektrodynamik einführe. Und ich hoffe, daß sie das besser verstehen als mancher Physikstudent!« (Feynman 2010, 23).

nen; wir brauchen aber die Rechnungen und die sie herleitenden Beweise nicht nachvollziehen zu können. Glücklicherweise haben viele kompetente Physiker mittlerweile einführende Darstellungen gegeben, in denen die Grundzüge der mathematischen Modellierung der Quantentheorie so erklärt werden, dass sie von Laien, die in der Oberstufe einen guten Mathematikunterricht hatten, prinzipiell nachvollziehbar sind.³⁸

Ebenso wie ein Übermaß an mathematischer Konkretisierung ist ein Zuviel an historischer Detaillierung dem hier angestrebten Projekt eher hinderlich. In Bezug auf die Geschichte der Quantenmechanik existiert umfangreiches Quellenmaterial, sei es in Form von Briefwechseln zwischen Physikern, als Dokumentationen zu Konferenzen sowie eine große Menge an Informationen zu den biografischen Umständen wichtiger Quantenphysiker. Hierauf bauen eine Vielzahl von Arbeiten zur Geschichte der Naturwissenschaften auf. In diese Quellen tiefer einzudringen, ist faszinierend. Doch für den Zweck einer soziologischen Rekonstruktion der zentralen Bezugsprobleme der Theorieentwicklung ist es wenig hilfreich, mit dem Blick eines Historikers in das Material einzudringen, denn hierdurch geraten die übergreifenden Denk- und Theoriebewegungen aus dem Blick.

Zwischen einer zu hohen Abstraktion, welche die inneren Bewegungen der quantenphysikalischen Theoriebildung tilgt, und einem zu großem Detailreichtum, der den ›Wald vor lauter Bäumen‹ nicht mehr erkennen lässt, liegt ein mittlerer Abstraktionsgrad. Erst auf diesem Niveau kann eine begriffliche Abstraktion geleistet werden, die sich zwar einerseits den bereits im Gegenstand gegebenen theoretischen Abstraktionen anschmiegt, also in der Lage ist, die entscheidenden theoretischen Figuren zu rekonstruieren, andererseits jedoch über den untersuchten Gegenstand hinausgehend in der Lage ist, Bezugsprobleme und Lösungswege zu identifizieren, um auf diesem Wege einen tieferen Einblick in die Dynamiken der Theoriearchitektur zu gewinnen.

Nur auf diesem Wege lässt sich der Tatsache gerecht werden, dass die Quantentheorie selbst eine Theorie darstellt, die aus Abstraktionsleistungen gewonnen worden ist, die spezifischen und nachvollziehbaren Bewegungen folgt und ebendiese wieder mit sich bringt.

38 Siehe als gute Einführung in die Entwicklung der Denkweisen der Physik mit Referenz auf wichtige Originalarbeiten Simonyis Kulturgeschichte der Physik (Simonyi 2004), sowie eine leicht verständliche allgemeine Einführung in die Denkweisen der Quantentheorie Arroyo Camejo (2006).

*Bevorzugtes Quellenmaterial: Dokumente
physikalischen Denkens*

Als Quellenmaterial der hier angestrebten Rekonstruktion eignen sich vor allem Textdokumente, die von den Physikern erstellt worden sind, welche die Entwicklung der Quantentheorie maßgeblich mit vorangetrieben haben. Neben den teilweise für den Laien nur noch schwer nachvollziehbaren Originalarbeiten haben viele Forscher immer auch versucht, die zentralen Argumentationslinien ihrer Arbeiten dem gebildeten Laienpublikum zu vermitteln. Entsprechend sind eine Vielzahl intermediärer Schriften, etwa in Form von Vortragsauswertungen und populärwissenschaftlichen Monografien entstanden, die an ein Massenpublikum gerichtet sind. Wir gehen davon aus, dass die in diesen Schriften entwickelten Denkfiguren homolog sind zu dem, was die Autoren auch in ihrer sonstigen Arbeit tun. Wir nehmen an, dass sie uns damit etwas sagen wollen, was sie auch sonst als Physiker zu sagen hätten. Entgegen dem von Soziologen vorschnell geäußerten Manipulationsverdacht, dass mit diesen Veröffentlichungen auch wissenschaftspolitische Motive verbunden sind, gehen wir davon aus, dass hier in der Regel ein ernsthaftes Bemühen stattfindet darzustellen, um was es ihnen in ihrer Arbeit eigentlich geht. Gerade deshalb erscheint uns dieses Material – in Verbindung mit dem kritischen Abgleich der dem Laien nur schwer verständlichen physikalischen Originalarbeiten und flankiert durch allgemeine wissenschaftshistorische Arbeiten³⁹ – als ein guter Ausgangspunkt für die angestrebte Rekonstruktion.

Zwischen diesen drei Textsorten besteht in Hinblick auf mathematische und physikalische Reflexionstiefe ein Komplexitätsgefälle. Im Sinne einer auch für den Laien halbwegs lesbaren Darstellung ist hier ein Mittelweg zu finden, der den Grundgedanken der jeweiligen Arbeiten gerecht wird, ohne sich allzu sehr ins Detail zu verlieren. Insbesondere Kapitel I, in dem die Ursprünge der Quantentheorie und die ihr zugrunde liegenden Bezugsprobleme vorgestellt werden, mag zunächst etwas sperrig und physiklastig wirken. All die Leser, welche sich hier inhaltlich durchbeißen, werden jedoch damit belohnt, die Reflexionsbewegungen der folgenden Kapitel besser nachvollziehen zu können. Gerade weil viele populäre Darstellungen der Quantentheorie auf dem Markt sind und man auch als Laie glaubt zu wissen, von was die Theorie eigentlich handelt, lohnt es sich, hier genauer auf die eigentlichen Bezugsprobleme der Physik zu schauen, welche die Wissenschaftler in den 1920er-Jahren dazu gebracht haben, die Quantenmechanik zu entwickeln.

39 Siehe etwa Hund (1967).

*Systemtheorie als eine hinreichend strukturreiche Theorie,
um autologische Verhältnisse nachzeichnen zu können*

Eine im oben genannten Sinne verstandene Rekonstruktion sollte idealerweise einen Strukturreichtum aufweisen, der den zu rekonstruierenden Theoriebewegungen entspricht. Dies ist der Grund dafür, warum die bisherigen *philosophischen* Annäherungen an die Quantentheorie in der Regel nicht besonders erhellend sind. Philosophische Wissenschaftsreflexionen sind stark determiniert durch die Innenwelt der jeweiligen philosophischen Konzeption, von der aus das zu untersuchende Theoriegebäude betrachtet wird. Dabei werden üblicherweise *logische Implikationen* und *epistemische* sowie *ontologische* Unterscheidungen mitgeführt, die Trennlinien erzeugen, die im Sinne des jeweils eigenen Betrachtungssystems zwischen *wahr* und *falsch* bzw. einer angemessenen und einer unangemessenen Argumentation unterscheiden lassen.

Die philosophischen Kampfbegriffe Realismus, Positivismus, Idealismus, Rationalismus, Sensualismus, Naturalismus oder Subjektivismus ergeben zwar innerhalb der philosophischen Tradition noch Sinn, eignen sich allerdings spätestens seit der Quantenphysik nicht mehr, um die Bewegungen der Theoriebildungen innerhalb der modernen Physik zu rekonstruieren. Die Gesetze der Verrechenbarkeit von Operatoren führen zu einer schwächeren Kausalität und einer schwächeren Logik. Das Messproblem lässt den Schnitt zwischen Subjekt und Objekt fließend werden und auch ein reiner Positivismus und sein Gegenbegriff des reinen Realismus laufen anhand von Theorieverhältnissen leer, entsprechend denen die untersuchten Gegenstände nicht mehr als klassische Dinge beschrieben werden können.

Die philosophischen Auseinandersetzungen beschränken sich leider oftmals nur darauf, Argumentationen zu entfalten, die darauf angelegt sind, ihre begrifflichen Leitunterscheidungen mithilfe oder gegenüber einer bestimmten quantentheoretischen Position oder Interpretation zu stabilisieren. Man versucht dann etwa nachzuweisen, dass unter bestimmten Bedingungen auch mit der Quantentheorie eine realistische Weltauffassung aufrechterhalten werden kann oder dass man gut beraten sei, den Positivismus und Realismus nicht vorschnell gegeneinander auszuspielen.⁴⁰

Solche innerphilosophischen Theoriebewegungen haben jedoch bestenfalls peripher etwas mit den Theorieentscheidungen der Quantenphysik zu tun. Sie referieren überwiegend auf die Bezugsprobleme und Problemstellungen der zeitgenössischen Philosophie und stellen

⁴⁰ So etwa Stöltzner (1999) und teilweise immer noch Esfeld (1999; 2009) bzw. Dorato/Efeld (2010).

damit keine Rekonstruktion quantentheoretischer Theoriebildung dar. Anders als die (analytische) Philosophie hat sich die Physik in Experiment und Theoriebildung längst erfolgreich in nicht-klassischen Welten eingerichtet, in denen »*ontological gerrymandering*«⁴¹ und willkürliche, durch die Beobachtung gesetzte Schnitte in der Welt eher die Regel als die Ausnahme darstellen.

Aus diesen Gründen ist zu vermuten, dass eine fachexterne Rekonstruktion der Quantentheorie derzeit eher durch die Soziologie denn durch die Philosophie geleistet werden kann. Die *science studies* haben mittlerweile gezeigt, dass wechselnde und unscharfe epistemische und ontologische Bestimmungen kein Hindernis darstellen, um gute Wissenschaft zu betreiben, und entsprechend die Rekonstruktion wissenschaftlicher Praxis nur auf Basis deontischer, also ontologisch und epistemisch offener Konzepte geleistet werden kann.⁴²

Insbesondere die soziologische Systemtheorie ist mittlerweile gut darauf vorbereitet, mit wechselnden Ontologien und Beobachtungsverhältnissen in ihren Gegenständen umgehen zu können. Anders als die gegenwärtige philosophische Tradition verfügt sie – wie auch die Quantentheorie – über einen *Struktureichtum*, der es erlaubt, eine Theorie gleichsam im Grundlosen zu gründen, ohne dabei im Beliebigen zu münden.

Die soziologische Systemtheorie erlaubt rekursive Begründungsverhältnisse, ist nicht auf bestimmte ontologische Annahmen über die Beschaffenheit von Realität festgelegt, hat eine Beobachtungstheorie entwickelt, die mit verschachtelten System/Umwelt-Verhältnissen umgehen kann, gestattet die Beschreibung von Wissensgenese als Ko-Produktion von psychischen und kommunikativen Prozessen und hat nicht zuletzt eine wissenschaftstheoretische Konzeption entwickelt, die auf der kommunikativen Selbstkonditionierung der Wissenschaft beruht.

Gehen wir deshalb im Folgenden etwas ausführlicher auf Luhmanns »Wissenschaft der Gesellschaft« ein,⁴³ in der die vorangehend benannten Aspekte umfassend ausgearbeitet sind.

In diesem Werk wird die Frage behandelt, wie die Wissenschaft im Allgemeinen und die soziologische Systemtheorie im Besonderen

41 Dieser schöne Begriff wurde von Woolgar und Pawluch (1985) im Kontext der *science studies* geprägt und bezeichnet in Anlehnung an den ehemaligen Gouverneur Elbridge, der je nach den politischen Opportunitäten seine Wahlkreise zuschnitt, die Tatsache, dass viele Naturwissenschaftler je nach Fragestellung und Bedarf pragmatisch ihre Ontologie verändern.

42 Siehe etwa Rheinberger (2006) und für das Paradigma der *actor network theory* ausgearbeitet von Latour (2007).

43 Luhmann (1998).

als ein autologisches Theorieprojekt funktionieren kann, das als Gegenstand in sich selber vorkommt. Sie steht damit vor der paradoxen Aufgabe, die Wissenschaft im Bodenlosen zu gründen, aber eben gleichzeitig in einer Weise, dass es weiterhin um Wahrheit geht. Unter einer konstruktivistischen Epistemologie kann Wissenschaft jedoch nicht mehr mit Popper unter einer allgemeingültigen »Logik der Forschung« subsumiert werden.⁴⁴ Spätestens mit Gödel ist deutlich geworden, dass jeder Versuch eines formallogischen Systems, sich aus sich selbst heraus zu beweisen, grundsätzlich zu Widersprüchen oder Paradoxien führen muss.⁴⁵ Die Logik zeigt sich damit sozusagen selbst als unlogisch und kann entsprechend als letztes Fundierungsprinzip für die Wissenschaft nicht mehr infrage kommen.

Da aber die Wissenschaft offensichtlich auch ohne den Nachweis einer logischen Konsistenz empirisch erfolgreich ist, kehrt sich für Luhmann die Frage ihrer Begründung um: *Wie* schafft es Wissenschaft, ihre Gegenstände und Wahrheiten – sowie Antworten auf die Frage nach ihren eigenen Erkenntnismöglichkeiten – zu generieren, auch wenn diese nicht mehr transzendental und logisch begründbar sind? Die Antwort auf diese Frage offenbart sich bei Luhmann auch für die Wissenschaft durch die Instruktion »Beobachte den Beobachter« bzw. für das Wissenschaftssystem, »wie sich aufgrund der Beobachtung von Beobachtungen Systeme bilden« können.⁴⁶

Das Augenmerk richtet sich jetzt, wie auch schon in den *science studies*, auf die wissenschaftliche *Praxis*, also auf all das, was innerhalb der Wissenschaft geschieht: auf das Durchführen von Experimenten, das Rechnen und Beweisen, das Erzeugen von Texten usw. Im Sinne des zuvor geforderten mittleren Abstraktionsgrads kann es hier jedoch nicht um eine Wissenschaftsethnografie gehen, in der dem Wissenschaftler bei der Arbeit zugeschaut wird,⁴⁷ sondern um die Rekonstruktion der wichtigen Weichenstellungen aufgrund textförmig vorliegender wissenschaftlicher Diskurse. Wissenschaft wird damit vor allem als eine kommunikative Tatsache betrachtet. Die epistemischen und ontologischen Figuren bzw. die handlungsleitenden semantischen Unterscheidungen der Quantenphysik zeigen sich jetzt darin, welche *kommunikativen Anschlüsse* innerhalb dieser wissenschaftlichen Teildisziplin gewählt und generiert werden. Ob bestimmte Theoriefiguren, Interpretationen, Hypothesen in der Wissenschaft als Wissenschaft erscheinen, lässt sich somit nicht mehr durch *äußere* Kriterien bestimmen – etwa durch das Werturteil eines analy-

44 Popper (2007).

45 Vgl. Hofstadter (1979).

46 Luhmann (1998, 499).

47 Siehe hier etwa Latour/Woolgar (1986) und Knorr-Cetina (1991).

tischen Philosophen, der glaubt, einen »Gottesaugenstandpunkt«⁴⁸ einnehmen zu können –, sondern allein durch die kommunikative Plausibilität und Attraktivität der verwendeten Semantiken *innerhalb* des jeweiligen wissenschaftlichen Diskurses.

Als wesentliche Neuerung gegenüber den klassischen Erkenntnistheorien werden mit der soziologischen Systemtheorie zirkuläre Begründungsverhältnisse zugelassen. Im Sinne einer »naturalized epistemology«⁴⁹ ist es jetzt gestattet, dass Annahmen über die Erkenntnisvoraussetzungen sich selbst durch die empirische Forschung beeinflussen lassen. Die Prinzipien und Voraussetzungen der Forschung selbst lassen sich nun durch die *soziale* Praxis der Forschung konditionieren. Auch die experimentellen Naturwissenschaften und ihre Theoriebildung, ebenso die Mathematik, erscheinen aus dieser Perspektive – um es nochmals zu betonen – vor allem als eine kommunikativ fundierte Praxis. Luhmann vollzieht hiermit eine radikale Transformation von philosophisch begründeter Wissens- und Wissenschaftstheorie zu einer Soziologie der *Wissenskommunikation* und beansprucht damit, die gesamte Tradition von der Antike über die Neuzeit bis zur Gegenwart hinter sich zu lassen.

Entgegen dem Common Sense, dass es der Wissenschaftler sei, der etwas weiß, wird wissenschaftliches Wissen – wie im Prinzip schon bei Popper angelegt⁵⁰ – konsequent der *Kommunikation* zugerechnet (ein Forscher mag etwas für wahr halten und die Evidenzen für offensichtlich sehen; solange dies jedoch nicht in die kommunikativen Prozesse des jeweiligen wissenschaftlichen Fachgebiets einfließt und dort validiert wird, erscheint es nicht als wissenschaftliches Wissen).⁵¹

48 Putnam (1991).

49 Luhmann (1998, 14) in Referenz auf Quine.

50 Poppers Argumentation läuft dann darauf hinaus, dass man es den bornierten und engstirnigen Wissenschaftlern gar nicht überlassen könne, über den evolutionären Wert einer wissenschaftlichen Theorie zu entscheiden. Hierfür kommt für ihn nur die Gemeinschaft der Wissenschaftler in Frage, die durch ihre kommunikative Praxis des kontinuierlichen Weiterfragens und Infragestellens die Beschränkungen der beteiligten Psyphen überwinden lässt (Popper 1972).

51 Dies bedeutet jedoch nicht, dass Bewusstseinsprozesse und Anschauungen eine vernachlässigbare Rolle spielen. Im Gegenteil: Nur bewusstseinsfähige Akteure können wahrnehmend in Resonanzbeziehungen zur Umwelt treten. Kommunikation kann demgegenüber nur auf der Basis sinnhafter Anschlüsse operieren. Sie kann weder sehen und hören noch fühlen oder schmecken und ist deshalb auf die *strukturelle Koppelung* mit entsprechend konditionierten psychischen Systemen angewiesen, (die sich wiederum durch entsprechende Sinnangebote aus der wissenschaftlichen Kommunikation zur Mitarbeit anregen und faszinieren lassen).

Mit Blick auf die Systemreferenz Kommunikation heißt dies, dass Wissen im Allgemeinen und wissenschaftliches Wissen im Besonderen vor allem eine ›soziale Tatsache‹ darstellt. Da die Kommunikation die Welt nicht erkennt, sondern nur »in das« einteilt, was sie »mitteilt und was sie nicht mitteilt«⁵² ergibt sich über das Primat der Kommunikation ein scharfer Blick auf die Selektivitäten und Paradigmenabhängigkeit von Wissenschaft. Dies gilt selbstredend auch für die Mathematik. Auch sie kann unter diesen Voraussetzungen nichts anderes darstellen als ein Produkt sozialer Operationen, die selbst wiederum auf sozialen Operationen beruhen und auf diese Weise die bewährten Formen der Mathematik stabilisieren.

Da Kommunikation selbst nicht wahrnehmen kann, ist wissenschaftliche Kommunikation jedoch darauf angewiesen, durch psychische Systeme mit Sinneswahrnehmungen unterfüttert zu werden. Abstrakte theoretische Konzepte machen für das Bewusstsein nur Sinn, wenn sie durch eine gewisse Anschaulichkeit geprägt sind, also auf Konzepten beruhen, die Modalitäten der Sinneserfahrungen abbilden können. Selbst für den Grenzfall einer reinen Mathematik ist hiermit eine rudimentäre Anschaulichkeit zu fordern, etwa in Form geometrischer Figuren, gewissen Symmetrieprinzipien, dem Rückgriff auf lebensweltliche Konzepte (etwa der Steigung von Kurven) oder schlicht in der Idee der Zählbarkeit. Eine gewisse psychisch-sinnliche Referenz muss vorausgesetzt werden, damit das Bewusstsein überhaupt irgendetwas mit Mathematik anfangen kann.

Erst mit dem Blick auf die komplexe Beziehung zwischen Bewusstsein und Kommunikation lässt sich das vertrackte Wechselspiel von Anschaulichkeit und Nicht-Vorstellbarem in der Quantentheorie nachzeichnen. In den Formalismen der Quantenphysik ergeben Konzepte wie ›Objekte im Raum‹ keinen rechten Sinn mehr. Dennoch bleibt die Theorie darauf angewiesen, sprachliche Begriffe zu

Der Schritt, Bewusstsein und Kommunikation als operativ getrennte Prozesse zu betrachten, eröffnet für unser Projekt einer soziologischen Rekonstruktion der Quantentheorie die Chance, die unbefriedigende philosophische Auseinandersetzung um Rechtfertigung oder Kritik an positivistischen oder sensualistischen Erkenntniszugängen zu umgehen. Die Alternative besteht jetzt darin, anstelle auf transzendente Wahrheitsbedingungen einer außerhalb der Forschung stehenden Logik zurückzugreifen, die Forschung als eine *doppelte Praxis* anzusehen, nämlich der kommunikativen und der psychischen Bewegungen. Mit der Kommunikation und dem Bewusstsein erscheinen jetzt zwei unterschiedliche Referenzbereiche, die von ihrer konstitutionellen Operationsweise nicht identisch sind, jedoch als ein gemeinsames Projekt, sozusagen als eine ›Koproduktion‹ zusammengedacht werden können.

52 Luhmann (1998, 27).

verwenden, die mit den anschaulichen Assoziationen der klassischen Physik verknüpft sind.

Wissenschaft und Zeit

Wissenschaftliches Wissen beruht auf einer theoretisch koordinierten Begriffsbildung, die anders als die Wörter der Alltagssprache nicht mehr auf eine spezifische raumzeitliche lebensweltliche Kontextualisierung der Kommunikation angewiesen sein braucht. Auf diesem Wege werden übergreifende Abstraktionsleistungen und vom Common Sense abweichende konzeptionelle Verknüpfungen möglich. Eine wesentliche Rolle spielt hierfür die Entwicklung von Schrift und Buchdruck. Erst das geschriebene Wort erlaubt die Ablösung von den interaktiven Zusammenhängen des rein mündlichen Sprachgebrauchs und eröffnet für das kommunikative Gedächtnis eine besondere Selektions- und Zeitdynamik. Fachkonferenzen, Auseinandersetzungen in Zeitschriften, das Verfassen von Monografien und die Institutionalisierung von kondensiertem Wissen in Lehrbüchern haben ihre jeweils eigenen Zeitrhythmen. Während das Bewusstsein in den projizierten Zeithöfen der Jetztzeit⁵³ gefangen ist und von hier aus nur egozentrische Perspektiven entfalten kann, ergibt sich die kommunikative Zeit allein durch die jeweiligen Anschlussoperationen. Sobald die Wissenschaftskommunikation überwiegend in schriftlicher und publizierter Form stattfindet, wird damit auch eine Loslösung von den jeweils spezifischen Milieus möglich, in denen ursprünglich das Wissen produziert und formuliert wurde.

Dass beispielsweise ein Physiker von seinen Kollegen ›gemobbt‹ wurde oder der in einem Gruppenzusammenhang bestehende Denkstil alternative Lösungswege unwahrscheinlicher werden lässt und deshalb im sozialpsychologischen Sinne zu einem *lock in* bestimmter Orientierungen und theoretische Haltungen führen kann, stellt hier nur die eine Seite der Medaille dar. In der Zeit der Kommunikation, die allein durch kommunikative Anschlüsse bzw. den sich hieraus ergebenden Anschlusswahrscheinlichkeiten definiert ist, kann demgegenüber die ›Realzeit‹⁵⁴ und auch die psychologische Zeit kommunikativ transzendiert werden. Als Schrödinger beispielsweise 1935 mithilfe seines berühmten Beispiels von der Katze seine Kritik an der damals dominanten Deutung der Quantentheorie formuliert hatte,⁵⁵

53 Husserl spricht hier von Retention und Protention, die beide im Fenster des Jetzt stattfinden (siehe etwa Husserl 2000).

54 Mit Realzeit wird hier salopp die Zeit gemeint, welche durch Uhren angezeigt wird.

55 Schrödinger (1935).

traf seine Argumentation im *mainstream* der theoretischen Physiker kaum auf Resonanz. Dies schmälert jedoch nicht die kommunikative Relevanz seines Beitrages, da siebzig Jahre später viele hochrangige Physiker eher an die von Schrödinger formulierte Interpretation der Quantenmechanik anschließen als an die nun für überholt betrachtete Kopenhagener Deutung.⁵⁶ Ebenso bekommt beispielsweise auch Einsteins Kritik von 1935 in Verbindung mit der zuvor kaum beachteten Bohmschen Mechanik im Jahr 1964 mit der Formulierung des Bell-Theorems eine neue Relevanz, die mit der experimentellen Überprüfung der hieraus abgeleiteten Vorhersagen im Jahr 1982 noch gesteigert wurde.⁵⁷

Die Theoriebewegungen der Quantentheorie lassen sich also nicht hinreichend verstehen, wenn man die Aufmerksamkeit (allein) auf bestimmte Zeitepochen und die hier jeweils dominanten Diskurse beschränkt. Die Möglichkeit wissenschaftlichen Wissens beruht in hohem Maße auf Eigenleistungen der Gesellschaft, die diese im Rahmen ihrer Evolution erst hervorbringt. Mit der Entstehung und Ausbreitung der Schriftform wird die Transzendenz von psychischer Zeit und Realzeit möglich, da sich nun Information, Mitteilung und Verstehen sowie die hierfür notwendigen Gedächtnisleistungen voneinander entkoppeln lassen. Die Kommunikation springt gleichsam von Anschluss zu Anschluss und schert sich nicht um die Welten, welche dazwischen liegen. Ein wissenschaftlicher Text, der vor dreißig Jahren kaum Beachtung fand, kann sich in bestimmten Konstellationen als Schlüsselbaustein für eine Problemlösung erweisen. Wissenschaftliche Kommunikation beruht auf hoch spezifischen

56 So etwa die Nobelpreisträger Murray Gell-Mann (1994) und Robert Laughlin: »Richard Feynmann hat als Angriff auf die Quantenelektrodynamik eine großartige graphische Technik entworfen, welche immer noch als etwas interpretiert wird, das sich von der traditionellen Quantenmechanik unterscheidet, obwohl sie in Wirklichkeit einfach eine Neuformulierung von Schrödingers Gleichung darstellt. [...] Phil Anderson identifizierte das Prinzip der Symmetrieverletzung bei der Quantenorganisation als das eigentliche Schrödingers ›Katze‹ zugrunde liegende Problem. Lev Gor'kov entwickelte eine Schrödingersche Beschreibung der Streuung von Metallen, welche vollkommen ohne die Bornsche Wahrscheinlichkeitshypothese auskommt. Murray Gell-Mann ging so weit, in seiner Dankesrede zur Verleihung des Nobelpreises 1976 zu sagen: ›Niels Bohr unterzog eine ganze Generation von Physikern einer Gehirnwäsche, indem er sie glauben machte, das Problem [der Auslegung der Quantenmechanik] sei bereits vor fünfzig Jahren gelöst worden.« (Laughlin 2008, 54 f.).

57 Siehe Einstein, Rosen und Podolsky (1935), Bell (1964) sowie Aspect et al. (1982).

Koppelungen zwischen Bewusstsein, Gehirnen, experimenteller Welt und Schriftkommunikation. Erst auf dieser Basis kann Wissenschaft als eigener systemischer Zusammenhang emergieren.

Hieraus ergibt sich für unsere Aufgabe der Rekonstruktion das Primat, einerseits die kommunikativen Bewegungen nachzuvollziehen, andererseits jedoch die hiermit verbundenen Anschauungen ernst zu nehmen, wohl wissend, dass diese unterschiedlichen Zeitdynamiken folgen. Mit anderen Worten, eine sinnvolle Rekonstruktion muss auch hier, in der Frage der Zeit, den Freiheitsgraden gerecht werden, die sich aus der Verschränkung von Bewusstseinsystemen mit Kommunikationssystemen in der wissenschaftlichen Praxis ergeben. Da wissenschaftliche Praxis sich aufgrund der Dominanz der Schriftform heutzutage in hohem Maße als Kommunikation unter Abwesenden reproduziert, fällt sie nicht mehr mit lebensweltlichen Kontinuitäten zusammen. Auch dies spricht im Sinne unseres Anliegens gegen einen ethnografischen oder biografietheoretischen Zugang zum Problemfeld, da die hier gesuchten Theoriebewegungen dabei tendenziell eher aus dem Blick geraten.

Das bereits vorgestellte heuristische Prinzip der Rekonstruktion auf mittlerem Abstraktionsgrad lässt sich somit auch auf die Frage der Zeit anwenden. Der soziologische Beobachter ist gefordert, größere Sprünge in den Blick zu nehmen, denn erst auf diese Weise kann er Zusammenhänge erkennen.

Wissenschaft und Wahrheit

Schauen wir aus der Perspektive der soziologischen Systemtheorie nun auf die für die Wissenschaft konstitutive Unterscheidung von wahr/unwahr. Wir treffen hier auf eine Binarisierung der Welt, die mit der Möglichkeit der Sprache entstanden ist. Erst mit den Mitteln der Sprache lassen sich Sinnangebote in einer *Beobachtung zweiter Ordnung* mit einem ›Nein‹ auszeichnen.⁵⁸ In der Welt außerhalb der Sprache gibt es demgegenüber keine Negation, sondern nur operative Vollzüge, die als Positivität eben deshalb sind, weil sie sind. *Wahrheit gehört damit zur Systemreferenz Kommunikation* und kann aufgrund ihres fehlenden Umweltkontaktes nicht aus sich selbst heraus wahr

58 Mit ›Beobachtung zweiter Ordnung‹ ist hier die Möglichkeit benannt, sich Bezeichnungen und Unterscheidungsgebrauch *reflexiv* zugänglich zu machen. Erst mit der Sprache kann das, was ausgezeichnet und benannt worden ist, kritisiert und zurückgewiesen werden, wobei dies eben wiederum nur als Beobachtung möglich ist. Die Kritik oder die Formulierung einer Nein-Version hebt nicht das Kritisierte auf, sondern ersetzt es einfach durch eine neue Beobachtung.

oder rational sein. Sie ist entsprechend auch nicht »durch Hinweis auf eine Quelle (etwa: Vernunft) validierbar«. ⁵⁹ Wahrheit ist damit vielmehr als ein *symbolisches Medium* anzusehen, mit dem Wissen durch eine Operation im System ausgezeichnet werden kann, um es für weitere Operationen im Kommunikationssystem ›Wissenschaft‹ anschlussfähig zu machen. Als kommunikativ generierter Wert kann Wahrheit keine außerhalb des Kommunikationssystems ›Wissenschaft‹ existierenden Objekte repräsentieren. Sie kann nur interne Anschlussmöglichkeiten und -potenziale organisieren.

Dies wird insbesondere am Paradigma der Mathematik deutlich. Mathematik ist, »gerade weil sie auf Übereinstimmung mit der Außenwelt und auch auf entsprechende Illusionen verzichtet, in der Lage, Anschlußfähigkeit zu organisieren«. ⁶⁰ In mathematischen Aussagen lässt sich deshalb recht eindeutig zwischen wahr und falsch unterscheiden, weil die durch die mathematische Kommunikation geleistete semantische Engführung Konsistenzzwänge erzeugt, die zwischen diesen beiden Werten unterscheiden lässt.

Was Wahrheit ist, erschließt sich damit in der Rekonstruktion rein operativ, nämlich indem *beobachtet* wird, wie Beobachter mit der Unterscheidung wahr/unwahr umgehen, um auf diese Weise neue Rekombinationsmöglichkeiten im Wissen auszuprobieren. Die Frage, wie die Wissenschaft mit dieser Unterscheidung umzugehen hat, kann entsprechend auch nicht mehr durch Prinzipien oder allgemeingültige Kriterien fundiert werden. Sie bedarf zwar einer theoretischen Fundierung, die jedoch ihrerseits als geschichtsabhängig und damit kontingent beobachtet werden kann. Der Erfolg der modernen Wissenschaften und ihrer technischen Anwendungen kann aus dieser erkenntnistheoretischen Perspektive nicht mehr darauf beruhen, dass Natur oder Welt richtig ›erkannt‹ werden. Vielmehr ist der Fortschritt in den Wissenschaften das Ergebnis von immer komplexeren und raffinierteren Verknüpfungen und Relationierungen von Sinnformen – und der Tatsache, dass die Welt die hieraus gezogenen Konsequenzen toleriert. Die in der Wissenschaftstheorie üblichen Begriffe wie ›Realismus‹, ›Positivismus‹, ›Rationalismus‹ und ›Sensualismus‹ verlieren aus dieser Perspektive ihre Unterscheidungskraft, denn in der Koproduktion von Kommunikation und Bewusstsein werden *nolens volens* immer alle diese Referenzbereiche sinnhaft fortgeführt. Sie werden sowohl theoretisch als auch anschaulich, sowohl in Selbst- als auch in Fremdreferenz mitaktualisiert. Man könnte sagen, dass eine ›Kampfabstimmung‹ hinsichtlich der ›richtigen epistemischen

59 Luhmann (1998, 173).

60 Ebd. 201.

Haltung« aussichtslos ist, da sich die Praxis sowieso nicht an das Ergebnis halten kann.

Hiermit kommen wir zu der wichtigen Frage nach den »richtigen Reduktionen«, ⁶¹ also dem Problem, wie sich Wissenschaft in angemessener Form selbst konditionieren bzw. ihren Betrieb in Anbetracht überfordernder Weltkomplexität programmieren kann. Wie jeglicher systemischer Zusammenhang kann Wissenschaft hier nicht anders vorgehen, als zu simplifizieren. Es bleibt ihr entsprechend nichts anderes übrig, als eine eigene, vereinfachende Welt aus »selbstgemachten Daten« und Gegenständen zu generieren, in der sich in den »zahllosen kombinatorischen Möglichkeiten nach Ergebnissen« und Beziehungen suchen lässt, von denen sich dann einige halten lassen und andere eben nicht. ⁶²

Dies reicht aber noch nicht aus, um Wissenschaft zu ertragreichen, aneinander anschließenden Projekten zu bündeln. Um dies zu leisten, muss eine übergreifende *funktionale Beziehung* gestiftet werden, also eine *Limitationalität* erzeugt werden, entsprechend der Einschränkungen, die sich aus einer Untersuchung oder einem Experiment ergeben, auch den Variationsbereich von anderen Untersuchungen einschränken, sodass nicht immer von vorne angefangen werden muss und man zudem aus vergangenen Erfahrungen lernen kann. ⁶³

Wie ›Wahrheit‹ lässt sich auch ›Limitationalität‹ nicht durch ein höheres Prinzip begründen. Vielmehr werden auch hier die Kriterien der Einschränkungbeziehungen durch den eigenen Betrieb erzeugt. ⁶⁴ Da aber einerseits die Codewerte wahr/unwahr noch keine Kriterien der richtigen Zuteilung der Werte beinhalten und andererseits Wissenschaft nicht Weltausschnitte oder Fragestellungen dogma-

61 Ebd. 362 ff.

62 Ebd. 370.

63 »Wie immer, entscheidend ist eine funktionale Beziehung, in der die Einschränkung der einen Seite einer Unterscheidung den Variationsbereich der anderen limitiert. [...] Nur unter der Bedingung von Limitationalität kann man Erträge sicherstellen, kann man erreichen, daß die Wissenschaft nicht in jedem Moment wieder ganz von vorne anfangen muß (ohne jedoch gehindert zu sein, Erworbenes in Frage zu stellen). Nur unter der Bedingung von Limitationalität kann man einen Code in rekursiven Operationen praktizieren, denn nur dann bedeuten Negationen der einen Seite etwas für die andere. Negationen gewinnen auf diese Weise mehr als nur punktuelle, nur Bestimmtes auslöschende Relevanz. Sie werden durch ein Verhältnis der Limitationalität ergiebig in dem Sinne, daß sie einschränken, was dann noch möglich ist« (Luhmann 1998, 392).

64 Auch Limitationalität beruht auf der Entfaltung einer Paradoxie, nämlich auf der »unbegründeten Begründung der Unterscheidung von unbegründet und begründet« (Luhmann 1998, 396).

tisch reduzieren kann (alles muss prinzipiell fraglich bzw. befragbar bleiben), kann das System sich nur unter der Voraussetzung programmieren, dass die angewendeten Programme zu einem späterem Zeitpunkt selbst wieder zur Disposition stehen können. Ermöglicht wird dies vor allem durch die »Binarisierung der Programme« mit der »*Unterscheidung von Theorien und Methoden*«. ⁶⁵ In der Physik wird diese Differenz dann durch die disziplinäre Dichotomie *theoretische Physik* und *Experimentalphysik* verwaltet. Hierdurch ergibt sich die Option, jeweils die eine oder die andere Seite konstant bzw. variant setzen zu können. Man kann eine theoretische Festlegung durch eine bestimmte Methode befragen, um dann ggf. die Theorie zu verändern, oder man ändert Methoden aus theoriegeleiteten Überlegungen. »Das System findet in jeder praktischen Situation Anhalt in Limitierungen und fällt nie ins Leere«, ist aber »trotzdem nicht an dogmatische Setzungen oder ein für allemal akzeptierte limitative Bedingungen gebunden«. ⁶⁶ Methoden verwalten gewissermaßen die Differenz zwischen Beobachtungen erster und zweiter Ordnung, indem sie festlegen, was jeweils als Datum vergegenständlicht wird und wie die Beziehung zwischen den (selbst generierten) Daten durch die Theorie beobachtet wird. ⁶⁷

All dies heißt jedoch nicht, dass Wissenschaft beliebig verlaufen kann. Aus evolutionärer Perspektive wird sich hier eine bestimmte Verzahnung von Redundanz- und Varianzorientierung herausgeschält haben, um der Wissenschaft ein hinreichendes Auflösungs- und Rekombinationsvermögen zu ermöglichen. Wissenschaft muss sich einerseits in die Lage bringen, Zufälle und Irritationen hinreichend nutzen zu können. Andererseits kann Offenheit eben nur durch Geschlossenheit erreicht werden, also wenn durch Theorie- und Begriffsbildung hinreichende Sensibilitäten im System in Form von inneren Theoriestructuren aufgebaut werden, um überhaupt interessante »Entdeckungen« generieren zu können. ⁶⁸

Ein hoch entwickeltes, in viele Ausformungen differenziertes Theoriegebilde, wie es die Quantentheorie darstellt, kann nicht als

65 Luhmann (1998, 403).

66 Luhmann (1998, 403 f.).

67 Dies bedeutet, dass es keine »Logik der Forschung« (Popper) geben kann. Jede vorstellbare Letztbegründung methodologischer Zugänge verfängt sich auch hier im Zirkulären, d. h. wir begegnen »grundlosen Gründen«, die nur durch das Begründen begründet werden können (Luhmann 1998, 391).

68 »Hochkomplexe Wissenskonstruktionen sind leichter störbar, irritierbar, sind empfindlicher für Wahrnehmungen und für Bedenken, die im Bewußtsein aufsteigen mögen und in die Kommunikation gegeben werden« (Luhmann 1998, 391).

Abbild der Wirklichkeit gesehen werden, was jedoch nicht im Widerspruch dazu steht, dass sie durch vielfältige experimentelle Belege bestätigt wird: »Hohe Komplexität ist zwar keinerlei Zeichen dafür, daß die Umwelt einigermaßen adäquat repräsentiert oder gar modelliert ist; aber belegt wird doch ganz unmittelbar, daß auch eine so hochgetriebene, so weit von Welt und Alltagserfahrungen distanzierte Unwahrscheinlichkeit immer noch geht – also offenbar umweltangepaßt operiert, wie immer die Außenwelt beschaffen sein mag.«⁶⁹

Erst mit einer solchen wissenschaftstheoretischen Position wird es möglich, die Entfaltung der Quantentheorie als ein sich selbst konditioniertes semantisches Gebilde zu rekonstruieren, ohne dabei auf externe, durch Philosophie oder Logik gesetzte Geltungsansprüche zurückgreifen zu müssen. Eine auf diese Weise angeleitete Rekonstruktion ist nicht mehr gezwungen, für eine bestimmte Deutung Partei zu ergreifen, sondern kann vorurteilsfrei den unterschiedlichen Entfaltungen der inneren Bezugsprobleme und den hieraus folgenden Theorientwicklungen folgen. Die Eigenarten einer bizarren Theorie, die eine vermutlich ebenso bizarre Wirklichkeit zu beschreiben versucht, können hier in den Blick kommen, ohne eine bestimmte Klasse von ontologischen oder epistemischen Vorannahmen treffen zu müssen.

2 Die Rolle der Mathematik

Mithilfe der zuvor geschilderten wissenschaftstheoretischen Konzeption lässt sich auch die Beziehung zwischen Mathematik und Quantenphysik in einer differenzierteren Weise betrachten, als es etwa in den gängigen Ausarbeitungen zur Geschichte der Quantenmechanik geschieht.

Zunächst ist hierzu festzustellen, dass »auch Logik und Mathematik Kondensate und Regulative sozialer Operationen sind – insofern es nur gelingt, den Beobachter als zeitbeständiges selbstreferenzielles System zu etablieren.«⁷⁰ Die Mathematik stellt aus dieser Perspektive vor allem eine *Formsprache* dar, die so angelegt ist, dass sie vollkommen auf die Referenz auf äußere Objekte verzichten kann. Ihre Gesetze folgen ausschließlich aus ihren inneren Axiomen. Damit ist ihre Form vollkommen bestimmt. Gerade dies lässt sie hochgradig anschlussfähig werden für alle außermathematischen Verwendungen (in der Physik, der Wirtschaft, den Sozialwissenschaften etc.), in

69 Luhmann (1998, 373).

70 Luhmann (1998, 75).

denen regelmäßige oder regelhafte Beziehungen beobachtbar sind. Mathematik repräsentiert – dies ist hier zu betonen – keine außerhalb ihr bestehenden oder existierenden Objekte; sondern sie *symbolisiert* vor allem Anschlußfähigkeit im *Medium Wahrheit*. Da ihre inneren Relationen stimmen, gestattet sie die *kommunikative Validierung* einer auf mathematischer Modellierung beruhenden Gesetzmäßigkeit. Entweder stimmen die Daten mit den im Modell aufgestellten Kriterien überein – oder eben nicht.

Mathematik beweist jedoch keinen physikalischen Zusammenhang. Wie beispielsweise in der Auseinandersetzung um die Interpretation der Quantentheorie deutlich wird, kann es geschehen, dass unterschiedliche physikalische Auffassungen zwar mathematisch modellierbar sind, aber zugleich (bislang) noch keine Daten vorliegen bzw. erzeugt werden können, die entscheiden lassen, welches Modell zu verwerfen ist. Beispielsweise wird sowohl in der Bohmschen Mechanik⁷¹ als auch in der ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹⁷² die Schrödinger-Gleichung durch zusätzliche Terme ergänzt. Im Rahmen der derzeitigen Möglichkeiten der Experimentalphysik lassen sich jedoch keine abgeleiteten ›Beweislagen‹ generieren, die zwischen den hierdurch aufgespannten Alternativen unterscheiden lassen.

Um ein etwas tieferes soziologisches Verständnis der Mathematik zu gewinnen, soll an dieser Stelle etwas ausführlicher auf die diesbezüglichen Arbeiten von Bettina Heintz eingegangen werden.⁷³ Ausgangspunkt ihrer Untersuchung ist das Dilemma der klassischen mathematiksoziologischen Arbeiten, die der Mathematik entweder einen epistemischen Sonderstatus zugestehen – sie repräsentiert dann per se die Logik oder das reine Denken – oder sie für sozial konstruiert halten, um damit auch ihren Geltungsanspruch in Frage zu stellen. Heintz schlägt demgegenüber mit Luhmann einen dritten Weg ein, der die Entwicklung der modernen Mathematik an die Entstehung eines übergreifenden *Kommunikationsmediums*, an die Entwicklung einer hinreichend abstrakten Zeichensprache knüpft, auf dessen Basis mathematische Sätze erst beweisbar sind.

Sobald sich auf diese Weise eine abstrakte Formalsprache erst einmal herausgebildet hat, repräsentiert Mathematik dann in der Tat logische Konsistenz und Folgerichtigkeit. »In der Mathematik ist« nun »ein Streit mit Sicherheit zu entscheiden«. ⁷⁴ Die hiermit entscheidbare Wahrheit – und dies ist ein wichtiger Punkt – bleibt jedoch eine *kommunikative Wahrheit*, die sich der historisch beding-

71 Vgl. Passon (2010) sowie ausführlicher in Kap. II.2.

72 Siehe Ghirardi et al. (1986) sowie ausführlicher in Kap. IV.1.

73 Heintz (2000a; 2000b).

74 Heintz (2000b).

ten Ausdifferenzierung der Mathematik als einer Spezialwissenschaft verdankt.

Mit Heintz stellt sich die »Mathematik des 17. und 18. Jahrhunderts« noch als ein fachlich recht »heterogenes Gebilde« dar. »Neben Geometrie und Algebra umfasste sie Gebiete, die wir heute der Physik zurechnen (z. B. Optik, Statik, Astronomie und Bewegungslehre). Im Vergleich zur ›reinen‹ Mathematik, wie sie sich im 19. Jahrhundert herausbildete, war sie stark anwendungsorientiert und bis zu einem gewissen Grade empirisch, d. h. der Unterschied zu den damals neu entstehenden experimentellen Wissenschaften lässt sich nicht einfach auf die Differenz formal vs. empirisch reduzieren.«⁷⁵

Verschiedene Zugänge und mathematische Praxen bestanden nebeneinander fort. Der ›Beweis‹ spielte damals nur eine geringe Rolle. Inkonsistenzen zwischen den unterschiedlichen vorfindbaren Argumentationsweisen stellten insofern kein Problem dar, als in den praxisnahen Anwendungen der Mathematik eher die Plausibilität der Argumentation im Vordergrund stand als die umfassende formale Konsistenz. Mathematik diente hier vor allem als ein Werkzeug, das man nutzen konnte, um Experimente zu beschreiben, und dessen Anwendung überwiegend in den persönlichen Begegnungen zwischen den Wissenschaftlern illustriert wurde.

Dies änderte sich jedoch im 19. Jahrhundert, als einhergehend mit der ›Globalisierung‹ der wissenschaftlichen Kommunikation die Schriftform eine immer größere Bedeutung bekam. Hier wurden nun übergreifende und abstraktere Darstellungs- und Beweisformen benötigt, die nicht mehr nur durch eine ›Kommunikation unter Anwesenden‹ abgesichert werden konnten,⁷⁶ in der *gezeigt* werden kann, wie es geht:

»Die Ausdifferenzierung der Mathematik als autonome Disziplin löste die traditionellen Kommunikationsnetzwerke auf, die in vielen Fällen auf direktem Kontakt und persönlichen Beziehungen beruhten, und führte zu neuen Kommunikationskreisen, die zwar fachlich homogener, sozial und geographisch aber weiter gestreut waren. [...] Unter der Bedingung anonymer und indirekter Kommunikation reichen persönliches Ansehen und informelle Argumentationen nicht mehr aus, um Konsens zu sichern. Es braucht eine präzise Sprache, um Argumentationen mitteilbar, und ›strenge‹ Methoden, um sie überzeugend zu machen. Die im 19. Jahrhundert einsetzende Beschäftigung mit den Grundlagen der

⁷⁵ Heintz (2000b, 348 f.).

⁷⁶ Siehe zu den Besonderheiten von auf Interaktion beruhenden Systemen Kieserling (1999).

Mathematik und die Forderung nach größerer ›Strenge‹ sind in diesem Zusammenhang zu sehen. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts wurde der ›naive abstractionism‹ (Gray 1992) der früheren Mathematik überwunden und durch Objekte ersetzt, die ausschließlich mathematikintern definiert sind. Diese ›Arbeit an den Begriffen‹ war auch deshalb dringlich geworden, weil die Mathematiker in zunehmendem Maße Begriffe verwendeten, die nicht mehr als Idealisierungen bzw. Abstraktionen aus empirischen Erfahrungen verstanden werden konnten, sondern ausschließlich ›fiktiven‹ Charakter hatten. Das bekannteste Beispiel sind die imaginären Zahlen, die von Leonhard Euler treffend als ›ohnmögliche‹, ›eingebildete‹ oder eben ›imaginäre‹ Zahlen bezeichnet wurden (Toth 1987, 115) und die man bis weit ins 19. Jahrhundert verwendete, ohne sie systematisch hergeleitet zu haben. Im Zuge dieser ›Theoretisierung‹ (Jahnke 1990) bzw. ›De-Ontologisierung‹ (Bekemeier 1987, 220) der Mathematik wurden Begriffe, die man bis dahin als selbstverständlich vorausgesetzt hatte, sukzessiv hinterfragt und in ein explizites System überführt. [...] Den Endpunkt dieser Entwicklung bildete David Hilberts formale Axiomatisierung der Geometrie (Hilbert 1909 [1899]). Im Gegensatz zur inhaltlichen Axiomatik verzichtet die formale Axiomatik auf eine inhaltliche Qualifizierung der Axiome. Axiome sind Annahmen hypothetischer Art, ›Satzungen‹ gewissermaßen, deren inhaltliche Wahrheit nicht zur Debatte steht. Wahr sind die Axiome dann, wenn aus ihnen kein Widerspruch resultiert. [...] In Hilberts formalisierter Geometrie sind die Begriffe gewissermaßen ›autark‹ geworden. Sie verweisen auf nichts mehr außerhalb des mathematischen Systems, innerhalb dessen sie definiert wurden. Die Wahrheitsinstanz verschiebt sich von außen nach innen, vom Gegebenen zur Konstruktion, von der inhaltlichen Übereinstimmung zum Verfahren.«⁷⁷

Die Selbstfindung und Selbstbestimmung der mathematischen Wissenschaft als ›reine Mathematik‹ erscheint hier als eine Antwort auf die Kommunikationsprobleme eines sich zunehmend ausdifferenzierenden und globalisierenden Wissenschaftsbetriebs. In den hiermit entstehenden größeren Kommunikationszusammenhängen können Zweifel und Unsicherheiten nicht mehr einfach durch das persönliche Gespräch ausgeräumt werden. Ebenso wenig lässt sich jetzt einfach vor Ort auf das Experiment verweisen, um zu illustrieren, dass sich die Dinge eben entsprechend der postulierten Gesetzmäßigkeiten verhalten.

77 Heintz (2000b, 350).

Die Konsolidierung der Mathematik als eine Disziplin des ›formalen Beweisens‹ leistet eine erhebliche kommunikative Plausibilisierung von abstrakten ›Wahrheiten‹. Auf Basis einer ausgearbeiteten Formsprache der Mathematik wird die Unterscheidung zwischen wahr und falsch nun kommunikativ auch in der Schriftform eindeutig entscheidbar. Man folgt der Eigenlogik des mathematischen Formalismus, um auf diesem Wege zu einer eindeutigen Aussage zu gelangen. Auf formaler Ebene werden Zweifel und Gegenfragen nun blockiert, da das, was man zeigen kann, eben *beweisbar* ist (und über alles andere braucht man im Zweifelsfall nicht zu sprechen).

Damit verliert die Mathematik jedoch zugleich die Nähe zur Welt. Ihre innere Logik folgt den Zwängen einer *Kunstsprache*, die mit Blick auf viele ihrer Formen zwar eine hohe Ästhetik aufweist, jedoch keinen darüberhinausgehenden Weltbezug mehr garantieren kann.

Gerade aufgrund ihrer weltfernen Selbstbezüglichkeit kann die Mathematik einen nahezu unerschöpflichen Formenreichtum generieren. Dieser wiederum eröffnet der sich ebenfalls immer mehr ausdifferenzierenden Experimentalphysik eine Vielzahl neuer Perspektiven zur Modellbildung. Mathematik und Physik können auf diese Weise in eine Koproduktion treten.

Diese Zusammenarbeit beruht jetzt nicht mehr nur darauf, dass physikalische Anschauungen zu einer mathematischen Modellierung führen, die dann die im Modell antizipierte Gesetzmäßigkeit abbilden. *Die entwickelte Mathematik erlaubt jetzt umgekehrt auch, mathematische Formen für Phänomene und Problembereiche zu finden, von denen noch keine Anschauung oder Ahnung besteht, was diese physikalisch bedeuten könnten. So kann eine Physik, die in ihren Experimenten auf seltsame Phänomene stößt, die sich mit ihren derzeitigen Eigenmitteln weder deuten oder verstehen lassen, sehr wohl zur Charakterisierung der sich hier offenbarenden Beziehungen erfolgreich auf Formen der Mathematik zurückgreifen.*

Die entscheidenden Entwicklungen der Quantentheorie beruhen geradezu auf den hiermit möglichen neuen Rekombinationsmöglichkeiten. Während die klassischen physikalischen Theorien – selbst Einsteins berühmte Gedankenexperimente zur Relativitätstheorie – ihren Ausgangspunkt noch im anschaulichen Modell finden, um dann anschließend für dessen Formalisierung eine angemessene mathematische Darstellung zu suchen, vertauschen sich in der Quantentheorie die Verhältnisse. Das experimentelle Problem findet in der Mathematik zunächst seine Beschreibung, um dann erst die Suche nach neuen Erklärungskonzepten zu beginnen.

Einiges spricht dafür, dass sich nicht-klassische Welten überhaupt erst mithilfe einer auf diese Weise hochgetriebenen Mathematik konzeptualisieren lassen. Erst indem die mathematische Theoriebildung

als abstrakte Form zu sich selbst findet, lassen sich auch in der Physik Hypothesen bilden, die in solch extremer Weise vom Common Sense abweichen, wie es mit der Quantentheorie notwendig wird.⁷⁸

Die Mathematik erlaubt die Errechnung einer unendlichen Anzahl von Formen und formalen Identitäten, die wiederum die theoretische Physik aufgreifen kann, um ihre immer gewagteren Konstruktionen in eine Überprüfung zu überführen, die kommunikativ zwischen wahr und falsch unterscheiden lässt. Auf diese Weise lässt sich die Physik in ein ähnliches Abstraktionsniveau treiben wie die Mathematik. So wie Letztere etwa mit imaginären Zahlen rechnen kann, macht es Ersterer nun keine Probleme mehr, davon auszugehen, dass Materie aus ›Wellen von nichts‹ besteht. Sie kann, wie beispielsweise innerhalb der Stringtheorie, mit Objekten arbeiten, die in 10 Dimensionen der Raumzeit ausgefaltet sind. Für die Physik darf dies jedoch keineswegs in einer Weise missverstanden werden, als könne man sie als ein virtuelles Unternehmen betrachten.

Anders als in der Mathematik müssen ihre Abstraktionsbestrebungen und die hierdurch rekonstruierten physikalischen Identitäten ständig am Widerstand der ›Realität‹ (was immer das auch sein mag) rekonfirmiert werden.⁷⁹

78 Um es mit Luhmann zu formulieren: »Selbstreferenzielle Geschlossenheit ist nun eine unabdingbare Voraussetzung dafür, daß die Wissenschaft eigene Identitäten, also eigene Gegenstände erzeugen kann. Erst diese Überlegung gibt der Systemtheorie jene logische und erkenntnistheoretische Bedeutung, die sich querstellt zu den Prämissen der klassischen Logik« (Luhmann 1998, 311).

79 »Offenbar kommt es zu Identifikation nur unter zwei Voraussetzungen. Die eine besteht im Weglassen von Unterscheidungen, etwa solchen der räumlichen oder zeitlichen Lokalisierung. Ohne Abstraktion (und zwar nicht: Abstraktion von anderen Objekten, sondern Abstraktion von Unterschieden!) gibt es keine Identität. Die zweite Voraussetzung liegt im Gelingen einer rekursiven Produktion von »Eigenwerten«. Identität muß mit anderen Worten, am schon Identifizierten identifiziert werden. Die Wiederholung der Operation des Identifizierens (trotz eines immer kühneren Weglassens von Unterschieden) muß gelingen, muß das für identisch Gehaltene *kondensieren* können. Und anders als in der Mathematik muß dies rekursive Testen mit *anderen* Operationen in *veränderten* Kontexten aber *im selben System* erfolgen, sie muß also trotz Kontextvariationen *konfirmiert* werden können« (Luhmann 1998, 311 f.).

Erfindung der imaginären Zahlen

Gehen wir an dieser Stelle etwas ausführlicher auf die Erfindung der imaginären Zahlen ein, denn dies wird uns später, bei der Erörterung der Schrödinger-Gleichung, hilfreich sein.

Imaginäre Zahlen stellen einen Kunstgriff der Mathematik dar, mit dessen Hilfe sich zum Beispiel aus negativen Zahlen Wurzeln ziehen lassen. Das Quadrat einer reellen Zahl gibt immer eine positive Zahl. So ergibt 2^2 und -2^2 in beiden Fällen jeweils 4. Der Ausdruck $\sqrt{-4}$ ergibt demgegenüber im Kontext *reeller Zahlen* keinen Sinn, da hier keine Zahl existiert, die mit sich selbst multipliziert -4 ergibt.

An sich ist schon die Multiplikation mit -1 ein Vorgang, der ein gewisses mathematisches Abstraktionsvermögen verlangt und der ebenso die Einführung der Null und die Erweiterung der *natürlichen Zahlen* N auf die Menge der *ganzen Zahlen* Z voraussetzt. Anschaulich kann man sie sich anhand eines Zahlenstrangs so vorstellen, dass man bei der Multiplikation mit -1 einen Wert erhält, der von der Null aus gesehen in die *umgekehrte* Richtung zeigt wie der Ausgangswert. Multipliziert man jetzt erneut mit -1 , so liegt der Wert wieder am ursprünglichen Ort.

Insofern man Mathematik als eine abstrakte Formalwissenschaft begreift, kann man sich aber auch andere Varianten vorstellen, wie die Multiplikation mit negativen Zahlen vonstattengehen könnte. So kann man die Multiplikation mit -1 auch als *Drehung* um 180° Grad um den Achsenpunkt 0 verstehen bzw. entsprechend *definieren*. Multipliziert man zweimal mit -1 , vollzieht man jetzt eine Kreisbewegung um 360° Grad und kommt dann wieder bei der ursprünglichen Zahl an. Die Drehung führt jedoch gegenüber der ursprünglichen Achse eine zusätzliche räumliche Dimension ein, denn man braucht jetzt eine Fläche, um die Drehbewegung durchzuführen.

Hat man diese neue Dimension jedoch erst einmal eingeführt, eröffnet sich die Möglichkeit, um beliebige Winkel zu drehen. Man kann jetzt auch um ein Viertel, also um 90° Grad drehen. Dreht man zweimal um 90° Grad, erhält man 180° Grad. Bei vier bzw. acht oder zwölf Vierteldrehungen kommt man jeweils wieder am Ausgangspunkt an. Da eine Drehung um 180° Grad der Multiplikation mit -1 entspricht, kann man sich jetzt auch ein Produkt vorstellen, das zwei multiplikative Teilschritte mit einer Drehung von jeweils 90° Grad beinhaltet. Da das Teilergebnis einer Vierteldrehung in die hinzuerfundene neue Achse zeigt, beinhaltet es zusätzlich zu dem Betrag der reellen Zahl noch den Betrag der zusätzlichen Achse – den Imaginärteil i . Zwei Imaginärteile i miteinander multipliziert ergeben entsprechend dieser Definition dann -1 .

Indem also eine *zusätzliche Dimension* und mit ihr die *imaginären Zahlen* eingeführt werden, lassen sich beispielsweise auch Wurzeln aus negativen Zahlen ziehen (etwa aus $\sqrt{-1}$, denn i^2 ergibt -1).

Hat man die imaginären Zahlen erst einmal in der oben beschriebenen Weise eingeführt, lassen sich in konsistenter Weise mit ihnen die aus der Algebra vertrauten Rechenarten durchführen. Zudem eröffnen sie neue Optionen: Da sich mit ihnen Kreisbewegungen beschreiben lassen, kann man mit ihnen jetzt auf recht einfache Weise periodische Vorgänge, etwa Sinus-schwingungen, darstellen.

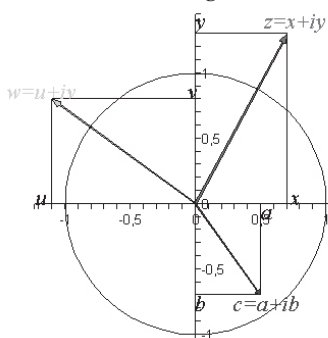


Abb. 1: Imaginäre Zahlen⁸⁰

Imaginäre Zahlen sind dabei genauso real oder irreal wie jede andere Zahl auch. Eine Zahl ist per se eine Abstraktion, die von der Welt als phänomenologisches ›Sosein‹ abstrahiert und Verschiedenes als gleich – nämlich als zählbar – setzt. Hieraus kann die Mathematik dann weitere Abstraktionen entfalten, etwa Addition, Multiplikation, Division, Potenzen etc., um aus den sich hieraus ergebenden logischen Zwängen neue Zahlen postulieren zu können, etwa die *gebrochene* Zahlen aus der Menge der *reellen Zahlen* R oder eben die *imaginären Zahlen* I . Wie bereits beschrieben:

Reine Mathematik hat *per se* keinen Weltbezug. Sie gründet zwar sehr wohl in Anschauungen – etwa in den Symmetrien geometrischer Figuren –, entfaltet diese jedoch explizit ohne Referenz auf eine Außenwelt. Gerade aufgrund ihrer ›Irrealität‹, ›Imaginationalität‹ oder man könnte gar sagen ›Fiktionalität‹ ist die moderne Mathematik in der Lage, einen großen Reichtum konsistenter Formen zu erzeugen, aus dem dann andere Wissenschaften schöpfen können, um die von ihnen entdeckten Beziehungen zu formalisieren.

3 Weiterer Verlauf dieser Studie

Die Quantentheorie ist jetzt gut hundert Jahre alt und mehr als zwei Duzend Nobelpreisträger haben sich mittlerweile an ihr abgearbeitet, doch noch immer erscheint sie weit davon entfernt, zu einer einheitlichen Deutung oder Interpretation zu finden. Mit den folgenden

⁸⁰ Quelle: M. Erné, Download am 1.10.2012 unter: http://www.iag.uni-hannover.de/~greite/ingo607/dateien/maple/bilder/MI_2_6_6.gif

Kapiteln soll eine soziologische Rekonstruktion der quantenphysikalischen Theoriebewegungen geleistet werden, über die sich verstehen lässt, warum dies der Fall ist und welche theoretischen Lagerungen zu diesem sonderbaren Befund geführt haben.

Im ersten Kapitel wird es darum gehen, die Bezugsprobleme nachzuvollziehen, die schließlich zur Entwicklung einer physikalischen Theorie geführt haben, die nicht mehr mit den Anschauungen und Konzepten der klassischen Physik nachvollzogen werden kann. Höhepunkt dieser Entwicklung ist die Formulierung der so genannten Kopenhagener Interpretation. Der wunderliche Charakter der Quantentheorie wird hiermit zum ersten Mal unter Physikern anerkannt, was jedoch die Kritik von namhaften Physikern, nicht zuletzt von Einstein und Schrödinger hervorruft.

Das zweite Kapitel beschäftigt sich mit der Suche nach Alternativen zur Kopenhagener Interpretation. Am Beispiel von Everetts Viele-Welten-Theorie und der Bohmschen Mechanik wird deutlich werden, dass alternative Deutungen zwar formulierbar sind, dies aber nur zum Preis von Weltkonzepten zu haben ist, die in Hinblick auf ihre Bizarrheit der Kopenhagener Deutung um nichts nachstehen.

Im dritten Kapitel stehen die Erfolge einer quantentheoretischen Experimentalphysik im Vordergrund. Da die Quantentheorie selbst in ihren vermeintlich absurden Vorhersagen nicht widerlegt werden kann, beginnt sich die Physik langsam an die Quantentheorie zu gewöhnen. Man kann mit ihr in den verschiedensten Bereichen erfolgreich arbeiten. Die Rückkehr zu einer Interpretation der Quantentheorie mit den Mitteln klassischer Konzepte ist hiermit aber weitestgehend verbaut.

Dies führt im vierten Kapitel zu dem Befund, dass jetzt für die Physik weniger die Quantenwelt, sondern vielmehr die durch unsere Erfahrungen gegebene Alltagswelt das Unerklärliche bildet. Wir begegnen hier einer Reihe von modernen Ansätzen, die einerseits von der Universalität der Quantentheorie ausgehen, die aber andererseits Wege suchen, über die sich erklären lässt, warum stabile, klassisch erscheinende Welten auftreten. Bei genauerem Hinsehen wird allerdings auch deutlich, dass solche Erklärungen nicht paradoxiefrei zu haben sind.

Das fünfte Kapitel bildet einen Exkurs zur Stringtheorie, da hier einige wissenschaftssoziologisch interessante Entwicklungen innerhalb der zeitgenössischen physikalischen Theoriebildung besonders deutlich werden.

Das sechste Kapitel stellt sich der Frage, inwieweit die Spitzenprobleme in der Interpretation der Quantentheorie Bezüge zu Reflexionsformen der Mystik aufweisen. Das Geheimnis der koordinierten

Koproduktion – der bodenlos ineinander verschachtelten System-Umwelt-Referenzen – wird hier virulent.

Im abschließenden Kapitel wird die Entwicklung der quantenphysikalischen Deutungsproblematik rekapituliert und unter dem Blickwinkel der Folgeprobleme einer Universaltheorie behandelt, die nicht umhinkommt, sowohl das *Beobachterproblem* als auch die Frage von *Sinn* und *Kontingenz* mitzureflektieren. Hierbei wird auf einige Ressourcen der soziologischen Systemtheorie zurückgegriffen. Es wird deutlich werden, dass die Quantentheorie, insofern man sie nicht nur als eine Rechenvorschrift begreift, nicht vermeiden kann, Verweise zu einer metaphysischen Reflexion mitzuführen.

Am Beispiel der Entstehung und Entwicklung der Quantentheorie können wir untersuchen, wie *Anschauung*, *Experiment* und *Entwicklungen der Mathematik* und *physikalische Theoriebildung* zueinander in produktive Wechselwirkung treten, um so eine solch merkwürdige Theorie wie die Quantentheorie hervorzubringen. Diese Theorieanlage lehrt uns schließlich, dass jeglicher Versuch einer anschaulichen Interpretation physikalischer Weltzusammenhänge zum Scheitern verurteilt ist. Hundert Jahre Quantentheorie zeigen auf, was Theoriebildung heutzutage leisten kann, welcher Preis hierfür zu zahlen ist, aber auch, welche Einsichten auf diese Weise gewonnen werden können.

Die Einsichten in ein solches Theorieprojekt lassen auch für andere Wissenschaftsgebiete deutlich werden, was eine Theorie verschränkter komplexer Systeme leisten kann, welche Art von Konsequenzen und welche Grenzen in Hinblick auf Versteh- und Beherrschbarkeit von Welt hier zu erwarten sind.

I DIE ENTWICKLUNG DER QUANTENTHEORIE

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

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

1 v. Weizsäcker (1992, 800 f.).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Die Entdeckung des Planckschen Wirkungsquantums

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

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

2 Varela et al. (1992a, 344).

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

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

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

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

3 Simonyi (2004, 426).

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

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

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

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

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

4 Ebd., 429.

5 Ebd., 429.

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

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

Wien-Planck

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

Rayleigh-Jeans

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8 Simonyi (2004, 431).

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

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

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

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

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

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

9 Planck [1900](1958, 700).

10 Simonyi (2004, 433).

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

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

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

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

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

Auch zur Beseitigung der Diskrepanz zwischen Theorie und Experiment

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

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

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

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

¹² Siehe vor allem Einstein (1905).

¹³ Siehe de Broglie (1924).

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

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

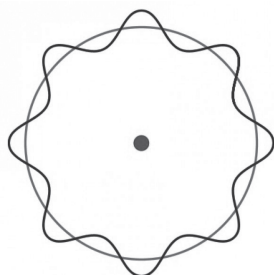


Abb. 2: Elektronenbahn als stehende Welle¹⁴

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

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

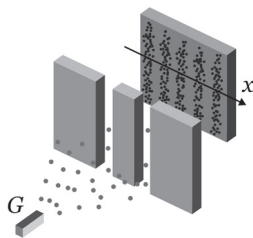


Abb. 3: Doppelspaltexperiment¹⁵

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

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

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



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

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

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

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



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

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

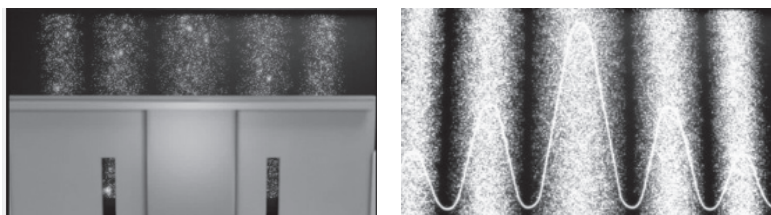


Abb. 7 und 8: Schirm beim Doppelspaltexperiment. Hinsichtlich der Verteilung zeigen sich Maxima mit hoher Intensität sowie Streifen, an denen keine Ereignisse anzutreffen sind.

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

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

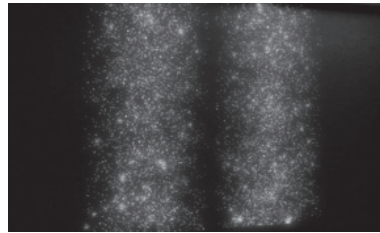


Abb. 9 und 10. Doppelspaltexperiment mit Messung. Ein Detektor ermittelt die Weginformation. Hiermit verschwindet jedoch das Interferenzbild und man erhält zwei Balkenverteilungen, die der Summe zweier getrennter Einzelspaltexperimente entsprechen würden.

Diese Experimente lassen sich in verschiedener Form variieren. Anstelle von sichtbarem Licht kann man es mit Elektronen oder sogar mit geeigneten größeren Molekülen durchführen (etwa mit den Fullerenen¹⁷). Man kann sicherstellen, dass die Detektoren für die Weg-

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

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

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

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

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

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

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

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

¹⁸ Einstein (1922, 234).

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

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

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

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

19 Ebd., 234 f.

20 Ebd., 237.

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

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

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

21 Ebd., 238 f.

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

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

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

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

Heisenbergs Lösung: Verzicht auf das Konzept der Elektronenbahn

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Schrödingers Wellengleichungen: Wellen aus nichts?

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

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

26 Simonyi (2004, 441).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Schrödinger konnte selbst zeigen, dass seine Wellengleichung in ihren heuristischen Konsequenzen als äquivalent zur Heisenbergschen Matrizenmechanik zu sehen ist. Beide Wege bieten eine Lösung des Quantisierungsproblems.³⁰ Dem ›Postulat‹³¹ der Schrödinger-Gleichung liegt jedoch eine andere Intuition zugrunde als Heisenbergs abstraktem Entwurf. Schrödinger hoffte, auf diesem Weg die subatomaren Prozesse in einem physikalisch anschaulichen Sinne als Wellen beschreiben zu können, denn in Bezug auf die mit den imaginären Zahlen assoziierten Kreisfunktionen zeigt sein Formalismus gewisse Homologien mit anderen Schwingungsvorgängen:

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

29 Prigogine/Stengers (1990, 232).

30 Siehe Schrödinger (1926).

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

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

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

32 Simonyi (2004, 449).

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

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

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

Born: Die statistische Interpretation der Wellenfunktion

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

34 Born/Wiener (1926).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

40 Heisenberg (2007, 67).

41 Ebd., 69.

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

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

42 Ebd., 69 f.

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

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

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

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

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

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

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

mentär ausgewiesenen Beschreibungsebenen, wird jetzt durch den Beobachter besetzt.

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

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation als theoretische Konsequenz der Quantenmechanik

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

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

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

$$pq \neq qp$$

Die Quantentheorie erlaubt mit der Vertauschungsrelation eine genauere Bestimmung:

$$pq - qp = h/2\pi i$$

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

$$\Delta p \Delta q \geq h$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

47 Weizsäcker (1994, 502 f.).

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

Die Schrödinger-Gleichung und der Zeitpfeil

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

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

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

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

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

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

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

⁵⁰ Prigogine (1990, 241).

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

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

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

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

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

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

51 Prigogine (1990, 241).

52 Heisenberg (2007, 80).

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

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

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

53 Laughlin (2008, 46 f.).

Von Neumann: die mathematische Grundlegung
der Quantenmechanik

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

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

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

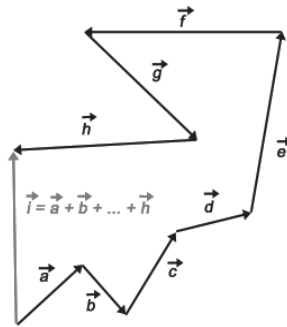


Abb. 11: Vektoraddition und -subtraktion⁵⁶

54 v. Neumann (1981 [1932]).

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

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

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

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

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

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

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

⁵⁸ So etwa Mittelstaedt (2000, 65).

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

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

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

59 v. Neumann (1932, 159 f.)

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

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

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

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

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

62 Mittelstaedt (2000, 66).

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

sich dies aus der konsequenten mathematischen Durchführung der Theorie ergibt.

Das Messproblem: Willkürliche Schnitte in der Welt

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

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

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

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

65 Vgl. v. Weizsäcker (1994, 537).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

66 Weizsäcker (1994, 511).

67 Einstein/Podolsky/Rosen (1935).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Schrödingers Katze: Wellenfunktionen springen nicht,
sie verschwinden*

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

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

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

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

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

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

72 Schrödinger (1935).

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

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

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

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

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

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

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

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

- 75 Schrödinger bemerkt zu diesem quantenmechanisch abgeleiteten Gesetz: Die »Aussage leidet wirklich nicht an einem übertriebenen Mangel an Präzision, ganz im Gegenteil, sie ist schärfer als eine wirkliche Messung je sein kann« (Schrödinger 1935, 810).
- 76 Hat man nicht »das Gefühl, daß der wesentliche Teil dessen, was gesagt werden soll, sich nur mit einiger Mühe zwängen läßt in die spanischen Stiefel einer Vorhersage über die Wahrscheinlichkeit, für eine Variable des klassischen Modells diesen oder jenen Meßwert anzutreffen? Hat man nicht den Eindruck, daß hier von grundlegenden Eigenschaften neuer Merkmalsgruppen die Rede ist, die mit klassischen nur noch den Namen gemein haben? Es handelt sich keineswegs um Ausnahmefälle, gerade die wahrhaft wertvollen Aussagen der neuen Theorie haben diesen Charakter« (Schrödinger 1935, 810).
- 77 »Um diese Aussage [in Hinblick auf die Werte eines Planckschen Oszillators] auf ein statistisches Konzept beziehen zu können, müßte die Statistik der Entfernungen wenigstens nach oben hin scharf begrenzt sein durch diejenige Entfernung, bei der schon die potentielle Energie den Wert $3 \pi h \nu$ erreicht bzw. überschreitet. So ist es aber nicht, sogar beliebige Entfernungen kommen vor, wenn auch mit stark abnehmender Wahrscheinlichkeit. Und dies ist nicht etwa ein nebensächliches Rechenergebnis, das irgendwie beseitigt werden könnte, ohne die Theorie ins Herz zu treffen: neben vielen anderen gründet sich auf diesen Sachverhalt die quantenmechanische Erklärung der Radioaktivität« (Schrödinger 1935, 811).

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

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

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

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

78 Hier in Referenz auf das Katzenbeispiel: »Die ψ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s. v. v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind. Das Typische an diesen Fällen ist, daß eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden lässt. Das hindert uns, in so naiver Weise das ›verwaschene Modell‹ als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen. An sich enthielt es nichts Unklares oder Widerspruchsvolles. Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Fotografie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden« (Schrödinger 1935, 812).

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

80 Ebd., 824.

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

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

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

81 Ebd., 823f.

82 Vgl. Luhmann (1993, Kap. »Sinn«).

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

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

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

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

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

83 Schrödinger (1935, 825).

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

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

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

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

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

ist allerdings die Erklärungskraft der Quantentheorie viel zu stark.

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

86 Ebd., 826.

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

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

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

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

87 Ebd., 827.

88 So Rössler (1992).

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

90 Schrödinger (1935, 826).

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

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

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

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

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

91 Ebd., 828.

92 Ebd., 847.

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

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

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

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

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

94 Laughlin (2008, 46).

95 Cushing (1994).

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

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

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

Die Kritik kann nicht das Kritisierte ersetzen

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

96 Fischer (2010, 138).

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

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

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

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

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

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

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

100 Hier wieder der Verweis auf Cushing (1994).

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

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

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

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

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

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

102 Weizsäcker (1994, 511).

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

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

*Zusammenfassung: Entstehung einer
nicht-klassischen physikalischen Theorie*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

104 Tegmark und Wheeler (2001).

II DIE SUCHE NACH ALTERNATIVEN ZUR KOPENHAGENER INTERPRETATION

Die Physik stand nach der Entdeckung der Quantentheorie vor dem Dilemma, zwar über eine empirisch außerordentlich erfolgreiche Theorie zu verfügen, welche jedoch zugleich mit einer Reihe bizarrer Implikationen einhergeht. Da der große Erfolg in der Anwendung der Quantentheorie¹ aber nicht das Problem ihrer Interpretation löst, wundert es nicht, dass ambitionierte Physiker versuchen, das Manko der problematischen Deutung der Quantentheorie zu reparieren. Wir treffen nun auf eine Reihe von Suchbewegungen, die einen Rückweg zu den Ordnungsverhältnissen der klassischen Physik versprechen. Als Bezugsproblem, an dem man sich jetzt abarbeitet, erscheint hier zum einen der Status des Beobachtungsprozesses in der Kopenhagener Deutung – der Beobachter stört und verleitet zudem dazu, ein subjektives Moment in die Physik einzuführen. Zum anderen bleibt der Status der Wellenfunktion ψ offen. Die Schrödinger-Gleichung erscheint jetzt einerseits als Universalformel der Quantentheorie, doch der für die Kopenhagener Deutung so wichtige un stetige Kollaps der Wellenfunktion kommt hier nicht vor. Neben dem weltanschaulichen Problem des Beobachtereffekts zeigt sich in der Quantenphysik hier sozusagen ein theorieästhetisches Defizit. Man muss etwas von außen in die Theorie einführen, was in ihr nicht vorkommt.

Die folgenden Ausführungen beschäftigen sich mit der Suche nach alternativen Deutungen im Anschluss an die Kopenhagener Interpretation, die auf diese Bezugsprobleme antworten. Wir beginnen mit der *Ensemble-Interpretation* als dem Versuch, zu einer klassischen Auffassung der Realität zurückzukehren. Aus dieser Perspektive erscheinen die seltsamen Eigenschaften der Quantentheorie, insbesondere die nicht-lokale Verknüpfung von Observablen und die Bedeutung des Beobachtungsaktes, nur als ein Artefakt einer komplexen statistischen Beschreibung. Das mit der Quantentheorie

1 In den wenigen Jahren nach ihrer Entstehung führte die Quantentheorie rasch zu einer Vielzahl von Entdeckungen. Die Orbital-Modelle des Atoms bilden die Grundlage der organischen Chemie. Mit der Quantentheorie wurde eine Theorie des radioaktiven Zerfalls möglich. Quantentheoretisch modellierte Prozesse erklären die Arbeitsweise von Transistoren ebenso wie die erstaunlichen Phänomene der Supraleitung und Suprafluidität.

aufgeworfene Geheimnis des Beobachters und der mit ihm in die Welt gesetzten willkürlichen Schnitte würde sich hiermit als eine Illusion erweisen. Insbesondere der Philosoph und Wissenschaftstheoretiker Karl Popper hat diesbezügliche Argumentations- und Diskussionsstränge vertreten und zusammengeführt. Für die folgende Darstellung greifen wir insbesondere auf seinen Beitrag *Quantum Mechanics without ›the Observer‹* aus dem Jahre 1967 zurück,² da sich die Grundzüge der Argumentation hier gut nachvollziehen lassen – und entsprechend deutlich wird, woran sie letztlich scheitert.

Demgegenüber stellt die Bohmsche Mechanik eine wirkliche Alternative zur Kopenhagener Interpretation dar. Auch der Physiker David Bohm hat nach einem Weg gesucht, die deterministische Teilchenauffassung aufrechtzuerhalten, um auf diesem Wege Momente einer klassischen Beschreibung beibehalten zu können. Dies hat ihn 1952 zu einer Theorie geführt, welche zwar weiterhin von ›realen‹ Teilchen ausgeht, die auch dann existieren, wenn sie nicht beobachtet werden. Diese sind jedoch über die Wellenfunktionen in eine komplexe holistische Weltbeziehung einzubetten, welche die Teilcheneigenschaften konditionieren.³ Die Bohmsche Mechanik beruht auf einer etwas abgewandelten Schrödinger-Gleichung, ist dieser jedoch in Hinblick auf ihre experimentelle Erklärungskraft äquivalent.

Die dritte prominente Alternative zur Kopenhagener Deutung bildet die 1957 durch Hugh Everett formulierte Viele-Welten-Theorie.⁴ Everetts Überlegungen setzen an dem Problem an, dass die Physik eine mathematisch elegante und in Hinblick auf empirische Fragestellungen extrem leistungsfähige Schrödinger-Gleichung vorfindet, man gleichzeitig jedoch einen Wellenkollaps postulieren muss, der sozusagen physikfern von außen in den Formalismus ›hinein beobachtet‹ werden muss. Auch Everett strebt eine Lösung an, die ohne den Beobachter auskommt. Er begreift dabei die Wellenfunktion ψ als grundlegendes physikalisches Erklärungsprinzip, mit dem der Weltverlauf deterministisch beschrieben werden kann. Seine Antwort besteht darin, eine Wellengleichung der Welt zu postulieren, die zwar weiterhin einen multiplen verzweigten Baum von Entscheidungsalternativen generiert, diese nun jedoch alle gleichzeitig als *realisiert* betrachtet werden.

Man braucht dann keinen Kollaps der Wellenfunktion mehr, der in die Wahl einer Alternative mündet. Vielmehr besteht jetzt eine Vielzahl paralleler Welten und an jeder neuen Weichenstellung quantenmechanischer Bestimmung können weitere Welten entstehen.

2 Popper (1967).

3 Bohm (1952a; 1952b).

4 Everett (1957).

Die vermeintlichen Lösungen zeigen sich jedoch allesamt nicht weniger absonderlich als die Probleme, welche hierdurch vermieden werden sollen. Sie führen keineswegs zurück in die angestrebten klassischen Gefilde der vertrauten Physik. Die Zusammenschau der Alternativen lässt damit erneut die Bezugsprobleme deutlich werden, die sich ergeben, wenn man sich auf die Quantentheorie einlässt.

1 Ensemble-Interpretation: Rückkehr zum Teilchenbild

Die Ensemble-Interpretation zielt darauf, zum Theorieverständnis der klassischen Physik zurückzufinden. Der Weg, mit dem dies erreicht werden soll, schließt an die von Born vorgelegte statistische Interpretation der Wellenfunktion an,⁵ mit der versucht wird, die im Experiment auftretenden Messunsicherheiten auf statistische Streuungen von Teilchenensembles zurückzuführen. Die Unbestimmtheiten bei der Messung an Quantenobjekten ergeben sich aus dieser Perspektive allein deshalb, weil man es mit Gruppen sich inhomogen bewegender Teilchen zu tun hat. Weil man die Anfangszustände der Orte und Impulse der Teilchenensembles nicht wissen könne, würden sich in Hinblick auf potenzielle Messungen nur statistische Beschreibungen anfertigen lassen. Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation würde damit also nicht auf der *realen* Unschärfe des Produkts zweier nicht vertauschbarer Operatoren beruhen, sondern wäre als ein Artefakt einer falsch verstandenen statistischen Theorie zu erklären. Wenn man mit statistischen Verfahren keine genauen Aussagen treffen kann, so dürfe man im Umkehrschluss nicht daraus folgern, dass die Unbestimmtheit eine Eigenschaft realer Objekte darstelle. Um es mit den Worten Poppers zu formulieren:

»Bedenkt man, daß die Plancksche Theorie eine statistische Theorie ist, so lassen sich die Heisenbergschen Formeln ganz natürlich als statistische Streurelationen auffassen, wie ich vor mehr als 30 Jahren anregte. Das heißt sie sagen nichts aus über die mögliche Genauigkeit von Messungen oder über irgendwelche Grenzen des Wissens. Sind es aber Streurelationen, so sagen sie etwas aus über die Grenzen der Homogenität quantenphysikalischer Zustände und damit, obwohl indirekt, etwas über die Voraussagbarkeit.

5 Max Born selbst bleibt auch noch während seines Nobelpreisvortrags im Jahr 1954 der von ihm entwickelten statistischen Interpretation treu (Born 1954).

Beispielsweise sagt die Formel $\Delta p_1 \Delta q_1 \approx h$ [...] einfach aus: Wenn wir die x-Koordinate eines Systems (etwa) eines Elektrons bestimmen, dann streut bei Wiederholungen des Experiments der Impuls. [...] Es gibt nicht den geringsten Grund, den realistischen und objektivistischen Charakter der gesamten Physik zu bezweifeln. [...] Der Beobachter ist wesentlich der Mensch, der die Theorie prüft. Dazu braucht er viele andere Theorien, konkurrierende Theorien und Hilfstheorien. Das alles zeigt, daß wir weniger Beobachter als Denker sind.«⁶

Poppers Argumentation ist stark durch die Arbeiten des Physikers Alfred Landé beeinflusst. Landé stand in engem Kontakt zu Max Born, David Hilbert und Niels Bohr. Landé unterstützte zunächst die Kopenhagener Interpretation, suchte dann aber später nach einer alternativen Erklärung. Auf Basis von Duanes Vorschlag,⁷ die Verteilungen im Spaltexperiment einfach als mechanische Wechselwirkung zwischen den Spaltwänden und bewegten Teilchen zu erklären, entwickelte er eine ausgefeilte statistische Theorie, entsprechend der die Welleneigenschaft der Materie als ein Messartefakt erscheint.⁸

Das Beobachterparadoxon der Quantenmechanik würde damit schlichtweg auf dem Missverständnis beruhen, dass die Theorie in Hinblick auf statistische Problemlagen hin konzipiert wurde und man entsprechend von ihr nur statistische Antworten erwarten könne. Alle weitergehenden ontologischen und epistemischen Aussagen zu Quantensystemen würden damit schlichtweg auf einem Kategorienfehler beruhen.⁹ Gleiches würde dann selbstredend auch für den Welle-Teilchen-Dualismus gelten müssen, denn alle am Ensemble beteiligten Objekte wären nun prinzipiell als klassische Teilchen erklärbar. Im Sinne eines prinzipiell statistisch angelegten Theorieinstruments wäre es allerdings durchaus korrekt, in Hinblick auf die

6 Popper (1993, 316 f.).

7 Duane (1923).

8 Siehe Landé (1965).

9 Hierzu Popper im Originaltext: »Unfortunately many people, including physicists, talk as if the distribution function (or its mathematical form) were a property of the elements of the population under consideration. They do not discriminate between utterly different categories or types of things, and rely on the very unsafe assumption, that ›my‹ probability of living in the South of England is, like ›my‹ age, one of ›my‹ properties – perhaps one of my physical properties«. Sowie weiter zur Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation: »My thesis is that these formulae set some lower limits to the *statistical dispersion* or ›scatter‹ of the results of sequences of experiments: they are *statistical scatter relations*. They thereby limit the precision of certain individual *predictions*« (Popper 1967, 19 f.).

Wellenfunktion von ›Wahrscheinlichkeitsfeldern‹ zu sprechen. Beide Beschreibungsebenen – die Teilchen- und die stochastische Ebene – dürfen dann allerdings nicht miteinander verwechselt oder in eine kausale Beziehung zueinander gebracht werden.¹⁰

Aus der hiermit formulierten Perspektive ließe sich die Quantentheorie auf eine physikalisch objektive und realistische Perspektive zurückführen. Als statistische Theorie erlaube sie, ›Wahrscheinlichkeitshypothesen‹ aufzustellen, die dann statistisch geprüft werden können. Das Nichtwissen des Experimentators wäre dann jedoch keineswegs subjektivistisch zu interpretieren bzw. dem Messvorgang zuzurechnen, sondern würde sich einfach als eine objektive Eigenschaft der Versuchsanordnung ergeben, die von ihrer Anlage her gesehen es einfach nur mit streuenden Ensembles zu tun bekommt.¹¹

10 »My eleventh thesis is this: even though both the particles and the probability fields are real, it is misleading (as Landé rightly insists) to speak of a ›duality‹ between them: the particles are important *objects* of the experimentation; the probability fields are propensity [Neigungsfelder] fields, and as such important properties of the experimental arrangement, and of its specified conditions.«

»My twelfth thesis is that the mistaken idea of duality of particle and wave is, partly, due to the hopes raised by de Broglie and Schrödinger of giving a wave theory of the *structure of particles*« (Popper 1967, 39 f.).

11 »Denn die objektive Wahrscheinlichkeit sagt uns nur, was durchschnittlich geschieht, wenn ein solches Ereignis sich viele Male wiederholt: Über das Einzelereignis sagt die objektive statistische Wahrscheinlichkeit nichts.

Das war der Punkt, an dem der Subjektivismus Eingang in die Quantenmechanik fand, sowohl nach Einsteins Ansicht als auch nach der seiner Gegner. Und an diesem Punkt versuchte ich, den Subjektivismus zu bekämpfen, indem ich die Propensitätsinterpretation der Wahrscheinlichkeit einführte. Das geschah nicht *ad hoc*. Es war vielmehr das Ergebnis einer kritischen Überprüfung der Argumente, die der Häufigkeitsinterpretation der Wahrscheinlichkeit zugrunde liegen.

Der Hauptgedanke war, daß Propensitäten (Verwirklichungstendenzen) als physikalische Realitäten aufgefasst werden können. Sie sind Maße oder Maßzahlen von Dispositionen. Messbare physikalische Dispositionen (›Potentiale‹) waren in der Physik durch die Feldtheorie eingeführt worden. Es gab also einen Präzedenzfall, in dem Dispositionen als physikalisch real aufzufassen, nicht ganz fremdartig ist. Und er ließ Raum für Indeterminismus« (Popper 1994, 224). »Es ist deshalb jetzt möglich, eine ganze Sippe von philosophischen Gespenstern zu bannen und mit allen jenen verblüffenden philosophischen Behauptungen aufzuräumen, die von einer Einmischung des beobachtenden Subjekts, des Bewusstseins oder des Geistes in die Welt der Atome sprechen. Diese angebliche Einmischung läßt sich weitgehend wegerklären: Sie entsteht, wenn die traditio-

Die Wahrscheinlichkeiten der ψ -Funktion werden jetzt als *objektive* Eigenschaften der untersuchten physikalischen Systeme interpretiert. Diese Eigenschaften könnten dann nicht vom Wissen eines Beobachters abhängen, sondern wären den untersuchten Phänomenen selbst gegeben. Popper betrachtet also auch die Verwirklichungstendenz (die Propensität) eines Ergebnisses (z. B. den Durchtritt durch die eine oder andere Spaltöffnung) als eine objektive, beobachterunabhängige Eigenschaft. Propensitäten ergeben allerdings nur unter einem relationalen Blickwinkel Sinn, nämlich im Verhältnis zu den anderen potenziell realisierbaren Versuchsausgängen.¹² Mit der Ensemble-Interpretation würde sich also für das System der Teilchengruppe als Ganzes die Wahrscheinlichkeitsverteilung als *objektive* physikalische Eigenschaft ergeben, woraus dann auch die Ereigniswahrscheinlichkeiten konkreter Messereignisse als objektive Parameter abgeleitet werden können.¹³ So plausibel und anschaulich die Ensemble-Interpretation auf den ersten Blick erscheint, ein gewichtiges Theorieproblem bleibt jedoch bestehen: die Erklärung der *verbundenen* Wahrscheinlichkeitsbeziehungen während der *Interferenz* unterschiedlicher Wellenzüge. Dies erkennt auch Popper an, wenngleich er hofft, mit Landé zumindest einen qualitativen Ausweg gefunden zu haben:

»Eine Erscheinung, die in der Tat für die Quantentheorie spezifisch ist, ist die (phasenabhängige) Interferenz von Wahrscheinlichkeiten. (Genauer: von Wahrscheinlichkeitsamplituden. Es ist denkbar, daß wir dies als Letztes zu akzeptieren haben. Es scheint jedoch, daß das nicht der Fall ist. [...] Duanes Regel für die Quantisierung des Impulses kann nicht nur auf Photonen, sondern (wie Landé hervorhebt) auch auf andere Partikel angewendet werden, und sie liefert dann eine rationale (wenn auch nur qualitative) Erklärung der Teilcheninterferenz. Landé scheint weiter einen Weg gezeigt zu haben, auf dem die quantitativen Interferenzregeln der Wellenmechanik aus recht einfachen (wenn auch zusätzlichen Annahmen) abgeleitet werden können.«¹⁴

nelle subjektivistische Fehlinterpretation des Wahrscheinlichkeitskalküls auf die Atomtheorie übertragen wird« (Popper 1994, 132 f.).

12 Siehe ausführlich zum Konzept der objektiven Wahrscheinlichkeit Popper (1995).

13 Im Prinzip könnte man jetzt den objektiven Zufall auch in die mikroskopische Ebene selbst legen. Ein einzelnes Quantenteilchen wäre dann sozusagen »objektiv« unbestimmt und würde sich unabhängig vom Beobachter mit einer bestimmten Tendenz in dieser oder jener Form verwirklichen. Siehe zur Diskussion dieser Position Mohrhoff (2000) und Shafiee et. al. (2006).

14 Popper (1994, 132 f.)

Das Grundproblem ist hiermit aber keineswegs gelöst, denn Interferenz bedeutet auch die *Auslöschung* von Wahrscheinlichkeiten und dies würde bedeuten, dass in die ψ -Funktion auch *negative* Werte in die Rechnung eingehen müssten. In der klassischen Wahrscheinlichkeitsrechnung gibt es aber *keine* negativen Wahrscheinlichkeiten. Leslie Ballentine folgend, einem aktuellen Vertreter der Ensemble-Interpretation, hätten wir also entweder eine komplexe Wahrscheinlichkeitsverteilung anzunehmen – die dann allerdings wohl nicht mehr auf Basis klassischer physikalischer Konzepte verstanden werden kann – oder man wäre gezwungen, nur noch einen Teil der ψ -Funktion als physikalisch real anzusehen.¹⁵ Dem letzten Vorschlag folgend würde sich aber nun die Frage stellen, was mit dem anderen Teil geschehen soll. In den Rechnungen der Experimentalphysiker wird der imaginäre Teil offensichtlich gebraucht – ohne ihn funktionieren die Formeln nicht. Es bleibt also nichts anderes übrig, als sich einzugestehen, dass die Verhältnisse komplizierter sind und man die Ensemble-Interpretation der Quantentheorie nicht auf Basis der aus der klassischen Physik vertrauten Konzepte formulieren kann.

Die Kopenhagener Interpretation betrachtet die Nicht-Vertauschbarkeit der Operatoren als ontologisches Primat, um auf diese Weise zu einer ebenso einfachen wie erklärungsstarken Theorie zu kommen. Hierfür ist allerdings ein Preis zu zahlen: die Paradoxien des Messproblems und die Aufgabe des klassischen Verständnisses der Realität. Die Ensemble-Interpretation hingegen behält die klassische Realitätsauffassung bei, wird auf diesem Wege jedoch gezwungen, eine Statistik verbundener Wahrscheinlichkeiten zu entwickeln, die komplexe Beziehungen postulieren müssen, welche ebenfalls einer klassischen Beschreibung spotten.

Nolens volens hat auch sie anzuerkennen, dass die Phänomene der Quantenwelt in einer nicht-trivialen, möglicherweise nur holistisch beschreibbaren Weise miteinander zusammenhängen. Die Ensemble-Interpretation – insofern sie hinreichend komplex argumentiert – eröffnet erneut die Diskussion um mögliche verborgene Variablen, die mit der Kopenhagener Deutung überwunden schien.¹⁶ Während

15 »Since a ›well defined‹ but negative probability makes no sense, some modifications of either (5.18 [Verweis auf vorige Formel, die eine komplexe Wahrscheinlichkeitsverteilung darstellt]) or the interpretation seems in order (such as, perhaps, a restriction on the states which are to be considered physically realizable). This objection does not necessarily invalidate the concept of a complex probability distribution, but the usefulness of such a distribution is yet to be determined« (Ballentine 1970, 374).

16 »The Statistical Interpretation, which regards quantum states as being descriptive of ensembles of similarly prepared systems, is completely

Heisenberg und v. Neumann einfach postulieren konnten, dass es keine zusätzlichen Freiheitsgrade gibt und deshalb der Zufall in die Welt eintritt, stellt sich mit der statistischen Interpretation erneut die Frage, welche physikalischen Beziehungen Muster erklären können, in welchen sich Wahrscheinlichkeitstendenzen offensichtlich nicht nur addieren, sondern auch subtrahieren können.

Der epistemische Schnitt, welcher mit der Ensemble-Interpretation in die Welt gelegt wird, führt zwar zu einer einfachen Ontologie, da er auf einer klassischen und beobachterunabhängigen Teilchenwelt beruht. Hierfür ist jedoch der Preis zu zahlen, komplexe und verborgene Beziehungen anerkennen zu müssen, welche genau das, was mit dieser Theorie geleistet werden soll, unterminieren. Die offene Wunde der Ensemble-Interpretation liegt also darin, dass sie im entscheidenden Punkt nichts mehr zu erklären vermag. Auch sie führt nicht zu einer Klärung der Verhältnisse auf subatomarer Ebene, sondern wirft eine neue, eigentümliche Paradoxie auf: Je besser die statistische Modellierung aufgrund klassischer physikalischer Modelle gelingt, desto mehr werden Beziehungen gewahrt, die sich nicht mehr mit einer Statistik klassischer Wirkbeziehungen modellieren lassen.

Die Ensemble-Interpretation steht für eine Suchbewegung, die alle Grundannahmen der klassischen Physik beizubehalten versucht. Die konsequente Verfolgung dieses Weges führt offensichtlich in Paradoxien, welche den mit diesem Versuch verbundenen Anspruch unterminieren.

2 Bohmsche Mechanik: Holistische Ordnungen

Die Ausgangslage der Bohmschen Theorie besteht in der Auffassung, dass Teilchen *per se* als real zu betrachten sind und es entsprechend keinen Sinn ergibt, von einem Wellenkollaps auszugehen, mit dem die Teilchen erst entstehen würden. Anders als in der Ensemble-Interpretation wird die Teilchenauffassung jedoch nun in eine nicht klassische Weltbeziehung eingebettet. Die Wellenfunktion und die mit ihr auftretenden Interferenzbeziehungen erscheinen bei Bohm nicht mehr einfach nur als statistisches Artefakt. Den mit ihr aufge-

open with respect to hidden variables. It does not demand them, but it makes the search for them entirely reasonable [this was the attitude of Einstein (1949)]. On the other hand, the Copenhagen Interpretation, which regards a state vector as an exhaustive description of an individual system, is antipathetic to the idea of hidden variables, since a more complete description than that provided by a state vector contradict that interpretation« (Ballentine 1970, 374).

spannten Potenzialen wird vielmehr ebenso wie den Teilchen ein Realitätsstatus zugestanden. Bohm schlägt vor, von einer Führungswelle auszugehen, durch die ein Teilchen gleichsam gelenkt und gesteuert wird. Im Prinzip wurde diese Idee bereits von de Broglie im Jahr 1927 formuliert. Doch aufgrund konzeptioneller Schwächen traf dieser Ansatz damals auf wenig Resonanz. Bohm hingegen gelang eine konsistente mathematische Ausformulierung dieser Idee, mit der in Hinblick auf empirische Erklärungskraft das Gleiche geleistet werden kann wie mit der orthodoxen Quantenmechanik.

Der Weg hierzu besteht darin, die Schrödinger-Gleichung durch eine zweite Gleichung zu ergänzen, welche die Bewegungen der gelenkten Teilchen beschreibt. Diese laufen gleichsam auf dem mit der ψ -Funktion aufgespannten Wellenzug. Da die Teilchenbewegung jetzt als durch die Phase der Welle geleitet betrachtet wird, erhält sie zu jedem Zeitpunkt einen genau bestimmten Ort. Die bei einer Messung auftretende Unschärfe würde sich entsprechend dadurch ergeben, dass man nicht wisse, wo sich das Teilchen ursprünglich befunden habe.¹⁷

Auf den ersten Blick scheint es so, als ob es sich bei der Bohmschen Mechanik um eine klassische Theorie mit verborgenen Variablen handele. Dass eine solche Konzeption nicht mit den Regeln der Verrechnung der Operatoren, auf denen die Schrödinger-Gleichung basiert, in Einklang zu bringen ist, hat bereits v. Neumann gezeigt.¹⁸ Aufgrund der Nicht-Vertauschbarkeit der Operatoren stehen einem Quantensystem keine zusätzlichen Freiheitsgrade zur Verfügung. Die Idee der Führungswelle schien damit zunächst erledigt.

Bei genauerem Hinsehen zeigt sich jedoch, dass die Bohmsche Mechanik keine klassische Theorie darstellt. Versuchen wir im Folgen-

17 Die »Bohmsche Mechanik ergänzt die Schrödingergleichung um Bewegungsgleichungen für die Ortskoordinaten des jeweiligen ›Quantensystems‹, also etwa für das Hüllenelektron des Wasserstoffatoms. In der Bohmschen Mechanik sind Wellen- und Teilcheneigenschaften also nicht komplementär zueinander, und ein Teilchen hat zu jedem Zeitpunkt einen definierten Ort. [...] Das -Feld ›führt‹ also die Teilchenbewegung und bekommt eine reale physikalische Bedeutung. Die statistischen Vorhersagen der üblichen Quantenmechanik können alle reproduziert werden, wenn man für die Anfangsbedingungen der Orte von Teilchen, die durch die Wellenfunktion beschrieben werden, eine ψ^2 -Verteilung wählt. Dies nennt man die Quantengleichgewichtshypothese. Die Bohmsche Mechanik ist eine deterministische Theorie, und ihre Wahrscheinlichkeitsaussagen haben den gleichen Status wie in der klassischen statistischen Physik: Sie sind lediglich der Unkenntnis über die genauen Anfangsbedingungen geschuldet.« (Passon 2010, 1).

18 v. Neumann (1932).

den die Konsequenzen, welche sich aus dieser Theorieanlage ergeben, mit den Worten von Passon etwas genauer nachzuvollziehen. Wie bereits gesagt, haben wir von der »Schrödinger-Gleichung sowie einer zweiten Führungsgleichung für den Teilchenort auszugehen. Die Teilchenbewegung wird also durch die Phase S der Wellenfunktion geleitet.«¹⁹ Hiermit ist das System schon vollkommen determiniert. Da die Schrödinger-Gleichung an sich schon eine deterministische Zeitentwicklung beschreibt, ist mit der zusätzlichen Ortsbestimmung bereits alles festgelegt. Da jetzt aber aufgrund des Quantenformalismus keine weiteren Freiheitsgrade mehr vorhanden sind, »verlieren Konzepte wie Energie, Impuls etc. auf dem Niveau der individuellen Bohmschen Teilchen ihre Bedeutung.«²⁰

All die bekannten klassischen Variablen wie auch die neuen Quanteneigenschaften (z. B. der Spin) existieren damit nicht mehr als individuierbare Eigenschaften von Teilchen, sondern bestehen nur noch als *kontextualisierte* Merkmale ebendieser Teilchen, welche in die Dynamik der Schrödinger-Gleichung eingebettet sind. Die Bohmsche Mechanik leistet damit eine »komplette Umdeutung des Observablenkonzeptes der Quantenmechanik«. Hierdurch rückt der nicht-klassische Charakter der Quantentheorie wesentlich stärker in den Vordergrund als in der Kopenhagener Interpretation. »Der Ausgang eines Experiments zur Messung von Spin, Energie, Impuls etc. wird ebenso wie alle anderen Wechselwirkungen in der Bohmschen Mechanik durch Anfangsort und Wellenfunktion festgelegt. Die Größen (bzw. ihr späterer »Messwert«) sind nicht direkt dem Teilchen auf der Bohmschen Trajektorie zugeordnet, sondern gewinnen ihren Wert (und damit auch ihre Bedeutung) erst aus dem Zusammenspiel von Wellenfunktion, Teilchenort und Messapparatur.«²¹

Auf einer oberflächlichen Ebene ergeben sich im Falle einer Messung die gleichen Resultate wie in der orthodoxen Quantenmechanik. Auch hier gilt dann das Bornsche Messpostulat.²² Auf einer tieferen Ebene ist jedoch von einer *umfassenden Kontextualität* auszugehen. Hier ist dann »der Ort die einzige »Eigenschaft« des Teilchens und was man lax »Impuls des Teilchens« bzw. »Energie«, »Drehimpuls« etc. nennt, ist lediglich das Ergebnis eines entsprechenden Messexperimentes. Ein solches Experiment macht mehr, als lediglich eine

19 Passon (2010, 31).

20 Ebd., 34.

21 Ebd., 40.

22 »Die individuellen Teilchenbahnen der Bohmschen Mechanik entziehen sich aufgrund der Quantengleichgewichtsbedingung der Beobachtbarkeit, führen aber im statistischen Mittel auf die Vorhersagen der Quantenmechanik« (Passon 2010, 40).

Teilcheneigenschaft zu erkunden, sondern erzeugt im Wortsinn das Resultat durch Verschränkung von Objektwellenfunktion mit der Wellenfunktion des Messgeräts«. ²³

Da Quantensysteme jedoch aus miteinander verschränkten Wellenfunktionen bestehen, werden »auch die Teilchenorte in nichtlokaler Weise« gekoppelt und damit »hängt die Bewegung eines Teilchens explizit vom Teilchenort« eines »jeweils anderen ab«. ²⁴ Die »spukhafte Fernwirkung«, welche Einstein, Podolsky und Rosen in ihrem Gedankenexperiment noch als unannehmbare Theoriekonsequenz brandmarken konnten, wird hier zur Regel erklärt. ²⁵

Aus der Bohmschen Mechanik folgt ein *Quantenholismus*, in dem einerseits entsprechend den mit der Wellenfunktion gegebenen Potenzialen gleichsam alles mit allem zusammenhängt. Andererseits begegnen wir hier Teilchen, die entgegen der Kopenhagener Deutung auch in ihrer Nichtbeobachtung als »reale« Objekte betrachtet werden können. Wir brauchen keinen Kollaps der Wellenfunktion mehr, da alles bereits durch die Schrödinger-Gleichung und den uns prinzipiell unbekanntem Anfangsorten der Teilchen gegeben ist. Mit Bohm könnten wir somit zu einer deterministischen Weltauffassung zurückkehren, haben hierfür allerdings eine Welt zu akzeptieren, in der alles mit allem in *nicht-lokalen* Beziehungen zusammenhängt.

Im Allgemeinen erlaubt die Bohm'sche Mechanik, für quantenmechanische Experimente die gleichen Vorhersagen zu treffen wie bereits mit dem Formalismus der orthodoxen Quantenmechanik. Aus diesem Grunde könnte man entsprechend dem Sparsamkeitsprinzip argumentieren, dass man doch bei der einfacheren Formulierung bleiben sollte. Darüber hinaus bestehen verschiedene Varianten, wie man die Bohm'sche Theorie zu einer allgemeinen Quantentheorie weiterentwickeln kann. Im Fachdiskurs bestehen mehrere Alternativen, die in unterschiedlicher Strenge und Konsequenz dem Primat der »*beables*« ²⁶ folgen, also davon ausgehen, »dass jeder Zustand zu jedem Zeitpunkt einen definierten Wert dieser Größe besitzt und nicht nur nach einer Messung«. ²⁷

Neue Aktualität gewann die Bohmsche Mechanik durch die Bellsche Ungleichung, mit der das Postulat der nicht-lokalen Wechselwir-

23 Passon (2010, 55).

24 Ebd., 79.

25 Einstein, Podolsky und Rosen (1935).

26 Der Begriff »*beable*« wurde durch Bell geprägt und bezeichnet eine epistemische Haltung, in der auch unter Quantenbedingungen weiterhin von einer Existenz »seiender« Objekte ausgegangen wird (vgl. Bell 1986).

27 Passon (2010, 55).

kung auf den empirisch-experimentellen Prüfstand gestellt werden konnte (siehe ausführlich Kapitel III.1).

Gehen wir an dieser Stelle nochmals auf die Bezugsprobleme ein, auf die die Bohmsche Mechanik eine Antwort zu geben sucht. Die Ensemble-Interpretation stellt den ontischen Status der Wellenfunktion infrage, hat dann aber das Problem, wie sich die Interferenz von Wahrscheinlichkeiten ohne ein wie auch immer geartetes Feldkonzept erklären lässt. Wir treffen hier auf Wellen, die eigentlich nicht existieren können. Die Kopenhagener Interpretation geht vom Kollaps der Wellenfunktion während einer Messbeobachtung aus, wobei jedoch nicht gesagt werden kann, an welcher Stelle der Schnitt in die Welt gemacht werden kann. Da der Messprozess prinzipiell auch quantenmechanisch beschrieben werden kann, lässt sich kein Beobachter *in* der Welt identifizieren, der solch einen Schnitt erzeugen könnte. Wir treffen hier auf ein Phänomen, das es nach dem reinen Formalismus der Quantentheorie eigentlich nicht geben kann.

Die Bohmsche Mechanik umschifft diese beiden schwerwiegenden epistemischen Probleme auf elegante Weise. Es *gibt* hier Teilchen und ebenso werden die mit der Wellenfunktion aufgespannten Feldbeziehungen als real betrachtet. Der problematische Kollaps der ψ -Funktion wird in dieser Beschreibung nicht benötigt.

Für diese Interpretation der Quantentheorie ist jedoch wiederum ein Preis zu zahlen. Die Welt erscheint nun als ein zusammenhängendes System, das auf komplexe Weise ineinander eingefaltet ist. Sie erscheint jetzt als eine *implizite* Ordnung, entsprechend der ein Geschehen an Ort *A* über die bestimmenden Kontextvariablen Einfluss auf prinzipiell jedes andere, noch so weit entfernte Geschehen an Ort *B* haben kann. Wir begegnen hier der Paradoxie des Holismus, die darin besteht, dass das Ganze nicht aus seinen Teilen bestehen kann, denn sonst könnten die Teile ja nicht Ausdruck des Ganzen sein. Die Paradoxie der Quantentheorie wird jetzt als *eingefaltete Ordnung* entfaltet, entsprechend der das Ganze gleichzeitig mit sich identisch und nicht identisch ist. Aus diesem Grunde kann eine solche Ordnung auch nicht explizit sein, denn mit der Differenz, welche die Beobachtung in der Welt macht, kann diese nicht als Ganzes erfasst werden. Jede Beobachtung teilt die Welt erneut in Beobachtetes und Nicht-Beobachtetes ein. An dieser Stelle wird auch deutlich, warum für Bohm der Dialog mit Jiddu Krishnamurti so attraktiv erscheint. Seine Theorieform zeigt offensichtlich Parallelen zu mystischen Figuren (siehe auch Kapitel VI).

David Bohms vielschichtige und gebrochene akademische Biografie hat eine Reihe wissenschaftshistorischer Untersuchungen inspiriert. Wir treffen hier auf einen jüdisch-amerikanischen Physiker, der in seiner Jugend mit kommunistischen und pazifistischen Bewegun-

gen sympathisiert hat und darüber hinaus schnell zur Elite der neuen US-amerikanischen Physik vordringt. Seine politische Orientierung bringt es jedoch mit sich, dass er aus dem Manhattan-Projekt ausgeschlossen wird, mit dem die Entwicklung der Atombombe vorangetrieben wurde. Nichtsdestotrotz entwickelte er sich zu einem angesehenen Physiker und veröffentlicht ein viel beachtetes Standardlehrbuch zur Quantenphysik. Er folgt hier zwar noch in weiten Teilen der Kopenhagener Schule, gibt aber den damit verbundenen erkenntnistheoretischen und philosophischen Problemen einen großen Raum.²⁸

In der McCarthy-Ära weigert sich Bohm, einige vermeintlich sozialistische Kollegen zu denunzieren. Dies führte zum Verlust seiner Lehrerlaubnis an der Princeton-Universität. Ihm blieb zunächst nichts weiter übrig, als nach Brasilien auszuwandern, was zugleich mit einem Ausschluss aus der fachwissenschaftlichen Gemeinde einherging. Hier begann Bohm intensiver über alternative Deutungen der Quantentheorie nachzudenken, wobei er sich offensichtlich auch durch Denkfiguren aus dem dialektischem Materialismus inspirieren ließ. Wenige Jahre später wechselte er an die Technische Universität von Haifa in Israel. Hier gelang ihm die Entdeckung eines weiteren merkwürdigen Quanteneffekts, der später unter der Bezeichnung Aharonov-Bohm-Effekt bekannt wurde. Hier konnte gezeigt werden, dass die Interferenz von Elektronen in einer merkwürdigen Art durch ein Magnetfeld beeinflusst wird, nämlich nicht durch die magnetische Kraft selber, sondern durch die Eigenschaften eines virtuellen Vektorfeldes. Die empirisch gefundenen Wechselbeziehungen lassen sich nur mit Hilfe der imaginären Anteile der Wellenfunktion erklären.²⁹

28 Bohm (1951).

29 Um die Sache mit Fischer zu erklären: »[E]in Magnetfeld kann den merkwürdigen (spezifisch quantenmechanischen) Vorgang beeinflussen, bei dem Elektronen miteinander interferieren, wie Wellen es tun. Und das Verwunderliche an dieser in der Literatur als Aharonov-Bohm-Effekt bekannten Quantensonderlichkeit besteht darin, dass sie nicht auf das (reale) Magnetfeld selbst zurückgeführt werden kann, sondern auf eine nicht messbare (unwirkliche) Größe, die Physiker in ihre Theorien eingeführt haben, um die mathematische Schreibweise zu vereinfachen. Sie nennen diesen irrealen Teil der Theorie ›Vektorpotenzial‹ und leiten das (reale) Feld davon ab. Ein solcher Schritt in fast transzendente Sphären musste gedanklich unternommen werden, weil sich der Aharonov-Bohm-Effekt im konkreten Versuch auch dann noch zeigt, wenn das Magnetfeld längst verschwunden ist, das heißt, wenn seine Stärke den Wert null erreicht hat und auf den Messgeräten nichts mehr angezeigt wird (was aber nicht bedeutet, dass da nicht doch noch etwas da sein könnte)« (Fischer 2010, 273f.). Siehe die Originalarbeiten Aharonov/Bohm (1959; 1961).

1961 wechselte Bohm schließlich an die Universität London, wo er die Idee einer holistischen Interpretation der Quantentheorie weiterverfolgte. Hier begannen auch seine Dialoge mit Jiddu Krishnamurti und in diesem Zusammenhang wandte er sich zunehmend philosophischen und spirituellen Fragen zu.³⁰

Bohms Wirken gibt viel Raum, darüber nachzudenken, inwieweit persönliche Lebensumstände und Theoriebildung miteinander wechselwirken. Es hat sicherlich einige Plausibilität, mit Forstner nach der Wechselwirkung zwischen Bohms früherer dialektisch-materialistischer Weltauffassung, seiner Suche nach alternativen Deutungsmöglichkeiten und seinem Ausschluss aus der Diskursgemeinschaft amerikanischer Physiker zu fragen.³¹ Doch auch hier ist letztlich anzunehmen, dass solch grobe äußere gesellschaftliche Dynamiken die inneren Bewegungen einer elaborierten physikalischen Theoriebewegung nicht wirklich determinieren können. Dass die Lektüre von Friedrich Engels ›Dialektik der Natur‹³² zur Beschäftigung mit erkenntnistheoretischen Fragen und der Suche nach einer deterministischen Theoriealternative inspirieren kann, ist eine Sache. Welche Konsistenzzwänge und inneren Anschlussoptionen sich aus einer komplexen physikalischen Theorie ergeben, stellt jedoch eine andere Geschichte dar.

Kehren wir deshalb im Sinne unseres Projektes wieder zum Referenzrahmen der Physik zurück und sehen in diesem Zusammenhang Bohms Leistung primär darin, die Idee klassischer Substantialität der Teilchen und die Ontologisierung von Schrödingers Wellenfunktion konsequent weiterverfolgt zu haben. Anstatt davon auszugehen, dass es Teilchen nur gibt, wenn sie beobachtet werden und dass Wellenfunktionen durch die Messbeobachtung kollabieren, generiert die Bohmsche Mechanik eine beobachterunabhängige und deterministische physikalische Theorie. Der Versuch, die Bezugsprobleme der Quantentheorie auf diesem Wege zu lösen, führt jedoch erneut zu bizarren Konsequenzen. Die Paradoxien der Kopenhagener Deutung werden hier zwar verschoben – anstelle des Beobachters erscheint jetzt eine nicht-lokale holistische Ordnung –, jedoch keineswegs einer Klärung zugeführt, welche die Rückführung in eine klassisch-physikalische Theoriekonzeption erlaubt.

30 Siehe etwa Bohm (1988) und Krishnamurti/Bohm (1985).

31 Siehe hierzu Forstner (2005; 2007; 2008).

32 Engels (1962).

3 Viele-Welten-Interpretation: Die ψ -Funktion als einzige Realität

Die Idee der Paralleluniversen ist Stoff für zahlreiche Fantasie- und Science-Fiction-Romane. Solche Fantasien sind jedoch nicht Gegenstand der Arbeit eines Physikers, der an den Problemen der Quantentheorie arbeitet.

Sicherlich, es gibt auch Physiker, die mit ihren Schriften mit populärwissenschaftlichen Diskursen in Resonanz treten.³³ Doch hierin die eigentliche Arbeit des Physikers zu sehen, wäre ein Missverständnis, das darauf beruht, die Referenz der Wissenschaft mit dem Bezugssystem der Kunst oder den Massenmedien zu verwechseln. Die Währung innerhalb der Physik besteht weder in der Ästhetik einer phantastischen Konzeption noch in den Einschaltquoten eines Massenpublikums. In der Physik geht es um Theorieentwicklung auf Basis mathematischer und konzeptioneller Konsistenz. Anschlussfähig sind hier allein Arbeiten, die auf Basis der Rekombination etablierter Theoriefiguren und/oder aktueller empirischer Befunde neue Einsichten in den Gegenstand ermöglichen.

Dies gilt auch für die ›Viele-Welten-Interpretation‹. Versuchen wir, uns im Folgenden aus einer innerphysikalischen Perspektive an diese Konzeption anzunähern.

Hugh Everett suchte Mitte der 1950er-Jahre in seiner Doktorarbeit an der Princeton University nach einer Lösung des quantenmechanischen Messproblems. Mit der Arbeit von v. Neumann lag eine gut ausgearbeitete Theorie der Quantenmechanik vor, mit deren Hilfe die Experimentalphysik immense Fortschritte gemacht hatte. In all den vielfältigen Entdeckungen und Einsichten, die hier gewonnen werden konnten, zeigte sich die Schrödinger-Gleichung als uneingeschränkt gültig. Die Quantentheorie rückte hiermit neben der allgemeinen Relativitätstheorie zunehmend in die Position einer allgemeinen Grundlagentheorie der Physik. Doch trotz ihrer immensen Erklärungskraft blieben zwei grundlegende Probleme bestehen. Zum einen lässt sich der Formalismus der Quantentheorie nicht ohne Weiteres mit der allgemeinen Relativitätstheorie in Einklang bringen. Zum anderen bleibt das Messproblem bestehen. Mit v. Neumann ist davon auszugehen, dass der Schnitt der Messung willkürlich gesetzt wird und entsprechend nur die Alternative bleibt, dass der mit dieser Entscheidung implizierte Wellenkollaps wirklich passiert, wenngleich dies in der in Hinblick auf den Zeitverlauf deterministisch angelegten Schrödinger-Gleichung selbst nicht vorgesehen ist. Wie bereits ge-

33 Siehe etwa die populären Bücher von Stephen Hawking.

sagt, der Wellenkollaps kommt in der physikalisch-mathematischen Beschreibung nicht vor.

Everett nahm sich das letztere Problem vor und suchte intensiv nach einer Lösung, die ohne Hilfsannahmen auskommt, welche außerhalb des Formalismus der Schrödinger-Gleichung liegen. Auf diese Weise wollte er zu einer realistischen Interpretation der Quantentheorie gelangen, die darauf basiert, der Schrödinger-Gleichung in Hinblick auf die Weltbeschreibung einen ontologisch *objektiven* Status zuzuweisen. Entgegen der statistischen Interpretation durch Born und Popper würde die Wellenfunktion damit nicht nur eine Wahrscheinlichkeitsvorhersage für eine *mögliche* Entwicklung von Welt geben, sondern die *wirkliche* Entwicklung der Welt beschreiben.

Insofern man die Wellenfunktion des Universums kennen würde, wären damit die mathematische Beschreibung der Welt und die Welt selbst, also Reflexion und Sein, wieder eins. Es würde jetzt wieder die alte Regel des ausgeschlossenen Dritten gelten (*tertium non datur*). Sowohl der Einfluss der Beobachtung als auch die das Kausalitätsprinzip störenden Modaloperatoren würden wieder aus der Physik verschwinden. Die Grundbeschreibung der Welt wäre wieder eine realistische und deterministische.

Der Weg, den Everett hierbei einschlägt, ist im Prinzip einfach zu begreifen. Der Ausgangspunkt bleibt die Wellenfunktion ψ , welche jetzt aber die *ganze* Welt beschreibt. Everetts Trick besteht darin, all die mit der ψ -Funktion aufgespannten Möglichkeiten als manifestierte Realitäten aufzufassen. In der ›wirklichen‹ Welt, so die Annahme, werden alle durch ψ aufgespannten Optionen realisiert. Jeder Realitätsschnitt hat dann als Nachbarschaft andere Realitätsausschnitte, welche parallel zu ihm bestehen. Mit Dieter Zeh gesprochen, bilden Everetts ›Welten‹ daher »eine gewisse Analogie zu inhaltlich voneinander unabhängigen und getrennt betrachtbaren Radio- oder Fernsehsendungen, die alle gleichzeitig als *eine* elektromagnetische Welle den (hier dreidimensionalen) Raum füllen – nur daß in der globalen Quantenwelt der Zuschauer selber Teil einer der ›Sendungen‹ oder ›Welten‹ ist.«³⁴

Um im Beispiel von Schrödingers Katze zu bleiben: Die Wellenfunktion der zwei sich überlagernden Katzen spaltet sich in zwei alternative, jedoch auf einen gemeinsamen Grund zurückzuführende Geschichten auf, die sich nur in Hinblick auf ein Detail – den Tod der Katze – unterscheiden. Mit jeder neuen Messinteraktion, die eine Weichenstellung erzwingt, entstehen neue Parallelwelten und entsprechend beinhaltet die Gesamtwellenfunktion der Welt letztendlich eine unvorstellbare Anzahl von Parallelwelten, die alle gleichzeitig als ›real‹ zu betrachten sind, also entsprechend der Verschränkung ihrer

34 Zeh (2010, 16).

Zustände relativ zueinander in einer bestimmten Beziehung stehen, wenngleich man ihre jeweilige Entwicklung in klassischen Begriffen auch getrennt beschreiben könnte. Aus diesem Grund wählte Everett für seine 1957 abgeschlossene Arbeit auch den Titel »*relative state formulation of quantum mechanics*«. ³⁵

Als Preis für einen auf diese Weise wiedergewonnenen »Realismus« der Physik ist nicht nur eine ebenso phantastische wie abstruse Weltauffassung in Kauf zu nehmen, sondern auch ein Splitting des Bewusstseins. Ein Experimentator, der die Kiste mit Schrödingers Katze öffnet, erlebt nur seine Welt, nicht jedoch die seines Doubles, das parallel hierzu einen anderen Ausgang des Experiments beobachten kann. Der *Zufall* entscheidet, welcher Wirklichkeitskontinuität sein individuelles Bewusstsein folgt. Die Kontingenz der Beobachtung bleibt also bestehen. Die Modaloperatoren und Ungewissheiten sind nicht verschwunden, werden jedoch an einen Ort verlagert, der einen objektivistischen Physiker nicht mehr zu stören braucht. Die Frage, ob ein Bewusstsein zufällig oder zwingend und notwendig etwas erlebt, fügt aus einer objektivistischen Perspektive einem objektiv verlaufenden Weltgeschehen nichts hinzu. ³⁶ Die objektive Welt er-

scheint jetzt als universell gegebenes, absolutes Sein im Sinne der Summe aller mit der Wellenfunktion errechenbaren Parallelwelten. Das jeweilige Bewusstsein kann demgegenüber bestenfalls noch ein bruchstückhaftes Schattenbild der für es unbegreifbaren wirklichen Welt erheischen. Ihm bleibt nur noch ein minimalistischer Ausschnitt aus der Fülle alternativer Erlebenskontinuitäten, die alle gleichzeitig gegeben anzusehen sind. ³⁷

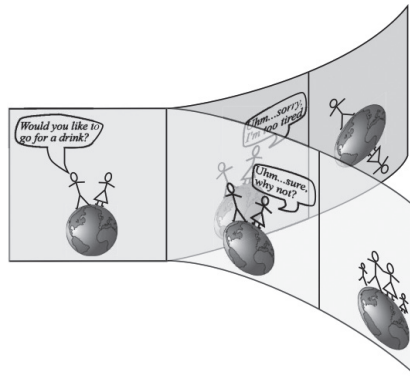


Abb. 12: Splitting einer Welt in zwei Parallelwelten. ³⁸

³⁵ Everett (1957).

³⁶ Es erscheint jetzt bestenfalls noch als ein »non-efficacious« und »powerless by-product of the physical world«. So dann Jackendoff (1987, 26), der hiermit die objektivistische Perspektive auf die Spitze treibt.

³⁷ Streng genommen führt diese Auffassung dann auch zu einem Blockuniversum, in dem alle Zustände für alle Zeiten gleichzeitig bestimmt sind, denn innerhalb der deterministischen Wellenfunktion stellt die Zeit eine stetige Variable dar. Sie steht, wie Soler Gil (2007) beschreibt, nicht mehr im Einklang mit einer präsentistischen Auffassung von Zeit.

³⁸ Bildreferenz: Tegmark (2004, 8).

Die Viele-Welten-Theorie ist kontraintuitiv gegenüber unserer Welterfahrung. Doch sie lässt sich mathematisch und physikalisch in konsistenter Weise durchführen. Auf den ersten Blick scheint sie nicht mit dem Satz der Energieerhaltung in Einklang zu stehen, da ja mit der Vervielfachung der Welten auch die Beträge der Massen und Energien zu multiplizieren sind.³⁹ Dieses Problem lässt sich mit der ›*relative state formulation*‹ jedoch recht einfach lösen, indem jeder realisierten Welt eine Gewichtung zugeordnet wird, die sich aus dem Wahrscheinlichkeitskalkül des Messpostulats ergibt. Mit jedem neuen Splitting würde aufgrund der zusätzlichen Welten die Gewichtung einer einzelnen Welt abnehmen. Die Summe aller Welten würde dann weiterhin 100 % der gesamten Masse und Energie des Universums ergeben. Ebenso lässt sich die Viele-Welten-Theorie in Einklang mit den Hauptsätzen der Thermodynamik formulieren. Nicht zuletzt lässt sie sich ohne Weiteres in die Dekohärenztheorie einbetten,⁴⁰ mit deren Hilfe sich der Übergang von der Quantenwelt zu den stabilen Phänomenen der klassischen Welt recht gut erklären lässt (siehe ausführlich Kapitel IV.4).

Die Viele-Welten-Theorie erlaubt darüber hinaus, den nicht-lokalen Charakter der ψ -Funktion anzuerkennen, ohne dabei von der Übertragung von Information mit Überlichtgeschwindigkeit ausgehen zu müssen. Eine Messung an einem verschränkten Quantenobjekt ›splittet‹ die Welt in zwei weitere Parallelwelten. Eine weitere Messung an den konjugierten Teilchen führt dann zu einer weiteren Spaltung, so dass sich die Messkonstellationen auf vier Welten verteilen, die von ihrer Geschichte her konsekutiv zusammenhängen. Auf diese Weise lässt sich die Korrelation einer Messung an zwei verschränkten Quantenteilchen erklären, ohne dass auf eine rückwärtslaufende Kausalität, ein Zeitloop, den Einfluss eines Beobachters oder einer simultanen Fernübertragung von Information zurückgegriffen werden muss.

Anders als im Holismus der Bohmschen Mechanik hätte die Messinteraktion hier keine Auswirkungen auf ferne Regionen der Welt, sondern würde zu einer Spaltung in mehrere Welten führen, in denen bis auf die lokalen Abweichungen alles gleich bleibt. Um im Beispiel von Schrödingers Katze zu bleiben, die Weichenstellung Katze tot/lebendig führt hier nur zu lokalen Wirkungen, nicht jedoch zu einer Veränderung weit entfernter Weltzustände.

Was die Viele-Welten-Theorie für den Physiker und den Mathematiker attraktiv erscheinen lässt, ist ihre interne Konsistenz und

39 Energie und Masse sind hier entsprechend der Einsteinschen Formel

$E=mc^2$ natürlich als äquivalent und ineinander überführbar zu sehen.

40 Vgl. Joos/Zeh (1984).

Einfachheit. Weder braucht man der Schrödinger-Gleichung weitere Formalismen hinzuzufügen noch wird das objektivistische Weltbild durch eine Beobachterproblematik oder nicht-klassische Kausalitäten gestört.⁴¹

Dem Common Sense unseres Alltagsbewusstseins kommt die Bohrsche Auffassung der komplementären Welle-Teilchen-Beschreibung entgegen, während uns die Idee der Parallelwelten bestenfalls als Science Fiction geeignet erscheint. Aus physikalischer Perspektive kehren sich für Dieter Zeh jedoch die Verhältnisse um:

»Denn während Science Fiction sich über die Naturgesetze hinwegsetzt, sind die Vielen Welten gerade eine Konsequenz der all-gemeinsten und bestgeprüften Gleichung der Physik (der Schrödingergleichung). Um sie zu vermeiden, muß man diese Gleichung willkürlich abändern oder ergänzen, so daß man eigentlich die Kopenhagener Interpretation als Science Fiction bezeichnen müßte.

Die verschiedenen ›Welten‹ der Quantentheorie, die sich aus der Schrödingergleichung ergeben, bilden also eine dynamische Einheit. Sie werden als Konsequenz dieser Dynamik erst näherungsweise unabhängig, wobei sie in scheinbar instantanen Ereignissen (›Quantensprüngen‹) als unabhängige Welten entstehen – wie die Bruchstücke einer kontinuierlich ablaufenden Explosion. Somit ist es auch falsch, der Viele-Welten-Interpretation die Behauptung zu unterstellen, daß alle denkbaren Welten existieren. Nach dieser Vorstellung existieren vielmehr nur solche Welten,

41 Anders als in der Ensemble-Interpretation werden die nicht-lokalen Eigenschaften der ψ -Funktion zwar anerkannt und entsprechend explizit berücksichtigt, bleiben aber dann im Ensemble der Parallelwelten verborgen. In der jeweiligen Einzelwelt erscheinen jedoch nur lokal wirkende Gesetzlichkeiten. »Die nichtlokale Wellenfunktion kann also nicht einfach statistische Korrelationen auf Grund unvollständiger Information (hier über noch nicht gemessene Spinwerte) beschreiben. Da die Detektoren mit den zugehörigen Magnetfeldern zudem beliebig weit voneinander entfernt sein dürfen, wären im Prinzip nur noch mysteriöse, überlichtschnelle Wechselwirkungen zwischen ihnen zur Erklärung möglich (von Einstein, dem nichtlokale Zustände fremd waren, als ›spukhafte Fernwirkung‹ bezeichnet). Es sei daher betont, daß auch die Quantentheorie keine beobachtbaren nichtlokalen oder superluminalen kausalen Einflüsse erlaubt, also insbesondere die kausale Raumzeitstruktur, die durch die Grenzgeschwindigkeit des Lichts definiert wird, respektiert. Sie benötigt aber gar keine Fernwirkungen, da sie bereits nichtlokale Zustände voraussetzt, die ihrerseits die Grundlage der ›Vielen Welten‹ bilden« (Zeh 2010, 22).

die sich deterministisch aus einer bestimmten Anfangsbedingung der universellen Wellenfunktion (z. B. beim Urknall) gemäß der Schrödingergleichung entwickelt haben. Wohlgermerkt gibt es an diesen Konsequenzen überhaupt keinen Zweifel, wenn man die Schrödingergleichung uneingeschränkt akzeptiert, was wie jede Kosmologie eine Hypothese ist. Die von den meisten Physikern vertretenen gegenteiligen Ansichten beruhen dagegen nur auf ihren traditionellen, der klassischen Alltagserfahrung entstammenden pragmatischen Vorstellungen und nicht der empirisch begründeten fundamentalen Theorie.«⁴²

Die Viele-Welten-Interpretation legt nicht *per se* eine bestimmte epistemische Haltung fest. Sie lässt sich sowohl unter einem positivistischen als auch einem realistischen Primat begreifen. Ersterem entsprechend sieht man die Schrödinger-Gleichung als die derzeit einzig akzeptable Rechenvorschrift an, beschäftigt sich dann allerdings nicht mit der Frage, ob es die multiplen Universen ›wirklich‹ gibt. Es reicht hier aus, mit der empirischen Evidenz zu arbeiten, dass es unsere Welt gibt.⁴³ Die anderen Realisierungsmöglichkeiten werden dann hypothetisch einfach mitgeführt, um in konsistenter Weise mit dem Formalismus der Quantentheorie arbeiten zu können.⁴⁴ Der realistischen Perspektive folgend sieht man demgegenüber auch die Parallelwelten als existent an und denkt entsprechend über mögliche

42 Zeh (2010, 5 f.).

43 »Müssen alle ›Welten‹ tatsächlich existieren? Das *müssen* sie sicher nicht. Nur ihre Konsequenzen sowie Argumente der Ökonomie der Beschreibung können über die Berechtigung der Annahme ihrer Existenz entscheiden. Wenn wir innerhalb der Viele-Welten-Vorstellung die Tatsache akzeptieren, daß wir als lokale Beobachter nach dem Eintreten eines Dekohärenzereignisses (etwa bei der Messung eines mikroskopischen Objektes) subjektiv in *einer* der dabei voneinander unabhängig gewordenen Komponenten des Quantenuniversums leben, könnten wir ebensogut auch annehmen, daß alle anderen *von nun an* nicht mehr ›existieren‹ – auch wenn wir im Experiment niemals eine objektive Modifikation der Schrödinger-Gleichung nachweisen können. Dies scheint sogar die ökonomischere Annahme zu sein, für die deswegen oftmals ›Occams Rasiermesser‹ ins Feld geführt wird, mit dem man alles Überflüssige und nicht Nachprüfbares aus unserem Weltbild entfernen soll« (Zeh 2010, 11).

44 Gerade in kosmologischen Anwendungen der Quantentheorie gilt dann oftmals der Befund, dass die Anwendung von Parallelweltensembles die Rechnungen und Modelle einfacher macht als der Versuch, mit individualisierten Universen zu arbeiten. Vgl. Tegmark (1996).

experimentelle Anordnungen nach, welche Hinweise bezüglich deren Existenz sich ergeben könnten.⁴⁵

Ebenso sind verschiedene ontologische Auffassungen mit der Viele-Welten-Theorie vereinbar. Entsprechend einer aristotelischen Sichtweise kann der primäre Referenzrahmen die erfahrbare Welt bleiben, die dann jedoch mit den mathematischen Hilfsmitteln der Schrödinger-Gleichung leichter beherrschbar wird. Hier würde es sich allein schon aus pragmatischen Gründen anbieten, die Dinge nicht komplizierter zu machen, als sie sind. Es hätte keinen Sinn, die Rechnung durch zusätzliche unnötige Postulate zu verkomplizieren, da ja sowie nicht davon auszugehen ist, dass die theoretische Idee mit der erfahrbaren Welt vollkommen in Einklang zu bringen ist.⁴⁶

Im Sinne einer platonischen Betrachtungsweise ließe sich aber auch das Universum mit der mathematischen Idee der Quantentheorie gleichsetzen. Man hätte nun davon ausgehen, dass das Universum gleichsam ein riesiger (Quanten-)Computer sei, der nach dem Formalismus einer noch zu findenden »Theory of Everything«⁴⁷ die Welt errechnet.⁴⁸ Die *Idee* der Theorie und die Wirklichkeit werden hiermit eins. Das, was wir mit unseren Sinnen von der Welt erfahren können, wäre demgegenüber nichts weiter als eine illusionäre Anschauung über die Welt. Den einzigen Ausweg aus dem Gefängnis einer solchermaßen beschränkten Erkenntnis kann aus dieser Perspektive nur die Mathematik liefern, da sich nur mit ihrer Hilfe eine

45 Ein Vorschlag besteht darin, Quantencomputer so zu präparieren, dass sie in verschiedenen Welten gleichzeitig rechnen müssten, wodurch dann indirekt auf die Existenz dieser Welten geschlossen werden könnte. Eine andere Idee beruht auf der Vermutung, dass die Gravitationskraft durch die Parallelwelten dringen könnte und sich entsprechende Effekte zeigen könnten, bzw. wäre dann ggf. sogar eine Kommunikation zwischen zwei Welten möglich, falls es gelingen würde, Gravitationswellen zu generieren und zu detektieren (vgl. Deutsch 1986; und Plaga 1997). All diese Vorschläge können derzeit experimentell (noch) nicht realisiert werden.

46 Dies würde dann etwa auch gegen die Bohmsche Theorie sprechen. Da der Schrödinger-Gleichung mit der Führungsgleichung ein zweiter Formalismus hinzugefügt wird, wird die Rechnung unnötigerweise verkompliziert, ohne dass hierdurch in pragmatischer Hinsicht etwas gewonnen wäre. In der Tat wird die Bohmsche Mechanik sehr schnell sehr kompliziert.

47 Tegmark (2004, 12). Aus Perspektive der theoretischen Physik stellt sich hier vor allem das Problem, wie die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenfeldtheorie verbunden werden kann.

48 Siehe etwa Lloyd (2005).

formale Abstraktion gewinnen lässt, die den Common-Sense-Bereich unserer Alltagserfahrungen überwinden kann.⁴⁹

Unabhängig wie man nun epistemisch oder ontologisch zur Viele-Welten-Theorie steht, aus Perspektive der Physik besteht ihr Charme darin, dass sie konzeptionell recht einfach ist und durch die Auslagerung des Zufalls in die vermeintlich subjektive Sphäre des Bewusstseins all jenen unangenehmen Problemen aus dem Weg geht, die sich aus einer Einbeziehung des Beobachters in das Kalkül ergeben würden. In diesem Sinne lässt sich dann auch Tegmarks Alternative

- 49 Hier das emphatische Plädoyer von Tegmark für das platonische Paradigma: »Yet there is a still deeper underlying question: there are two tenable but diametrically opposed paradigms regarding physical reality and the status of mathematics, a dichotomy that arguably goes as far back as Plato and Aristotle, and the question is which one is correct. ARISTOTELIAN PARADIGM: The subjectively perceived frog perspective is physically real, and the bird perspective and all its mathematical language is merely a useful approximation. PLATONIC PARADIGM: The bird perspective (the mathematical structure) is physically real, and the frog perspective and all the human language we use to describe it is merely a useful approximation for describing our subjective perceptions. What is more basic – the frog perspective or the bird perspective? What is more basic – human language or mathematical language? Your answer will determine how you feel about parallel universes. If you prefer the Platonic paradigm, you should find multiverses natural, since our feeling that say the Level III multiverse is ›weird‹ merely reflects that the frog and bird perspectives are extremely different. We break the symmetry by calling the latter weird because we were all indoctrinated with the Aristotelian paradigm as children, long before we even heard of mathematics – the Platonic view is an acquired taste! In the second (Platonic) case, all of physics is ultimately a mathematics problem, since an infinitely intelligent mathematician given the fundamental equations of the cosmos could in principle compute the frog perspective, i.e., compute what self-aware observers the universe would contain, what they would perceive, and what language they would invent to describe their perceptions to one another. In other words, there is a ›Theory of Everything‹ (TOE) at the top of the tree [...] whose axioms are purely mathematical, since postulates in English regarding interpretation would be derivable and thus redundant. In the Aristotelian paradigm, on the other hand, there can never be a TOE, since one is ultimately just explaining certain verbal statements by other verbal statements – this is known as the infinite regress problem« (Tegmark 1996, 11).

›viele Worte‹ oder ›viele Welten‹ und seine eindeutige Präferenz für Letzteres nachvollziehen.⁵⁰

Auch physikalisch konzeptionell lässt sich die Idee der Multiversen – so bizarr sie auf den ersten Blick auch anmutet – recht einfach und ohne größere gedankliche Akrobatik vorstellen. Unser Alltagsdenken ist bereits darauf angelegt, alternative realistische Geschichten als Optionen vergangener Entscheidungssituationen mitzuführen.⁵¹ ›Als ob‹- und ›was wäre, wenn‹-Figuren stellen längst vertraute Semantiken dar, die wir alltäglich nutzen, um in unseren Narrativen fiktive Wirklichkeiten zu generieren.⁵² Nicht nur aus mathematischen Gründen, sondern auch in Hinblick auf ihre semantisch recht einfache physikalisch konzeptionelle Seite stellt die Viele-Welten-Interpretation eine durchaus anschlussfähige Theorieoption dar. Während man nur schwerlich eine Anschauung von einer Bohmschen Mechanik gewinnen kann, in der Teilchen keine individuierbaren Eigenschaften mehr besitzen und stattdessen in eine implizite Ordnung eines holistischen Universums eingebettet sind, zeichnen sich die Everettschen Welten weiterhin durch die uns vertrauten klassischen Eigenschaften aus.

Die Viele-Welten-Theorie kann all dies leisten, jedoch ist hierfür ein sehr hoher Preis zu zahlen. Sie muss einen wesentlichen Aspekt quantenphysikalischer Experimente in die Subjektivität der vermeintlichen Beobachter verschieben. Sie führt gleichsam zu einem absolu-

50 »We have seen that a common feature of all four multiverse levels is that the simplest and arguably most elegant theory involves parallel universes by default, and that one needs to complicate the theory by adding experimentally unsupported processes and ad hoc postulates (finite space, wavefunction collapse, ontological asymmetry, etc.) to explain away the parallel universes. Our aesthetic judgement therefore comes down to what we find more wasteful and inelegant: many worlds or many words. Perhaps we will gradually get more used to the weird ways of our cosmos, and even find its strangeness to be part of its charm« (Tegmark 1996, 18). Siehe auch Tegmark (1997).

51 Wir begegnen hier jener eigentümlichen Semantik des Entscheidens, entsprechend der die Vergangenheit ein Reservoir alternativer Weltoptionen beherbergt, während die Zukunft durch die Entscheidung auf einen einzelnen Pfad festgelegt wird. Vgl. Luhmann (2000b, 123-182).

52 Die Wahrscheinlichkeitsrechnung erzeugt per se eine Verdoppelung der Wirklichkeitsbeschreibung und lässt sich entsprechend einerseits als eine Fiktion auffassen, die vieles mit literarischen Gattungen gemein hat, sich dann aber von diesen in Hinblick auf den Charakter der Realitätskonstruktion dahingehend unterscheidet, als dass sie als wissenschaftliche Fiktion sozusagen eine realere Fiktion darstellt. Vgl. Esposito (2007).

ten subjektivistischen Zufall, dem nun eine ebenso absolut zu verstehende objektivistische Welt unvereinbar gegenübersteht. Wenngleich mit dem hohen Anspruch angetreten, auf den störenden Schnitt in die Welt verzichten zu können, den die Kopenhagener Deutung in die Physik einführt, wird hier der Riss in der Welt über die Totalisierung der Subjekt-Objekt-Dichotomie fast noch radikaler zementiert.

Die lokale Kausalität und der Determinismus der physikalischen Welt werden hier gerettet, indem Kontingenz und Zufall als eine Illusion subjektiver Beobachter denunziert werden. *Nolens volens* begegnen wir hier der Paradoxie, dass die Tatsache der subjektiven Beobachtung und damit der Relativität des gewählten Referenzpunktes zugleich vorausgesetzt wie auch negiert werden muss. Auch der Viele-Welten-Theoretiker hat nichts anderes zur Verfügung als die Daten einer erlebten Welt, die sich dann jedoch fälschlicherweise nur als einer Welt zugehörig zeigen. Die vermeintlich eindeutige Trennung zwischen einem subjektiven Bereich, wo der Zufall herrscht, und einer objektiven Welt, in der die Wellenfunktion des Universums in deterministischer Manier das Weltverhalten darstellt, kollabiert hiermit. Auch wenn es formal abgestritten wird, treten also auch in der Viele-Welten-Theorie zirkuläre Begründungsverhältnisse auf.

Innerhalb der Theoriediskussion der Quantenphysik ist dieses Dilemma durchaus bekannt und wird unter dem Stichwort ›*preferred basis problem*‹ diskutiert. Im Prinzip handelt es sich hierbei um die Frage, wie in einer Welt, in der ja alles miteinander verschränkt gesehen werden kann, die Trennlinie zwischen der Superposition zweier Quantenzustände und der Trennung in zwei alternative Welten *gesetzt* werden kann. Beispielsweise können beim Doppelspaltexperiment die beiden Wegalternativen ›rechter Spalt‹ und ›linker Spalt‹ solange einer Welt zugehörig betrachtet werden, bis eine Messung die Weginformation bestimmt. Entsprechend der Everett-Theorie würde hier eine Spaltung in zwei Welten eintreten müssen, die dann beide als real zu betrachten sind. Eine Messung – so die übliche Hilfsannahme – würde jetzt sozusagen eine Verschränkung auflösen und zu zwei klassischen Zuständen in zwei unterschiedlichen Welten führen.⁵³

Die Dekohärenz von Quantenzuständen durch Interaktionen mit anderen physikalischen Systemen ist zwar empirisch vielfältig bestätigt,⁵⁴ der Übergang zur klassischen Welt lässt sich jedoch nicht allein auf der hier vorgeschlagenen Basis erklären. Wenn man nämlich die Messinstrumente jetzt ebenfalls auf Basis der Schrödinger-Gleichung beschreiben würde, ergibt sich mit der Messinteraktion

53 So dann etwa Deutsch (1985), der das *preferred basis problem* unter anderem mit Hilfe dem Prinzip der *decoherence* erklärt.

54 Vgl. Joos und Zeh (1984).

eine weitere Superposition, also wiederum ein gemischter Zustand, der nicht in eine scharfe klassische Lösung einrastet, sondern irgendwie verschmiert wäre. Um diesen Zustand zu bestimmen, bedürfte es wiederum einer Messinteraktion. Letztere wäre aber wiederum ein Quantenzustand, der entsprechend definiert werden müsste. Auf diese Weise kommen wir – insofern wir weiterhin von einer universell gültigen *Schrödinger-Gleichung* ausgehen, zu einem infiniten Regress, der jedoch nicht zur Ausflagung realer Welten, sondern sukzessive von einem gemischten Zustand zu einem anderen verschmierten Zustand führt.⁵⁵

Der Viele-Welten-Theorie bleibt an dieser Stelle nichts anderes übrig, als die Wahl der Basis in die Subjektivität irgendeines Beobachters zu legen, was dann jedoch eine Vielzahl anderer Probleme nach sich zieht. Angefangen beim Solipsismusproblem, über die Auseinandersetzung darüber, ob verschiedene Beobachter miteinander verschränkt sein können, bis hin zur Frage, ob man sich auch Tierkollektive als Beobachter vorzustellen habe, die an der Produktion sich teilender Welten beteiligt sind,⁵⁶ bleibt die Frage des Beobachters virulent. Das ausgeschlossene Dritte tritt unweigerlich wieder in das Kalkül mit ein.

Das Bezugsproblem der Kopenhagener Deutung wird hier gleichsam an eine Stelle verschoben, die für den praktischen Physiker zunächst unproblematisch erscheint, da die Psyche nicht sein Forschungsgegenstand ist. Der mit der Beobachtung erfolgende Schnitt findet jetzt gleichsam außerhalb – meta – der Physik statt. Dieser Trick kann die Deutungsproblematik jedoch nicht wirklich beruhi-

55 Siehe zu einer ausführlichen Kritik an der Everettschen Position in Hinblick auf das *preferred basis problem* Stapp (2002).

56 Siehe zur Illustration Barret: »The preferred basis problem is arguably a more serious problem for a splitting-worlds reading of Everett. In order to explain our determinate measurement records, the theory requires one to choose a preferred basis so that observers have determinate records (or determinate experiences) in each term of the quantum-mechanical state as expressed in this basis. The problem is that not just any basis will do this. Making the total angular momentum of all the sheep in Austria determinate by choosing such a preferred basis to tell us when worlds split, would presumably do little to account for the determinate memory I have concerning what I just typed. But this is the problem, we do not really know what basis would make our most immediately accessible physical records, those records that determine our experiences and beliefs, determinate in every world. The problem of choosing which observable to make determinate is known as the preferred-basis problem« (Barret 2011).

gen, da hierdurch streng genommen der Anspruch auf eine monistische Erklärung der Welt aufgegeben werden muss, denn das Subjekt, mit dem der Schnitt erfolgt, erscheint jetzt nicht mehr als Teil der physikalischen Welt. Auch hier begegnen wir nur einer Problemverschiebung, finden also keine Lösung des Deutungsproblems der Quantentheorie vor.

4 Entfaltungen der Paradoxie einer nicht-klassischen Theorie

In den vorangehenden Ausführungen wurden drei Alternativen zur Kopenhagener Deutung der Quantentheorie vorgestellt. Sie bauen alle auf dem mathematischen Formalismus der Schrödinger-Gleichung auf, entwickeln aber jeweils einen eigenständigen konzeptuellen Rahmen und verwerfen die physikalisch-anschauliche Intuition der Kopenhagener Deutung, dass die Messbeobachtung den Kollaps der Wellenfunktion bewirke und auf diese Weise eine Welt von Tendenzen und Möglichkeiten in die klassischen Wirklichkeiten definiter Zustände überführe.

Die Ensemble-Theorie geht vom Teilchenbild als ontologischer Basis aus, um mit Hilfe statistischer Überlegungen den Beobachter zu bannen. Die Wahrscheinlichkeiten der ψ -Funktion erscheinen jetzt als objektive Eigenschaften streuender Teilchen. Das Dilemma bleibt jedoch, dass diese Ensembles in Hinblick auf konjugierte Wahrscheinlichkeiten miteinander verschränkt sind, also eine Beziehung angenommen werden muss, welche die in der klassischen Beschreibung vorausgesetzte Individualität der beteiligten Teilchen wieder infrage stellt.

Die Bohmsche Mechanik wählt einen ontologischen Ausgangspunkt, entsprechend dem sowohl die Teilchen als auch die sie steuernde Führungswelle als ›real‹ betrachtet werden. Die konsequente Durchführung dieser Idee führt zu einem holistischen Universum, entsprechend dem die Eigenschaften von Teilchen als hochgradig kontextualisiert, das heißt auf nicht-lokale Weise mit dem gesamten Universum verbunden sind.

Die Viele-Welten-Theorie geht demgegenüber vom ontologischen Primat der durch die Schrödinger-Gleichung aufgespannten Wellenfunktion aus. Das Wahrscheinlichkeitskalkül wird hiermit aus der objektiven physikalischen Beschreibung getilgt, tritt allerdings als ausgeschlossenes Drittes über das Postulat des subjektiven Zufalls wieder in die Welt mit ein. Ebenso schleicht sich der ausgeschlosse-

ne Beobachter über das Problem der zu wählenden Basis erneut ins physikalische Kalkül.

Alle drei vorgestellten Alternativen zeigen sich hiermit als eine Entfaltung der Paradoxien einer nicht-klassischen Theorieanlage. Der eigenwillige Charakter der Quantentheorie wird hier also mehr bestätigt denn beruhigend in klassische Gefilde überführt.

Die Ensemble-Theorie sucht nach klassischen Kausalitäten und gelangt zu konjugierten komplexen Wahrscheinlichkeitsbedingungen. Die Suche nach lokalen Kausalitäten führt zur Notwendigkeit einer translokalen Betrachtungsweise (vollends deutlich wurde dies mit den experimentellen Studien zum Bell-Theorem; siehe Kapitel III.1).

Die Viele-Welten-Theorie sucht die Rückkehr zu einer objektivistischen Beschreibung der Physik. Doch sie reifiziert damit nur die Rolle des Beobachters, indem sie erneut den Schnitt zwischen der klassischen Welt und der Quantenwelt legen muss.

Die Bohmsche Mechanik sucht den Realismus und begegnet einer holistischen Weltdynamik, die jeglicher Vorstellungskraft spottet und bestenfalls noch mit transzendenten Begriffen umschrieben werden kann.

Sowohl die Ensemble-Interpretation als auch die Viele-Welten-Theorie verwenden klassische physikalisch-konzeptionelle Anschauungsweisen. Selbstreferenz kommt hier als Theoriefigur nicht vor. Inwieweit die Bohmsche Mechanik in der Lage ist, einen anderen epistemischen Zugang zu bieten, kann an dieser Stelle nicht überprüft werden, da hierfür tiefer auf die Fortentwicklungen und Potenziale dieser Theorie eingegangen werden müsste.

Als Soziologen sind wir nicht gezwungen, in epistemischer oder ontologischer Hinsicht Partei zu ergreifen, sondern können abstrahierend auf die Theoriebewegungen schauen. Wir sehen, dass die Versuche einer Begründung der Quantentheorie auf Basis festgezurrt ontologischer Prämissen zu Paradoxien führen. Wir vermuten an dieser Stelle, dass dies mit der Charakteristik und der Theoriebauweise der Quantentheorie selbst zu tun hat. Wir nehmen an, dass dies in ihrer Theoriearchitektur gegründet ist, nämlich darin, dass sie selbstreferentiell und damit paradox gebaut ist. Wir vermuten ferner, dass dies keinen Mangel darstellt, sondern erst auf diese Weise eine hinreichende Auflösungsfähigkeit möglich wird, um komplexe physikalische Realitäten angemessen modellieren zu können.

Bevor wir diesen Vermutungen ausführlicher nachgehen können (in Kapitel VII), lohnt es sich, zunächst etwas ausführlicher auf jene Ergebnisse aus der Experimentalphysik einzugehen. Diese sind für die Interpretation und das gegenwärtige Verständnis der Quantenphysik von hoher Relevanz und haben die Mehrzahl der Physiker letztlich

dazu gebracht, den nicht-klassischen Charakter der Quantentheorie als Grundlage des modernen Physikverständnisses anzuerkennen.

Hiermit verlagert sich mehr und mehr das Bezugsproblem der Physiker. Nicht mehr die Quantenwelt, sondern das Erscheinen von Objekten, die den Gesetzen der klassischen Physik folgen, erscheint jetzt erklärungsbedürftig. Im anschließenden Kapitel werden einige aktuellere Varianten der Interpretation der Quantentheorie vorgestellt, die sich daran abarbeiten, den Übergang zwischen der Quantenwelt und der klassischen Welt erklären zu können.

III NORMALISIERUNG – QUANTENTHEORIE UND EXPERIMENTALPHYSIK

Die Entwicklung und Rekonsolidierung der Quantentheorie beruht auf einem engen Wechselspiel von Experimentalphysik, theoretischer Physik und Mathematik. Die vorangehenden Ausführungen haben gezeigt, dass es fruchtbar sein kann, die mathematische Formentwicklung und die physikalische Theoriebildung als zwei getrennte Sphären anzusehen, die sich mit- und gegeneinander ausdifferenziert haben. Die Mathematik ist zu einer eigenen Wissenschaft geworden, die gerade aufgrund ihrer Abstraktion und der hiermit verbundenen Lösung von empirischen Lagen einen nahezu unendlichen Formenreichtum zur Verfügung stellen kann. Gerade von der Realitätsferne der Mathematik kann jedoch wiederum eine theoretische Physik profitieren, die in Hinblick auf ihre physikalischen Anschauungen nicht mehr weiterkommt. Physiker sind deshalb gut beraten, es erst mal mit Formen auszuprobieren, die im Rahmen ihrer Weltmodelle zunächst noch keinen Sinn ergeben, jedoch – weil sie im Einklang mit den empirischen Daten stehen – aufzeigen, wohin eine physikalische Theorieentwicklung gehen könnte. Sowohl die Heisenbergsche Matrizenmechanik als auch die in Hinblick auf ihren epistemischen und ontologischen Status schwer deutbare ψ -Funktion der Schrödinger-Gleichung sind höchst erfolgreiche Beispiele einer Theorieentwicklung, in der die mathematische Intuition dem konzeptionellen physikalischen Verstehen weit vorangehen kann. Sei es der Kollaps der Wellenfunktion in der Kopenhagener Deutung, der Holismus der Bohmschen Mechanik, Everetts Viele-Welten-Theorie oder die Rückkehr zur klassischen Physik in der Ensemble-Interpretation: Die Debatte um die physikalische Deutung der Quantentheorie ist Jahrzehnte nach ihrer mathematischen Ausformulierung noch nicht entschieden.

Wenngleich mit v. Neumann zunächst die »Machtübernahme der Mathematik in der Quantentheorie« gelang,¹ bedeutet dies jedoch keineswegs, dass für die weitere Theorieentwicklung die Fragen nach der physikalischen Anschauung und der Deutung von Quantenprozessen unerheblich geworden sind. Auch wenn Physiker in ihrer Selbstbeschreibung oftmals dazu neigen, die Bedeutung nicht-ma-

1 v. Weizsäcker (1994, 511).

thematischer konzeptioneller Vorstellungen herunterzuspielen, lässt sich deutlich zeigen, dass auch in der Quantenphysik wesentliche Fortschritte der Experimentalphysik darauf beruhen, dass man den ontologischen und epistemologischen Prämissen folgt, welche sich aus einer bestimmten Interpretation der Quantentheorie ergeben.

Während also die Zuflucht zu einer reinen Mathematik als Antwort auf das Bezugsproblem einer tiefgehenden »Krise der theoretischen Physik«² verstanden werden kann, bleibt das Pendel nicht stehen, sondern wendet sich erneut in Richtung physikalisch-konzeptioneller Verständnisweisen. Fragen der Deutung und Anschauung führen zu neuen Experimenten, die dann wiederum weitergehende theoretische Fragen aufwerfen. Originär physikalisches Denken gewinnt hiermit wieder mehr Bedeutung innerhalb der Quantentheorie. Physikalisch-konzeptionelle Anschauungen und eine hierdurch inspirierte Theoriebildung führen jetzt zu einer Reihe interessanter abgeleiteter Hypothesen, die in ein empirisches Untersuchungsdesign überführt werden können.

In diesem Kapitel wird es vor allem darum gehen, einige für unser Thema relevante Pfade der Experimentalphysik etwas genauer nachzuzeichnen.

Wir beginnen mit dem *Bell-Theorem*, mit dem die Frage der Nicht-Lokalität und der impliziten Variablen auf den Prüfstand kommt.

Anschließend beschäftigen wir uns mit der von Richard Feynman ausformulierten *Quantenelektrodynamik*, da hier Experimentalphysik und physikalische Anschauung in einer außergewöhnlichen Weise zusammenfinden. Die Physik findet hier zu einer neuartigen Beziehung zwischen Theoriebildung und Anschauung.

Drittens gehen wir mit dem *Casimir-Effekt* und dem *Aharonov-Bohm-Effekt* auf zwei eigenartige Feldeigenschaften ein, die dazu auffordern, in Bezug auf Quantenobjekte das Verhältnis von mathematischer Modellierung und physikalischem Realismus neu zu konfigurieren.

Darüber hinaus hat die neuere Experimentalphysik einige Varianten des *Doppelspaltexperimentes* entwickelt, die neues Licht auf das Messproblem werfen. Zu nennen sind etwa Experimente zur Gewinnung und Löschung von *Weg-Informationen* bei Quantenobjekten, aber auch Studien mit größeren Quantenobjekten, etwa den *Fullerenen*.

Abschließend ist ausführlicher auf einige makroskopische Quantenphänomene wie die *Supraleitung*, die *Suprafluidität* sowie den *Quanten-Hall-Effekt* einzugehen, da sich aus diesen Forschungsfeldern eine Reihe von Einsichten in die Quantentheorie aus dem Blickwinkel der *Emergenz* kollektiver Zustände ergeben. Hier wird

2 Einstein (1922).

zudem deutlich, wie aus anderen Zweigen der Experimentalphysik eine eigenständige, neuartige Auslegung und Interpretation der Quantentheorie erwachsen kann.

I Die Bellsche Ungleichung und das Aspect-Experiment: Reale Verschränkung oder beobachterabhängige Kausalität

Mit dem Bell-Theorem wird es möglich, die Frage, ob die Quantentheorie eine klassische Theorie darstellt, in eine empirisch überprüfbare Hypothese zu überführen. Eine theoretische Physik, die aufgrund der mathematischen Modellierung zu dem Schluss kommt, dass bestimmte Axiome der klassischen Physik aufgegeben oder abgeschwächt werden müssen, trifft jetzt auf eine Experimentalphysik, die sich überlegt, wie die theoretischen Konsequenzen in ein Untersuchungsdesign umgesetzt werden können, das die Falsifikation der abgeleiteten Hypothesen erlaubt, also damit im Code der Wissenschaft zwischen wahren und falschen Aussagen unterscheiden lässt. Die theoretische Validierung der Quantentheorie als nicht-klassische Theorie durch die Mathematik (Was folgt aus dem Formalismus?) tritt jetzt in Interaktion mit einer experimentellen Validierung (Was zeigt das Experiment?). Das Deutungsproblem wird damit auch zu einer empirischen Frage und verlässt den Bereich rein metaphysischer Spekulation.

Was besagt nun das Bell-Theorem? Im Prinzip sind nach dem Formalismus der Quantentheorie zwei Teilchen, die irgendwann miteinander in Wechselwirkung standen und hierdurch quantenmechanisch verschränkt wurden, nun aber räumlich getrennt sind, weiterhin als durch eine nicht-lokale Fernwirkung miteinander verbunden zu betrachten. Wie bereits geschildert, formulierten Einstein, Podolsky und Rosen 1935 den berühmten Einwand, dass die Quantenverschränkung zur Verletzung des klassischen Prinzips der lokalen Wirkungen führen müsse. Einstein sprach hier in polemischer Form von einer »spukhaften Fernwirkung« und hielt nicht zuletzt aus diesem Grunde die Quantentheorie in der vorliegenden Form für eine unbefriedigende und unvollständige Beschreibung der Wirklichkeit.

John S. Bell, der als Experimentalphysiker am CERN arbeitete, entwickelte 1964 mit dem Bell-Theorem ein mathematisches Kriterium, nach dem die im ERP-Paradoxon formulierten Phänomene in ein empirisches Untersuchungsdesign überführt werden konnten.³

3 Vgl. Bell (1964).

Bell fand es unbefriedigend, den epistemischen Status von Quantenobjekten mit der Kopenhagener Deutung im Ungewissen zu lassen und zudem die Paradoxien des Messproblems hinnehmen zu müssen. Mit der Bohmschen Mechanik entdeckte er eine in sich schlüssige Alternative, in der auch in der Quantenwelt von Objekten (so genannten ›beables‹) ausgegangen wird, denen ein klar definierter ontologischer Status zugeschrieben werden kann. Als Experimentalphysiker suchte er zudem einen Weg, die unterschiedlichen Interpretationen in ein testbares Untersuchungsdesign zu überführen. Die Bohmsche Mechanik postuliert nicht-lokale Wechselwirkungen, die innerhalb der Ensemble-Theorie ausgeschlossen sind und von Einstein als absurde Annahmen gekennzeichnet wurden. Bell gelang es nun, auf Basis einfacher statistischer Überlegungen ein Kriterium zu entwickeln, mit dem sich experimentell entscheiden lässt, ob die Daten aus einem quantenmechanischen Experiment mit einer bestimmten Art von Interpretation in Übereinstimmung stehen können.

Die *Bellsche Ungleichung* formuliert eine Grenze der Mittelwerte von Messergebnissen, deren Überschreitung aufzeigt, dass die zugrunde liegende Theorie nicht mehr als *lokal* und *real* gelten kann. Als ›real‹ wird dabei eine physikalische Theorie angesehen, wenn bei einer Messung jeweils nur eine Eigenschaft festgestellt werden kann, die auch *ohne* die Messung feststehen würde und dies für jede denkbare Messung gilt.⁴ Als ›lokal‹ wird eine physikalische Theorie betrachtet, wenn sich bei zwei räumlich getrennten Sachverhalten die Bestimmung des einen nicht zeitgleich auf den jeweils anderen Sachverhalt auswirkt.

Stellen wir uns zum Beispiel vor, man hat jeweils Paare von zwei Kugeln, die ein dreifarbiges Streifenmuster haben, welches aus einer Auswahl aus den Farben Gelb, Violett, Blau, Orange, Grün und Rot gebildet wird. Wir nehmen weiterhin an, dass die Farbkombinationen in der Weise verschränkt sind, dass das Erscheinen einer Farbe bei der einen Kugel jeweils mit der Komplementärfarbe einer zweiten Kugel einhergeht. Rot bei Kugel 1 führt zu Grün bei Kugel 2 etc. In einer klassischen und lokalen Theorie besitzen die Kugeln vor der Messung schon ihre Farbe (*realistische* Beschreibung). Zudem verändert die Messung an einer Kugel nicht die Farbe der jeweils anderen. Falls eine Messung an Kugel 1 diese in einer bestimmten Farbe anmalen würde, so könnte dieser lokale Einfluss nicht die Eigenschaften der zweiten Kugel verändern. Entsprechend der mit der Quantentheorie gegebenen Verschränkungsregel würde sich die

4 Dies schließt allerdings nicht aus, dass wir die jeweiligen Werte aufgrund unserer mangelnden Kenntnis verborgener Parameter nicht vorhersagen können.

Sachlage jedoch anders darstellen müssen. Entweder würde die Farbe vor der Messung noch gar nicht bestehen (Kopenhagener Deutung) oder die Messung an einem Objekt verändert simultan den Zustand am konjugierten Objekt (Bohmsche Mechanik).

In Bezug auf die Verteilung der Messergebnisse führen die klassische und die quantenphysikalische Theorie in Hinblick auf die Statistik der Merkmalskombination zu einer anderen Wahrscheinlichkeitsverteilung.⁵ Dies wird durch die Bellsche Ungleichung ausgedrückt. Sie formuliert eine untere Schranke für die Mittelwerte von Messgrößen verschränkter Quantenteilchen. Hierdurch lässt sich experimentell entscheiden, ob die Beziehung zwischen den konjugierten Teilchen auf klassische Weise durch verdeckte Variablen erklärt werden kann (die Eigenschaften der verbundenen Teilchen sind dann als schon zuvor durch verborgene Variablen programmiert zu sehen) oder ob nicht-klassische Quanteneffekte angenommen werden müssen.

1982 gelang Alain Aspect mit seiner Arbeitsgruppe zum ersten Mal ein Experiment, mit dem das EPR-Gedankenexperiment auf Basis der Bellschen Ungleichung umgesetzt werden konnte.⁶ Entgegen Einsteins Annahme konnten hier und in folgenden Experimenten die Vorhersagen zugunsten der Quantentheorie bestätigt werden.⁷

5 Siehe zu einer anschaulichen Herleitung des Bell-Theorems Greene (2008, 132 ff.).

6 Aspect (1982)

7 Man kann solche Experimente gut über die Verschränkung von Spinzuständen realisieren. »Betrachten wir das einfachste Beispiel, die Verschränkung der Spinzustände zweier Elektronen (oder Photonen), die zusammen von einer Quelle ausgesandt werden und sich dann in entgegengesetzte Richtungen voneinander entfernen. Der Spin mikrophysikalischer Objekte ist eine Art Eigendrehimpuls. Der Spin der Elektronen kann prinzipiell nur zwei Werte annehmen, »Spin plus« und »Spin minus«. Im verschränkten System der zwei Elektronen hat jedoch keines der beiden Elektronen für sich einen bestimmten Spinwert. Der Gesamtzustand des Zwei-Elektronen-Systems ist eine Superposition der Korrelationen »erstes Objekt Spin plus und zweites Objekt Spin minus« mit »erstes Objekt Spin minus und zweites Objekt Spin plus« in jeder Richtung.

Daraus folgt: Sobald eines der beiden Objekte einen definierten Wert des Spins in einer Raumrichtung annimmt – etwa bei einer Messung, deren Ergebnis entweder »Spin plus« oder »Spin minus« ergibt –, erhält das andere Objekt augenblicklich den entgegengesetzten Spinwert in dieser Raumrichtung, und zwar unabhängig davon, wie weit die beiden Objekte voneinander entfernt sind. Diese inzwischen vielfach gemessenen Beziehungen sind als Einstein-Podolsky-Rosen- oder EPR-Korrelationen bekannt (Esfeld 2011, 54 f.).

Ausgehend von einer Affinität zur konzeptionellen Grundidee der Bohmschen Mechanik entwickelte sich über das Bellsche Kriterium eine Experimentalphysik, welche auch die wunderlichen Annahmen der Quantenphysik auf den Prüfstand stellt. Hiermit kommt die Diskussion um die Interpretation der Quantenmechanik in Bewegung. Eine Ensemble-Theorie, welche auf klassischen statistischen Überlegungen beruht, kann in der Physik jetzt als ›widerlegt‹ betrachtet werden. Darüber hinausgehend erlaubt das Bellsche Theorem jedoch nicht, zwischen dem Geltungsbereich der Bohmschen Mechanik, der Kopenhagener Interpretation oder der Viele-Welten-Theorie zu unterscheiden. Allgemein herrscht unter den Physikern nun zwar Konsens, dass die Quantenphysik nicht gleichzeitig eine realistische *und* eine lokale Theorie darstellen kann. Wo aber hier genau der epistemische Schnitt zu legen ist – in der Beobachterwirkung, in der Aufspaltung in Parallelwelten, in einer zeitlich rückwärts laufenden Kausalität, einer sich simultan ausbreitenden Fernwirkung oder anderen dem Common Sense widersprechenden Mechanismen –, ist hierdurch nicht entschieden.

Bells Arbeiten und deren Umsetzung durch Aspect bilden aber insofern einen wichtigen Knotenpunkt in der Theorieentwicklung der Quantenmechanik, als hiermit offenbar wird, dass die merkwürdigen Eigenschaften dieser Theorieanlage nicht allein ein mathematisches Artefakt darstellen, sondern einem wie auch immer gearteten Dialog mit der Natur geschuldet sind. Die Frage um die Interpretation der Quantenmechanik wird hiermit nicht nur erneut virulent, sondern wird zugleich in eine Experimentalphysik eingespeist, der es mit den in den 80er-Jahren rasant entwickelten technischen Möglichkeiten zunehmend gelingt, auch absonderliche quantenphysikalische Thesen in empirische Fragestellungen zu überführen.

Mit Blick auf unsere Rekonstruktion der Theorieentwicklung der Quantenmechanik lässt sich an dieser Stelle jedoch festhalten, dass die Experimente zum Bell-Theorem in Hinblick auf den physikalischen Status der Quantentheorie einen wichtigen Wendepunkt darstellen, mit dem der nicht-klassische Charakter der Quantentheorie gleichsam zementiert wird.⁸ Eine bizarre Theorie zeigt jetzt im Experiment Befunde, welche die zuvor unter vielen Physikern als absurd betrachteten Konsequenzen dieser Theorie bestätigen. Experimentalphysik und theoretische Physik finden jetzt zu einem gemeinsamen Tanz, der die hochgradig unanschauliche Quantentheorie als Universaltheorie der Physik in Stellung bringt.

8 Dies hat dann auch Konsequenzen für die philosophische und wissenschaftstheoretische Reflexion der Quantentheorie. Vgl. Cushing/McMullin (1989).

2 Die Quantenelektrodynamik: Diagrammatische Anschaulichkeit

An dieser Stelle lohnt es sich, etwas ausführlicher auf die Entwicklung der Quantenelektrodynamik einzugehen (im folgenden QED), die wesentlich durch die Arbeiten von Richard Feynman geprägt wurde, denn hier finden physikalisch konzeptionelle Anschauung und Experimentalphysik auf eine neue Weise zueinander. Die Physik scheint hier ihre Anschaulichkeit wiederzugewinnen. Beim zweiten Blick wird aber deutlich, dass dies mit einem veränderten Verständnis von Theorie einhergeht, das streng genommen kaum mehr etwas mit den Anschauungen der klassischen Physik gemein hat.

Die QED leistet eine quantentheoretische Beschreibung von elektromagnetischen Feldern, wodurch sich die Anwendung der Quantentheorie auf eine Vielzahl von Phänomenen ausdehnen lässt. Was an dieser Stelle die Beschäftigung mit der QED interessant macht, ist zum einen ihre eindrucksvolle empirisch experimentelle Leistungsfähigkeit, zum anderen die Art und Weise, wie Anschauung und mathematische Intuition hier miteinander kombiniert werden. Ersteres wird zum Beispiel deutlich bei der Bestimmung des magnetischen Moments von Elektronen. Die QED postuliert, dass Elektronen spontan Lichtquanten aussenden und wieder absorbieren können, wodurch sich jedoch ihre magnetischen Eigenschaften etwas verändern. Die sich hiermit ergebende Abweichung von einem Normwert lässt sich sowohl theoretisch berechnen als auch experimentell bestimmen. Mittlerweile stimmen beide Werte auf 7 Stellen nach dem Komma miteinander überein.⁹

9 »Mittlerweile hat sich die Theorie der Quantenelektrodynamik mehr als fünfzig Jahre lang gehalten und ist über einen immer größeren Anwendungsbereich auf immer größere Genauigkeit getestet worden. Und so kann ich heute die stolze Behauptung wagen, daß zwischen Experiment und Theorie kein signifikanter Unterschied mehr besteht!

Damit Sie sich eine Vorstellung davon machen können wie die Theorie durch die Mangel gedreht wurde, möchte ich ein paar Zahlen aus jüngster Zeit anführen: Den Experimenten nach liegt Diracs Zahl bei 1,00115965221 (mit einer Unsicherheit von 4 in der letzten Dezimalstelle), der Theorie nach bei 1,0011596246 (mit einer rund fünfmal so großen Unsicherheit). Das bedeutet, um diese Zahlen etwas anschaulicher für Sie zu machen, etwa, daß Sie die Entfernung von Los Angeles nach New York bis auf Haaresbreite genau messen können« (Feynman 2010, 17).

Der Grundgedanke der QED besteht darin, dass Teilchen, seien es Elektronen oder Photonen, nicht nur einen Weg nehmen, um von einem Punkt a nach Punkt b zu gelangen, sondern verschiedene, möglicherweise gar unendlich viele Pfade *gleichzeitig* durchlaufen, um ein beobachtbares Ergebnis zu realisieren. Zugleich realisierte Wege treten dabei jedoch in eine Interferenzbeziehung ein, sodass sie sich in ihrer Konsequenz oftmals wieder auslöschen. Die QED folgt damit der Grundintuition der Schrödinger-Gleichung. Sie fasst das elektrodynamische Feld konsequent als einen unendlich dimensionierten Vektorraum auf (›Hilbertraum‹), in dem eine Vielzahl von Phasenbeziehungen zur Geltung kommen und entsprechend mit berücksichtigt werden müssen. Allgemein werden Feynmans Arbeiten eher nicht als eine eigenständige Interpretation der Quantenmechanik aufgefasst, sondern als eine Weiterentwicklung derselben zu einer allgemeinen Quantenfeldtheorie, mittels der sich auch die in Feldern anzutreffenden Dynamiken quantentheoretisch untersuchen lassen. Dennoch lässt sich die QED durchaus auch als eine eigenständige Interpretation der Quantentheorie betrachten. Sie entwickelt mit den Feynman-Diagrammen eine eigene Darstellungsform, über die neue Anschauungsmöglichkeiten generiert werden, was dazu führt, der Wellenfunktion einen stärkeren Realitätscharakter zugestehen zu müssen.¹⁰ Es scheint, dass Feynman durch seine Arbeit implizit eine Alternative zur Kopenhagener Deutung anbietet, ohne dies jedoch als Theoriekonflikt explizit zu machen. Allein dies lässt die Beschäftigung mit der QED lohnenswert erscheinen. Darüber hinaus zeigen sich in der QED neue Weisen der Kombination von Mathematik und physikalisch-konzeptioneller Anschauung. Feynman hat eine *diagrammatische* Umsetzung¹¹ der Quantentheorie erfunden, über die sich recht komplexe Beziehungen in einfacher Form als Vektorgrafiken darstellen und nachvollziehen lassen. Die Quantenelektrodynamik gewinnt hierdurch eine Anschaulichkeit, die mit der Matrizenmechanik und der ψ -Funktion zunächst verloren gegangen war.

Nähern wir uns mit Feynman im Folgenden der Grundidee der Quantenelektrodynamik. Im Prinzip führt die QED alle »Licht- und

10 Der Nobelpreisträger Robert B. Laughlin bemerkt hierzu: »Richard Feynman hat als Angriff auf die Quantenelektrodynamik eine großartige graphische Technik entworfen, welche immer noch als etwas interpretiert wird, das sich von der traditionellen Quantenmechanik unterscheidet, obwohl sie in Wirklichkeit einfach eine Neuformulierung von Schrödingers Gleichung darstellt« (Laughlin 2008, 54 f.).

11 Siehe zur Bedeutung des Diagrammatischen aus einer kultursemiotischen Perspektive auch Rustemeyer (2009).

Elektronenphänomene« auf drei »Grundvorgänge« zurück. »Vorgang 1: Ein Photon bewegt sich von Ort zu Ort. Vorgang 2: Ein Elektron wandert von Ort zu Ort. Vorgang 3: Ein Elektron emittiert oder absorbiert ein Photon.«¹²

Auf den ersten Blick scheint hier ein Modell vorzuliegen, das auf der Vorstellung bewegter Teilchen beruht. Hiermit entsteht die leicht nachvollziehbare Anschauung, dass Wechselwirkungen zwischen Materieteilchen wie Elektronen auf dem Austausch von Photonen beruhen. Entsprechend lassen sich dann auch die Anziehungs- und Abstoßungskräfte in elektromagnetischen Feldern als Austausch von (virtuellen) Photonen nachvollziehen.

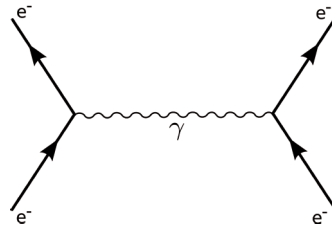


Abb. 13: Feynman Diagramm. Zwei Elektronen (e^-) stehen in Wechselwirkung, indem Photonen (γ) emittiert und absorbiert werden.¹³

Feynman überführt dieses einfache Modell nun in eine quantentheoretische Betrachtungsweise, die davon ausgeht, dass Photonen und Elektronen nicht nur einen Weg nehmen können, sondern mehrere, und dass sich die unterschiedlichen Wegoptionen entsprechend der mit der ψ -Funktion gegebenen Phasenbeziehung einander überlagern. Die Grundidee kennen wir bereits aus dem Doppelspaltexperiment – das Photon oder das Elektron kann sowohl den linken als auch den rechten Spalt durchtreten und entsprechend erscheint auf dem Schirm ein Interferenzmuster.

Feynman verallgemeinert das mit dem Doppelspaltexperiment gegebene Modell dahingehend, dass bewegte Teilchen potenziell unendlich viele Wege nehmen können und dass all diese Wegoptionen in die Rechnung mit einbezogen werden müssen. Was im Doppelspaltexperiment noch als eine durch den Versuchsaufbau konditionierte Sondersituation erscheint, wird jetzt als Regelfall betrachtet. Photonen und Elektronen erscheinen jetzt per se als *Potenzialitäten*, die sich entsprechend der ψ -Funktion gleichzeitig in verschiedene Raumrichtungen ausbreiten. Feynman geht dabei von der Annahme aus, dass alle möglichen Wege gleichberechtigt sind und entsprechend realisiert werden. Da aber jetzt verschiedene Wege unterschiedlich

¹² Feynman (2010, 101).

¹³ Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ca/Feynmandiagram.svg/250px-Feynmandiagram.svg.png>, (download 31.5.2011).

lang sind, treten Interferenzen auf, sodass manche Optionen ausgelöscht werden.

Erinnern wir uns nochmals an die Eigenschaften der Wellenfunktion. Sie beschreibt einerseits die Wahrscheinlichkeit, bei Messung ein Objekt anzutreffen (dies ist durch das Absolutquadrat des jeweiligen Werts der Ψ -Funktion gegeben). Andererseits generiert sie eine Wellenbeziehung, wodurch sich die Potenzialitäten entsprechend der Gleich- oder Gegenläufigkeit der Phasen addieren oder subtrahieren.

Feynman hat nun eine einfache graphische Umsetzung in Form von Pfeildiagrammen entwickelt. Man hat jetzt für jeden möglichen Weg einen Pfeil zu zeichnen. Die *Länge* des Pfeils gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Weg eingeschlagen wird (das Quadrat der normierten Länge gibt die Wahrscheinlichkeit an, das Ereignis zu messen).¹⁴ Die Drehrichtung des Pfeils gibt hingegen seine Phasenlage an. Wenn man nun alle möglichen Wege mit solchen Pfeilen darstellt, ergibt sich die einfach zu verstehende Möglichkeit der Vektoraddition. Man reiht die Pfeile aneinander. Wirkungen, die in entgegengesetzte Richtungen weisen, heben sich auf, gleichgerichtete verstärken sich hingegen. Insofern man die Mathematik beherrscht, kann man solche Rechnungen auch mit unendlich vielen Pfeilen durchführen, die dann *alle* möglichen Wege repräsentieren. Im Ergebnis der Rechnung verschwinden dann die Unendlichkeiten, da sich in der Regel die Phasenbeziehungen systematisch aufheben und nach entsprechender Kalkulation nur noch eine diskrete Zahl an Wirkmöglichkeiten übrigbleiben.

Wir verfügen damit über eine diagrammatische Perspektive, mit der sich alle denkbaren Wege von Photonen und Elektronen sowie deren Interferenz exemplarisch darstellen lassen. Feynman beansprucht, mit seinem Modell *alle* elektromagnetischen Prozesse beschreiben zu können. Jedes Photon und jedes Elektron würde damit entsprechend der Ψ -Funktion immer viele Wege gleichzeitig nehmen. Die Grenze zwischen einer klassischen und einer quantenmechanischen Weltbeschreibung wird damit obsolet. Alle uns bekannten optischen Phänomene können jetzt auch dahingehend erklärt werden, dass Photonen gleichzeitig viele Wege gehen, jedoch die meisten auf-

14 Hiermit ist dann auch eine Haltung verbunden, die sich von der Essentialisierung bestimmter quantenphysikalischer Begriffe löst. »Der Fachbegriff für diese Pfeile lautet ›Wahrscheinlichkeitsamplituden‹. Wir haben die ›Wahrscheinlichkeitsamplitude für ein bestimmtes Ereignis berechnet‹ – das klingt respektgebietend. Dennoch ziehe ich es vor, die Dinge schlicht und einfach beim Namen zu nennen und zu sagen, wir haben versucht, den Pfeil zu finden, dessen Quadrat die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines bestimmten Ereignisses darstellt« (Feynman 2010, 45).

grund der Phasenauslöschung zu keiner sichtbaren Wirkung führen. Unsere vertraute Welt aus Licht und Farben stellt sich aus dieser Perspektive gleichsam als ein komplexer raumzeitlicher Wellenteppich dar, aus dem die sichtbaren Phänomene nur deshalb ausflagen, weil andere Wellenbereiche durch Interferenz unsichtbar werden.

Feynman weist hiermit der Wellenfunktion einen ontologischen Status zu, demzufolge die Phasenbeziehungen als real anzusehen sind. Erstaunlicherweise funktioniert eine solch gewagte Theorieanlage. Im Bereich der Optik kann man mit diesem Modell beispielsweise leicht erklären, warum je nach Dicke eines Glases und Wellenlänge des Lichtes manchmal mehr und manchmal weniger Licht an der Oberfläche reflektiert wird, warum Linsen funktionieren oder warum bei Spaltexperimenten mit punktförmigen Lichtquellen keine scharfe Verteilung auf dem Schirm zu erwarten ist.¹⁵

Verdeutlichen wir uns am Beispiel eines Spiegels etwas ausführlicher das Grundprinzip der Erklärung. Ein Spiegel bildet ein gespiegeltes Objekt normalerweise genau an einem Punkt ab. Wenn aber ein Photon viele Wege nehmen kann, wäre zunächst zu erwarten, dass das Objekt auch an anderen Orten abgebildet wird und entsprechend das Spiegelbild beim Betrachter nicht lokalisiert erscheint (siehe Abb. 14).

Da aber jetzt für jede Strecke eine unterschiedliche Zeit gebraucht wird, entstehen Phasenverschiebungen, die zu Interferenzen führen. Wenn man nun die Vektoren aller möglichen Wege addiert, entsteht als Ergebnis ein Vektor, zu dem nur die Wege beitragen, welche das uns aus dem Alltag vertraute eindeutige Spiegelbild ergeben.

Hieraus folgt jetzt aber auch, dass ein Spiegelsegment eine gewisse Größe haben muss, damit genügend Wege verwirklicht werden können, um die Interferenzen zu generieren, welche ein eindeutiges Spiegelbild garantieren.¹⁶ In gleichem Sinne lässt sich nun ein Beugungsgitter als ein besonderer Spiegel verstehen, bei dem man in regelmäßiger Form Streifen herausgekratzt hat. Die für einen Spiegel ungewöhnlichen Reflexionen des Gitters erklären sich jetzt dadurch,

15 Siehe ausführlich Feynman (2010, 48 ff.).

16 »Das bedeutet, daß sich Licht in Wirklichkeit nicht nur geradlinig ausbreitet; es ›schmeckt‹ in die Nachbarpfade ringsherum ›hinein‹ und macht sich einen kleinen Kernbereich in seiner unmittelbaren Umgebung zunutze. (Ganz ähnlich muß ein Spiegel, um normal zu reflektieren, eine Mindestgröße aufweisen: Ist er zu klein für dieses Kernbündel benachbarter Wege, wird das Licht in viele Richtungen gestreut, egal, wohin man den Spiegel auch stellt.)« (Feynman 2010, 67).

dass bestimmte Wege physikalisch verunmöglicht wurden und damit bestimmte Interferenzen nicht auftreten.¹⁷

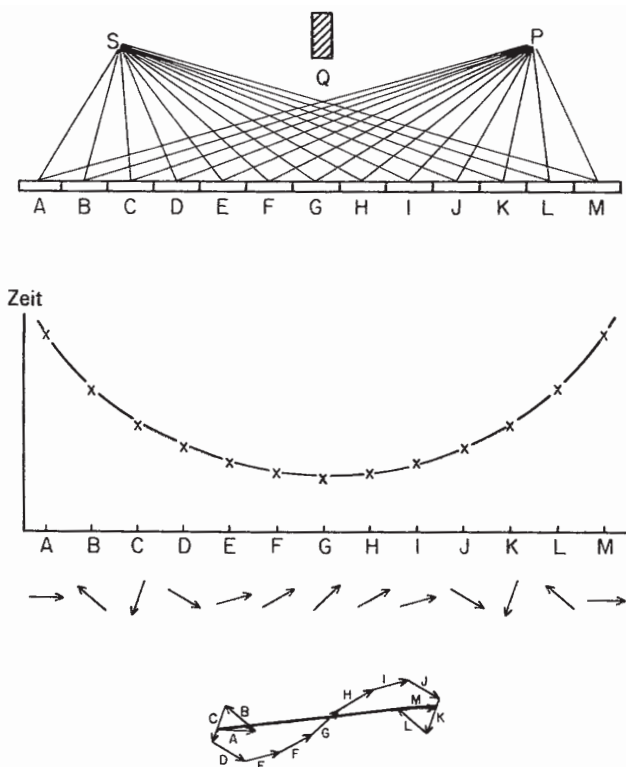


Abb. 14: Spiegelung eines Objekts. Darstellung oben: Spiegelung von S in den Segmenten des Spiegels und Reflektion zum Photosensor P. Darstellung Mitte: Zeitdauer der Wege von S zu P und die sich hieraus ergebende Phasenbeziehung. Darstellung unten: Addition der Vektoren und Bildung der Resultierenden. In der Darstellung wird der Spiegel zur Vereinfachung in gleich große Segmente eingeteilt. In der mathematischen Berechnung lassen sich die Segmente auf eine beliebige kleine Größe hin annähern.¹⁸

17 »Wenn wir nun die in eine bestimmte Richtung – zum Beispiel nach rechts – tendierenden Pfeile addieren, die anderen dagegen außer acht lassen (indem wir die betreffenden Stellen des Spiegels auskratzen), reflektiert unser falsch platziertes Spiegelstück einen wesentlichen Prozentsatz des Lichtes. Ein solch ausgekratzer Spiegel wird Beugungsgitter genannt« (Feynman 2010, 55).

18 Darstellung entnommen aus Feynman (2010, 55).

Erstaunlicherweise funktioniert die Feynmansche Modellierung im Falle aller aus der Optik vertrauten Phänomene. Allein diese Tatsache lässt die Quantenphysik in einem vollkommen anderen Licht erscheinen. Die Wellenfunktion und die hiermit erklärbaren Alltagsphänomene erscheinen jetzt als die Regel. Die im Doppelspaltexperiment erzeugte Symmetriebrechung erscheint demgegenüber als ein experimentelles Artefakt, welches sich dadurch ergibt, dass man dem Licht oder den Elektronen durch den Spalt zu wenig Raum gibt, um all die anderen Wege zu gehen. Hierdurch wird dann eine Phasenbeziehung verhindert, die zu einem eindeutigen Ergebnis führt. Oder anders herum: Weil die Spaltöffnungen zu klein sind, kommt der Zufall ins Spiel, denn jetzt kann die *Tatsache*, dass sich Licht nicht geradförmig und direkt ausbreitet, nicht mehr durch Interferenzen ausgemittelt werden. Die Begründungsverhältnisse kehren sich hier gegenüber der klassischen Betrachtungsweise um: Weil sich Licht entsprechend der ψ -Funktion überall gleichzeitig hinbewegt, funktioniert eine Konditionierung der Lichteigenschaften durch Interferenz. Erst wenn man die Auslöschung der Phasen experimentell behindert, gerät die geordnete Welt aus den Fugen und dem Zufall wird eine Chance gegeben.¹⁹

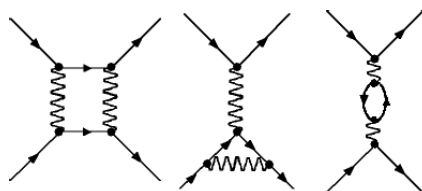
Wie wird nun die Beziehung zwischen Licht und Elektronen in der Quantenelektrodynamik verstanden? Wir erinnern uns, dass ein Elektron ein Photon emittieren oder absorbieren kann. Dies eröffnet die Möglichkeit, elektromagnetische Wirkungen wie Anziehung oder Abstoßung zu modellieren, ohne dass auf Kräfte zurückgegriffen werden muss, die außerhalb des Interaktionssystems zu verorten

19 »So entpuppt sich also der Satz von der geradlinigen Ausbreitung des Lichts als bequeme näherungsweise Umschreibung der wirklichen Vorgänge in der uns vertrauten Welt; ähnlich wie der Satz von der Gleichheit in der uns vertrauten Welt; ähnlich wie der Satz von der Gleichheit von Ein- und Ausfallswinkel im Falle der Reflexion des Lichts an einem Spiegel. Das ist ein Beispiel für die ›Unschärferelation‹: Zwischen dem Wissen, welchen Weg das Licht zwischen den Blöcken nimmt und welchen nach dem Durchgang, besteht eine Art ›Komplementarität‹ – beide genau zu kennen, ist unmöglich. Ich möchte hier aber noch ein Wort zum historischen Kontext der Unschärferelation sagen: Als die revolutionären Ideen der Quantenmechanik bekannt zu werden begannen, versuchte man zunächst, sie im Rahmen der alten Ideen (wie, Licht breitet sich geradlinig aus) zu verstehen. An einem bestimmten Punkt aber versagten die alten Ideen, und deshalb wurde ein Warnschild aufgestellt, das da besagte: ›Lassen Sie aber all den alten Kram von Anfang an links liegen und halten Sie sich an die Ideen, die ich Ihnen in diesen Vorlesungen darlege – nämlich für alle Wege, auf denen ein Ereignis eintreten kann, Pfeile zu addieren – kann Ihnen die ganze Unschärferelation überhaupt gestohlen bleiben!‹« (Feynman 2010, 68).

sind. Da innerhalb einer Interaktion kein Photon das System verlässt – es wird innerhalb der Wechselwirkung generiert und zugleich wieder vernichtet –, spricht man auch von *virtuellen* Photonen. Man kann sie nicht sehen oder messen. Dennoch kann man ihnen eine Existenz zuschreiben, weil sie im Modell Sinn ergeben.

Wie schon im Falle der Ausbreitung des Lichts kann auch hier nicht mehr nur von einem Weg ausgegangen werden, über den Elektronen miteinander wechselwirken. Unterschiedliche Varianten sind als gleichzeitig realisiert anzunehmen. Wie in Abb. 15 aufgezeigt, führen unterschiedliche Wege zu etwas anderen Formen der Beeinflussung der Elektronen. Um zu einer übergreifenden Lösung zu gelangen, sind wieder alle denkbaren Wege einzubeziehen und in Hinblick auf die unterschiedlichen Phasenbeziehungen zu verrechnen.

Abb. 15: Feynman Diagramme zur Wechselwirkung von Elektronen. In verschiedenen Weisen wird die Wechselwirkung über den Austausch virtueller Photonen modelliert.²⁰



Prinzipiell können an jedem Ort und zu jeder Zeit Photonen erzeugt und absorbiert werden. Dabei ergeben sich einige Eigenarten der Modellierung: Die (virtuellen) Photonen, ebenso wie die aus Wechselwirkungen entstandenen (temporären) Elektronen können in der Zeit vor- und zurücklaufen. Diese Eigenart führte zur Vorhersage der Anti-Teilchen, die dann einige Jahre später empirisch nachgewiesen werden konnten.²¹

²⁰ Quelle: Jacqueline Schenk, download am 31.5.2011 unter <http://www.physik.uzh.ch/lectures/MC2010/cd/exercises/unischule/theorie/feynmoeller-4vertex4.gif> (download 31.5.2011). Quelle: <http://www.physik.uzh.ch/lectures/MC2010/cd/exercises/unischule/theorie/feynmoeller-4vertex4.gif> (download 31.5.2011).

²¹ »Zum Beispiel könnte das Elektron ein Photon emittieren, *bevor* es eines absorbiert. Oder, und diese Möglichkeit (c) ist noch sonderbarer, das Elektron könnte ein Photon emittieren, daraufhin *in der Zeit zurücklaufen*, um ein Photon zu absorbieren, und sich dann in der Zeit wieder vorwärts bewegen. Der Weg eines solchen ›rückwärts laufenden‹ Elektrons kann sogar so lang sein, daß er bei Experimenten im Labor wirklich in Erscheinung tritt. Auch sein Verhalten ist in diesen Diagrammen und in der Gleichung für E (A nach B) mit eingeschlossen.

Schauen wir uns das rückwärts laufende Elektron bei vorwärts fortschreitender Zeit an, kommt es uns wie ein ganz gewöhnliches Elektron

Allein der Blick auf diese wenigen Diagramme möglicher Elektronen-Photonen-Wechselwirkungen lässt ahnen, dass die Rechenverhältnisse zur Bestimmung der Phasenbeziehungen sehr schnell kompliziert werden. Mittels moderner Computertechnik lassen sich hier jedoch mittlerweile recht gute Näherungen erzeugen, so dass sich die QED-Modellierung nicht nur in Hinblick auf qualitative Vorhersagen, sondern auch in quantitativer Hinsicht mit den Daten aus Experimenten abgleichen lässt.

Ein eindrucksvoller Erfolg der QED besteht in der Vorhersage des bereits erwähnten magnetischen Moments von Elektronen. Einfach gesagt, handelt es sich hier um die Frage, in welchem Maße ein Elektron mit einem Magnetfeld wechselwirkt. Wenn man jetzt einfach annehmen würde, dass ein geladenes Teilchen auf geradem Weg durch ein Magnetfeld läuft, errechnet sich ein Betrag, der dann üblicherweise auf den Wert μ_B normiert wird. Empirisch ergibt sich jedoch eine kleine Abweichung von diesem Wert. Mit Feynman lässt sich diese Diskrepanz darüber erklären, dass ein Elektron in Wirklichkeit auch eine Vielzahl alternativer Wege zurücklegt, die dann in die Rechnung mit einzubeziehen sind. So könnte es beispielsweise zwischendurch ein Photon emittieren, um dieses ein wenig später wieder aufzunehmen. Mit Hilfe der Pfadintegration aller denkbaren Wege ist es gelungen, das theoretische Modell und die empirische Messung auf sieben Stellen hinter dem Komma miteinander abzugleichen.²² Experiment und Modell stimmen offensichtlich in

vor, außer daß es von normalen Elektronen angezogen wird, daß es also, wie wir sagen, eine ›positive‹ Ladung hat. (Hätte ich die Auswirkungen der Polarisation berücksichtigt, würde ersichtlich, warum das Vorzeichen von j für das rückwärts laufende Elektron umgekehrt erscheint, was die Ladung positiv erscheinen läßt). Aus diesem Grund wird es als ›Positron‹ bezeichnet. Das Positron ist gewissermaßen ein Geschwister zum Elektron und außerdem ein Mitglied der Familie der ›Antiteilchen‹. Das 1931 von Dirac postulierte ›Anti-Elektron‹ wurde im Jahr darauf von Carl Anderson experimentell entdeckt und ›Positron‹ getauft. Heute können Positronen mühelos (zum Beispiel durch den Zusammenstoß zweier Photonen) erzeugt und wochenlang in einem Magnetfeld gespeichert werden« (Feynman 2010, 115).

- 22 »[Das] magnetische Moment« stellt gewissermaßen die Antwort eines Elektrons auf ein äußeres Magnetfeld dar. Als Dirac die Regeln für die Berechnung dieser Zahl erarbeitete, benutzte er die Formel für $E(A$ nach $B)$ und erhielt eine recht einfache Antwort, die wir in unseren Einheiten als μ_B setzen wollen. Das Diagramm für diesen ersten Näherungswert des magnetischen Moments eines Elektrons ist äußerst einfach – ein Elektron bewegt sich in der Raumzeit von einem Ort zu einem anderen und koppelt an ein Photon von einem Magneten [...]. Einige Jahre später

hohem Maße miteinander überein. Die QED stellt damit eine empirisch extrem erfolgreiche physikalische Theorie dar. Zudem ließ sich die Grundkonzeption ihrer Modellierung auf die sogenannte *starke Wechselwirkung*, eine weitere der vier fundamentalen Naturkräfte, übertragen.²³

Die Quantenelektrodynamik stellt eine außerordentlich erfolgreiche Theorie dar. Gerade im Kontext der soziologischen Rekonstruktion der Theoriebewegungen der Quantenphysik ist jedoch hier darauf hinzuweisen, was auf theoretischer Ebene dafür in Kauf genommen werden muss. Gemeint ist hier nicht die Art und Weise, wie die QED dem Common Sense unserer Alltagserfahrung entspricht, sondern ein mathematisches Problem, das die konzeptionelle Kohärenz des geschilderten Ansatzes empfindlich stört. Für den Nicht-Mathematiker lässt sich dieses Problem etwa folgendermaßen umschreiben. Wie ge-

entdeckte man, daß dieser Wert nicht genau 1 ist, sondern etwas höher liegt – etwa bei 1,00116. [...] Erforderlich war die Korrektur, weil das Elektron auch auf einem anderen Weg von Ort zu Ort wandern kann: Anstatt sich direkt von einem Punkt zu einem anderen zu begeben, kann es nach einem Stück Wegs plötzlich ein Photon emittieren und dann (o Schreck!) das eigene Photon absorbieren [...], mag so etwas nun ›unmoralisch‹ sein oder nicht! Wollen wir nun den Pfeil für diese Alternative berechnen, müssen wir für jeden Ort in der Raumzeit, an dem das Photon emittiert und für jeden Ort, an dem es absorbiert werden kann, einen Pfeil zeichnen. [...] Hinzu kommt noch eine neue, interessante Möglichkeit [...]: ein Photon wird emittiert, erzeugt ein Positron-Elektron-Paar, dieses vernichtet sich wieder – unerachtet Ihrer ›moralischen‹ Einwände – und erzeugt ein neues Photon, das schließlich vom Elektron absorbiert wird. Diese Möglichkeit muß also auch berücksichtigt werden! [...] Mittlerweile haben die Experimentatoren sogar noch detailliertere Versuche durchgeführt und ihre Zahl hinter dem Komma um einige weitere Stellen verringert – und noch immer hält die Theorie Schritt.

So zeichnen wir für unsere Berechnungen all diese Diagramme, notieren ihre mathematischen Entsprechungen und addieren die Amplituden – immer schön nach ›Kochbuch‹. [...] Gegenwärtig präsentieren die Theoretiker die Zahl 1,0011596246 und die Experimentatoren die Zahl 1,00115965221 plus oder minus 4 in der letzten Dezimalstelle). Ein Teil der Unsicherheit beim theoretischen Wert (zirka 4 in der letzten Dezimalstelle) geht auf das Konto des Computers, der die Zahlen abrundet)« (Feynman 2010, 133 ff.).

- 23 Gell-Mann postulierte auf dieser Basis die so genannten Quarks und Gluonen als Wechselwirkungsteilchen, welche diese Kraft moderieren. Der Nachweis der Eigenschaften von Quarks in Rahmen von Experimenten mit Teilchenbeschleunigern führte 1969 zu seinem Nobelpreis (Gell-Mann 1994).

schildert müssen in der QED sehr viele Wege einbezogen werden, wie Elektronen und Photonen miteinander gekoppelt werden können. Dabei sind aber auch räumlich und zeitlich sehr enge Koppelungen mitzudenken.

Dies führt aber dazu, dass man zu Werten nahe der Null kommt. Jeder weiß aus dem Schulunterricht, dass man durch Null nicht teilen darf bzw. dass die Division durch sehr kleine Werte zu nahezu unendlich großen Ergebnissen führt. Solche Rechnungen führen zu sinnlosen Ergebnissen.²⁴

Die Physiker haben nun einen Weg entdeckt, wie sich das Problem umschiffen lässt. Der in Fachkreisen unter dem schönen Begriff ›Renormierung‹ bekannte Trick funktioniert folgendermaßen: Man bricht die Rechnung ab, bevor Unendlichkeiten entstehen und geht dann einfach davon aus, dass sich zwei Unendlichkeiten aufheben, sodass das Ergebnis am Ende stimmt. Hierfür ist zwar in Kauf zu nehmen, dass die Werte der Koppelungskonstanten nicht genau bestimmt werden können. Dies braucht aber wiederum den Physiker nicht zu stören, da diese Werte nur virtuell in die Rechnung mit eingehen, also empirisch sowieso nicht beobachtbar sind.²⁵

24 »Wenn wir Terme berechnen, die Kopplungen beinhalten, müssen wir (wie stets) alle möglichen Punkte, an denen Kopplungen auftreten können, bis hin zu den Fällen, in denen die Koppelungspunkte übereinander liegen – mit einem Nullabstand dazwischen – berücksichtigen. Und jetzt kommt's: Versuchen wir nämlich, den ganzen Weg bis hinunter zum Nullabstand zu berechnen, fliegt die Rechnung auf und gibt sinnlose Antworten (wie unendlich) – ein Umstand, der der Theorie der Quantenelektrodynamik anfangs schwer zu schaffen machte« (Feynman 2010, 146).

25 »Wenn zwei die Bestimmung von n und j aus demselben m und e bei verschiedenen Abständen abbrechen und die von ihnen gefundenen unterschiedlichen Werte eines anderen Problems benutzen, erhielten sie, wenn alle Pfeile von allen Termen berücksichtigt wurden, nahezu dieselbe Antwort! Und zwar fiel diese Antwort um so ähnlicher aus, je näher die Berechnungen für n und j bis zum Nullabstand weitergeführt worden waren. [...] Endlich konnte man mit der Theorie der Quantenelektrodynamik rechnen!

Allem Anschein nach hängen von den kleinen Entfernungen zwischen den Kopplungspunkten *lediglich* die Werte n und j – *ohnehin nicht unmittelbar beobachtbare theoretische Zahlen* – ab. Alles andere dagegen, was beobachtet werden *kann*, scheint nicht davon betroffen zu sein.

Das Spielchen, was wir auf der Suche nach n und j spielen, heißt im Fachausdruck ›Renormierung‹, ein reichlich hochtrabender Begriff für ein verrücktes Verfahren! Ein solcher Hokuspokus hat uns daran gehindert, die mathematische Folgerichtigkeit der Theorie der Quantenelektrodynamik

Mit Blick auf das Verhältnis von Mathematik, Experiment und physikalisch konzeptioneller Anschaulichkeit schlägt das Pendel hier gleichsam um. Wir verfügen jetzt über eine Theorie, die über ihre diagrammatische Darstellbarkeit recht anschaulich ist und der eine klare physikalisch konzeptionelle Idee zugrunde liegt (so seltsam einem die Idee der vielen gleichzeitig realisierten Pfade zunächst auch erscheinen mag). Die Theorie ist in Hinblick auf experimentelle Fragestellungen in qualitativer und quantitativer Hinsicht extrem leistungsfähig und hat zu einer Vielzahl neuer Erkenntnisse innerhalb und außerhalb der Atomphysik geführt.

Mathematisch bleibt die Theorie jedoch inkonsistent. Sie lässt sich nicht in ein geschlossenes System aus Axiomen und Beweisen überführen. Stattdessen arbeitet sie auf der Basis von Näherungen, die sich aus einer praktikablen Renormierung ergeben, ohne jedoch die mathematischen Prinzipien dieses heuristischen Verfahrens erklären zu können. Für einen Physiker, der wie Paul Dirac nach mathematischer Formvollendung gestrebt hat, ist der Preis für diese Lösung hoch, denn mit ihr wird die mathematische Strenge und Ästhetik der Physik geopfert.²⁶

zu beweisen! Trotzdem bleibt es erstaunlich, daß dies noch immer nicht auf die eine oder andere Weise geschehen ist; die Renormierung dürfte von den Mathematikern wohl kaum für voll genommen werden. Aber wie dem auch sei, fest steht jedenfalls, daß wir bis heute keinen guten mathematischen Weg für die Beschreibung der Theorie der Quantenelektrodynamik kennen: Wir brauchen zu viele Worte, um die Beziehung zwischen n und j und m und n zu erfassen (Feynman 2010, 147 f.).

- 26 So der Wissenschaftshistoriker Fischer: »Feynman entwickelte eine Sprache, in der es sogenannte Wegintegrale (path integrals) gab, mit denen sich die Wege – genauer: die Bewegungen der atomaren Realitäten darstellen ließen. Der Zauberer Feynmann kramte aus seinem Zylinder zudem sogenannte Proagatoren heraus, die für diese Wege verantwortlich waren und mit denen er bald die Bildchen, seine berühmten Diagramme, malen konnte, die alles so einfach aussehen ließen. Das mit dem Zaubern stimmt. Denn als Feynman seine Methode bei den Elektronen und dem Licht (seinen Photonen) einsetzte, verschwanden die Singularitäten – die hässlichen Unendlichkeiten – eine nach der anderen. Das ist genau so gemeint, wie es da steht: Jeder unendliche Wert, der in den (alten) Rechnungen auftrat, wurde von einem anderen unendlichen Wert kompensiert, der mit dieser neuen Methode sichtbar wurde. Die Unendlichkeiten hoben sich gegenseitig auf, und die Theorie konnte alles berechnen. Feynman triumphierte, das heißt, er triumphierte eigentlich nicht. Zwar jubelten seine Kollegen, aber einer schüttelte den Kopf: Paul Dirac. Er sah zwar, dass Feynman recht hatte, aber der Preis dafür war ihm zu hoch. Feynman hatte seiner Ansicht nach die Schönheit der Physik geopfert« (Fischer 2010, 288 f.).

Feynmans Quantenelektrodynamik leitet in verschiedener Hinsicht eine hochgradig raffinierte Theoriebewegung innerhalb der Quantentheorie ein. Mit ihr gelingt es, der Quantenphysik eine physikalisch anschauliche Basis zurückzugeben. Dies geschieht, indem auf einer oberflächlichen Ebene am Teilchenbild festgehalten wird (es sind ja Photonen und Elektronen, die sich bewegen), man auf der Tiefenebene jedoch in strenger Weise den Implikationen der Schrödinger-Gleichung folgt. Das Messproblem – und damit auch die Beobachterproblematik – wird hiermit in den Hintergrund gedrängt. Es erscheint jetzt kaum noch von Belang, da es in den empirischen Gegenständen, welche die QED vorrangig beschreibt, nicht von Relevanz ist. Stillschweigend wird die Quantentheorie hiermit in den Status einer Universaltheorie erhoben und die Grenze zwischen klassischer und quantentheoretischer Beschreibung wird damit obsolet.

Gleichzeitig wird die Quantentheorie hiermit von der Mathematik zurück an die Physik übereignet. Anstelle formaler Beweise treten nun die ›Zaubertricks‹ der Physiker, mittels denen sich in einer bizarren Welt mit einer ebenso bizarren Theorie empirische Datenlagen und theoretische Vorhersagen in nie zuvor gewesener Detailgenauigkeit in Übereinstimmung bringen lassen. Man schert sich nun weniger um mathematische Konsistenz denn um die Beziehung von Theorieentwicklung und Experimentalphysik. Entsprechend der alten physikalischen Tradition wird hier mathematisches Können vor allem zum Rechnen gebraucht, jedoch nicht mehr als Ausgangspunkt der physikalischen Theoriebildung verstanden.²⁷

Erstaunlich bleibt, dass eine solchermaßen hochgetriebene und jeglichem Common Sense zuwider laufende physikalische Theorie funktioniert, dass sich also Wirklichkeit und die mit der Theorie vollzogenen Bewegungen in einer Weise aneinander anschmiegen, dass letztere nicht falsifiziert wird.

Hiermit deutet sich bereits ein neuer Weg zum Verständnis der Quantenphysik an, der gleichzeitig Abschied nimmt vom Glauben

27 Diese Haltung zur Mathematik wird am Beispiel des folgenden, bereits an anderer Stelle verwendeten Zitats deutlich: »Wie sich eine Subtraktion bewerkstelligen lässt, ist im Grunde nicht schwer zu begreifen – solange man sie nicht wirklich auszuführen braucht. Und damit sind wir bei mir und meiner Aufgabe angelangt: Ich erkläre Ihnen, was die Physiker machen, wenn sie das Verhalten der Natur vorhersagen, aber ich lehre Sie keine Tricks, mit denen sie *effizient* arbeiten. [...] Die Physikstudenten kostet es sieben Jahre, solche Tricks zu erlernen. Genau an dem Punkt werden wir uns sieben Jahre Physikstudium schenken: insofern als ich Sie anhand dessen, was wir wirklich machen, in die Quantenelektrodynamik einführe. Und ich hoffe, daß sie das besser verstehen als mancher Physikstudent!« (Feynman 2010, 23).

an die Allmacht der Mathematik. Anstatt die beobachtbaren Welt-dynamiken auf eine allgemeine Weltformel zurückzuführen, werden die empirisch beobachtbaren Beziehungen jetzt als *emergente* Erscheinungen makroskopischer Ordnungen aufgefasst. Dass die Renormierungsverfahren auch ohne eine mathematisch konsistente Theorie funktionieren, wird als Hinweis dafür genommen, dass die feststellbaren Ordnungsprinzipien nicht *bottom-up* aus mathematischen Grundformeln generiert werden können. Vielmehr werden die Regelmäßigkeiten der Quantenwelt jetzt *top-down* als Resultat kollektiver Ordnungsphänomene erklärt (siehe hierzu ausführlich Kap. III.5 und IV.6).

Aus soziologischer Sicht bemerkenswert erscheint hier, dass mit Feynman stillschweigend ein Übergang zu einem neuen Verständnis physikalischer Theorie eingeleitet wird. Theoretische Anschauung kann hier nicht mehr heißen, dass physikalische Objekte oder Gegenstände repräsentiert werden und damit die gefundenen Beziehungen die untersuchten Sachverhalte so darstellen, wie sie *sind*. Entgegen diesem ontologisierenden Verständnis von physikalischer Theorie treffen wir jetzt auf ein *pragmatisches* Verhältnis zur theoretischen Modellierung. Physikalische Theorie braucht hier weder im strengen Sinne Wirklichkeit zu repräsentieren noch mathematisch konsistent zu sein. Sie hat einfach zu *funktionieren*. In diesem Sinne kann Theorie jetzt auch auf Anschauungen basieren, die nicht mehr durch Beobachtung gedeckt sind. Während die Newtonschen Differenzialgleichungen in Referenz auf sich bewegende Objekte formuliert wurden und auch noch die Heisenbergsche Matrizenmechanik mit Blick auf ein strenges Observablenkonzept gefasst wurde, fußt die QED auf *diagrammatischen* Anschauungen, die einer unmittelbaren empirischen Referenz entbehren (es lässt sich empirisch kein Elektron finden, das mehrere Wege gleichzeitig geht). Nichtsdestotrotz lassen sich diese Diagramme jedoch zu einer Theorieform verknüpfen, aus der dann empirisch überprüfbare Hypothesen abgeleitet werden können, welche die operative Praktikabilität der Modellierung belegen.

Die Quantentheorie gewinnt hierdurch zwar eine Anschauung, die sich durch visualisierbare Modelle plausibilisiert. Diese Anschauung hat jedoch nichts mehr gemein mit dem Begreifen eines physikalischen Zusammenhangs, wie er noch mit den Mitteln der klassischen Physik erreichbar war (etwa den Stoßbewegungen von Teilchen). Mit Blick auf ihren Gegenstand bleibt die Quantentheorie weiterhin eine unanschauliche mathematische Hochabstraktion. Die Feynman-Diagramme lassen jedoch erneut physikalische Theorie möglich werden, insofern man *theoría* im Sinne der ursprünglichen griechischen Bedeutung als Anschauung, als Einsicht oder gar als Wahrnehmung des Schönen begreift. Auf diese Weise gewinnt die Physik erneut The-

oriefähigkeit. Sie kann jetzt wieder auf Basis eigener konzeptioneller Anschauungen (die jetzt auch wieder von den Anschauungen der Mathematik abweichen können) Formen und Beziehungen entwickeln und in Beziehung zu empirischen Fragen setzen.

Allerdings kann physikalische Theorie jetzt nur noch auf Umwegen zu sich selbst kommen, nämlich indem sie sich in ihrer Anschauung von ihrem unmittelbaren empirischen Gegenstandsbezug – dem, was beobachtet werden kann – löst. Erst auf diesem Wege kann sie die Autonomie gewinnen, ihre theoretischen Formen in fruchtbarer Weise aufeinander beziehen zu können und um auf diese Weise Hypothesen zu generieren, die sich in eine experimentelle Überprüfung überführen lassen.

Da physikalische Theorien auf dieser Stufe der Ausdifferenzierung der Physik jetzt sozusagen *autonom* gewordene Anschauungen darstellen, treten nun auch innerhalb der Physik vermehrt Lagerungen auf, in denen unterschiedliche physikalische Theorien denselben empirischen Sachverhalt auf verschiedene, teilweise widersprechende Weise erklären können. So erscheinen beispielsweise aus einer emergenztheoretischen Perspektive die Grundgleichungen der QED falsch, wenngleich sie dennoch zu richtigen empirischen Ergebnissen führen (siehe ausführlicher Kap. IV.6).

Ebenso wie bereits für die Mathematik gilt jetzt auch für die Ausdifferenzierung der theoretischen Physik, dass sie gerade deshalb, »weil sie auf Übereinstimmung mit der Außenwelt« verzichtet und sich in Hinblick auf die eigenen Konzepte und Anschauungen operational abschließt, »Anschlussfähigkeit« und Fortschritt der Disziplin organisieren kann.²⁸ Der Verlust der Anschaulichkeit der modernen Physik geht hier mit einer Rückkehr zu physikalischen Anschauungen einher, die jetzt nur noch in physikalischer Theorie selbst gegründet sind. Die theoretische Physik gewinnt auf diese Weise Unabhängigkeit von Mathematik und Experiment, um sich zugleich von den mathematischen und experimentalphysikalischen Möglichkeiten zu neuen Formbildungen treiben zu lassen.

Die wissenschaftssoziologischen Konsequenzen einer weitergehenden Ausdifferenzierung und Autonomisierung der theoretischen Physik und die Folgen für die Fachdisziplin werden in Kapitel V ausführlicher am Beispiel der Stringtheorie erörtert werden.

28 Luhmann (1998, 201).

3 Aharonov-Bohm-, Casimir- und Tunneleffekt: Seltsame Quantenfelder im leeren Raum

Wir erinnern uns an dieser Stelle, dass der ontologische Charakter der Wellenfunktion innerhalb der Quantentheorie umstritten ist, man also von Anfang an nicht so recht wusste, wie der Status der ψ -Funktion einzuschätzen ist.²⁹ Wir begegnen hier dem Bezugsproblem der quantenphysikalischen Theoriebildung, dass mit ψ offenbar irgendeine physikalische Bedeutung impliziert ist, man aber im Gegensatz zu den bewährten physikalischen Feldtheorien nicht auf physikalische Kräfte verweisen kann, welche die mit ψ verbundenen Effekte erklären. Wahrscheinlichkeitswellen sind ›Wellen von nichts‹.

In den folgenden Abschnitten werden wir einige Befunde aus der Experimentalphysik vorstellen, die dafür sprechen, die mit der ψ -Funktion aufgespannten Potenzialfelder als wirkliche Eigenschaften physikalischer Systeme aufzufassen.

Wir beginnen mit dem Tunneleffekt, der in unterschiedlichen Feldern der Physik, Chemie und Biochemie beobachtet und technisch, insbesondere in der Halbleiterentwicklung, genutzt wird. Der Tunneleffekt besagt, dass Teilchen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Barrieren überwinden, die sie an sich energetisch nicht überschreiten könnten. Nach dem mit der Heisenbergschen Unschärferelation bestimmten ›Kreditrahmen‹ können gleichsam Energie und Raum aus dem ›Nichts‹ ausgeliehen werden, um eine in der klassischen Physik als unüberwindbar geltende Grenze zu ›untertunneln‹. Entsprechend der Schrödinger-Gleichung führt eine Barriere zwar zu einer starken Abnahme der Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen außerhalb der Barriere zu messen. Doch es bleibt eine kleine Restwahrscheinlichkeit übrig, da sich die ψ -Funktion auch über die Barriere hinweg ausbreitet.

Der Tunnel-Effekt spielt eine wichtige Rolle für die theoretische Herleitung radioaktiver Zerfallsprozesse, denn auf Basis klassischer physikalischer Konzepte lässt sich nicht erklären, warum ein alpha-Teilchen die Anziehungskräfte überwinden kann, welche es an den Atomkern binden.³⁰ Ebenso lassen sich spontane Mutationen der Erbsubstanz durch den Tunneleffekt verstehen und, wie bereits er-

29 So geht die Kopenhagener Deutung davon aus, dass vor der Beobachtung bzw. einer Messung kein Zustand definiert ist und damit also auch der ontologische Status prinzipiell unbeantwortet bleiben muss. Die Erklärungsleistung der ψ -Funktion würde sich hiermit auf das Messpostulat reduzieren, also auf den Sachverhalt, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung bei einer Messung dem Absolutquadrat von ψ entspricht.

30 Vgl. Löwdin (1963).

bestimmten Wellenlänge auftreten. Außerhalb der Platten können demgegenüber Photonen in allen Wellenlängen erscheinen. Die sich hieraus ergebende Asymmetrie hätte aber – so Casimirs Vermutung – zur Folge, dass die beiden Platten durch eine Kraft aufeinandergedrückt werden. 1958 konnte der Effekt experimentell bestätigt werden.³³

Darüber hinaus ist an dieser Stelle nochmals kurz auf den Aharonov-Bohm-Effekt einzugehen, der 1959 in der Arbeitsgruppe von David Bohm experimentell nachgewiesen sowie quantentheoretisch hergeleitet wurde.³⁴ Dieser Effekt beruht auf virtuellen Eigenschaften, die mit dem imaginären Teil der Wellenfunktion ψ einhergehen. Ein bereits vergangenes Magnetfeld übt hier eine Wirkung auf die Interferenz von Elektronen aus, auch wenn vor Ort keine magnetischen Kräfte mehr vorhanden sind, um diese Wirkung zu erklären. Die Wechselwirkung kann auf Basis des Formalismus der Schrödinger-Gleichung als eine Überlagerung der Wellenfunktion *außerhalb* der klassischen Kraftwirkung erklärt werden.

Die drei hier in kurzer Form vorgestellten Feldeffekte weisen auf eine fruchtbare Beziehung zwischen quantentheoretischer Modellbildung und Experimentalphysik hin, in der gerade die ungewöhnlich erscheinenden Konsequenzen der Quantentheorie zum Anlass genommen wurden, Hypothesen zu bilden, die dann in Experimente überführt werden können. Mit den experimentellen Erfolgen der Quantentheorie änderte sich auch Schritt für Schritt ihr epistemischer und ontologischer Status innerhalb der Physik. Während man in den 30er-Jahren noch mit Einstein hoffen konnte, dass sie unvollständig sei und in absehbarer Zeit durch eine schlüssigere Konzeption überwunden werde, zeigen sich gerade auch ihre zunächst nur schwer zu akzeptierenden Konsequenzen empirisch als außerordentlich belastbar.

Es verwundert deshalb nicht, dass seit den 50er-Jahren viele Physiker mehr und mehr dazu neigen, der ψ -Funktion auch in ontologischer Hinsicht einen fundamentaleren Status zuzuweisen. Mehr und mehr erscheinen die ›Wellen von nichts‹ jetzt ›real‹.

33 Siehe zur neueren Diskussion des Casimir-Effekts Mostepanenko/Trunov (1997). Siehe zur Einführung auch Boyer (1985).

34 Siehe Aharonov/Bohm (1959; 1961).

4 Variationen zum Doppelspaltexperiment: Der Kontext bestimmt, was der Fall ist

Erinnern wir uns kurz an das Doppelspaltexperiment mit Elektronen oder Photonen, dass bereits in Kapitel I ausführlicher vorgestellt wurde. Wenn beide Spalte geöffnet sind und man keine zusätzliche Weginformation erhebt, zeigt sich auf dem Schirm hinter den Spaltöffnungen ein Streifenmuster. Sobald man aber mit einem Messdetektor hinter einem Spalt die Weginformation ermittelt, verschwindet das Interferenzmuster. Zu diesem Experiment sind mittlerweile zahlreiche Variationen entwickelt worden, die weitere Einsichten in die Eigenschaften von Quantensystemen geben können und insbesondere das Bezugsproblem der *Messbeobachtung* erhellen. Wir stellen im Folgenden einige wichtige Gruppen von Experimenten vor.³⁵

Interferometer

Unter bestimmten Bedingungen lassen sich konjugierte Paare von Photonen erzeugen, von denen beide in entgegengesetzte Richtung laufen. Auf diese Weise kann man versuchen, das eine für die Erhebung der Richtungsinformation zu nutzen, während das andere dann am Doppelspalt weiterhin das Interferenzmuster erzeugen sollte.

Einige interessante Varianten von Weg-Information-Experimenten lassen sich mit Hilfe eines Interferometer durchführen. Hier trifft Licht aus einem Laser auf einen halbdurchlässigen Spiegel. Der Strahl wird gespalten. Beide Teilstrahlen werden jedoch mit Hilfe weiterer Spiegel wieder zusammengeführt und treffen abschließend auf einen zusätzlichen halbdurchlässigen Spiegel.

Schauen wir uns das Arrangement an, so wird deutlich, dass die Lichtstrahlen unterschiedliche Wege nehmen, aber am letzten Spiegel wieder vereint werden, um hier dann allerdings nochmals gespalten und auf zwei Detektoren verteilt zu werden. Aufgrund von Phasenverschiebungen bei einer Spiegelung laufen die Wellen nicht unbedingt synchron. Entsprechend können bei bestimmten Konstellationen destruktive Interferenzen auftreten, d. h. die Wellen löschen sich wechselseitig aus, wenn sie phasenverkehrt zusammentreffen. Mit ein wenig Geschick lässt sich das Interferometer so justieren, dass an einem der Detektoren alles Licht und am anderen kein Licht mehr festgestellt werden kann. Wenn jetzt jedoch mit einem Messgerät

35 Ein erster Überblick in die derzeit möglichen Experimente findet sich in Greene (2008, 100 ff.) oder Zeilinger (2005).

innerhalb der Anordnung zusätzlich noch detektiert wird, ob ein bestimmter Weg eingenommen wurde, so lässt sich die Interferenz nicht mehr feststellen. Der letzte halbdurchlässige Spiegel teilt wieder die Lichtmenge und entsprechend können wieder an beiden Detektoren Signale gemessen werden. Das Gleiche ist der Fall, wenn man einen der beiden Lichtwege verstellt.

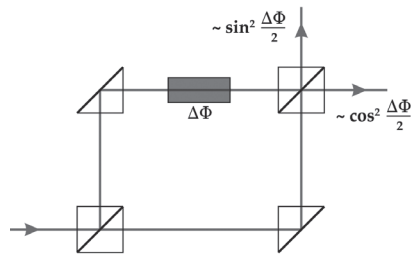


Abb. 17: Mach-Zehnder Interferometer³⁶

Auch hier verschwindet die Interferenz. Selbst wenn man die Lichtquelle soweit herunterfährt, dass einzelne Photonen gemessen werden können, ändert dies nichts an den zuvor beschriebenen Resultaten. Wie im Doppelspaltexperiment scheint das Licht gleichzeitig beide Wege zu nehmen, es sei denn, es wird irgendwo gemessen. Nun ergibt sich keine Interferenz mehr.

Das Mach-Zehnder-Interferometer eröffnet die Option der wechsellwirkungsfreien Messung, ob ein Objekt in einem der Strahlgänge versteckt ist oder nicht. Wenn ein Lichtquant den unverstellten Pfad wählt und zugleich die Interferenz ausbleibt, so lässt sich eine Aussage über ein Objekt im Strahlgang treffen, ohne dass dieses auch nur einem Lichtquant ausgesetzt worden ist.³⁷

Bemerkenswert ist der Befund, dass erst mit dem zweiten, am Ausgang platzieren halbdurchlässigen Spiegel das Auftreten von Interferenzen ermöglicht wird, diese dann jedoch durch die Bestimmung des Weges wieder ausgelöscht werden können. Es scheint so, als ob durch den Einbau des letzten Spiegels eine neue Mehrdeutigkeit entsteht, also gleichsam durch den Versuchsaufbau neues *Nicht-Wissen* erzeugt wird.³⁸ Wissen und Nicht-Wissen scheinen hier in

36 Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c9/Mach-Zehnder_interferometer.svg/350px-Mach-Zehnder_interferometer.svg.png (download 15.7.2012).

37 Siehe Kwiat, Weinfurter und Zeilinger (1997).

38 »Wheeler hat das so ausgedrückt: ›... das Photon ... nimmt nur einen Weg, aber es nimmt beide Wege, es nimmt beide Wege, aber es nimmt nur einen Weg. Was für ein Unsinn! Wie offenkundig ist es, dass die Quantentheorie widersprüchlich ist!‹ Nach Niels Bohr ist sie jedoch gar nicht widersprüchlich. Es ist eben der gesamte experimentelle Aufbau, den wir bei der Analyse der Eigenschaften eines Systems heranziehen müssen, und der experimentelle Aufbau ist eben qualitativ verschieden, je nachdem, ob der letzte halbdurchlässige Spiegel eingesetzt wird oder nicht. Wird

einem wechselseitigen konstitutiven Zusammenhang zu stehen, aus dem dann bestimmte Konstellationen von Beobachtbarem und Erwartbarem entstehen.

Delayed-Choice-Experimente

Der zweistufige Aufbau des Interferometers führte Archibald Wheeler zu einem Gedankenexperiment, mit dem die Zeitverhältnisse in Bezug auf die Generierung von potenziellem Wissen untersucht werden können. Er entwickelte hieraus die Idee der *delayed-choice*-Experimente. Da das Licht benötigt, um den Strahlengang des Versuchsaufbaus zu durchlaufen, kann man jetzt ein Experiment ersinnen, in dem erst, nachdem ein Photon den ersten Halbspiegel durchquert hat, entschieden wird, ob man den zweiten Halbspiegel am Ausgang einsetzt. Prinzipiell lassen sich mit Wheeler gar Experimente kosmologischen Ausmaßes ersinnen.³⁹ So könnte beispielsweise das Licht von sehr hellen lichtintensiven Sternen (Quasare) betrachtet werden, welches durch Gravitationszentren in zwei Wege gespalten wurde, so dass man am Himmel jetzt ein Doppelbild sieht. Durch Spiegelanordnungen könnte man diese beiden Strahlen wieder in Form eines Interferometers zusammenführen und schauen, in welcher Weise Weginformation und Interferenz miteinander in Beziehung stehen.

Nach der klassischen Teilchenauffassung wäre die Entscheidung, welcher Weg genommen worden ist, bereits Lichtjahre vor der vom Experimentator gewählten Messentscheidung getroffen worden. Mittlerweile sind eine Reihe von *delayed-choice*-Experimenten durchgeführt worden, die der Grundidee von Wheelers Gedankenexperiment folgen.⁴⁰ Bislang führen alle zu dem Befund, dass erst die Messentscheidung den Charakter des Experimentes determiniert. Im Sinne der Kopenhagener Interpretation würde dies bedeuten, dass die Bahn der Photonen vor der Messung *nicht* existiert (und zwar selbst dann, wenn das Photon Jahre vorher entstanden sein mag).

er eingesetzt, haben wir offenbar keine Information über den Weg, den das Teilchen genommen hat. Das Interessante an der Quantenphysik ist eben gerade, dass dieses Nicht-Wissen zu etwas qualitativ Neuem führt, nämlich zur Interferenz beider Möglichkeiten. Man sollte also korrekterweise nicht behaupten, das Teilchen habe beide Wege genommen, sondern: Wir wissen nicht – und niemand kann das wissen –, welchen Weg das Teilchen in diesem Fall genommen hat« (Zeilinger 2005, 201 f.).

39 Siehe Wheeler (1978).

40 Siehe etwa Jacques et al. (2007).

Erhebung und Auslöschung der Weginformation

Eine weitere aufschlussreiche Variante des Doppelspaltexperiments besteht in einer Anordnung, mittels der die Weginformation zunächst erhoben wird, dann aber in einem zweiten Schritt die gewonnene Information wieder zerstört wird. Das zunächst gewonnene Datum wird gleichsam ausradiert, bevor es genutzt werden kann, weshalb man diese Art von Versuchsaufbau auch als *Quantum Eraser* bezeichnet.

Ein solches Experiment lässt sich beispielsweise verwirklichen, indem man zunächst einen Polarisationsfilter in beide Wege stellt – sobald die Polarisation eines Quantenteilchens bestimmt ist, ist auch deren Weg bestimmt und damit verschwindet das Interferenzmuster. Vor den Schirm kann man nun einen weiteren Polarisationsfilter anbringen. Wenn dieser um einen Winkel von 45° zu den am Spalt angebrachten Filtern gedreht ist, wird die hiermit ermittelbare Information wieder aufgehoben, denn aufgrund des querstehenden Polarisators würde jetzt für beide Polarisationsrichtungen jeweils die eine Hälfte der Quantenteilchen die eine und die andere Hälfte die jeweils entgegengesetzte Drehrichtung einnehmen. Die Ungewissheit über den Status der Quantenteilchen ist damit wiederhergestellt und bemerkenswerterweise liefert das Experiment in dieser Anordnung wieder das Interferenzmuster.⁴¹ Man kann diese Experimente variieren, etwa indem nur zu einem gewissen Grad die Weginformation erhoben wird. Je nach Bestimmungsgrad verwischt dann die Interferenz in einem kontinuierlichen Übergang zwischen einem scharfen Streifenmuster und jenem Streubild, das sich bei hundert Prozent sicherer Weginformation ergeben würde.

Welle-Teilchen-Dualismus von Molekülen

Eine weitere für unseren Zusammenhang aufschlussreiche Klasse von Experimenten besteht darin, das Doppelspaltexperiment auf größere Objekte, etwa auf Atome oder gar Moleküle auszuweiten. Wenn man bereit ist, de Broglie zu folgen und auch Materie Welleneigenschaften zuspricht,⁴² dann müssten prinzipiell auch Moleküle Interferenzeigenschaften zeigen können. Mittlerweile ist das Doppelspaltexperiment mit Fullerenen durchgeführt worden.⁴³

41 Siehe etwa die Quantum-Eraser-Experimente, die von der Gruppe um Anton Zeilinger durchgeführt worden sind (Herzog, et al. 1995). Vgl. auch Walborn et al. (2002).

42 de Broglie (1927).

43 Siehe Arndt et al. (1999).

Dies sind kugelförmige Kohlenstoffmoleküle mit einer hohen Symmetrie, deren Atome wie auf der Oberfläche eines Fußballes angeordnet sind. Im Falle des C_{60} besteht ein solches Molekül aus zwanzig Sechsecken und zwölf Fünfecken.⁴⁴ In der Arbeitsgruppe von Zeilinger konnten auch bei diesen großen Molekülen die für Quantenobjekte typischen Interferenzen nachgewiesen werden. Dabei wurde folgender Versuchsaufbau verwirklicht:

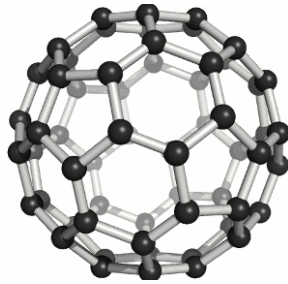


Abb. 18: C_{60} -Fulleren⁴⁵

»Im Experiment kommen diese Fußballmoleküle aus einem Ofen, der sich auf einer Temperatur von etwa 650 Grad Celsius befindet. Bei dieser hohen Temperatur verdampfen diese Moleküle und verlassen den Ofen durch eine kleine Öffnung. Nach etwa einem Meter Flugstrecke treffen die Moleküle zwar nicht auf einen Doppelspalt, dafür aber auf ein Vielspaltsystem, ein Gitter. Nach einem weiteren Meter werden diese Moleküle registriert, und was [...] dann auf dem Computerbildschirm [zu sehen ist], ist nichts anderes als die Verteilung der Fußballmoleküle in der Beobachtungsebene. Dies entspricht den hellen und dunklen Streifen im Doppelspaltexperiment, aber diesmal nicht aus Licht, sondern aus massiven Teilchen. Das heißt, es gibt in der Beobachtungsebene einen Meter hinter dem feinen Gitter im Idealfall Stellen, auf die keine Fußballmoleküle treffen, wie auch andere Stellen, auf die sehr viele treffen. Genauso wie beim Doppelspalt ist dieses Ergebnis auch beim Gitter durch Quanteninterferenz zu erklären. Jedem einzelnen Fullerenmolekül ist eine Welle zuzuordnen, die durch zwei oder mehr benachbarte Öffnungen des Gitters hindurchtritt. An manchen Stellen der Beobachtungsebene löschen sich diese Wellen gegenseitig aus, dort können also keine Fußballmoleküle mehr hin, an anderen Stellen verstärken sie sich gegenseitig.«⁴⁶

44 Die Fullerene haben ihren Namen in Gedenken an den Erfinder und Architekten Buckminster Fuller, der in seinen Arbeiten selbsttragende Strukturen entwickelt hat, die den Fußballmolekülen ähneln (vgl. Krause/Lichtenstein 1999).

45 Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Buckminsterfullerene_animated.gif (download 15.7.2012).

46 Zeilinger (2005, 102 f.).

Damit das Interferenzbild entsteht, muss der Versuch im Vakuum durchgeführt werden, denn in einer Gasatmosphäre bekommt man nur Teilchenverteilungen ohne Interferenzbilder. Die Luftmoleküle scheinen durch ihre Interaktion mit den Fullerenen diese gleichsam zu ›messen‹ und auf diese Weise in individuierbare Teilchen zu überführen. Demgegenüber scheinen sich die Fullerene ohne Messung als eine Welle zu verhalten, die das Gitter an verschiedenen Stellen durchquert und entsprechend auf dem Schirm ein Interferenzmuster erzeugt. Bemerkenswert an diesem Versuch ist, dass die Fullerene mit einer Temperatur von 650° Celsius selbst infrarotes Licht aussendet. Aufgrund des langwelligen Charakters lässt sich dieses jedoch nicht zur Bestimmung der Weginformation nutzen. Man kann jetzt aber die Fullerene weiter bis auf 3000° C aufheizen, so dass eine kurzwelligere Strahlung entsteht, die potenziell genutzt werden könnte, um den Ort einzelner Fullerenmoleküle zu bestimmen.⁴⁷ Bemerkenswerterweise verschwindet mit zunehmender Aufheizung auch das Interferenzbild. Es besteht hier also ein strenger Zusammenhang zwischen der Möglichkeit von Wechselwirkungen, die auf ein lokalisiertes Teilchen schließen lassen, und dem Auftreten von destruktiven Interferenzen, die sich anschaulich aus dem Wellenbild ergeben würden. Wohlgemerkt: Die Bestimmung des Ortes der Fullerene durch das von ihnen ausgesendete kurzwellige Licht muss nicht real durchgeführt werden, damit die Interferenz verschwindet. Wie auch schon bei der Interaktion mit den Luftmolekülen reicht allein, dass der Nachweis einer stattgefundenen Interaktion prinzipiell möglich ist.

Die hier vorgestellten neueren Variationen zum Doppelspaltexperiment zeigen auf, dass sich sehr wohl sinnvolle physikalische Fragen stellen lassen, die über die Standardinterpretation der Kopenhagener Deutung hinausweisen. So wird deutlich, dass eine ›Messung‹ bereits durch Luftmoleküle oder die Wechselwirkung entsprechend kurzwelliger elektromagnetischer Wellen veranlasst werden kann. Man braucht also nicht mehr auf eine Metaphysik des Beobachters zurückzugreifen, wonach ein Messakt subjektphilosophisch zu deuten ist. Als Minimalbedingung einer quantenphysikalischen ›Beobachtung‹ scheint jetzt eine physikalische Konstellation auszureichen, in der eine wie auch immer geartete Interaktion einen Unterschied machen kann.

Die *delayed-choice*- und die *quantum-eraser*-Experimente zeigen jedoch, dass das Mysterium der Quantentheorie damit nicht aufgehoben ist. Das Dilemma des Welle-Teilchen-Dualismus bleibt bestehen und die Option, die Quantenphysik aufgrund klassischer

47 Siehe Zeilinger (2005, 103 f.).

Beschreibungsweisen verstehen zu können, rückt hiermit in weite Ferne. Wie kann man sich einen Messvorgang noch als eine unumkehrbare Beeinflussung des zu messenden Objekts vorstellen, wenn die anschließende Löschung der Weginformation das vermeintlich ausgelöschte Wellenmuster wiederherstellt? Wie hat man sich einen Welle-Teilchen-Dualismus vorzustellen, demzufolge scheinbar die Entscheidung über den gewählten Weg vom Ende und nicht vom Anfang her zu denken ist?

Exkurs: Aktuelle Auseinandersetzung um die Interpretation der Doppelspaltexperimente

Im Zusammenhang der vorangehend geschilderten Experimente lohnt es sich, etwas näher auf Ulrich Mohrhoffs Variante der Interpretation von quantentheoretischen Prozessen einzugehen.⁴⁸ Der Grundgedanke seiner Interpretation lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Grundsätzlich wird eine realistische Perspektive eingenommen. Die Objekte unserer Alltagswelt, die den Gesetzen der klassischen Physik folgen, sind ebenso als ›real‹ zu betrachten wie der unbestimmte Charakter der Quantensysteme in der Mikrowelt. Anders als in Poppers Ensemble-Interpretation, werden die den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit folgenden Verwirklichungstendenzen (Propensitäten) jedoch nicht als kollektive Eigenschaften streuender Teilchengruppen verstanden. Vielmehr werden *einzelne* Quantenobjekte jetzt als ›objektiv‹ unbestimmt betrachtet. Entsprechend treten nach Morhoff auf der Quantenebene all die theoretisch ableitbaren Merkwürdigkeiten (einschließlich rückwärtslaufender Kausalbeziehungen!⁴⁹) als Folge ihrer inhärenten Unbestimmtheit ›wirklich‹ auf.

Im Sinne einer ›interaktionistischen‹ Perspektive ließen sich Quantenteilchen jedoch durch makroskopische Objekte bestimmen, da die Interaktion mit einer Messapparatur zu einem eindeutigen Ergebnis führe. Die Qualitäten mikrophysikalischer Objekte wären damit nicht als intrinsische Eigenschaften von Quantensystemen anzusehen, sondern würden von außen, also *extrinsisch* durch die Begegnung mit Makroobjekten bestimmt. Die aus der Alltagswelt bekannten Objekte übernehmen also die funktionale Rolle, welche in einer nicht-realistischen Interpretation der Beobachter einnimmt. Makroobjekte werden gleichsam als selbstindizierend betrachtet, während ein Quantenobjekt zu seiner Bestimmung eine Fremdindizierung durch ein Makroobjekt benötigen würde. Da Quantenobjekte auch

48 Siehe etwa Mohrhoff (1999a; 1999b; 2000; 2002).

49 Siehe Mohrhoff (1999a).

in Hinblick auf Ort und Zeit unbestimmt sind, könnte jetzt auch ihre raumzeitliche Verortung als durch Makroobjekte bestimmt gesehen werden. Sobald eine diesbezügliche Indizierung stattgefunden hat, würden wir also jene irreversiblen Kausalbeziehungen vorfinden, die uns aus der klassischen Welt vertraut sind, wo Raum, Zeit und Kausalität offensichtlich eindeutig bestimmt sind.⁵⁰

Mit Morhoff begegnen wir einem interessanten Derivat der Kopenhagener Interpretation, in der die funktionale Stelle des Beobachters durch (selbst-)indizierende Eigenschaften von Makroobjekten ersetzt wird. Ungeachtet der epistemischen Attraktion eines solchen, gewissermaßen umgedrehten Reduktionismus, stellt sich jedoch bei genauer Betrachtung heraus, dass hiermit das Beobachterproblem nicht wirklich gelöst ist.

Wie bereits bei v. Neumann bleibt die Frage offen, wie seinerseits das klassische Objekt, welches zur Bestimmung des Quantenobjektes benötigt wird, von seiner Umwelt abgegrenzt werden kann. Die Frage, ob zu einem Messgerät auch das Gebäude des Versuchsraum, die Atmosphäre, der Versuchsleiter (und warum nicht gleich das ganze Universum) dazugehört, lässt sich nicht beantworten.⁵¹ Wir

50 »The macroscopic positions are assumed to be intrinsic, self-indicating and real, while the properties of the microscopic world are contingent and extrinsic, depending on what happens in the macro-world. Mohrhoff's interpretation emphasizes the objective fuzziness of all quantum phenomena, assigning objective probabilities to the possible outcomes of unperformed measurements. He extends this non-valuedness and fuzziness to the concepts of space and time and introduces a new understanding of spatiotemporal events, the character of physical reality and the meaning of objective probability« (Shafiee/Jafar-Aghdamib/Golshanic 2006, 316).

51 »If indication is equivalent to measurement, one wonders how by invoking this notion, one can solve the anomalies of quantum world. As a matter of fact, one could declare that an indication without an observer has no meaning in the quantum domain, even if the classical objects are considered to be self-indicating. For without an observer, it cannot be verified if any property is really indicated for quantum systems. If there is a macroscopic object somewhere, then, we are always confronted with the question of how can one be assured of whether a measuring apparatus performs a measurement or not? For example, in Schrödinger's cat experiment, one cannot distinguish that the cat is dead or alive (and consequently, one cannot identify whether the spin direction of the corresponding electron, e.g., is up or down), when the cat is not observed and there is no perception of what was being measured (or indicated) therein. Mohrhoff's interpretation does not rule out the role of observer. Otherwise, the question arises as to whether the measuring instrument can provide the ground for indicating a micro-object without an observer turning on the apparatus, performing the measurement and analyzing the data.

gelangen entweder mit Bohm zu einem so umfassenden relationalen Holismus, dass es kaum mehr Sinn sinnvoll ist, von einem Makroobjekt zu sprechen (denn das Objekt wäre dann letztendlich nichts anderes als die Wellenfunktion des gesamten Universums), oder wir hätten jetzt wiederum von einer relativen Bestimmung auszugehen, die jedoch einen willkürlichen Schnitt in der Welt durch einen Beobachter voraussetzt.

Ein weiteres Problem liegt in der Frage des Anfangs. In Hinblick auf die kosmologische Evolution ist ja anzunehmen, dass makroskopische Objekte nicht schon immer vorhanden waren, sondern ihrerseits erst aus einer ›Quantensuppe‹ heraus entstanden sind. Mit Mohrhoffs Theorie würde es uns jetzt aber nicht gelingen, zu einem anfangslosen Zirkel der Selbstbestimmung zu gelangen. Da Quantenzustände aus dieser Perspektive nicht aus sich heraus zu einer weitergehenden Bestimmung fähig sind, sondern hierzu bereits in Raum und Zeit lokalisierte Objekte benötigen, gibt es keinen Anfang.⁵²

So attraktiv es auch erscheinen mag, einen *bottom-up*-Reduktionismus durch ein eindeutiges *top-down*-Kausalschema zu ersetzen, die Paradoxien der Quantentheorie verschwinden hiermit nicht.

Insbesondere Bohr hatte postuliert, dass mit der Quantentheorie eine epistemische Grenze erreicht sei, nach der es keinen Sinn mehr ergebe, nach Erklärungen zu suchen, die außerhalb der komplementär zu verstehenden Wellen- und Teilchenbeschreibung liegen.

Die hier vorgestellten Experimente haben erneut die Büchse der Pandora geöffnet. Sie offenbaren zwar neue und überraschende Einsichten in das Verhalten von Quantenobjekten. Wie man diese denkwürdigen Ergebnisse im Kontext einer ebenso denkwürdigen Theorie zu verstehen hat, bleibt jedoch alles andere als eindeutig.

One should also note that we need to have a definite quantitative definition for the spatial distribution of a classical object. One cannot define qualitatively the border between a sharp distribution and a non-sharp distribution because there is a possibility that we may not be able to distinguish these two notions in some given regions. One has to have a quantitative criterion for defining the sharpness of a spatial distribution and how one can distinguish a sharp distribution from a non-sharp one« (Shafiee/Jafar-Aghdamib/Golshanic 2006, 327).

- 52 »The existence of classical world, with objects having sharp spatial distribution, requires certain conditions which have not been there all the time. For example, what kind of reality could one ascribe to fundamental particles in the early universe, when there was no indication? Apparently, Mohrhoff takes it for granted that the classical world has always been there and that it will exist in the future« (Shafiee/Jafar-Aghdamib/Golshanic 2006, 327).

Der Experimentalphysiker Zeilinger schlägt etwa eine Radikalisierung der Kopenhagener Deutung vor und empfiehlt, das Wellen- und das Teilchenbild ganz *aufzugeben*, um stattdessen die Quantenprozesse primär auf Basis eines abstrakt gefassten Informationsbegriffs zu rekonstruieren, der diese Vorstellungen nicht mehr braucht (siehe hierzu ausführlich Kapitel IV. 3).

Demgegenüber sprechen sich Englert, Scully und Walther aufgrund der oben vorgestellten Experimente dafür aus, das Komplementaritätsprinzip zu radikalisieren, also Wellen- und Teilcheneigenschaften von Quantenmaterie *gleichzeitig* als real zu betrachten. Man hätte dann die Unbestimmtheitsrelation und das hieraus entstehende Verhältnis von Wissen und Nicht-Wissen als abgeleitete Phänomene zu begreifen.⁵³ In den Quantenobjekten würden sich dann klassische und nicht-klassische Eigenschaften in einer interessanten Weise miteinander verzahnen. Während in einer ungestörten Wahrscheinlichkeitswelle auch *rückwärtslaufende* Kausalitäten auftreten können, würde die Interaktion zwischen Quantenobjekten zu einem Symmetriebruch führen, der Ursache und Wirkung irreversibel aneinanderkettet.⁵⁴ Dies würde dann auch erklären, warum Quantenzustände solange erzeugt und wieder vernichtet werden können (Reversibilität), bis sie auf einen Beobachtungsprozess treffen, der das Geschehen zu einem irreversiblen Ereignis macht.

Die innerphysikalische Auseinandersetzung um die Interpretation der neuen Doppelspaltexperimente lässt zum einen deutlich werden, dass die Frage der Deutung der Quantentheorie zunehmend aus dem Bereich metaphysischer Spekulation in die Sphäre einer hypothesentestenden Experimentalphysik überführt wird. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass damit die Frage der Interpretation keineswegs in Richtung von mehr Eindeutigkeit überführt werden kann. Im Gegenteil, je nach gewähltem theoretischen Ausgangspunkt lassen sich die divergierenden Interpretationsansätze weiter entfalten. Die Fortschritte in der empirischen Forschung führen in eine Diversifizierung anstelle einer Vereinheitlichung der theoretischen Diskurse.

Auch dies spricht wieder für den bereits geäußerten Befund, dass physikalische Theorien heutzutage immer weniger die Realität abbilden, sondern primär autonome konzeptionelle und begriffliche Gebilde darstellen, die in Hinblick auf ihre theoretischen Möglichkeiten erforscht und aus denen dann auch empirisch überprüfbare Hypothesen abgeleitet werden können. Erst in Distanz zur beobachtbaren Wirklichkeit können die Potenziale eines theoretischen Ansatzes ausgelotet werden. Die Quantentheorie steht damit für den endgültigen Bruch zwischen einer dem Common Sense verpflicht-

53 Englert, Scully und Walther (1995).

54 So dann auch Mohrhoff (1999a).

teten Anschauung von Realität und der physikalisch-theoretischen Konzeptionalisierung von Wirklichkeit. Als Folge hat die Physik wohl auch in Zukunft hinzunehmen, dass sie theoretisch nicht mehr zu einer Einheit finden kann, dass also unterschiedliche theoretische Zugänge parallel entwickelt und ausdifferenziert werden, um physikalische Sachverhalte erklären und deuten zu können.

5 Makroskopische Quantenphänomene: Emergente, kollektive Ordnungen

Auf den folgenden Seiten soll mit der Suprafluidität, der Supraleitung und den Quantenhalleffekten auf eine Gruppe interessanter empirischer Phänomene eingegangen werden, die in besonderer Weise die Verzahnung von Theorie, Experimentalphysik und Theorieentwicklung innerhalb der Quantenphysik deutlich machen. Hier zeigt sich, wie von einem spezifischen empirischen Forschungsfeld aus Erkenntnisse generiert werden, die dann wiederum auf das Verständnis der Quantentheorie rückwirken, indem neue Wege aufgezeigt werden, wie Phänomene quantenmechanisch konzeptionalisiert und interpretiert werden können. Als Ausgangsproblem erscheinen zunächst seltsame und unerklärliche empirische Phänomene, die in Rückgriff auf quantentheoretische Überlegungen möglicherweise einer Klärung zugeführt werden können, dann aber die Quantentheorie herausfordern, ihre Denkweisen unter dem Blickwinkel emergenztheoretischer Konzepte zu reflektieren. Die spezielle Anwendung der Quantenmechanik auf diese Phänomene wirft also neue Bezugsprobleme auf, die zu einer eigenständigen Theoriebildung im Sinne einer in sich konsistenten physikalischen Anschauung führen.

Kollektive Quantenphänomene sind von Einstein auf Grundlage einer Arbeit des indischen Physikers Bose schon im Jahr 1925 aufgrund von theoretischen Überlegungen vorhergesagt worden. Seine Argumentation schließt an die Planckschen Studien zur Schwarzkörperstrahlung an, die zur Entdeckung der Quantelung von Strahlungsenergien geführt hatte. Planck hat dabei auf Boltzmanns Wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation der Entropie zurückgegriffen, die das Verhalten von Gasen beschreibt. Hierbei werden all die Varianten ausgezählt, über die ein Makrozustand realisiert werden kann. Auf Basis der sich hieraus ergebenden Statistik konnte Planck zeigen, dass die Strahlungsformel, in die das Plancksche Wirkungsquantum eingefügt werden musste, auch physikalisch-konzeptionell sinnvoll ist (siehe ausführlich Kapitel I).

Da die Planckschen Arbeiten sowieso schon auf eine nähere Verbindung im Verhalten von Strahlung und Gasen hinweisen, lag es für Einstein nahe, die sich hieraus ergebenden Beziehungen näher zu erkunden und zu schauen, ob sie sich in eine vollständige Analogie von Quantengas und Molekülgas überführen lassen.⁵⁵

Die Grundidee ist dabei folgende: Man erweitert die Planckschen Arbeiten auf Materiewellen, die sich durch die von de Broglie gefundene Beziehung beschreiben lassen. Für unsere Zwecke reicht es zu verstehen, dass die Wellenlänge von der Temperatur abhängt. Kälte geht mit langsameren Atom- oder Molekülbewegungen und entsprechend längeren Wellenlängen einher. Heißere Verhältnisse führen demgegenüber zu kürzeren Wellenlängen mit entsprechend höheren Frequenzen und Energien. Bei sehr kalten Temperaturen werden die Wellenlängen so groß, dass ein Wellenzug die räumliche Anordnung mehrerer Atome übergreifen kann. Die Wellen der einzelnen Atome beginnen sich entsprechend in einer Weise zu überlagern, dass sie örtlich nicht mehr einzelnen Teilchen zugeordnet werden können. Einstein postulierte nun mit Blick auf die Analogie von Quanten- und Atombeschreibung, dass unterhalb einer kritischen Temperatur ein Phasenübergang stattfinden müsse. Die Teilchen würden hier gleichsam ihre Identität verlieren und zu einem Kondensat zusammenfinden, das durch eine übergreifende Wellenbeziehung charakterisiert werden müsse.⁵⁶

55 Hierzu Einstein im Original: »In einer neulich in diesen Berichten [Quelle 1924] erschienenen Abhandlung wurde unter Anwendung einer von Hr. D. Bose zur Ableitung der Planckschen Strahlungsformel erdachten Methode eine Theorie der ›Entartung‹ idealer Gase angegeben. Das Interesse dieser Theorie liegt darin, daß sie auf die Hypothese einer weitgehenden Verwandtschaft zwischen Strahlung und Gas gegründet ist. Nach dieser Theorie weicht das entartete Gas von dem Gas der mechanischen Statistik in analoger Weise ab, wie die Strahlung gemäß dem Planckschen Gesetze von der Strahlung gemäß dem Wienschen Gesetze. Wenn die Bosesche Ableitung der Planckschen Strahlungsformel ernst genommen wird, so wird man auch an dieser Theorie des idealen Gases nicht vorbeigehen dürfen; denn wenn es gerechtfertigt ist, die Strahlung als Quantengas aufzufassen, so muß die Analogie zwischen Quantengas und Molekülgas eine vollständige sein.« (Einstein 1925).

56 Quantenteilchen, wie Elektronen in einem Atom oder Molekül, verlieren entsprechend der Quantentheorie per se ihre Identität, da sie nicht räumlich lokalisiert zu denken sind. Sie sind damit auch nicht im Sinne von Ordinalzahlen zählbar, wie Lévy-Leblond herausstellt. »Man kann die Anzahl der Elektronen zählen, aber nicht dadurch, dass man sie voneinander unterscheiden könnte, was zur Folge hat, dass der Begriff der Anzahl für Quantenobjekte sehr viel schwieriger zu handhaben ist

Wie bereits gesagt, sind die Überlegungen, welche zur Vorhersage des *Bose-Einstein-Kondensats* führen, statistische.⁵⁷ Jenseits einer kritischen Temperaturgrenze, wird der Übergang von einer in eine andere Phase mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartbar. Der vorhergesagte Effekt beruht darauf, dass das Verhalten eines Partikels von dem Verhalten anderer Partikel abhängig ist. Dies impliziert, dass die kollektiven Eigenschaften umso wahrscheinlicher werden, je mehr Partikel in das System involviert sind. Mikroskopisches Verhalten erscheint damit als emergentes Produkt makroskopischer Ordnungszustände.

als für gewöhnliche Objekte. Im Rahmen des klassischen Begriffs der Anzahl, der dazu dient, die Äpfel, die Scheuerlappen, die Servietten, überhaupt alle gewöhnlichen Gegenstände zu zählen, unterscheidet man zwei Aspekte, den kardinalen und den ordinalen Aspekt der Zahl. Der Kardinalzahlaspekt ist derjenige der Quantität der Menge insgesamt: Zum Beispiel kann ich die Anzahl der Zuckerstücke dadurch bestimmen, dass ich sie in ihrer Gesamtheit wiege und durch die Masse eines einzelnen Zuckerstücks teile. Der Ordinalzahlaspekt besteht in der Möglichkeit, eine Ordnung unter ihnen zu installieren und sie, etwa durch Etablierung einer Anordnung (im Anschauungsraum), zu einem ersten Zuckerstück, zu einem zweiten, dritten, vierten, fünften Zuckerstück zu machen; am Ende dieser Abzählung wird man dann sagen können, dass es fünf davon gibt. Hinsichtlich der lokalisierbaren Gegenstände ist es, so sind wir es gewohnt, immer möglich, sie in eine Reihenfolge zu bringen, und auf diese Weise geht der Ordinalzahlaspekt Hand in Hand mit dem Kardinalzahlaspekt. Die Quantenobjekte dagegen verlieren die Ordinalität, bewahren aber die Kardinalität. Man kann sagen: Es gibt acht Elektronen im Sauerstoffatom, aber man kann sie nicht in eine Reihenfolge bringen – das erste, das zweite, das dritte, etc.« (Lévy-Leblond 2011, 45 f.). In der Quantentheorie taucht gewissermaßen das Phänomen eines absoluten, die räumliche Getrenntheit übergreifenden Identisch-Seins auf: »Dagegen hat das absolute Identisch-Sein der Quantonen einer bestimmten Art entscheidende Konsequenzen. Es liegt einem gänzlich neuen, eigenständigen Kollektivverhalten zugrunde. Der Zustand eines Ensembles von Quantonen kann, im Gegensatz zum Fall klassischer Teilchen, nicht durch den Rückgriff auf eine Liste individueller Zustände beschrieben werden, die jeweils einem der Mitglieder des Ensembles zugeschrieben werden können« (Lévy-Leblond 2011, 47).

57 An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass unterschiedliche Teilchenarten in Hinblick auf ihre Neigung in gleichen oder unterschiedlichen Energieniveaus vorzukommen, zu unterschiedlichen Statistiken führen. Die hier vorgestellten Überlegungen führen zur Bose-Einstein-Statistik, die sich auf die Gruppe der Bosonen bezieht. Eine gut verständliche Einführung in die Thematik gibt Ketterle (2006).

Suprafluidität

Knapp 15 Jahre nach Einsteins Studie konnte 1938 bei Helium, das auf eine Temperatur von $2,17^\circ$ Kelvin gekühlt wurde, ein Phasenübergang entdeckt werden, der mit neuen und außerordentlich bemerkenswerten Eigenschaften einhergeht.⁵⁸ Fritz London wiederum, der von Einsteins diesbezüglichen Arbeiten wusste, griff die Idee der Kondensation zum Quantengas auf und entwickelte hieraus eine Theorie der Suprafluidität und Supraleitung. Beide Phänomene ließen sich auf diesem Weg erfolgreich als kollektive Quantenphänomene beschreiben.⁵⁹

Suprafluides Helium hat praktisch keine Viskosität und dringt reibungsfrei durch engste Kapillaren und kann zudem von alleine an Gefäßwänden hochkriechen. Es hat eine Wärmeleitfähigkeit, welche die eines Metalls wie Kupfer um mehr als das tausendfache übertrifft. Die auf einer Seite eines Gefäßes mit suprafluidem Helium eingestrahlte Wärme wird praktisch sofort auf der andern Seite wieder abgestrahlt. Der Wärmetransport verläuft nicht wie in normalen Flüssigkeiten über Diffusion (d. h. über den Austausch der Energie über Teilchenstöße), sondern über wellenförmige Temperaturpulse, weshalb man hier auch vom *zweiten Schall* spricht.

All diese Eigenschaften lassen sich nicht mit den Mitteln der klassischen Physik erklären. In der Thermodynamik wird Wärme bekanntlich mittels der Bewegungsenergie individueller Teilchen beschrieben. Eine Temperatur ist dann nichts anderes als der Mittelwert aller vorfindbaren Teilchenbewegungen. Viskosität erscheint als Konsequenz von Reibungsprozessen, in denen gerichtete Bewegungen von Teilchengruppen durch Teilchenstöße in diffuse Wärmeprozesse umgewandelt werden. Die Wärmekapazität ergibt sich aus den Freiheitsgraden eines Teilchenensembles, also aus den Möglichkeiten, Energie auf unterschiedliche Bewegungsrichtungen individuierter Teilchen zu verteilen. Die Wärmeleitfähigkeit entspricht dem Transport von Energie über Teilchenstöße.

Die *Entropie* erscheint hiermit als das Maß, welches die *Menge an Information* angibt, die benötigt wird, um einen Aggregatzustand zu beschreiben. Sie hängt von den Freiheitsgraden ab, in dem sich die Teilchen in einem Gas in unterschiedlichen Richtungen bewegen können. Wärmeleitfähigkeit, Viskosität und Entropie stehen hiermit in enger Beziehung zueinander. Damit wird aber auch deutlich, dass sich mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht erklären lässt,

58 Siehe Kapitza (1938) und Allen/Misener (1938).

59 Siehe London (1938) und London (1950/1954).

warum Helium im suprafluiden Zustand praktisch keine Viskosität, eine unendliche Wärmeleitfähigkeit und keine Entropie aufweist.

Der quantentheoretisch abgeleitete Phasenübergang zum Bose-Einstein-Kondensat eröffnet demgegenüber eine einfache, wenngleich eigenartige Erklärung. Im suprafluiden Zustand haben die Atome keine Individualität mehr, denn sie verschmelzen zu einer einzigen Quantenwelle. Hiermit einhergehend verschwinden auch die Eigenschaften, die individuelle Atome besitzen können. Ohne individuierbare Teilchen gibt es aber auch keine Freiheitsgrade mehr, um Wärme in verschiedene Raumrichtungen transportieren oder speichern zu können. Ohne diese Freiheitsgrade besteht kein Aggregat mehr, das Entropie beinhalten kann bzw. über das informationstheoretische Überlegungen hinsichtlich wahrscheinlicher Zustandskombinationen erstellt werden können. Im Kondensat besteht nur noch *ein* Quantenzustand.

Wenn Suprafluidität auf Quantengasen beruht, müssten sich bei geeigneter Versuchsanordnung auch Interferenzphänomene zeigen lassen. In den 1990er-Jahren konnte dies experimentell demonstriert werden, indem zwei Bose-Einstein-Kondensate zur Überlappung gebracht wurden. Im Einklang mit der quantenmechanischen Beschreibung zeigte sich hier in der Tat, dass destruktive Interferenzen auftreten können, dass also eine Kombination von Materie und Materie zu keiner Materie führen kann.⁶⁰ Die Quantenphysik liefert auch hier eine erfolgreiche Erklärung für ein bizarres empirisches Phänomen, was wiederum die Experimentalphysik herausfordert, auf Grundlage der Vorhersagen der Theorie weitere, abgeleitete Quantenphänomene zu suchen und zu bestätigen.

Supraleitung

Gehen wir mit der Supraleitung kurz auf ein anderes kollektives Quantenphänomen ein. Auch hier tritt bei einer kritischen Temperatur ein Phasenübergang ein, der jedoch in diesem Falle die elektromagnetischen Eigenschaften des Materials radikal transformiert. Im Supraleiter fällt der elektrische Widerstand auf den Wert Null und gleichzeitig werden die von außen angelegten Magnetfelder aus dem Leiter herausgedrängt. Technisch lässt sich die Supraleitung etwa für die Erzeugung sehr starker Magnetfelder nutzen. Man speist dann in eine supraleitende Spule einen starken Strom ein, schließt den Kreis und nun kann der Strom widerstandsfrei im Kreis rotieren.

60 »*Those areas of destructive interference show that matter combined with matter can result in no matter!*« (Ketterle 2006). Siehe zum Versuch vor allem Andrews et al. (1997).

Auch die Supraleitung kann durch ein den ganzen Leiter übergreifendes Bose-Einstein-Kondensat erklärt werden, wobei sich jedoch die Erklärung, warum Elektronen in eine einheitliche Wellenfunktion übergehen, nicht so leicht erschließt. Aufgrund des Ausschließungsprinzips von Pauli unterliegen Elektronen – anders als flüssiges Helium – nicht der Einstein-Bose-Statistik. Aus quantenmechanischen Gründen können zwei Elektronen nicht den gleichen Raum einnehmen.

Bardeen, Cooper und Schrieffer gelang 1957 jedoch eine überzeugende quantentheoretische Erklärung, die darauf beruht, dass Elektronen im Kontext bestimmter Wechselbeziehungen zu den umgebenden Atomen sogenannte Cooper-Paare bilden können, die dann wiederum einer Statik folgen, die zu einer Bose-Einstein-Kondensation führen kann.⁶¹ Für diese Arbeit bekamen sie den Nobelpreis.

Einfach gesagt beruht ihre Erklärung auf der Idee, dass zwei Elektronen miteinander zu einem Paar gekoppelt werden können, wenn sie aufgrund der Schwingungen der sie umgebenden Atomgitter kontinuierlich (virtuelle) Photonen austauschen. Diese Paare bilden nun eine Einheit, die in der Summe den Spin Null trägt, was wiederum gestattet, dass diese Paare sich in das Kollektiv einer übergreifenden Wellenfunktion einreihen können. Die Theorie mutet auf den ersten Blick ziemlich verrückt an, da nun gleich zwei unterschiedliche Mechanismen kollektiver Wirkungen miteinander gekoppelt werden müssen. Zunächst emergieren aus den Atomen des Leitungsgitters und den noch vollständig individualisierten Elektronen Cooper-Paare. Die Cooper-Paare führen dann in einem zweiten Schritt der Kollektivierung zur Emergenz eines Quantengases, welches als eine einzige Elektronenwelle agiert und somit die Eigenschaften der Supraleitung erklärt.

Empirisch findet diese Theorie ihre Bestätigung in dem Befund, dass die Temperatur, an der der Phasenübergang zum Einstein-Bose-Kondensat eintritt, in linearer Weise von der Isotopenmasse der Gitteratome des Leiters abhängt. Die Schwingungsenergie des Gitters steht hiermit genau im Einklang mit der zur Erzeugung eines Cooper-Paares notwendigen Strahlungsenergie. Alles Weitere funktioniert dann entsprechend dem Prinzip der Aufsummierung wahrscheinlicher Wege. Wenn Cooper-Paare wahrscheinlich werden, wird auch die Integration in ein übergreifendes Elektronenkondensat wahrscheinlich, was dann wiederum die Stabilisierung der Cooper-Paare wahrscheinlicher werden lässt.

In Hinblick auf die physikalisch-konzeptionelle Grundlage begreifen wir auch hier einem Phasenübergang, der nur als ein makroskopisches emergentes Phänomen verstanden werden kann. Der

61 Siehe Barden, Cooper und Schrieffer (1957).

kollektive Zustand versklavt die weniger bestimmten mikroskopischen Zustände und lässt dadurch den kollektivierten Systemzustand wahrscheinlich werden. In Begriffen der Theorie dissipativer Strukturen würden wir hier von einem ›Attraktor‹ sprechen, den die Systemdynamik im Phasenübergang anläuft.⁶²

Die Theorie der Cooper-Paare führt zur Vorhersage weiterer experimentalphysikalisch nachweisbarer Effekte. So erfolgt beispielsweise das Durchtunneln von Leiterbarrieren eines Supraleiters immer mit zwei Elektronen gleichzeitig.⁶³

Die Entwicklung neuer theoretisch konzeptioneller Verständnissen steht auch hier in engem Zusammenhang mit der Umsetzung ins empirische Experiment. Nur auf solchem Wege lassen sich solchermaßen hochgetriebene Fortentwicklungen der Quantenphysik plausibilisieren und innerhalb der Wissenschaftsgemeinschaft als Common Sense und Status quo physikalischer Theoriebildung etablieren.

Quanten-Hall-Effekt

Abschließend möchten wir mit dem Quanten-Hall-Effekt, für dessen Entdeckung Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis bekam, ein weiteres kollektives und emergentes Quantenphänomen vorstellen. Worin besteht dieser Effekt?

Bringt man Materialflächen, durch die ein Strom fließt, in ein Magnetfeld, so entsteht senkrecht zur Richtung des Stromflusses eine weitere Spannung, die kontinuierlich mit der Stärke des Magnetfeldes ansteigt. Nimmt man als Platte jetzt Halbleiter mit einer sehr dünnen Leitungsoberfläche und kühlt diese auf Temperaturen um wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt ab, so steigt die Spannung nicht mehr linear mit der Magnetfeldstärke, sondern stufenweise in Form einer Treppe. Die quantentheoretische Erklärung dieses Phänomens geht auch hier von einem Einstein-Bose-Kondensat aus, das diesmal jedoch nicht räumlich ausgebreitet ist, sondern sich als zweidimensionales, also flächiges Elektronengas realisiert. Aus der Kombination der Interferenzeffekte, die sich im Magnetfeld aus kreisförmigen Elektronenströmen ergeben, und der Supraleitung an der Oberfläche des Leiters kann das Stufenmuster quantenphysikalisch erklärt werden.

Erstaunlicherweise zeigt sich jetzt, dass das Verhältnis der Stufen nicht vom Material oder der Form der Probe beeinflusst wird. Ebenso

62 Siehe zur Theorie dissipativer Strukturen Prigogine (1979).

63 Brian Josephson hat für Entdeckung und Vorhersage dieses Effektes 1973 den Nobelpreis bekommen (siehe Josephson 1973).

macht es nichts aus, wenn die Probe durch schlechte Lötstellen oder auf andere Weise verunreinigt ist. Es reicht allein, wenn die Probe eine gewisse Größe hat. Ist dies der Fall, werden die Stufen in einem genau definierten Verhältnis reproduziert, das durch die Klitzing-Konstante gegeben ist. Interessanterweise stimmt diese Konstante genau mit dem Quotienten aus dem Planckschen Wirkungsquantum und dem Quadrat der Elementarladung überein (h/e^2).⁶⁴

Dieser Befund ist insofern bemerkenswert, als er den Gedanken nahelegt, dass sich möglicherweise die Naturkonstanten selbst als makroskopisch kontextualisierte Phänomene verstehen lassen. Laughlin, der später den Nobelpreis für die Entdeckung und Erklärung des fraktionalen Quantenhalleffekts bekommen hat, bemerkt hierzu:

»Gewöhnlich sehen wir diese Ladung als Baustein der Natur, der keinen kollektiven Kontext benötigt, um einen Sinn zu ergeben.

64 »Nachdem von Klitzing die universelle Gültigkeit nachgewiesen hatte, bemerkte er rasch, dass das Quantum des so definierten Hall-Widerstands eine Kombination aus physikalischen Naturkonstanten war – der unteilbaren elektrischen Elementarladung e , der Planck-Konstante h und der Lichtgeschwindigkeit c –, von denen wir glauben, dass sie alle Bausteine des Universums sind. Diese Tatsache schließt offensichtlich auch ein, dass man die Bausteine mit atemberaubender Geschwindigkeit messen kann, ohne mit ihnen selbst umgehen zu müssen. Für die meisten Physiker ist das zutiefst bedeutsam und zutiefst anstößig. Die Nachdenklicheren unter ihnen können es einfach nicht glauben, solange sie die Zahlen nicht studiert haben, und selbst dann argwöhnen sie, dass das nicht stimmt. Doch das kommt nie vor. Es gibt Experimente in Hülle und Fülle und sie sind konsistent und schwer angreifbar. Zudem scheint die Genauigkeit der Messung von Klitzings unbegrenzt weiter zuzunehmen, wenn man die Temperatur weiter absenkt und die Probe größer macht. Deshalb ist sie zur anerkannten Definition für diese spezielle Kombination von Naturkonstanten geworden. [...] Wie wir alle wussten, waren von Klitzings Proben nicht perfekt, weshalb wir davon ausgingen, dass wir sie variieren sollten. In Prozessor-Halbleitern treten immer Variable auf, die man nicht kontrollieren kann, etwa strukturelle Defekte im Kristallgitter, zufallsbedingte eingebaute Fremdatome, amorphe Oxide an der Oberfläche, angefranzte Ränder, die bei der optischen Lithografie zurückbleiben, Metallstückchen, die beim Befestigen von Drähten mit klobigen Lötcolben über die Oberfläche verteilt werden und so weiter. [...] Tatsächlich ist der Quantenhalleffekt ein großartiges Beispiel, wie Perfektion aus Unvollkommenheit hervorgeht. [...] Die extreme Genauigkeit des Von-Klitzing-Effekts lässt dessen kollektive Natur unbestreitbar werden, und darin liegt seine besondere Bedeutung« (Laughlin 2007, 120 f.).

Selbstverständlich wird diese Vorstellung durch die einschlägigen Experimente widerlegt. Diese zeigen, dass die Elektronenladung *nur* in einem kollektiven Kontext Sinn ergibt – und dieser Kontext kann entweder durch das leere Vakuum des Raums bereit gestellt werden, das die Ladung in der selben Weise modifiziert, wie die atomaren Wellenlängen oder durch irgendwelche Materie, die den Effekten des Vakuums zuvorkommt. Überdies erfordert die Fähigkeit der Materie, vorrangig in Erscheinung zu treten, dass die hier wirkenden Organisationsprinzipien die gleichen sind, die auch im Vakuum am Werk sind, weil die Effekte sonst ein Wunder wären.

Wie sich herausstellt ist das Rätsel der Elektronenladung kein einmaliger Fall. Alle fundamentalen Konstanten setzen den Kontext einer Umgebung voraus, um einen Sinn zu ergeben. In der Praxis gibt es in der Physik keine Unterscheidung zwischen reduktionistischen und emergenten Größen. Sie ist lediglich eine künstliche Erfindung und ähnelt eher unserer Gewohnheit, unbelebten Objekten manchmal ein Geschlecht zuzuweisen«. ⁶⁵

Die hier vorgestellten kollektiven, bei niedrigen Temperaturen beobachtbaren Quantenphänomene eröffnen *emergenztheoretische* Perspektiven. Sie weisen auf Phasenübergänge hin, die durch makroskopische Ordnungsrelationen bestimmt werden und in denen weniger das Ganze durch die Teile, sondern vielmehr die Teile (immer) auch durch das Ganze bestimmt zu sehen sind. Wir treffen auf sich selbst stabilisierende Wahrscheinlichkeiten. *Selbstähnlichkeit* und *fraktale Geometrie* werden hiermit zu Theoriefiguren, die sowohl für die Erklärung von Phasenübergängen in klassischen als auch quantenmechanischen Phänomenen von wichtiger Bedeutung sind. ⁶⁶ Mikro- und Makrophänomene zeigen sich hier in komplexen Konstitutionsverhältnissen, in denen Grund und Begründetes zirkulär miteinander verschachtelt werden.

Die Untersuchung makroskopischer Quantenphänomene stellt ein empirisch außerordentlich fruchtbares Forschungsfeld dar, in dem sich Theorieentwicklung und Experimentalphysik in engen Zyklen verzahnen.

Die von Bose und Einstein postulierte Krise der Individualität der Teilchen im Quantengas wird mit den hier vorgestellten Experimenten innerhalb des wissenschaftlichen Diskurses in wissenschaftliche Wahrheiten überführt, die von verschiedenen Seiten flankiert werden

65 Laughlin (2007, 41).

66 Vgl. Papon et al. (2006).

und an die unterschiedlichen Teilgebiete der Physik und Ingenieurwissenschaften anschließen können.

Versuchen wir hier wiederum das Verhältnis von physikalisch konzeptioneller Anschauung, Mathematik und Experimentalphysik zu reflektieren: Einsteins und Boses Überlegungen aus dem Jahr 1925 hatten zunächst den Status von Randbemerkungen zu theoretischen Problemen der damals noch nicht etablierten Quantenphysik und fanden entsprechend nur marginale Beachtung. Erst das empirische Phänomen der Suprafluidität führt zu Suchbewegungen, welche solch randständigen Theorieoptionen attraktiv erscheinen ließen. Indem aber jetzt die Idee einer Statistik kollektiver Quantenphänomene auf einen empirischen Gegenstand trifft, der hiermit erfolgreich konzeptionalisiert und beschrieben werden kann, können jetzt auch riskantere Theoriekonstruktionen ausprobiert werden, die Individualisierung und Kollektivierung von Quantenobjekten in ein wechselseitiges Fundierungsverhältnis setzen. Diese Bewegung erlaubt es schließlich, die Quantentheorie aus Perspektive der Emergenz zu denken. Wenngleich Emergenz zunächst ein Konzept der klassischen Physik darstellt, mit dem Phasenübergänge erklärt werden können, lässt sich diese Theorieoption mit quantentheoretischen Elementen rekombinieren. Dies führt wiederum im Falle der Supraleitung zu einer noch gewagteren Theoriekonstruktion, die auf zwei ineinander verschachtelten, sich wechselseitig stabilisierenden emergenten Prozessen beruht.

Die Theorie, dass zwei individualisierte Objekte ein Paar bilden, das einen Teil der Objekteigenschaften aufhebt, was dann eine vollständige Kollektivierung zu einem übergreifenden Quantenzustand erlaubt, ist auf den ersten Blick so bizarr, dass sie kaum eine Chance hätte, wenn nicht auf diesem Wege empirische Befunde erklärt und weitere empirisch überprüfbare Thesen generiert werden könnten. Wir treffen hier auf eine zunächst hoch unwahrscheinliche Rekombination zweier Theoriesprachen aus jeweils verschiedenen Teilgebieten der Physik (Emergenz- und Quantentheorie), die auf jeweils unterschiedlichen physikalischen Anschauungen beruhen. Der empirische Erfolg der auf diese Weise gewonnenen Theorie, sobald hinreichend stabilisiert und damit autonom geworden, legt es jedoch nahe, nun alle quantenphysikalischen Phänomene emergenztheoretisch zu betrachten. Hiermit entsteht innerhalb der Quantentheorie ein weiteres Paradigma, mit dem dann auch das Deutungsproblem der Quantentheorie in einem anderen Lichte erscheint (siehe ausführlich Kap IV.6). Die Idee der Emergenz wird jetzt zu einer eigenständigen konzeptionellen Anschauung, um die eigenartigen Phänomene der Quantenwelt verstehen zu können.

Homolog zur Anschauungstechnik der Feynman-Diagramme gewinnt die theoretische Physik hier eine weitere Rahmentheorie, welche die konzeptionelle Selbstidentifikation von Theoriebildungen anleitet und Raum bietet, sich mit den hierdurch ergebenden theoretischen und experimentalphysikalischen Möglichkeiten zu neuen Formbildungen anregen zu lassen.

Auch hier lässt sich wieder ein deutlicher Bruch zum Theorieverständnis der klassischen Physik feststellen. Während dort physikalisch-konzeptionelle Anschauung und empirische Phänomene noch in unmittelbarem Bezug zueinander stehen, löst sich die theoretische Anschauung auch hier vom beobachtbaren Gegenstand ab. Ein fallender Apfel, der den Gesetzen der Newtonschen Physik folgt, lässt sich beobachten. *Cooper-Paare*, die sich in eine übergreifende Wellenfunktion auflösen, sind niemals gesehen worden. Sie beruhen auf einer theoretischen Anschauung, die sich nur deshalb plausibilisieren lässt, weil ihre theoretischen Modellierungen mit empirisch beobachtbaren Phänomenen in Einklang gebracht werden können. Wir treffen auch hier auf Hochabstraktionen physikalischer Theoriebildung, die gerade deshalb erfolgreich sein können, weil sie sich von der Außenwelt ablösen und innere Formmöglichkeiten ausprobieren, um auf diesem Wege zu einer Rekombination von Theorieelementen zu gelangen, welche sich an die empirischen Befunde anschmiegen können.

6 Normalisierung einer Theorie, die nicht mehr mit dem Common Sense vereinbar ist

Die Entwicklung der Quantenphysik führte zunächst über die Abstraktionen einer autonom gewordenen Mathematik. Der damit verbundene Verlust an Anschaulichkeit wird jetzt jedoch innerhalb der Physik durch neue Formen theoretischer Anschauung kompensiert, mit denen sich nun erneut wieder physikalisch erklären lässt, wenngleich die Begriffe ›Erklären‹ und ›Theorie‹ jetzt etwas anderes meinen. In der klassischen Physik waren Teilchen noch Teilchen und Wellen noch Wellen. Der epistemische und der ontologische Charakter der grundlegenden Elemente der Theoriebildung standen noch im Einklang mit dem Common Sense unserer Welterfahrung. Entsprechend fallen hier Erklären und Begreifen noch zusammen. Nachdem sich die Quantentheorie mit Heisenbergs Matrizenmechanik zunächst radikal von den klassischen Konzepten gelöst hat, tauchen in ihrer Theoriebildung erneut vermehrt physikalisch-konzeptionelle Anschauungen auf, welche die Suchbewegungen der theoretischen

Physik anleiten. Hierbei handelt es sich jetzt aber überwiegend um theoretische Konstrukte, die sich nicht mehr an irgendeine phänomenologisierbare Erfahrung anbinden lassen – und dies auch nicht mehr nötig haben. Wir treffen nun vielmehr auf einen gemeinsamen Tanz unterschiedlicher theoretischer und experimentalphysikalischer Projekte, in der manchmal das Experiment die Theorie führt und manchmal die Empirie neue Spielarten der Kombination theoretischer Anschauung herausfordert.

Die Quantentheorie erweist sich für die Experimentalphysik als ein außerordentlich erfolgreiches Paradigma, das vielfältige Forschungsvorhaben entwickeln und strukturieren lässt. Sei es in der Physik der elektronischen und elektrotechnischen Bauteile, der physikalischen Chemie, der Astronomie, der Tieftemperaturphysik, der Optik oder der Elementarteilchenphysik – der Status der Quantenmechanik als einer physikalischen Fundamentaltheorie ist mittlerweile unumstritten.⁶⁷ Wie Peter Mittelstaedt feststellt, ist die überwiegende Mehrzahl der Physiker mittlerweile bereit, die bizarren Konsequenzen dieser Theorieanlage hinzunehmen und als Normalität anzuerkennen:

»Anders als in den ersten Jahrzehnten der neuen Theorie geht es nicht mehr darum, die Schrecken der Quantenphänomene zu bannen. Unbestimmtheiten, Tunneleffekte, Nichtlokalität und Teleportation gehören vielmehr zum Alltag des Quantenphysikers. Die Aufgeregtheiten, die man auch heute noch über solche Effekte in der populärwissenschaftlichen Literatur und in der Presse findet, sind nichts als Nachhutgefechte.«⁶⁸

Schon die kurze Zusammenschau der hier vorgestellten Forschungsbeispiele zeigt auf, dass die quantentheoretisch inspirierte Experi-

67 Lévy-Leblond weist darauf hin, dass allerdings die Alltagstechniken, in denen Quantenwissen zur Anwendung kommt, in der Regel genauso unanschaulich sind wie die Theorie: »Wenn ich versuche, dem Elektron eine wohl definierte Position zuzuschreiben, indem ich es zwingen, sich an einem präzise bestimmten Punkt aufzuhalten, verliere ich mit einem Schlag alle Information hinsichtlich seiner Geschwindigkeit, und umgekehrt. Dabei handelt es sich nicht um ›Unschärfen‹ oder ›Ungewissheiten‹. Man kann diesen Ausdruck der ›Unschärfe‹ nur verwenden, wenn man an der Vorstellung festhält, dass das Elektron an einem präzise bestimmten Ort sei, ohne selbst zu wissen, wo, und eine präzise bestimmte Geschwindigkeit besitze, die man nur nicht kenne. Das aber hieße, es sich weiterhin als ein klassisches Teilchen vorzustellen; in diesem Sinne ist der Ausdruck ›Unschärfe‹ ein Relikt klassischer Konzeptionen, von denen die eigentliche Quantentheorie sich trennt« (Lévy-Leblond 2011, 57).

68 Mittelstaedt (2000, 67).

mentalphysik in recht heterogene Forschungsfelder aufgefächert ist. Die emergenztheoretisch begründeten Untersuchungen zu den Phasenübergängen in der Supraleitung haben kaum etwas mit den Fragen gemein, welche ein unter *delayed-choice*-Bedingungen durchgeführtes Doppelspaltexperiment beantworten soll. Beide haben wiederum wenig mit den Problemstellungen zu tun, an denen sich die Quantenfeldtheorie abarbeitet. Die einzige gemeinsame Klammer der unterschiedlichen Forschungsprojekte bleibt die mit der Schrödinger-Gleichung gegebene Wellenbeziehung, derzufolge ›Wellen von nichts‹ eine physikalische Bedeutung bekommen.

Der Aharonov-Bohm- oder der Casimir-Effekt sprechen dafür, dass Quantenfelder selbst dann wirken, wenn keine klassischen Kraft-Materie-Konstellationen vorhanden sind, die eine Wirkung vermitteln könnten.

In Feynmans Quantenelektrodynamik stimmen gerade deshalb die Daten aus Experiment und theoretischer Vorhersage in solcher Genauigkeit miteinander überein, weil die kollektive Beschreibung ›alle Wege‹ zu jenem Interferenzmuster führt, das Phänomene ausflaggt, die uns als Teilchen mit konkreten Eigenschaften erscheinen.

Wenn die Auslöschung der Weg-Information im Doppelspaltexperiment die Interferenz wiederherstellt, ist es nicht mehr sinnvoll, davon zu sprechen, dass ein individuierbares Teilchen diesen oder jenen Weg genommen hat. Teilchen- oder Welleneigenschaften sind jetzt nur noch als kontextualisierte Eigenschaften eines experimentellen Gesamtarrangements sinnvoll beschreibbar.

In der Bose-Einstein-Statistik können die Eigenschaften und das Verhalten eines Partikels nicht mehr ohne Referenz auf die Eigenschaften und das Verhalten von anderen Partikeln verstanden werden. In Quantengasen kann die Individualität von Teilchen gar vollkommen verschwinden, sodass es nahe liegt, im Sinne einer *top-down*-Kausalität Teilchen generell als abgeleitetes Phänomen makroskopischer Ordnungssysteme aufzufassen.

Die experimentelle Bestätigung des Bell-Theorems führt zur Einsicht, dass die Quantenmechanik nicht zugleich eine *lokale* und eine *reale* Theorie darstellen kann, man also entweder hinzunehmen hat, dass erst die Beobachtung das zu beobachtende Phänomen mitkonstituiert oder aber die beobachteten Quantenphänomene in einer nicht-lokalen Beziehung in das Versuchsarrangement eingebettet sind. Entsprechend sind sie nur noch holistisch oder relational verstehbar. Die einzelnen Teile eines Quantensystems haben dann aber mit Esfeld gesprochen keine ›intrinsischen Eigenschaften‹ mehr, sondern nur noch ›relationale Eigenschaften, die in einer Korrelation zwischen

einem Quantensystem und einer Messapparatur bestehen«. ⁶⁹ Eine solche Perspektive führt aber dann unweigerlich zu einer Metaphysik der Relationen, ⁷⁰ einer Welt, in der *Relationen* den Urgrund darstellen, während die *Relata* als essen- und substanzlos zu betrachten sind. ⁷¹

Wenngleich die hier vorgestellten Experimente die Vorhersagen der Quantentheorie zum Alltag der Experimentalphysik werden lassen, ist damit jedoch keineswegs die Frage ihrer Interpretation gelöst. Im Gegenteil, ihre Paradoxien erscheinen in einem noch deutlicheren Licht. Was uns die vorgestellten Versuche lehren, ist vor allem, dass die Quantentheorie auf (fast) allen Gebieten der Physik erfolgreich in experimentalphysikalische Fragestellungen übersetzt werden kann und dass sich die Quantenmechanik (nahezu) überall

69 Esfeld (2002, 200).

70 »Wenn wir also einmal zu der negativen ontologischen Behauptung berechtigt sind, dass es keine intrinsische Natur jenseits der manifesten Beziehungen gibt, dann können wir auch eine Ontologie in positiven Begriffen formulieren, nämlich eine Ontologie von Relationen« (Esfeld 2002, 212).

71 »If physics tells us only about the way in which the things at the basic level of the world are related to each other, two different metaphysical positions remain open:

(1) One can continue to hold on to a metaphysics of intrinsic properties of the systems at the basic level of the world, but concede that we cannot gain any knowledge of these properties insofar as they are intrinsic.

(2) One can give up a metaphysics of intrinsic properties in favour of a metaphysics of relations according to which the relations in which they stand are all there is to the things at the basic level. The first one is the position that Jackson—somewhat reluctantly—endorses. As already mentioned in the introduction, the main argument for this position is that (a) relations require *relata*, that is, things which stand in the relations, and that (b) these things have to be something in themselves, that is, must have intrinsic properties over and above the relations in which they stand. Jackson makes use of this argument when he dismisses the view ›that the nature of everything is relational cum causal, which makes a mystery of what it is that stands in the causal relations‹ (p. 24). However, as has been made clear in this paper, a metaphysics of relations has to reject merely the second part of this argument: one can maintain that (a) relations require *relata*, that is, things which stand in the relations, but that (not b) these things do not have any intrinsic properties over and above the relational properties, which can in principle be captured by physics. In this case, there is nothing paradoxical about a metaphysics of relations. In other words, there is no a priori argument that excludes a—moderate—metaphysics of relations« (Esfeld 2004, 613 f.).

als physikalische Grundlagentheorie bewährt hat. (Eine Ausnahme bilden Fragestellungen, die von der allgemeinen Relativitätstheorie berührt werden.)

Jenseits des Erfolges der Quantenphysik bleibt jedoch die Frage offen, wie die Beziehung zwischen der Quantenwelt und unserer mit den Mitteln der klassischen Physik gut beschreibbaren Alltagswelt konzeptualisiert und verstanden werden kann. Mit Mittelstaedt steht also nicht mehr die Quantenphysik zur Disposition, sondern unsere vertraute Realität:

»Das gewachsene Verständnis der Quantentheorie hat vielmehr zu der Einsicht geführt, dass Quantenphysik einfacher und von weniger vorphysikalischen Voraussetzungen abhängig ist als die klassische Physik. Sie ist deshalb auch allgemeiner und gilt nicht nur in der mikroskopischen Physik, sondern auch in der makroskopischen Welt und in der Kosmologie. Es geht daher – und das ist die oben angedeutete Problemverschiebung – heute nicht mehr darum, Quantenphänomene aus der Sicht der klassischen Physik verständlich zu machen. Das ungelöste, heutige Problem ist vielmehr die klassische Physik selbst. Wie ist es möglich, dass es so etwas wie die uns vertraute, heile Welt der klassischen Physik überhaupt gibt? Auf diese Frage konnte eine überzeugende und befriedigende Antwort bislang nicht gefunden werden. – Wenn nicht ein völlig neues, aus heutiger Sicht überraschendes Erklärungsmodell für die klassische Welt gefunden wird, dann deutet sich eine, zumindest ontologisch sehr unschöne Lösung an: Die Welt der klassischen Physik könnte eine in allen praktischen Fällen bewährte, aber nur näherungsweise richtige Idealisierung, d. h. letztlich eine Illusion sein.«⁷²

Das ungelöste Problem der Quantenphysik bleibt die klassische Physik selbst. Die mit der Kopenhagener Deutung zunächst geleistete Beruhigung ihrer inhärenten Paradoxien lässt sich auch unter Physikern immer weniger plausibilisieren. Tegmark stellte 1997 in einer informellen Umfrage unter achtundvierzig Physikern fest, dass nur noch dreizehn Kollegen die Kopenhagener Deutung favorisieren.⁷³ Acht bekennen sich zur ›Viele-Welten-Interpretation‹, dazu vier weitere zu

72 Mittelstaedt (2000, 68).

73 »Although the poll was highly informal and unscientific (several people voted more than once, many abstained, etc), it nonetheless indicated a rather striking shift in opinion compared to the old days when the Copenhagen interpretation reigned supreme« (Tegmark 1997).

der ähnlich gelagerten ›konsistenten Geschichten-Interpretation,74 vier zur Bohmschen Mechanik, und einer zur ›spontanen Kollaps-Theorie‹.75 Achtzehn Kollegen bleiben unentschieden oder vermuten, dass keine der vorgeschlagenen Interpretationen zutreffe.76 1999, zwei Jahre später, führte Tegmark im Zusammenhang einer Tagung über Quantencomputer eine weitere Umfrage unter Kollegen durch. Hier bekannten sich nur noch 10 Prozent zum Kollaps der Wellenfunktion, während ein Drittel Varianten der Viele-Welten-Interpretation für eine angemessene Interpretation der Quantentheorie hielten. Die Mehrheit der anwesenden Physiker wollte sich nicht mehr auf eine bestimmte Interpretationsweise festlegen lassen:

»Aber das Meinungsbild ist undeutlich: Von den Befragten wollten sich die meisten, nämlich fünfzig Forscher, für keine der angebotenen Antworten entscheiden. Ein Grund für diese große Anzahl mag der grassierende terminologische Wirrwarr sein. Nicht selten sagen zwei Physiker beispielsweise, sie seien für die Kopenhagener Deutung, und stellen dann fest, dass sie nicht dasselbe darunter verstehen.

Trotzdem macht die Umfrage deutlich, dass es an der Zeit ist, die Lehrbücher der Quantenmechanik zu aktualisieren. Obzwar diese Bücher in einem der ersten Kapitel unweigerlich den nicht-unitären Kollaps als fundamentales Postulat anführen, zeigt die Umfrage, dass heute viele Physiker – zumindest auf dem brandneuen Gebiet der Quantencomputer – dieses Postulat nicht mehr ernst nehmen. Der Begriff Kollaps wird zweifellos seinen Nutzen als Rechenrezept behalten, aber ein warnender Kommentar, der verdeutlicht, dass es sich dabei wahrscheinlich nicht um einen fundamentalen Vorgang handelt, der die Schrödinger-Gleichung verletzt, könnte klugen Studenten stundenlanges Grübeln ersparen.«77

Auch wenn man zugesteht, dass Tegmarks Umfragen keineswegs repräsentativ sind und sich aus Perspektive anderer disziplinärer Fachgruppen die Verhältnisse anders darstellen können, wird hier deutlich, dass es unter modernen Physikern alles andere als klar ist, wie man den Quantenformalismus auf einer tieferen Ebene zu verstehen habe.

74 Siehe zur ›konsistente Geschichten-Interpretation‹ Kapitel IV.5.

75 Siehe zur ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ Kapitel IV.1.

76 Tegmark (1997).

77 Tegmark (2001).

Schauen wir uns mit Blick auf das vergangene Kapitel das Verhältnis von Anschauung, Mathematik und physikalisch konzeptionellem Verständnis etwas genauer an:

Zunächst ist festzustellen, dass man in der Experimentalphysik mit der Quantentheorie erfolgreich rechnen kann. Man kann Experimente planen, Hypothesen entwickeln, die Daten in Beziehung zu den theoretisch zu erwartenden Ergebnissen setzen. Das Alltagsgeschäft des Experimentalphysikers ist nicht mittelbar davon abhängig, welcher Interpretation man anhängt. Im Einzelfall mögen zwar auch Interesse oder auch Zweifel an bestimmten Deutungen den Anlass für ein bestimmtes Experimentaldesign geben (so wie im Bell-Experiment) oder umgekehrt bestimmte Versuchsergebnisse wieder die Deutungsfrage aufwerfen, doch bleibt die Physik selbst durch die Form ›empirisch/mathematisch‹ hinreichend determiniert.⁷⁸

Dies erklärt auch, warum viele Quantenphysiker in Hinblick auf Interpretations- und Deutungsfragen eine agnostische Haltung einnehmen. Man braucht sich nicht mit der Bedeutung quantenphysikalischer Konzepte zu beschäftigen, um mit der Schrödinger-Gleichung rechnen zu können. Die Physik kann gleichsam *verstehen ohne zu verstehen*.

Die Quantentheorie konnte sich in vielfältigen physikalischen Kontexten bewähren, wenngleich ihre Grundanlage jeglicher Anschauung zu spotten scheint. Heisenberg entwickelte seine Matrizenmechanik deshalb als eine mathematische Hochabstraktion, die explizit mit der Anschauung von Teilchenbahnen brach. Ebenso zeigte sich schnell, dass die Wellenfunktion der Schrödinger-Gleichung sich einer physikalisch konzeptionellen Anschauung verwehrt. So sehr Wahrscheinlichkeitswellen innerhalb des mathematischen Formalismus Sinn ergeben, was hiermit physikalisch anschaulich verbunden werden kann, bleibt opak.

Das Bohrsche Komplementaritätsprinzip, das in der Kopenhagener Deutung zum Ausdruck kommt, kann in diesem Zusammenhang als ein Versuch gesehen werden, einen gewissen Grad an Anschaulichkeit wiederherzustellen. Welle und Teilchen erschienen jetzt als zwei vertraute klassische Beschreibungsweisen, die zwar unvereinbar scheinen, aber beide notwendig sind, um die Quantenwelt angemessen verstehen zu können. Gleichzeitig wurde hiermit jedoch eine epistemische Grenze postuliert – und damit ein Weiterfragen blockiert.

⁷⁸ Peter Fuchs (2009) sieht hierin gar die allgemeine Form der Physik. Wir plädieren für eine dreigliedrige Form der Physik, da wir die konzeptionelle Anschauung als eine dritte relevante Determinante auffassen, welche die Theorieentwicklung konditioniert.

In die Quantentheorie war von Anfang an eine konstitutionelle Ambivalenz eingelassen, die darin besteht, auf der einen Ebene eine physikalische Anschauung zu postulieren – hierfür steht der Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus –, auf der anderen Seite jedoch nur einen mathematischen Formalismus zu haben, der sehr gut funktioniert, jedoch einer tieferen physikalisch konzeptionellen Vorstellung entbehrt.

In den hier vorgestellten Zweigen der Experimentalphysik wird diese Ambivalenz nicht nur mitgeführt, sondern es wird nach Hinweisen für deren Auflösung gesucht.

Bell hat sein Theorem gerade deshalb entwickelt, weil er mit Bohm vermutet hat, dass die Verschränkung, die Nicht-Lokalität und damit auch die Kontextualität der Teilcheneigenschaften die faszinierendste Konsequenz der Quantentheorie darstellt.

Die neuen Experimente zum Doppelspaltexperiment, insbesondere die *delayed-choice*- und die *quantum-eraser*-Versuche, lehren, dass Quanteneffekte *nicht* als Artefakte der Messinteraktion verstanden und konzeptionalisiert werden können und damit die Wege einer klassischen Erklärung dieser Phänomene weitgehend verbaut sind. Der Casimir- und der Aharonov-Bohm-Effekt zeigen auf, dass leerer Raum nicht leer von Wirkung ist, also auch die grotesksten Implikationen der Quantenphysik nicht am Realitätstest scheitern.

Feynmans diagrammatischer Zugang zur Quantenelektrodynamik beginnt mit dem Teilchenbild. Aber auch wenn die Wellenfunktion hier zunächst nur für die Wahrscheinlichkeit einer Wegoption steht, bekommt das mit ihr aufgespannte Feld gleichsam einen realeren Charakter als jene Teilchen, die in den Diagrammen einen konkreten Weg einschlagen. Genau genommen sind jetzt vielmehr die Teilchen als *virtuell* zu betrachten, denn im Falle destruktiver Interferenzen *zeigt* sich, dass sie keine Essenz an sich besitzen. Demgegenüber zeigt sich die Wellenfunktion als uneingeschränkt gültig, denn die mit ihr aufgespannten Interferenzmuster generieren vorhersagbare Wirklichkeiten.

Um in unserem Bild zu bleiben, Feynman gelingt es in subtiler Weise die konstitutive Rolle der ›Wellen von Nichts‹ zugleich zu veranschaulichen wie auch zu verdecken. Seine Diagramme gehen von einem Teilchenbild aus, um dieses durch die in die Vektordarstellung inhärent eingelagerte Phasenbeziehung zugleich wieder zu unterlaufen. Dieses Vorgehen ist hochgradig pragmatisch, denn es erlaubt die phantastischen Konsequenzen der Quantentheorie auf anschauliche Weise zu modellieren, ohne dabei weiter über Interpretationsfragen nachdenken zu müssen. Es gestattet, eine bizarre Welttheorie in überprüfbare Beziehungen von theoretischer Vorhersage und physikalischem Experiment zu überführen, hat aber dafür den

Preis zu zahlen, auf eine stringente und beweisbare mathematische Konzeptionalisierung verzichten zu müssen.

Die erfolgreiche Konzeptionalisierung von Suprafluidität und Supraleitung als makroskopische Quantenphänomene ergibt nur Sinn, wenn man davon ausgeht, dass die Bausteine der Materie *wirklich* Wellen ›sind‹. Nichts anderes hatte Einstein mit der Bose-Einstein-Statistik im Sinn. Die quantenmechanische Erklärung der Supraleitung zeigt uns jedoch zugleich, dass damit die Vorstellung individuierbarer Teilchen keineswegs hinfällig ist. Wir begegnen hier verschachtelten Transformationsverhältnissen, in denen Elektronen als individuierte Teilchen in Interaktion mit ihrer Umgebung ihre Individualität verlieren, indem sie sich zu Cooper-Paaren zusammenschließen, die sich zu einer übergreifenden Welle integrieren.

Innerhalb dieses Erklärungsmodells bilden Wellen- und Teilcheneigenschaften eine subtile Kontextur, aus welcher sich die beobachtbaren Eigenschaften entfalten. Das Bild eines individuierten Elektrons, das einen bestimmten Weg verfolgt, ist hier keineswegs hinfällig, sondern ebenso wichtiger Bestandteil der Erklärung, wie die makroskopischen Wellen, in welcher sich die Individualitäten unter bestimmten Voraussetzungen auflösen können. Auch in diesem Forschungsfeld ist die Anwendung der Quantentheorie nur deshalb erfolgreich, weil mit ihr zugleich anschaulich wie auch abstrakt gearbeitet wird. Einerseits wird sie zum Taktgeber physikalisch konzeptioneller Entwicklungen, indem man ausprobieren kann, in welchen sinnhaften Arrangements man Teilchen- und Welleneigenschaften kombinieren kann. Auf der anderen Ebene bleibt sie eine mathematische Hochabstraktion, denn weiterhin verschließt sich der epistemische und ontologische Status der ψ -Funktion einer übergreifenden Interpretation oder Deutung.

Die Quantentheorie hat heute zweifellos den Status einer, wenn nicht *der* fundamentalen physikalischen Grundlagentheorie. Die Praxis der Quantenphysik hat damit zu einer stillschweigenden Ontologisierung der Quantenkonzepte geführt. Für viele Physiker erscheint die Quantenwelt heute realer als die klassische Welt.

Diese Verschiebung ist aus wissenssoziologischer Perspektive hoch interessant, denn sie geschieht gewissermaßen durch Gewöhnung und nicht durch Verstehen. Man gewöhnt sich daran, dass auch leerer Raum eine Wirkung haben kann, dass ›Wellen von Nichts‹ die Emergenz von Teilchenqualitäten modulieren können und dass sich mit Hilfe des Konzepts der Durchtunnelung von Barrieren elektronische Bauteile lenken lassen.

Dass Quantenmaterie den Physikern heutzutage als ›real‹ erscheint, ist ein kommunikatives Phänomen. Quantenmaterie und Quantenobjekte lassen sich erfolgreich in den ›Dialog mit der Natur‹

einbinden. Quantensysteme sind zu einer der zentralen Kommunikablen der modernen Physik geworden.⁷⁹ Die Quantentheorie liefert damit weitaus mehr als Rechenformeln, mit denen sich Beziehungen in subatomaren Verhältnissen erfolgreich beschreiben lassen. Sie wird im wörtlichen Sinne zu einer *theoría*, zu einer Anschauung der Wirklichkeit,⁸⁰ und entsprechend organisiert die Quantentheorie heutzutage in umfassender Weise Beobachtungsperspektiven naturwissenschaftlicher Forschung.⁸¹

Gerade weil die Quantentheorie mittlerweile innerhalb der Physik unumstritten institutionalisiert ist, kann sie sich wieder vermehrt den Paradoxien ihrer Anlage und Interpretation stellen. In den 1930er-Jahren war man als Physiker gut beraten zu rechnen und zu experimentieren, anstatt das mit der Kopenhagener Deutung gesetzte Tabu zu hinterfragen.

Die hierin gesetzte epistemische Grenze ist heutzutage nicht mehr notwendig, denn der theoretische Status der Quantenphysik steht heute außer Frage. Experimentalphysik und Theorientwicklung sind in sich soweit gefestigt, dass Problemstellungen jeweils methodologisch-experimentell in einer Weise angegangen werden können, ohne dass gleich alle Implikationen der Theorie bekannt sein müssen (Experimentalphysiker können in ihrer Arbeit ›agnostisch‹ agieren). Umgekehrt sind auch die theoretischen Diskurse durch Stellenbesetzungen und die Institutionalisierung entsprechender Fachdiskurse in einer Weise ausdifferenziert, dass beispielsweise Vertreter der *Stringtheorie* an der Weiterentwicklung und Ausdifferenzierung ihrer Perspektive arbeiten können, ohne dabei allzu sehr durch empirische

79 An dieser Stelle der notwendige Hinweis auf die Arbeiten der Actor-Network-Theorie, in denen deutlich wurde, wie wissenschaftliche Objekte durch Kommunikation erzeugt und vergesellschaftet werden. Wie Geister und Götter werden dann auch Quanten, Elektronen oder eben auch ›Wellen von Nichts‹ dadurch real, dass sie in das Netzwerk der Kommunikation eingefügt werden und hierdurch ihre Wirkung entfalten (Latour 2000; Latour 2007).

80 Griechisch θεωρία *theoría*: Anschauung, Beobachtung, Einsicht; wörtlich ›Schau des Göttlichen‹ (*theos*).

81 Ihre Anwendungsbereiche strahlen vermehrt auch in die Lebenswissenschaften aus. Jüngst konnte gezeigt werden, dass Quantenphänomene eine Rolle innerhalb der Photosynthese spielen (Collini et al. 2010). Es gibt eine Reihe von Spekulationen zum Einfluss von Quantenprozessen auf Kognition und Bewusstsein. Bislang kann hier jedoch noch keine theoretisch konsistente Erklärung gewonnen werden. Die bisher angestellten Überlegungen müssen auch innerhalb der Physik als riskante Spekulationen gelten (siehe etwa Penrose 1998; Stapp 2007).

Umsetzungsansprüche behindert zu werden (siehe hierzu ausführlich Kapitel V).

Die gegenwärtige Physik kann und braucht sich nicht mehr positivistisch auf die Form *empirisch/mathematisch* zurückzuziehen, sondern kann in Rückkehr auf ihre produktiven Wurzeln Anschauung und Interpretation wieder als wesentliche Bestandteile ihrer Praxis begreifen. Es besteht für sie kein Grund mehr, die »Machtübernahme der Mathematik in der Quantentheorie« länger hinzunehmen.⁸² Der Verlust an Anschaulichkeit, der mit der Entwicklung der Quantentheorie einhergeht, hat zu einer neuen Bedeutung physikalischer Theoriebildung geführt. Physikalische Theorien greifen jetzt vermehrt auf eigene, sozusagen selbst- bzw. theoriegenerierte Anschauungen zurück. Die Trias von Experiment, Mathematik und physikalisch-anschaulicher Konzeptionalisierung wird somit auf ein neues, zugleich abstrakteres wie auch konkreteres Niveau gehoben.

Dies aufgreifend gelangen wir im nächsten Kapitel zu einigen neueren Ansätzen zur Interpretation und Deutung der Quantentheorie.

82 Weizsäcker (1994, 511).

IV NICHT DIE QUANTENPHYSIK, SONDERN UNSERE ALLTAGSWELT BLEIBT DAS UNERKLÄRLICHE

Während Bohr und Heisenberg in Bezug auf Quantensysteme von dem Primat ausgingen, dass man grundsätzlich nicht wissen könne, was zwischen zwei Messungen der Fall sei, gewinnt in den neueren Diskussionen der Physiker das Schrödinger-Bild immer mehr an Strahlkraft. Als eigentlich erklärungs-würdig erscheint jetzt weniger die Quantenrealität, sondern unsere vertraute klassische Welt, denn hier begegnen wir weder gleichzeitig lebenden und toten Schrödinger-Katzen noch gelingt uns der Durchgriff auf die Everettschen Parallelwelten.

Die Fortschritte in der quantenmechanisch begründeten Experimentalphysik führen also zu der eigentümlichen Situation, dass für die Physik die eigensinnigen Weltkonzepte der Quantenphysik gleichsam ›wirklicher‹ erscheinen als die Common-Sense-Konzepte unserer Alltagserfahrung.

Das Erstaunliche ist, dass eine solchermaßen hochgetriebene Theorieanlage funktioniert. Man konnte mit der Quantentheorie nicht nur seltsame Phänomene wie Supraleitung und Suprafluidität erklären, sondern auch eine umfassende Theorie der Elementarteilchen und Elementarkräfte entwickeln. Feynmans Arbeiten zur Quantenelektrodynamik ließen sich auch auf andere Bereiche übertragen, so dass mittlerweile eine übergreifende Modellierung von drei der vier bekannten physikalischen Grundkräfte geleistet werden kann. Die elektromagnetische sowie die für den Zusammenhalt der Atomkerne relevante schwache und starke Wechselwirkung lassen sich quantentheoretisch über den Austausch virtueller Kraftteilchen modellieren. Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik können diese drei Kräfte auf ein einheitliches Grundprinzip zurückgeführt werden. Allein die Gravitationskraft lässt sich bislang nicht ohne Weiteres in eine quantentheoretische Perspektive überführen.

Dies hindert Physiker jedoch nicht daran, schon jetzt über eine mögliche Weltformel nachzudenken. So entwickelten Wheeler und DeWitt eine Gleichung zur Wellenfunktion des gesamten Universums. Im Sinne der Viele-Welten-Theorie können hier alle denkbaren Gravitations- und Materiekonfigurationen in einem Superraum zusammengefasst werden. Wir begegnen hier einer physikalischen

Hochabstraktion, die zu einem Blockuniversum führt, in dem alles Mögliche und Gewesene immer schon gegeben *ist*.¹ Quantentheorie und Kosmologie treiben sich hier wechselseitig zu Theorieprojekten hoch, die zwar auf hoch spekulativer Basis arbeiten, sich aber dennoch plausibilisieren lassen, indem jeweils die Lücken der einen Disziplin durch Hypothesen aus der anderen gefüllt werden.²

All dies sind weitere Indizien dafür, dass sich die Physik längst in der Quantentheorie häuslich eingerichtet hat. Ihr Theoriegebäude ist den Physikern in ihrer täglichen Arbeit zu einer vertrauten Realität geworden, mit der sich rechnen lässt und über die sich Erwartungen stabilisieren lassen. Wenngleich niemals jemand Quantenobjekte und Wellenfunktionen gesehen hat (›Wellen von Nichts‹ lassen sich weder sehen und hören noch riechen oder schmecken), gewinnen sie kommunikativ den Charakter von Wirklichkeit, denn mit ihrer Hilfe lassen sich sinnhafte Beziehungen in Hinblick auf die experimentellen Beobachtungen generieren. Da Quantenobjekte jedoch konzeptionell Sinn ergeben (bzw. sich auf anderem Wege viele Daten kaum noch sinnhaft verknüpft lassen), liegt es nahe, ihnen in platonischer Manier selbst Realitätscharakter zuzugestehen. Dies muss nicht bewusst, d. h. auf Basis einer expliziten philosophischen Explikation geschehen, sondern passiert allein schon durch Gewöhnung. Indem man sich durch ständigen Gebrauch quantentheoretischer Kalküle an die mit ihnen verbundenen Konzepte gewöhnt, erscheinen Konzept und Realität, Landkarte und Gebiet, immer ähnlicher.

Entsprechend traut man sich in der Physik jetzt auch wieder vermehrt spekulativere Abstraktionen zu, die nicht mehr allein durch Beobachtung oder Experiment gedeckt sind. In der gegenwärtigen Ausdifferenzierung der Physik gewinnt die Theoriebildung damit zunehmend an Autonomie. Innerhalb der Physik können jetzt Inseln der Theoriearbeit entstehen, die sich weitgehend von empirischen Bezügen lösen, um auf diese Weise immer raffinierter theoretische Formen auf theoretische Formen beziehen zu können. Seien es quantenphysikalische Überlegungen zur Entropie von schwarzen Löchern und die hieran anschließende Idee eines holografischen Universums,³

1 DeWitt (1967).

2 So können etwa Schwankungen in der Hintergrundstrahlung des Universums auf Quantenmodelle zurückgerechnet werden, welche die Unbestimmtheitsrelation in der Frühgeschichte des Universums zur Geltung bringen. Ebenso können Singularitäten wegerklärt werden, indem Strings postuliert werden, die eine minimale Ausdehnung haben. Vgl. Greene (2006).

3 Eine populärwissenschaftlich gehaltene Einführung in dieses und die folgenden Konstrukte findet sich bei Greene (2008).

Spekulationen zu den Abläufen in der ersten Hunderttausendstel-sekunde des Universums oder das Nachdenken über die Gesetzmäßigkeiten in elf-dimensionalen Welten innerhalb der Stringtheorie – wir begegnen heute in der Physik theoretischen Hochabstraktionen, die durch empirische Beobachtungen bestenfalls noch illustriert werden, in der Regel aber kaum noch durch die gegenwärtigen Möglichkeiten der Experimentalphysik überprüft werden können.

In Kapitel V werden wir uns am Beispiel der *Stringtheorie* ausführlicher damit beschäftigen, wie sich mit diesen Theoriediskursen auch das Selbstverständnis der Physik verändert. Es wird hier deutlich werden, dass es der Physik nicht anders geht als jeder anderen hinreichend ausdifferenzierten theoriegetriebenen Wissenschaft. Auch die Physik reproduziert sich zunehmend auf Basis innerer theoretischer Abschlüsse, derzufolge man sich nur noch für oder gegen eine Theorie entscheiden kann, die Entscheidung selbst aber weder aus der Theorie noch aus der Empirie begründen kann.

In diesem Kapitel geht es demgegenüber nochmals um die Frage der Interpretation der Quantenphysik, also um das Problem, wie eine offensichtlich auf allen Ebenen der Experimentalphysik erfolgreiche Theorie mit einer klassischen Welt in Beziehung gesetzt werden kann, die nicht so recht zur Theorie zu passen scheint.

Wir beginnen zunächst mit der Theorie des ›spontanen Kollaps‹, die das Erscheinen der klassischen Welt mit Hilfe einer Brückenhypothese erklärt, die allerdings nicht auf ein bestehendes physikalisches Gesetz zurückgeführt werden kann. Anschließend beschäftigen wir uns etwas ausführlicher mit dem Problem der Irreversibilität der Zeit und der Antwort, die Carl Friedrich v. Weizsäcker hier anzubieten hat. Dies mündet in die ›*it-from-bit*‹-Perspektive, die dem Begriff der Information eine zentrale Stellung in der Deutung und Erklärung der Quantentheorie zuweist. Anschließend beschäftigen wir uns etwas genauer mit der Theorie der Dekohärenz, mit der versucht wird, den Übergang zur klassischen Welt als ein statistisches Phänomen wegzuerklären. Schließlich wird auf die ›Konsistente-Geschichten-Interpretation‹ einzugehen sein, welche eine Reihe kybernetischer Denkfiguren mit der Viele-Welten-Theorie verbindet. Abschließend wird mit Robert Laughlin näher zu erörtern sein, was für Konsequenzen eine emergenztheoretische Perspektive mit sich bringt.

Die Zusammenschau der in diesem Kapitel vorgestellten neueren Interpretationsversuche lässt deutlich werden, dass es der Physik weiterhin nicht gelingt, zu einer übergreifenden Einheit zu gelangen.

I Spontaner Kollaps: Rückkehr zur klassischen Realität

Im Folgenden möchten wir mit der ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ eine weitere Interpretation der Quantentheorie vorstellen, die derzeit insbesondere in Kreisen der analytischen Philosophie aufgegriffen und diskutiert wird. Streng genommen handelt es sich hierbei nicht so recht um eine physikalische Theorie, wenn man hierunter eine Theorieanlage versteht, die auf innerphysikalische Bezugsprobleme reagiert und entweder die Theorieentwicklung vorantreibt oder einen fruchtbaren Tanz von Theorieentwicklung und Experimentalphysik hervorbringt. Wie in den vorangegangenen Kapiteln deutlich geworden ist, hat sich die Physik mittlerweile recht gut in den Theoriegebäuden der Quantentheorie eingerichtet. Die Quantenmechanik ist damit längst zu einem eigenständigen Theorieprojekt abgehoben, das in sich so konsistent und kohärent ist, dass es kaum mehr durch die weltanschaulichen Probleme ihrer Theorieanlage infrage gestellt werden kann. Demgegenüber ist die ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ primär durch eine physikfremde Weltanschauung motiviert. Sie referiert vor allem auf die Bezugsprobleme der Philosophie. Im Anschluss an das Erbe der Ensemble-Interpretation (siehe Kapitel II.1) wird hier erneut die Rückkehr zu einer klassischen Beschreibung der Welt angestrebt.

Rekapitulieren wir zunächst die Bezugsprobleme, auf welche die ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ eine Antwort zu geben sucht.⁴

- Wir finden eine Quantentheorie vor, die mit nicht-lokalen Superpositionen von Quantensystemen rechnen lässt und deren bizarre Vorhersagen empirisch vielfältig bestätigt worden sind.
- Es bleibt die Frage offen, wie der Übergang zu den von uns im Alltag beobachtbaren klassischen Welten zu erklären ist.

4 Norris reformuliert aus philosophischer Perspektive das Dilemma einer dem Realismus und der kausalistischen Erklärung verpflichteten Tradition folgendermaßen: »In short, the philosophy of quantum mechanics has remained in a state of Kuhnian ›crisis‹ for the past six decades and more compared with the theory's remarkable success in matters of applied technological progress and predictive-observational warrant. If anything, the situation is now more confused – as a result of Bell's theorem and its subsequent experimental proof – than when Planck and Einstein first proposed the quantum hypothesis in response to various anomalies encountered with phenomena such as black-body radiation and wave-particle dualism. [...] At any rate, there is something awry about a theory that has exerted such widespread influence while effectively raising incomprehension to a high point of orthodox principle« (Norris 1999, 5).

- Man ist weiterhin nicht bereit, die Grundposition des Realismus aufzugeben und verwirft eine Haltung, entsprechend der erst der Mess- oder Beobachtungsprozess bestimmt, was der Fall ist.
- Man möchte nicht auf ungewöhnliche realistische Konzepte wie etwa den Bohm'schen Holismus zurückgreifen.

Um zu einer realistischen und lokalistischen Ordnung der klassischen Welt zurückkehren zu können, wird also ein Mechanismus gebraucht, mit dem sich einerseits die empirisch bestätigten nicht-lokalen Eigenschaften der Quantentheorie anerkennen lassen, der aber andererseits dennoch zu lokal individuierten Objekten führt, ohne auf eine zusätzliche Bestimmung durch einen Beobachtungs- bzw. Messprozess zurückgreifen zu müssen.

Da ein diesbezüglicher Mechanismus weder empirisch beobachtet noch aus einer bewährten physikalischen Theorie abgeleitet werden konnte, *postuliert* man jetzt einfach einen solchen Mechanismus und beginnt zu *rechnen*, um zu schauen, welche Modelle sich mit den bestehenden Daten in Übereinstimmung bringen lassen.

Ein gut ausgearbeitetes Modell des spontanen Kollapses stellt die Theorie von Ghirardi, Rimini und Weber dar (in der Literatur üblicherweise als GRW-Theorie referiert). Ihre Grundidee ist einfach: Wellenfunktionen kollabieren irgendwann von alleine. Wie radioaktive Substanzen haben sie sozusagen eine Halbwertszeit, nach der ein Teil der Quantensysteme in einen klassischen Zustand übergegangen ist und als eindeutig lokalisier- und bestimmbares Teilchen erscheint.

Da der spontane Zerfall von präparierten Quantenzuständen bislang nicht nachgewiesen wird, wird die Zerfallsrate jetzt von der unteren Grenze her so »justiert«, dass dies bei isolierten Quantensystemen so selten passiert, dass der postulierte spontane Zerfall im Rahmen menschlicher Zeithorizonte praktisch nicht beobachtet werden kann. Da aber jetzt Quantensysteme, die mit einer Messapparatur verschränkt sind, offensichtlich sofort klassisches Verhalten zeigen, wird angenommen, dass der Zerfall so schnell auftritt, dass in empirisch realisierbaren Zeithorizonten keine Superpositionen mehr festgestellt werden können. Da makroskopische Messinstrumente über eine unvorstellbar große Anzahl von Atomen verfügen (nämlich in der Größenordnung der Avogadro-Konstante von $6,022 \text{ mal } 10^{23}$ Teilchen/mol), kann man die postulierte Zerfallsrate ohne Probleme in ein Fenster legen, das außerhalb der empirischen Beobachtbarkeit liegt. Wenn man beispielsweise annimmt, dass alle 10^{14} Sekunden ein Quantenteilchen zerfällt, dann könnte man auf diese Weise erklären, dass man weder den Zerfall präparierter Quantenzustände (man müsste Millionen von Jahren auf solch ein Ereignis warten) noch eine Superposition von Quantenteilchen mit dem Messgerät beob-

achten kann (diese würden so schnell zerfallen, dass man sie nicht beobachten kann). In der mathematischen Modellierung der Quantentheorie geht man zwar weiterhin von der Schrödinger-Gleichung aus, ergänzt diese aber durch eine nicht-lineare Zufallsfunktion, mit der ein spontaner Zerfall eingeführt wird.

Die ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ führt damit zu einer anderen Quantentheorie, da der Grundformalismus erweitert werden muss. Für die meisten Physiker ist diese Theorieanlage deshalb unattraktiv, da man hierdurch eine kompliziertere Rechnung erhält, die jedoch im Rahmen der üblichen Versuchssysteme nichts Neues zur Erklärung beiträgt. Mit dem v. Neumann-Ansatz lässt sich perfekt rechnen und das Auftreten klassischer Phänomene in einem Messsystem, welches sich in einer offenen Umwelt befindet, lässt sich bereits durch die Dekohärenztheorie erklären. Die GRW-Theorie würde hier einen zusätzlichen Mechanismus postulieren, der eigentlich für die Erklärung nicht gebraucht wird.⁵

Es ist deshalb verständlich, dass dieser Ansatz innerhalb der Physik bislang auf wenig Resonanz stößt.

In der Philosophie stellt sich die Situation jedoch anders dar. Insbesondere die analytische Philosophie sucht nach einer Möglichkeit, zu einem klassisch-realistischen Weltbild zurückzukehren. Der Wiener Kreis und auch Karl Popper haben bekanntlich die nicht-realistischen und kausalitätsfeindlichen Implikationen der Quantentheorie stark bekämpft und entsprechend lange auf die Ensemble-Interpretation gesetzt.⁶ Spätestens mit den Untersuchungen zum Bell-Theorem (siehe Kapitel III.1) hatte jedoch auch die analytische Philosophie anzuerkennen, dass Verschränkung und Superposition *empirische* Phänomene darstellen, also nicht als Artefakt eines falschen Verständnisses von statistischen Beschreibungen wegerklärt werden können.

Die GRW-Theorie eröffnet demgegenüber die Chance, zumindest prinzipiell zu einem klassischen Weltbild zurückkehren zu können. Man hat jetzt zwar einerseits auf der Mikroebene den holistischen Charakter von Quantensystemen ernst zu nehmen, findet aber andererseits einen ›realistischen‹ Ausweg in der These, dass die Wellenfunktionen rechtzeitig in klassische Welten kollabieren.⁷

5 Siehe zur ergebnisoffenen Diskussion des Verhältnisses zwischen Dekohärenz-Ansätzen und Spontaner-Kollaps-Theorien Schlosshauer (2005).

6 Siehe zum zeitgenössischem Rekurs der analytischen Philosophie auf den Wiener Kreis und in Hoffnung, dass dies mit der GRW-Theorie möglich ist, Stöltzner (1999, 289).

7 Die Philosophen Dorato und Esfeld formulieren in diesem Sinne: »[We argue] that the formulation of quantum mechanics proposed by Ghirardi, Rimini and Weber (GRW) is a serious candidate for being a fundamental

Die Erweiterung des Schrödinger-Formalismus wird von den Protagonisten der GRW-Theorie dabei nicht als eine Schwäche angesehen, sondern als eine Stärke, denn die veränderte Theorieanlage führt zu geringfügig veränderten empirischen Vorhersagen, so dass die Theorie prinzipiell falsifizierbar erscheint, sollte es gelingen, künftig hinreichend genaue Messverfahren zu entwickeln.

Mit der GRW-Interpretation begegnen wir einer Theorieanlage, welche innerhalb der Physik wenig Beachtung findet, die aber für die (analytische) Philosophie von hohem Interesse ist. Grundsätzlich besteht innerhalb der physikalischen Theoriebildung keine Hemmschwelle, mit Theorieoptionen zu arbeiten, die dem Common Sense stark widersprechen. Vielmehr sind für die moderne Physik gerade auch bizarre Theoriekonstrukte attraktiv, natürlich unter der Voraussetzung, dass die empirischen Sachlagen solch hochgetriebene Theorien dulden. Für die (analytische) Philosophie stellen sich demgegenüber andere Diskurszwänge. Die Frage, ob man für eine universelle Geltung der Schrödinger-Gleichung optiert, kann hier nicht nur anhand von theorieästhetischen Überlegungen entschieden werden. Deutlich wird dies an der Forderung von Michael Esfeld, die offenen Fragen der Physik unter dem Blickwinkel philosophischer Denkhorizonte zu beantworten:

»Weil uns kein vollständig überzeugender *physikalischer* Vorschlag für eine Dynamik von Zustandsreduktionen zur Verfügung steht, ist es immer noch ein Gegenstand *philosophischer* Debatten, welche dieser beiden grundlegenden Optionen die plausiblere ist. [...] Der Punkt aber ist: Man kann nicht der Option für universellen Quanten-Holismus zustimmen und die ontologischen Annahmen anerkennen, welche die Theorien makroskopischer Systeme einschließlich unseres Alltagsrealismus enthalten. Wenn man hingegen die Option für begrenzten Quanten-Holismus für plausibel hält, dann kann man die Ontologie der Quantenphysik so ansehen, daß sie kompatibel ist mit den ontologischen Annah-

physical theory and explores its ontological commitments from this perspective. In particular, we propose to conceive of spatial superpositions of non-massless microsystems as dispositions or powers, more precisely propensities, to generate spontaneous localizations. We set out five reasons for this view, namely that (1) it provides for a clear sense in which quantum systems in entangled states possess properties even in the absence of definite values; (2) it vindicates objective, single-case probabilities; (3) it yields a clear transition from quantum to classical properties; (4) it enables to draw a clear distinction between purely *mathematical* and *physical* structures, and (5) it grounds the arrow of time in the time-irreversible manifestation of the propensities to localize« (Dorato/Esfeld 2010, 41).

men unserer Theorien makroskopischer Systeme einschließlich unseres Alltagsrealismus [...]. Ich denke, dieser Hinweis auf die heutige Erkenntnistheorie und Semantik stützt ein Plädoyer für Zurückhaltung in der Interpretation der Quantentheorie: Die Frage nach der Reichweite des Holismus der Quantenphysik ist nicht durch den Hinweis auf den Forschungsstand der gegenwärtigen Physik beantwortet. Es ist daher sinnvoll, breitere philosophische Erwägungen hinzuzuziehen in der Bewertung der Optionen, die wir haben.«⁸

Mit Blick auf die Themenstellung dieses Buches lässt sich aus der Auseinandersetzung um die GRW-Theorie vor allem lernen, wie weit sich die Quantenphysik mit ihrer Theoriebildung mittlerweile von unserer Alltagserfahrung entfernt hat und wie sehr ihre wundersamen Theoriefiguren mittlerweile zum Alltag der Physiker gehören. Es ist verständlich, dass Philosophen hier versuchen, Reparaturarbeit zu leisten, um die Theorieanlage wieder an das Alltagserleben heranzuführen. Gleichzeitig wird jedoch deutlich, wie hilflos diese Versuche sind, denn sie erreichen in der Regel weder den Physiker, der sich längst erfolgreich in seine eigenen Theoriegebilde eingesponnen hat, noch ein Publikum außerhalb der philosophischen Tradition.

Gerade die analytische Philosophie hat sich längst in ihre eigene Theorietradition eingesponnen. Mit Begriffen wie ›Realismus‹, ›Sensualismus‹, ›Kausalität‹, ›Externalismus‹ etc. hat sie sich in eigenen ontologischen und epistemischen Gebäuden verschanzt, die in Hinblick auf ihre Begriffskomplexität die physikalischen Theorien eher noch überbieten, ohne dabei selbst ihre Begriffsgebäude als kontingente, also durch die eigene Begriffsgeschichte konditionierte Weltbeschreibungen durchschauen zu können.

Die moderne Physik kann gerade deshalb einen Weltbezug herstellen, weil sie ein ontologisches und epistemisches *gerrymandering* betreibt,⁹ also in Hinblick auf ihre leitenden Anschauungen spekulativ und kontingenzfreudig bleibt. Ihre philosophische Heimatlosigkeit behindert keineswegs ihren Erkenntnisfortschritt, da dieser durch das Wechselspiel von Theoriebildung *und* empirischer Forschung balanciert wird. Die Philosophie ist demgegenüber begrifflich und konzeptionell überdeterminiert, da ihr aufgrund der disziplinären Selbstidentifizierung als Philosophie nichts anderes mehr übrig bleibt, als sich in den Begriffen und Konzepten der eigenen Tradition einzurichten.¹⁰

8 Esfeld (1999, 176 ff.).

9 Woolgar (1985).

10 Der Philosophie bleibt mit Marquard nichts anderes übrig, als den eigenen Weltverlust zu kompensieren, also »Inkompetenzkompensations-

In Physik und Philosophie steht die GRW-Theorie für den Versuch, zur klassischen Weltauffassung zurückzukehren. Hierfür ist jedoch wiederum ein Preis zu bezahlen: Man muss einen Mechanismus postulieren, für den es weder einen empirischen Hinweis gibt noch irgendeine physikalisch konzeptionelle Anschauung besteht. Der postulierte Zufallsprozess ist wiederum physikalisch theoretisch erklärungsbedürftig. Man bekommt jetzt zwar einen klaren Schnitt in der Welt, entsprechend dem eindeutig zwischen Quantensphäre und klassischer Physik unterschieden werden kann, verbaut sich hierbei aber zugleich die Möglichkeit, makroskopische Quantenphänomene wie Suprafluidität oder Supraleitung auf einfachem Wege zu erklären.

Der Wunsch, die klassische Welt begrifflich und konzeptionell reinzuhalten, führt hier zu einer theoretischen Konzeption, die den Namen *physikalische* Theorie eigentlich nicht mehr verdient. Weder erklärt sie noch stellt sie die Entfaltung oder Rekombination bestehender physikalisch konzeptioneller Anschauungen dar. Das einzige, was sie leistet, ist die Befriedung des Common Sense.

2 Zeit und Irreversibilität: Wissen macht einen Unterschied

Es ist das Verdienst von v. Weizsäcker, das Problem der Irreversibilität der Zeit mit dem Begriff des Wissens und damit auch mit dem Problem der Beobachtung in der Quantenphysik in Verbindung gebracht zu haben. Vor allem in seiner 1985 erschienenen Monografie »Der Aufbau der Physik« wurden seine diesbezüglichen Überlegungen systematisch und umfassend dargestellt.¹¹ Versuchen wir im Folgenden, die Grundgedanken von v. Weizsäckers Argumentation nachzuvollziehen.

In der klassischen Physik – aber auch in der Schrödinger-Gleichung – ist die Zeit ein einfacher Parameter, der in die physikalischen Gleichungen eingeführt wird und dem man wie einer Linie im Raum vorwärts- und rückwärtsfolgen kann, ohne dass dies für die Beschreibung einen Unterschied macht. Entsprechend dieser Modellierung besteht physikalisch kein Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft, denn die Gleichungen sind invariant für die Richtung der Zeit. Es macht keinen Unterschied, zu welchem Zeitpunkt man mit der Rechnung beginnt. Ein Zeitpfeil ist aus dieser Perspektive nichts anderes als ein Label, das ein Beobachter von außen an die Gleichung

kompetenz« zu betreiben (Marquard 1974).

11 v. Weizsäcker (1994). Siehe zur Frage der Zeit in der Physik und Philosophie auch v. Weizsäcker (1992).

dran klebt.¹² Aus der Perspektive eines vierdimensionalen Blockuniversums, das durch die Raumzeitkoordinaten aufgespannt wird, erscheint der subjektiv erlebte Zeitfluss nur als eine Illusion.

Demgegenüber geht v. Weizsäcker davon aus, dass die Auffassung einer richtungsinvarianten Zeit auch in physikalischer Hinsicht grundsätzlich *falsch* ist. Vor allem widerspricht sie dem empirisch gefundenen und umfassend empirisch bestätigten *zweiten Hauptsatz* der Thermodynamik. Dieser besagt, dass die Entropie eines geschlossenen Systems nur zu-, aber nicht abnehmen kann. Irreversibilität erscheint hiermit als ein empirisch physikalisches Faktum.¹³

Mit v. Weizsäcker stehen wir jetzt also vor dem Problem, dass die irreversible Zeit empirisch nicht zu leugnen ist, aber mit Ausnahme des zweiten Hauptsatzes in den kanonischen Gleichungen der Physik nicht vorkommt.

Für v. Weizsäcker besteht der einzig gangbare Weg aus dem Dilemma darin, den Begriff der Entropie mit dem Begriff der Wahrscheinlichkeit *informationstheoretisch* zu verbinden. Der Grundgedanke seiner Überlegung ist einfach nachzuvollziehen, die Konsequenzen sind jedoch alles andere als trivial.

Bevor man etwas *weiß*, ist die Zukunft offen und bestimmte Möglichkeitshorizonte sind mehr oder weniger *wahrscheinlich*. Sobald man etwas weiß, ist eine Wirklichkeit real geworden und alle anderen zuvor wahrscheinlichen Optionen sind damit hinfällig. Da der Zustand jetzt zu hundert Prozent wahrscheinlich ist, ergibt es keinen Sinn mehr, von einer Wahrscheinlichkeitsprognose zu sprechen. Die Modalwelt der Möglichkeiten hat sich jetzt unumkehrbar in ein konkretes Sein verwandelt.¹⁴

12 »Viele Physiker sind geneigt, eben darum die Begriffe Gegenwart, Zukunft, Vergangenheit als ›nur subjektiv‹ aus der ›objektiven‹ Naturbeschreibung auszuschließen. Soweit das nicht tunlich erscheint, führt man einen Rest der durch sie bezeichneten Struktur unter den metaphorischen Titeln ›Zeitrichtung‹ oder ›Zeitpfeil‹ ein (beide sind Metaphern, welche die Zeit wie eine Raumkoordinate behandeln). Die begrifflich klare Beschreibung dessen, was mit dem ›Zeitpfeil‹ gemeint ist, erweist sich dann als sehr schwierig« (v. Weizsäcker 1994, 42 f.).

13 »Tatsächlich ist der zweite Hauptsatz *empirisch* gefunden worden. D. h. wir wissen heute, daß in der Vergangenheit überall, wo eine zuverlässige Nachprüfung durch Menschen stattgefunden hat, die Entropie eines abgeschlossenen Systems im statistischen Mittel mit der Zeit gewachsen oder allenfalls konstant geblieben ist. [...] Epignose ist also (bis auf Schwankungserscheinungen) immer falsch, die Epi-Prognose nach eben diesen Wahrscheinlichkeiten immer richtig« (v. Weizsäcker 1994, 137).

14 »Die Schwierigkeit der logischen Erfassung zeitlicher Aussagen tritt genau dort hervor, wo der Zeitparameter zur Darstellung zeitlicher Verhält-

Die Quantentheorie postuliert, dass Quantenlogik und Quantenkausalität schwächer sind als klassische Logik und Kausalität, also die grundlegende Wirklichkeit nicht mehr durch Fakten, sondern nur noch durch Modaloperatoren und Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden kann.¹⁵ Wenn dies aber der Fall ist, dann würde mit v. Weizsäcker folgen, dass die irreversible Struktur der Aneignung von Wissen als das zentrale Moment der quantenmechanischen Theoriebildung zu begreifen ist:

»Der Kernbegriff der Quantentheorie, so wie sie gewöhnlich formuliert wird, dürfte der Begriff der Wahrscheinlichkeit sein. Wahrscheinlichkeit hat in der Physik prognostische Bedeutung. Physik

nisse nicht hinreicht, wo also Gegenwart, Zukunft und Vergangenheit in ihrem eigentlichen Sinn genommen werden müssen. Z. B. ist eine zulässige physikalische Bedeutung des Begriffs Wahrscheinlichkeit (und wie ich zu zeigen hoffe, sogar seine primäre Bedeutung) die derjenigen Wahrscheinlichkeit, mit der man eine Vorhersage machen kann. Diese verliert ihren direkteren Sinn in dem Augenblick, in dem der Zeitpunkt, für den man vorhergesagt hat, Gegenwart und alsbald Vergangenheit geworden ist. Es ist sinnlos zu sagen, man sage ein vergangenes Faktum vorher« (v. Weizsäcker 1994, 51).

- 15 Hierzu auch Mittelstaedt: »Die allgemeinsten pragmatischen Vorbedingungen einer Wissenschaftssprache, die sich auf quantenmechanische Objekte und deren Eigenschaften bezieht, sind schwächer und ärmer an außersprachlichen Voraussetzungen als die Vorbedingungen einer Sprache der klassischen Physik. Diese unterschiedliche Stärke drückt sich dann insbesondere in der Logik aus. Die Logik der quantenmechanischen Sprache ist schwächer als die klassische Logik. Hier ist wieder eine direkte Übertragung in mathematische Strukturen möglich. Quantenlogik führt auf den aus dem Hilbert-Raum der Quantenmechanik bekannten, nur orthomodularen, aber nicht Booleschen Verband der Projektionsoperatoren, während die klassische Logik auf den Booleschen Verband der Teilmengen des klassischen Phasenraumes führt. – Auch hier erweist sich die der Quantenphysik zugrunde liegende Logik-Struktur als schwächer und allgemeiner als die spezielle der klassischen Physik entsprechende klassische Logik. Etwas salopp ausgedrückt: Quantenlogik ist wahrer als klassische Logik.« [...] »Quantenmechanische, statistische Kausalität ist schwächer als klassische Kausalität, die als ein selten realisierter Spezialfall erscheint, und der quantenmechanische Substanzbegriff ist schwächer als der klassische, da Quantenobjekte anders als klassische Objekte nicht Träger aller Eigenschaften sind. Die mathematische Präzisierung dieser Einsichten führt dann zu den bekannten quantenmechanischen Observablen- und Wahrscheinlichkeitsstrukturen, in denen die jeweiligen klassischen Strukturen als Spezialfälle enthalten sind« (Mittelstaedt 2000, 67).

beruht auf Erfahrung; Erfahrung aber heißt, aus der Vergangenheit für die Zukunft gelernt zu haben. Also tritt an die Spitze der Bedingungen der Möglichkeit von Erfahrung die Struktur der Zeit selbst, in ihren Modi der Gegenwart, der Zukunft und der Vergangenheit.

Damit sind wir am Anfang des Aufbaus der Physik.«¹⁶

Insofern man die Quantentheorie als Universaltheorie der Physik anerkennt, erscheint also die Erfahrung von Ereignissen und die Möglichkeit des Wissens um Ereignisse als notwendiger Bestandteil der Physik selber. Beides verweist auf eine inhärente Struktur von Zeit, die wiederum an die Möglichkeit von Wissen und Information geknüpft ist.

Der Kern der Quantentheorie lässt sich mit v. Weizsäcker darauf reduzieren, dass sie eine »allgemeine Theorie probabilistischer Prognosen für empirisch entscheidbare Alternativen« darstellt.¹⁷ Sie beschreibt und determiniert die Möglichkeitsräume, die durch die Erfahrung von Welt als Manifestation irreversibler Zeit geschlossen werden. Die Messung am Quantenobjekt erscheint hiermit vor allem als *Informationsgewinn*,¹⁸ als ein Wissen, das die Potenzialitäten aus Vergangenheit und Zukunft in die Realität der Gegenwart überführt.

Information wird jetzt als das allem »Zugrundeliegende«, als die eigentliche »Substanz« der Quantentheorie aufgefasst, denn man kann »von der Information eines gegebenen Systems nur sinnvoll reden«, »wenn man die Existenz einer viel größeren Menge weiterer Information voraussetzt«. Der Informationsbegriff wird damit reflexiv, denn »Information ist nur, was verstanden wird«.¹⁹ Weizsäcker hütet sich jedoch davor, Verstehen an das Bewusstsein zu koppeln. Vielmehr betrachtet er den Verstehensprozess aus einer kybernetischen Perspektive. Auch Maschinen oder biologische Strukturen können in diesem Sinne Information verarbeiten.²⁰ Information erscheint hier als ein Unterschied, der in einem System einen Unterschied auslöst.²¹ Sie lässt sich damit weder als Materie noch als Bewusstsein fassen:

16 v. Weizsäcker (1994, 627).

17 v. Weizsäcker (1994, 589).

18 Vgl. ebd., 515 ff.

19 Ebd. 573 f.

20 ›Verstehen‹ ist dort nicht bloß ›subjektiv‹, als Bewußtseinsvorgang, aufgefasst, sondern auch als ›objektive‹ Wirkung, z. B. auf lebende Wesen oder Apparate. Diese Wirkung können wir als ›objektivierte Semantik‹ beschreiben« (v. Weizsäcker 1994, 574).

21 Siehe zur Explikation eines solchen Informationsbegriffes vor allem Bateson (1987).

»Im Rahmen des in der Naturwissenschaft verbreiteten cartesianischen Dualismus fragte man, ob Information Materie oder Bewußtsein sei, und erhielt die zutreffende Antwort: keines von beiden. Manche Autoren bezeichneten sie dann als ›eine dritte Art der Realität‹.

Wir werden die positive Antwort wählen: Information ist das Maß einer Menge von *Form*. Wir werden auch sagen: Information ist ein Maß der *Gestaltensfülle*. Form ›ist‹ weder Materie, noch Bewußtsein, aber sie ist eine Eigenschaft von materiellen Körpern, und sie ist von Bewußtsein wißbar. Wir können sagen: Materie *hat* Form. Bewußtsein *kennt* Form.«²²

Der Begriff Information ist für v. Weizsäcker synonym mit der Option, Gestalt oder Form annehmen zu können.²³ Auf grundlegender Ebene erscheint die Quantentheorie dann als eine Theorie sich selbst instruierender Formen, in der Modalitäten (Potenziale) in Faktizitäten (Formen) umgewandelt werden. Die Manifestation von Zeit in der Gegenwart generiert wiederum neue Modalitäten.²⁴ Hiermit tritt auch die ›Gegenwart‹ als eigenständige Zeitkategorie in die Physik ein, denn sie ist der Ort, wo etwas geschieht, wo eine entsprechende Selektion getroffen wird.²⁵ Die Minimaleinheit einer solchen durch

22 v. Weizsäcker (1994, 166 f.).

23 »Die Information steht für uns nunmehr an dem systematischen Ort einer Maßzahl der Substanz. Andererseits haben wir (5.2) Information erklärt als das Maß einer Menge an *Form*. Die Entwicklung der Physik scheint uns dahin zurückzuführen, die Form als die Substanz im Strom der Erscheinungen zu verstehen.« (v. Weizsäcker 1994, 580).

24 Weizsäcker sieht hier die Nähe zu »Sein und Zeit« von Heidegger (2006 [1926]): »Hiervon sprach auch Heidegger, wenn er an den Satz ›Es gibt Sein‹ die Frage knüpfte, welches ›Es‹ es sei, das hier ›gibt‹, und antwortete: das Ereignis. Ereignis gibt sein« (v. Weizsäcker 1994, 577).

25 »In der Näherung trennbarer Alternativen konnten wir die Quantentheorie mit reeler Zeitcoordinate, also mit der Fiktion der punktuellen Gegenwart aufbauen. Ereignisse aber gibt es nur durch Wechselwirkung; Wissen von Ereignissen ist jeweils ein neues Ereignis, nochmalige Wechselwirkung. Eigentliche Ereignisse gibt es nur in der für unbegrenzte Reflexion, also Wechselwirkung offenen Welt. Diese Offenheit umfaßt nicht nur den Raum, sondern auch die Zeit. Man wird die Formel wagen dürfen: Eigentliche Ereignisse gibt es nur in einer umfassenden Gegenwart. [...] Folgen wir dieser Darstellung, so können wir sagen, inwiefern der Begriff des individuellen Prozesses von den Zeitmodi unabhängig ist. Der individuelle Prozeß an einem Objekt enthält die Abfolge an ihm möglicher, jeweils durch Wechselwirkung zu etablierender Ereignisse.

die Quantenphysik forcierten Entscheidung bezeichnet v. Weizsäcker als eine *Uralternative*.²⁶ Gemeint ist hiermit der offene Horizont einer binären Alternative, die jetzt nicht mehr deterministisch durch das Kausalgesetz, sondern nur noch durch Beobachtung entschieden werden kann.

Insofern man bereit ist, mit dieser Argumentation mitzugehen, könnte man jetzt denken, dass damit auch die Beobachterproblematik der Quantentheorie gelöst ist. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie v. Weizsäcker selbst bemerkt:

»Nun die Konsequenz für den Beobachter. Er wird in der Beschreibung des Experiments nicht mitbeschrieben. Er ist vielmehr derjenige, der es beschreibt. Dabei kommt es aber auf ihn als diese individuelle Person gerade nicht an. Von seinen Wahrnehmungen, seinen Handlungen und seinem Wissen wird in der Beschreibung des Experiments nur gerade dasjenige relevant, was jeder andere ausgebildete Beobachter ebenso wahrnehmen, tun oder wissen würde. Es kommt in der Sprache Kants, nicht auf das empirische, sondern nur auf das transzendente Subjekt an: darauf, daß ein Subjekt etwas wahrnimmt, tut und weiß, und vielleicht mehrere Subjekte gemeinsam. Aber der so ›objektivierte‹ Beobachter ist kein ›reiner Geist‹. Er muß mit seinen Augen sehen, mit seinen Händen arbeiten. Er ist nur Beobachter, weil er selbst – vorsichtig sagen die Dualisten: weil sein Leib – Teil der Welt der Phänomene ist. Er kann sein eigenes Auge betasten, er steht in physischer Wechselwirkung mit den Objekten, die er beschreibt. Die Frage, wie der Beobachter sich selbst beschreiben könnte, bleibt offen.«²⁷

Wir begegnen hier einem Beobachter, der offenbar für die Beschreibung gebraucht wird, aber nicht zu fassen ist. Es kann sich offensichtlich nicht nur um ein individuelles Subjekt handeln, das die Welt in

Zwischen den Ereignissen ist *für dieses Objekt* keine Zeitfolge, sondern gleichsam umfassende Gegenwart. Die Zeitmodi konstituieren sich durch die Wechselwirkung. Die Faktizität der Vergangenheit bedeutet, daß vergangene Ereignisse an diesem Objekt aufbewahrt sind in ihrer Wirkung auf andere Objekte, also im Sinne der Möglichkeit der Vergangenheit durch ihre Wirkung auf die heute möglichen Ereignisse in der Welt: durch Dokumente. Die Offenheit der Zukunft bedeutet, daß *diesem* Objekt nicht anzusehen ist, welche Ereignisse durch seine Wechselwirkung mit anderen Objekten geschehen werden.« (v. Weizsäcker 1994, 617).

²⁶ »Nach unserem Teilchenmodell kann man voraussichtlich die Messung der Spinrichtung eines Elektrons im Stern-Gerlach-Versuch als die Entscheidung einer Uralternative auffassen« (v. Weizsäcker 1994, 577).

²⁷ v. Weizsäcker (1994, 531).

der Gegenwart zur Phänomenologisierung bringt. Entsprechend der Paradoxie von ›Wigners Freund‹²⁸ würde eine solche Auffassung an der Frage scheitern, wem man die entscheidende Beobachterqualität zugestehen habe (kommt ein Ereignis zur Realität, wenn man es selbst gesehen hat oder schon wenn ein Freund es gesehen hat?).

v. Weizsäcker zeigt hier eine gewisse Affinität zu Kants transzendentalen Subjekt, das als Bedingung der Möglichkeit vorausgesetzt werden muss.²⁹ Zugleich muss er sich jedoch eingestehen, dass es wenig Sinn ergibt, von einem fleischlosen und seiner physischen Substanz beraubten objektiven Beobachter als rein geistigem Konstrukt auszugehen. Die Quantentheorie legt nahe, von konkreten physischen Wechselwirkungen auszugehen. Offen bleiben die Fragen: Wer sieht, wenn gesehen wird? Wer weiß, wenn gewusst wird? Ist da überhaupt ein Beobachter oder gibt es nur Beobachten, Sehen und Wissen, aber keine Sehenden oder Wissenden? All dies ist zudem eingewoben in eine Theorieanlage, die von verschränkten und nicht-lokalen Quantenzuständen auszugehen hat.

Auch für v. Weizsäcker bleibt die Frage unbeantwortet, »wie der Beobachter sich selbst beschreiben könnte«.

Das alte Problem der Quantentheorie, wie unter der Voraussetzung von Beobachtungsprozessen, die selbst Teil der Welt sind, die Schnitte in der Welt zu legen sind, bleibt virulent. Wir begegnen dem Problem der mehrfachen Quantelung: Wahrscheinlichkeiten müssen durch Wahrscheinlichkeiten erklärt werden.³⁰ Modalitäten setzen Modalitäten voraus. Beobachter müssen durch Beobachter erklärt werden. All dies führt v. Weizsäcker zu der Auffassung, Information als den grundlegenden Begriff der Quantentheorie zu begreifen. Die Potenzialitäten, welche durch diese Wahrscheinlichkeitsbilder aufgespannt werden, werden hiermit als fundamentale und nicht mehr nur abgeleitete Kategorien der Physik aufgefasst.³¹

28 Vgl. Wigner (1962).

29 Kant (1952 [1781]).

30 »Es gibt eine Quantentheorie hinter der Quantentheorie, genau weil Wahrscheinlichkeiten nur mit Hilfe von Wahrscheinlichkeiten erklärt werden können. Das bedeutet nichts weiter, als daß es zu jedem möglichen Objekt der Quantentheorie auch ein mögliches Objekt der Quantentheorie gibt, das aus vielen Objekten der vorhergehenden Stufe besteht. Man wird so nicht nur zur zweiten, sondern zur mehrfachen Quantelung geführt« (v. Weizsäcker 1994, 312).

31 »Das Grundphänomen der quantentheoretischen Wahrscheinlichkeitsrechnung ist die ›Interferenz der Wahrscheinlichkeiten‹; die Grundgesetze beziehen sich nicht direkt auf die meßbaren Wahrscheinlichkeiten, sondern auf ›Wahrscheinlichkeitsamplituden‹. [...] Der Unterschied zwischen klassischen und quantenmechanischen Wahrscheinlichkeiten entspricht

3 Informationstheoretische Deutung: It from Bit

Immer wieder hat sich für die Interpretation der Quantentheorie der Begriff der Entropie aufgedrängt. Schon zu Beginn der Geschichte der Quantentheorie hat Planck aufgezeigt, dass sich aus der informationstheoretischen Herleitung der Entropie äußerst fruchtbare Perspektiven auf die Interpretation gequantelter Strahlungsprozesse ergeben (siehe Kap. I). Ebenso greift v. Weizsäcker auf einen informationstheoretisch gefassten Entropiebegriff zurück, um sich der Bedeutung der in der Schrödinger-Gleichung eingelagerten Wahrscheinlichkeiten anzunähern.

In neueren Diskussionen um die Interpretation der Quantentheorie finden sich einige Überlegungen, die Essenz der Quantentheorie mit Hilfe eines nackten Informationsbegriffs zu reformulieren.

Im Prinzip ist diese Perspektive schon mit der Kopenhagener Deutung angelegt. Mit den Worten Heisenbergs heißt es hier: »Die un stetige Änderung der Wahrscheinlichkeitsfunktion findet allerdings statt durch den Akt der Registrierung; denn hier handelt es sich um die un stetige Änderung unserer Kenntnis im Moment der Registrierung, die durch die un stetige Änderung der Wahrscheinlichkeitsfunktion abgebildet wird.«³²

Anstatt jetzt nach der Bedeutung oder gar dem ontologischen Gehalt der Schrödinger-Gleichung zu fragen, lässt sich die hier angedeutete epistemische Position in einer Weise radikalieren, dass am Ende nur noch die Information übrig bleibt. Man kann nichts weiter über Quantensysteme wissen, weil da außerhalb der durch die Messung realisierten Information nichts ist. Das einzige, was die Welt jetzt noch auszeichnet, ist Information. Entsprechend ist das Sein jetzt als ein abgeleitetes Phänomen zu verstehen. *It from bit* – so hat Archibald Wheeler diese radikale Perspektive benannt, entsprechend der allen physikalischen Phänomenen ein informationstheoretischer Ursprung zugrunde liegt.³³

genau dem Unterschied zwischen der klassischen und der quantentheoretischen Physik. Die meisten Erkenntnistheoretiker, zumal diejenigen aus der Schule des logischen Positivismus, haben diesem Unterschied einen ›bloß‹ empirischen Charakter zugeschrieben, also eine niedrigere Stufe in der Begriffshierarchie als diejenige, auf der sich der Sinn von Begriffen wie Erfahrung und Wahrscheinlichkeit entscheidet. Dadurch erklärt sich vermutlich das mangelnde Verständnis dieser Erkenntnistheoretiker für die Bedeutung des ersten Ranges, welche die Quantentheorie schon für die Formulierung des Sinns dieser ›höheren‹ Begriffe hat« (v. Weizsäcker 1994, 302 ff.).

32 Heisenberg (2007, 80).

33 Fischer resümiert in Bezug auf die Haltung von Wheeler: »Wheeler ver-

Insbesondere der Experimentalphysiker Zeilinger plädiert mittlerweile dafür, das Quanten-Bit als fundierendes Prinzip der Quantentheorie aufzufassen.³⁴ Gehen wir im Folgenden etwas ausführlicher auf seine Argumentationsweise ein.

Jede (physikalische) Theorie stellt ein System von Propositionen dar, also ein Netzwerk von Aussagen, die in einem spezifischen Begründungszusammenhang mit anderen Aussagen stehen. Zeilinger fragt nun, welches die elementare Proposition der Quantentheorie ist, die sie als Theorie konstituiert. Im Einklang mit der Kopenhagener Deutung sieht er ihre grundlegende Wahrheitsaussage darin, dass *die Quantentheorie eine fundamentale Aussage darüber macht, was man über die Welt wissen kann*.³⁵ Sowohl die theoretische Anlage der

suchte, den bekannten Erhaltungssätzen der Physik, die man etwa für Energie und den Impuls formulieren kann, einen weiteren hinzuzufügen, der die Information betrifft. Vielleicht bleibt ja die Menge an Information, die in der Natur steckt, konstant. [...] Bei Bohr hatte Wheeler gelernt, dass wir eigentlich nicht über die Natur bzw. die Wirklichkeit sprechen können, sondern über unser Wissen davon. Dieses Wissen haben wir aus den Informationen gewonnen, die wir der Natur entnommen haben – und das ist das Rätsel: Wenn wir der Natur Informationen entnehmen können, muss sie in ihr enthalten sein. Dies ist in einer wissenschaftlichen Beschreibung aber nicht der Fall. Da hat die Natur Masse, Energie, Ladung und manches mehr, aber keine Eigenschaft, die an das Konzept der Information anzuschließen ist.

Wheeler nutzte dies zu einer tollkühnen Spekulation, indem er fragte, ob wir überhaupt sagen könnten, dass es erst die Welt (das Etwas, das englische *it*) gegeben habe, der man dann Informationen, die bekanntlich in Bits gemessen werden, entnehmen kann. [...] Nun fragte Wheeler, ob nicht umgekehrt ›It from Bit‹ kommen könnte, ob nicht erst eine formbildende (informative) Bewegung da gewesen sei, die dann die Welt geschaffen habe. Selbst in der Bibel war am Anfang nicht ein Etwas, sondern eine Information, nämlich das Wort Gottes, mit dem das Nichts vertrieben wurde. [...] The ›really big questions‹ [are: ...]

It from Bit? (Sein aus Information?)

Why the Quantum? (Warum Quantensprünge?)

A participatory Universe? (Ein partizipatorisches Universum?)

What makes Meaning? (Wie entsteht Bedeutung?)

What makes Existence? (Woher kommt Etwas?)« (Fischer 2010, 254).

³⁴ Siehe vor allem Zeilinger (1999a).

³⁵ »The most fundamental viewpoint here is that the quantum is a consequence of what can be said about the world. Since what can be said has to be expressed in propositions and since the most elementary statement is a single proposition, quantization follows if the most elementary system represents just a single proposition. While I have given here, only in a very sketchy way, a few points of a new view of quantum mechanics,

Theorie³⁶ als auch die zentralen empirischen Befunde führen zu der Einsicht, dass Quantensysteme nicht vollständig bestimmt sind. Die theoretische Vorhersage der Quantentheorie lautet, dass in Quantensystemen eine schwächere Kausalität herrscht als in der klassischen Physik. Entsprechend sind Wahrscheinlichkeitstendenzen als ein konstitutioneller Bestandteil der physikalischen Realität anzusehen und können nicht durch verborgene Variablen wegerklärt werden.

Informationstheoretisch gewendet lässt sich jetzt formulieren, dass Quantensysteme aus einer Kombination von Eigenschaften bestehen, die man *wissen* kann und die man *nicht wissen* kann. Sie tragen eine begrenzte Anzahl von *Bits* an Information und beinhalten notwendigerweise Aspekte, die *nicht* bestimmt sind, die also *prinzipiell* nicht gewusst werden können.³⁷

a number of other fundamental concepts follow and will be elaborated upon in future papers. [...] This will also include a more detailed analysis of philosophical and interpretational consequences. Suffice it to say here that, in my view, the principle naturally supports and extends the Copenhagen interpretation of quantum mechanics. It is evident that one of the immediate consequences is that in physics we cannot talk about reality independent of what can be said about reality. Likewise it does not make sense to reduce the task of physics to just making subjective statements, because any statements about the physical world must ultimately be subject to experiment. Therefore, while in a classical worldview, reality is a primary concept prior to and independent of observation with all its properties, in the emerging view of quantum mechanics the notions of reality and of information are on an equal footing. One implies the other and neither one is sufficient to obtain a complete understanding of the world« (Zeilinger 1999b, 642).

36 Die Nicht-Vertauschbarkeit von Operatoren oder Matrizen bei der Multiplikation führt zur Unbestimmtheitsrelation. Vgl. Kap. I.

37 In philosophischen Kreisen ist die informationstheoretische Interpretation der Quantentheorie insbesondere durch Jeffrey Bub bekannt geworden: »Why the quantum?« was one of John Wheeler's ›Really Big Questions.‹ The characterization of quantum mechanics in terms of three information-theoretic constraints provides an answer to this question: a quantum theory is fundamentally a theory about the possibilities and impossibilities of information transfer in our world, given certain constraints on the acquisition, representation, and communication of information, not a theory about the mechanics of nonclassical waves or particles. In the debate between Bohr and Einstein on the interpretation of quantum theory, this answer to Wheeler's question sides with Bohr. The focus on quantum information as an answer to Wheeler's question about the quantum has been impressively successful in terms of new physics over the past twenty years or so. Where Einstein and Schrödinger saw a problem (e.g., the nonlocality of entanglement in the EPR experi-

Ein elementares Quantensystem beinhaltet genau ein *Bit* an Information. Zusammengesetzte Systeme sind dann aus N Elementarsystemen zusammengesetzt zu denken und tragen dann entsprechend N Bits an Information.³⁸ Im Unterschied zu einem klassischen Bit, mit dem ein normaler Computer rechnet, trägt ein Quantenbit (Qubit) neben dem bestimmten Anteil auch noch einen unbestimmten Anteil, denn über die Unbestimmtheitsrelation sind in ihm zwei Eigenschaften miteinander verschränkt.³⁹ Während in einem klassischen Computer die Rechnungen determiniert sind und so zu einem vorherbestimmten Ergebnis führen, würde ein Quantencomputer zugleich auch mit Unbestimmtheiten rechnen und entsprechend auch zu überraschenden Resultaten führen können.

An dieser Stelle interessieren uns jedoch nicht die Eigenschaften und Potenziale von Quantenrechnern, sondern die informationstheoretische Interpretation der Quantentheorie.

ment), contemporary physicists see an opportunity to exploit entanglement as a new sort of nonclassical communication channel (e.g., for teleportation, or for new modes of communication and computation). This is a major revolution in the aim and practice of physics. As Andrew Steane (1998) puts it:

Historically, much of fundamental physics has been concerned with discovering the fundamental particles of nature and the equations which describe their motions and interactions. It now appears that a different programme may be equally important: to discover the ways that nature allows, and prevents, information to be expressed an manipulated, rather than particles to move« (Bub 2004, 20). Vgl. auch Bub (2001; 2008).

38 »An elementary system carries 1 bit of information. We remark that this might also be interpreted as a definition of what is the most elementary system. We stress, again, that by proposition we mean something which can be verified directly by experiment. In order to avoid misconceptions, I would like to underline that notions such as that a system ›represents‹ the truth value of a proposition or that it ›carries‹ one bit of information only implies a statement concerning what can be said about possible measurement results« (Zeilinger 1999a, 635).

39 »Zusammenfassend können wir drei wesentliche Eigenschaften verschränkter Paare von Qubits feststellen: perfekte Korrelationen zwischen den Messresultaten der Teilchen eines Paares, obwohl die Resultate der Einzelmessungen völlig unbestimmt sind, unterschiedliche Statistik bei Messungen an verschränkten bzw. unverschränkten Paaren und die Möglichkeit, die vier Basiszustände (Bell-Zustände) durch Manipulation nur eines der beiden Teilchen ineinander zu überführen.

Diese drei Eigenschaften bilden den Grundstein für die wichtigen Methoden der Quantenkommunikation mit verschränkten Teilchen« (Weinfurter 2002, 122 f.).

Schauen wir mit Zeilinger deshalb nochmals auf das Experiment am Mach-Zehnder-Interferometer, das bereits in Kapitel III.4 vorgestellt wurde, denn hier wird ein elementares Quantensystem realisiert:

»Das elementarste Quantensystem entspricht einem Bit an Information. Dass diese Information tatsächlich sinnvoll ist, sehen wir, wenn wir uns das Mach-Zehnder-Interferometer noch einmal, aber diesmal aus der neuen Sichtweise der Information, betrachten. Wir haben bereits gesehen, dass wir entweder den Weg durch das Interferometer kennen (also welcher von zwei Detektoren, jeder in einem der beiden Strahlwege ›Klick‹ machen wird), oder wir können, wenn wir die Interferenz zulassen, festlegen, welcher der beiden Detektoren hinter dem Interferometer ›Klick‹ machen wird. Aber beides gleichzeitig geht nicht! Es handelt sich – laut Bohr – um zwei komplementäre Größen, also kann das System nur so beschaffen sein, dass es entweder die Antwort darauf trägt, welcher der beiden Detektoren im Interferometer ›Klick‹ machen wird, oder es trägt die Antwort darauf, welcher der beiden Detektoren hinter dem Interferometer ›Klick‹ machen wird. Ist die Antwort auf eine der beiden Fragen festgelegt, dann ist die Antwort auf die andere Frage vollkommen ungewiss. Wissen wir also mit Sicherheit, welchen Weg das Teilchen durch das Interferometer geht, ist absolut nicht festgelegt, welcher der beiden Detektoren hinter dem Interferometer das Teilchen registrieren wird.

Dies legt offenbar nahe, und das ist nun ein ganz entscheidender und zentraler Punkt, dass wir unser Teilchen im Mach-Zehnder-Interferometer als ein elementares System ansehen können. Es kann nur ein einziges Bit an Information tragen. Wir können uns aufgrund der Art und Weise, wie wir das Experiment aufbauen, wie wir damit das Teilchen präparieren, entscheiden, ob dieses Bit an Information dazu verwendet wird, den Weg im Interferometer festzulegen, oder dazu verwendet wird festzulegen, welcher Weg hinter dem Interferometer das Teilchen registrieren wird.«⁴⁰

In einem elementaren Quantensystem kann nur ein Wert bestimmt sein, während der andere unbestimmt bleiben muss, da das System eben nur ein Bit an Information tragen kann. Dennoch besteht zwischen beiden Werten ein Zusammenhang, denn erst die Bestimmung des einen lässt den anderen unbestimmt erscheinen.

40 Zeilinger (2005, 220).

Anders als bei Zufallsprozessen, die klassisch beschrieben werden können, bekommen wir es hier also mit einer *Koproduktion von Bestimmtheit und Unbestimmtheit* zu tun.⁴¹ Das *Verhältnis* von Wissen und Nicht-Wissen ist hiermit *konditioniert*, ist also seinerseits *bestimmt*, denn es ergibt sich als eine *verbundene* – man könnte ebenso gut sagen *holistische* – Eigenschaft des übergreifenden Quantensystems.⁴² Die Essenz der Quantentheorie besteht aus dieser Perspektive darin, dass sie Konfigurationen im Verhältnis von Wissen und Nicht-Wissen beschreibt.

Insofern wir die Quantentheorie als die grundlegende Theorie der Physik anerkennen, stehen wir mit Zeilinger vor dem Dilemma, dass wir zwischen *Information* und *Wirklichkeit* nicht in einer operationellen, nachvollziehbaren Weise unterscheiden können:

»Naturgesetze dürfen keinen Unterschied machen zwischen Wirklichkeit und Information.«

41 »Physikalisch bedeutet dies, dass sich das Quantensystem mit der Wahrscheinlichkeit $|a_0|^2$ im Zustand $|0\rangle$ befindet (den Wert \circ besitzt) und mit der Wahrscheinlichkeit $|a_1|^2$ im Zustand $|1\rangle$ (Wert \circ). Der Wert des Bits selbst ist damit quantenmechanisch ungewiss, eine Beobachtung wird einen der beiden Werte mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit liefern. Ist aber mit dieser Ungewissheit nicht auch ein Verlust an Information verbunden?

In der Quantenmechanik ist hier strikt zwischen Superposition und dem klassischen Gemisch zweier Möglichkeiten zu unterscheiden. Wenn wir zum Beispiel an einem Ensemble von Photonen mit gleicher Wahrscheinlichkeit horizontale und vertikale Polarisierungen detektieren, so kann es sich dabei um ein inkohärentes Gemisch ohne irgendeinen Informationsgehalt gehandelt haben. Es könnte aber auch eine kohärente Superposition gewesen sein, zum Beispiel: $(|H\rangle + |V\rangle) / \sqrt{2} = 45^\circ$, das heißt ein 45° Grad linear polarisiertes Ensemble mit eindeutig definierter Information. Wie wir später sehen, bildet diese Gleichzeitigkeit von Ungewissheit und definierter Information den Grundstein für die Sicherheit der Quantenkryptographie.

Die Möglichkeit der Superposition führt, zusammen mit den daraus folgenden Interferenzphänomenen, zu all den Paradoxa und Interpretationsproblemen der Quantenmechanik« (Weinfurter 2002, 122 f.).

42 »That state does not contain any information about the individuals; all information is contained in joint properties. In fact, now there cannot be any information carried by the individuals because the two bits of information are exhausted by defining that maximally entangled state, and no further possibility exists also to encode information in individuals« (Zeilinger 1999a, 639).

»Wir können unsere Grundidee noch radikaler formulieren, da es offenbar keinen Unterschied zwischen Wirklichkeit und Information geben kann, können wir auch sagen: ›*Information ist der Urstoff im Universum.*«⁴³

Mit einem Schlag scheint Zeilinger hier den gordischen Knoten der vielfältigen Interpretationsprobleme der Quantentheorie zu durchschlagen. Der Quantenformalismus kann jetzt in seiner nackten Form als ein auf Quantenlogik beruhendes Aussagensystem verstanden werden. Supplemente zu einer weitergehenden Interpretation der Quantentheorie scheinen jetzt nicht mehr gebraucht zu werden. Es scheint sinnlos zu fragen, was zwischen zwei Messungen an einem Quantensystem geschieht, da es prinzipiell keine Information geben kann, was hier geschieht (das System muss sozusagen undefiniert sein). Epistemisch fallen hier Positivismus und Realismus zusammen, denn man kann nur wissen, was man wissen kann, und dies zeigt sich als das, was möglich ist, als das, was in der Bestimmung von Wissen und Nicht-Wissen noch nicht entschieden ist.

Auch wenn es zunächst naheliegt, lässt sich Zeilingers Perspektive keineswegs mit dem Label ›subjektivistisch‹ abqualifizieren. Mit Blick auf die an seinem Institut durchgeführten Experimente mit den Fullerenen wird nicht vorausgesetzt, dass Wissen die Beobachtung durch einen bewusstseinsfähigen Akteur einschließt. ›Wissen‹ meint bei Zeilinger nur, dass eine Bestimmung durch eine Wechselwirkung stattfindet, die dann prinzipiell in weitere bestimmende Wechselwirkungen münden kann. Wissen erscheint hier gleichsam als eine *Systemeigenschaft*. Wenn Luftmoleküle oder Photonen einen Quantenzustand qua Interaktion definieren, dann ›weiß‹ das System.

Zeilingers Argumentation funktioniert gerade deshalb, weil sie die Kopenhagener Deutung an einen hoch abstrakten Informationsbegriff anbindet. Unbestreitbar gewinnt seine Interpretation der Quantentheorie damit ein hohes Maß an Eleganz. Die hierfür in Kauf zu nehmende Hochabstraktion stellt jedoch nicht nur eine Lösung, sondern zugleich ein Problem dar. Die Paradoxien der Quantentheorie lassen sich hiermit zwar oberflächlich zum Verschwinden bringen, doch sobald man versucht, den Informationsbegriff in einen konkreten Konstitutionszusammenhang einzubinden, erscheinen die Probleme erneut.

Entsprechend den Einsichten der Kybernetik erscheint Information als ein *Unterschied, der einen Unterschied* macht. Unweigerlich stellt sich jetzt aber die Frage, *wo* der Unterschied gemacht wird. Hiermit begegnen wir *volens volens* der Frage nach der Beziehung

43 Zeilinger (2005, 216 f.). Kursiv im Original.

zwischen *Medium* und *Form*. Worin schreibt sich die Information der Quantentheorie ein? Da ein klassisches Medium hierfür selbstredend nicht in Frage kommt, bleiben nur die mit der Schrödinger-Gleichung formulierten ›Wellen von Nichts‹ übrig. Da aber entsprechend der radikalisierten Kopenhagener Deutung keine Aussagen darüber gemacht werden dürfen, was zwischen den Messungen geschieht, hat es hier auch keinen Sinn mehr, von einer wellenförmigen Quantenmaterie auszugehen. Die Argumentation schließt sich hermetisch ab.

Hiermit wird die Paradoxie verdeckt, dass die Gleichsetzung von Theorie und Realität vorausgesetzt werden muss (ohne die mit der Schrödinger-Gleichung postulierten Interferenztherme gibt es keine Verschränkung), was jedoch auf anderer Ebene wieder bestritten werden muss (was zwischen den Messungen geschieht, gibt es nicht). Hiermit kommen wir in Kurzform zu der Paradoxie ›was zählt, zählt nicht‹. Man braucht die Wellenfunktion zum Rechnen, muss aber zugleich das mit ihr verbundene konzeptionelle Modell bestreiten. Es ist das Verdienst von Wheeler und Zeilinger, auf die Bedeutung des Informationsparadigmas für die Quantentheorie hingewiesen zu haben. Die übergreifenden Fragen zur Interpretation der Quantentheorie werden damit jedoch nicht hinfällig.⁴⁴

4 Dekohärenz: Die Natur misst sich selber

Mit v. Neumann wurde zwar schon recht früh das Postulat aufgestellt, dass Quantenprozesse immer auch in Hinblick auf ihre Einbettung in die Umwelt zu betrachten sind, doch erst in den 1970er-Jahren stellten sich die Physiker vermehrt der Frage, was es bedeuten könnte, Quantensysteme als *offene* Systeme zu betrachten. Hierdurch erweiterte sich die theoretische wie auch die experimentelle Blick-

44 In diesem Sinne kommt dann auch Duwell zu dem Schluss, dass Quanteninformation wohl ein wesentliches Merkmal der Interpretation der Quantentheorie darstellen muss, jedoch weder die Frage der verborgenen Variablen hiermit gelöst ist, noch die anderen empirisch relevanten Interpretationen der Quantentheorie ihre Relevanz verlieren: »Bub argues that quantum theory must be re-conceived of as a principle theory of information where information is a new physical primitive, to the exclusion of hidden variable theories. I will argue, contrary to Bub, that the CBH [Clifton, Bub, and Halvorson] theorem cannot be used to exclude hidden variables theories. Drawing inspiration from Bub, I sketch an alternative conception of quantum mechanics as a theory of information, but one which embraces all empirically equivalent quantum theories« (Duwell 2007, 181).

richtung. Nicht mehr nur die idealtypisch geschlossene und jegliche Interaktion mit der Umwelt ausblendende Versuchsanordnung war nun von Interesse. Mit Blick auf den Befund, dass die für Quantenphänomene so typischen Interferenzen durch Umwelteinflüsse ihre Kohärenz verlieren (das Wellenbild beginnt zu verrauschen), begann man vermehrt darüber nachzudenken, ob sich nicht auch der Übergang von der Quantenwelt zu den klassischen Begriffen einfach durch die Dekohärenz ›reiner Zustände‹ in ›gemischte Zustände‹ erklären ließe.⁴⁵ Einem reinen Zustand entspricht eine genau definierte Wellenfunktion, während sich der unreine Zustand durch Überlagerungen mit vielfältigen wahrscheinlichen, aber nicht bestimmten Wellenfunktionen auszeichnet. Auch die Dekohärenztheorie arbeitet sich damit an dem Bezugsproblem ab, dass man aus theorieimmanenten Gründen eine universelle Geltung der Wellenfunktion anzunehmen hat, man damit aber jedoch Probleme bekommt, das Erscheinen einer stabilen klassischen Welt zu erklären.

Erinnern wir uns nochmals an das Doppelspaltexperiment mit den großen Fulleren-Molekülen (siehe Kap III.4). Hier wurde deutlich, dass sowohl Luftmoleküle als auch eine hinreichend energiereiche Wärmestrahlung die Interferenzen der Molekülwellen zum Verschwinden bringen. Entsprechend liegt zunächst der Gedanke nahe, dass Umwelteinflüsse als ›Messungen‹ betrachtet werden können, welche den Zusammenbruch der Wellenfunktion bewirken und auf diese Weise Teilchen hervorbringen, die sich klassisch verhalten.

Die Annahme des Kollapses der Wellenfunktion verlässt jedoch das Schrödingerbild, was unbefriedigend bleibt, da man auf einen Mechanismus zurückgreifen muss, der außerhalb der Quantentheorie steht. Die Dekohärenztheorie versucht hier einen Ausweg zu bieten, indem sie den Übergang in die klassische Welt als einen »*scheinbaren* Kollaps in quasi-klassische Zustände« erklärt.⁴⁶

Die Grundidee ist im Prinzip einfach: Beide, das messende Objekt wie auch das zu messende Objekt, sind sowohl vor als auch nach der Messung mit der Schrödinger-Gleichung als Wellenfunktion zu beschreiben. Wellenfunktionen überlagern und ›verschränken‹ sich, sobald sie miteinander interagieren. Ein durch den Versuchsaufbau präpariertes Quantensystem kann als ein *reiner Zustand* betrachtet werden, der im Idealfall nur einen einzigen Freiheitsgrad besitzt (nämlich die eine Entscheidung, welche bei der Messung getroffen werden kann). Die Überlagerung der beiden Alternativen in einer ›Quantenwelle‹ lässt sich entsprechend als ein kohärentes Muster reproduzieren. Demgegenüber befindet sich das Messgerät in einem

45 Siehe hierzu als paradigmatischen Beitrag Joos/Zeh (1984).

46 Zeh (2011, 8).

gemischten Zustand, der sich aus vielfältigen Freiheitsgraden und einer Geschichte unzähliger Interaktionen mit der Umwelt ergibt. Um eine musikalische Metapher zu verwenden: Der reine Zustand entspricht dem sauberen und noch unverfälschten Ton eines Musikinstrumentes. Der gemischte Zustand entspricht den diffusen, sich überlagernden Hintergrundgeräuschen einer Stadt, welche aus einer Vielzahl von Geräuschquellen zusammengesetzt sind und in dem die unterschiedlichen Wellenfragmente chaotisch aufeinander einwirken.

Mit Blick auf die durch die Schrödinger-Gleichung aufgespannte Wellenfunktion ist bei diesem Bild allerdings zu beachten, dass letztere im Hilbertschen Konfigurationsraum definiert ist und damit nicht mit dem uns vertrauten dreidimensionalen Ortsraum verwechselt werden darf (nur für die Massepunkte gemessener Teilchen sind beide Räume identisch). Der Konfigurationsraum kann hingegen unendlich viele Dimensionen einnehmen und gestattet vor allem auch nicht-lokale Verschränkungen.

Dekohärenz bedeutet jetzt nichts anderes, als dass in einer Interaktion zwischen zwei Systemen sich die Wellenfunktionen überlagern und die zuvor vorhandenen Interferenzmuster ausgemittelt werden, so dass die eindeutige Phasenbeziehung gestört wird. Hiermit verschwindet dann auch *scheinbar* der Wellencharakter des Phänomens. So wie jetzt auch das akustische Hintergrundrauschen immer noch auf Luftschwingen beruht (wenngleich diese nicht mehr kohärent sind), so würden auch die Wellenfunktionen nicht wirklich verschwinden. Angesichts der Komplexität der sich überlagernden Muster kann jedoch keine bedeutungstragende Struktur mehr erscheinen. Die Kohärenz wäre damit *irreversibel* verloren gegangen.

Die Dekohärenztheorie kann hiermit auch erklären, warum wir in der Welt eine Zeitrichtung beobachten, die mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, dem Gesetz der Entropie, übereinstimmt. Die vielfältigen Interaktionen von Systemen mit ihrer Umwelt führen zum Verlust von Kohärenz und damit – so die wichtige Schlussfolgerung – zu klassischen Eigenschaften, in denen keine Interferenzen oder Überlagerungen von Wirklichkeitsalternativen zu beobachten sind.⁴⁷ Dass sich aus der Verschränkung unterschiedlicher Systeme

47 »The dependence of macroscopic systems upon their environment is studied under the assumption that quantum theory is universally valid. In particular scattering of photons and molecules turns out to be essential even in intergalactic space in restricting the observable properties by locally destroying the corresponding phase relations. The remaining coherences determine the ›classical‹ properties of the macroscopic systems. In this way local classical properties have their origin in the nonlocal character of quantum states. [...] For discrete variables (here exemplified

kohärente Wellenzüge ergeben, ist demgegenüber zwar nicht ausgeschlossen, jedoch als ein höchst unwahrscheinliches Ereignis zu betrachten.⁴⁸

Auf diese Weise lässt sich jetzt auch das *Entstehen* klassischer Objekte erklären. Diese erscheinen jetzt als wahrscheinliches *Mittel* von sich vielfältig überlagernden Wellenzügen. Eine Messinteraktion erzeugt eine sich überlagernde Wellenfunktion, die dann in Interaktionen mit weiteren Wellenfunktionen weitere Überlagerungen erzeugt, die sich wiederum wechselwirkend aufeinander beziehen. In der Aufsummierung dieser möglichen Prozesse kommt die Dekohärenztheorie zu einer *Dichtematrix*, die dann synonym für die Ausspuration eines hochwahrscheinlichen Aggregatzustandes steht.

Beim Doppelspaltexperiment würde also nicht die Messung das Quantenobjekt stören (d. h. es zum Kollaps der Wellenfunktion zwingen). Im Gegenteil ist jetzt davon auszugehen, dass das Quantenobjekt durch seine Interaktion mit dem Messinstrument letzteres zu einer Entscheidung zwingt (z. B. Beobachtung eines Teilchens am linken oder am rechten Spalt), welche dann auch makroskopisch beobachtet werden kann. Bei »reiner Dekohärenz« stört das »System die Umgebung« und »nicht umgekehrt. Der Dekohärenzeffekt am System selber ergibt sich nur als Konsequenz der daraus resultierenden Verschränkung«.⁴⁹

Die Objekte der klassischen Welt erscheinen aus dieser Perspektive gerade deshalb stabil und lokalisiert, weil sie durch die Interaktion mit nicht-lokal situierten Quantenobjekten konstituiert und stabilisiert werden. Joos beschreibt dies folgendermaßen:

»Es zeigt sich dann, dass makroskopische Eigenschaften bestimmter Objekte – *nämlich genau solcher Objekte, die wir makrosko-*

by two state systems) the classical properties are given by the measurement basis. The continuous case, studied for the translational degrees of freedom leads to a competition between destruction of decoherence by the interaction and dispersion of the wave packet by the internal dynamics« (Joos/Zeh 1984, 223)

48 Hierdurch erklärt sich dann auch, dass sich bei klassischen Entscheidungsalternativen – z. B. dem Wurf einer Münze oder einer Karte – immer nur diskrete Antworten zeigen. »Auch diese Frage vermag die Dekohärenz zu beantworten. Den Berechnungen zufolge sind klassische Zustände wie ›Bild oben‹ und ›Bild unten‹ genau diejenigen, denen Dekohärenz nichts anhaben kann. Das heißt also, Wechselwirkungen mit der Umwelt lassen zwar Karten mit dem Bild oben und Karten mit dem Bild unten unbehelligt, zwingen aber jede Superposition von ›oben‹ und ›unten‹ in eine der klassischen Alternativen ›oben‹ oder ›unten‹.« (Tegmark/Wheeler 2001).

49 Zeh (2011, 11).

pisch nennen – nicht, wie man naiverweise annehmen könnte, den Objekten schon von vornherein zukommen, sondern erst durch die *irreversible* Wirkung mit der Umgebung erzeugt werden. Damit finden *lokale* klassische Eigenschaften ihren Ursprung in der Nichtlokalität von (verschränkten) Quantenzuständen. Erst die Art der Wechselwirkung definiert, *welches* Charakteristikum dann ›klassisch‹ wird: Objekte erscheinen im *Raum* lokalisiert, weil die typischen Wechselwirkungen *ortsabhängig* sind.⁵⁰

Wie bereits angedeutet, braucht eine ›Messung‹ nicht mehr durch einen Experimentator durchgeführt werden. Seine Absicht, sein Wissen oder Nicht-Wissen werden hierzu nicht gebraucht. Die Natur misst sich hier gleichsam selber und lässt dadurch jene klassischen Welten erscheinen, über die sich dann wiederum andere klassische Welten bestimmen lassen.

Hiermit ergibt sich auch eine etwas andere Interpretation der *quantum-eraser*-Experimente (siehe Kap. III.4). Vor der Messung besteht ein isolierter, ›reiner‹ Quantenzustand, der entsprechend auch Interferenzeigenschaften *zeigt*. Nach der Messung liegt ein gemischter Zustand vor. Das vermeintliche Ausradieren der Information stellt aus Perspektive der Dekohärenztheorie keineswegs den ursprünglichen Zustand wieder her, sondern erzeugt ein neues kohärentes Quantensystem, das entsprechend wieder Interferenzen zeigt.⁵¹

Die Dekohärenztheorie ist auch in empirischer Hinsicht ein recht erfolgreiches Paradigma. Man kann mit ihr recht genaue Vorhersagen treffen hinsichtlich der Zeithorizonte, in denen Quantenzustände ihre Kohärenz verlieren. Bei größeren Systemen geschieht dies bei Raumtemperatur oftmals innerhalb von Nanosekunden.⁵²

50 Joos (2002, 190).

51 Hierzu Zeh: »[Die falsche Annahme ist:] Beim ›Quantenradierer‹ wird die Information über ein früheres Meßergebnis vernichtet (›ausradiert‹), wodurch die komplementäre Eigenschaft, z. B. in Form eines Interferenzbildes, wieder beobachtbar wird. Richtig ist vielmehr: Ein ›Radieren‹ (also eine Transformation der physikalisch vorliegenden Information in unkontrollierbare, also etwa thermische Freiheitsgrade) würde die Dekohärenz nur verstärken. Der sogenannte Quantenradierer erfordert eine Refokussierung der Superposition auf das lokale System – also den physikalischen Vorgang einer Rekohärenz, der nur bei mikroskopischen Systemen realisierbar ist« (Zeh 2011, 11).

52 Man kann sich auf Basis der Dekohärenztheorie auch Gedanken machen, auf welcher Ebene Quantenprozesse in kognitiven Prozessen im Gehirn in Erscheinung treten können: »Wie mehrfach betont, erlaubt die Quantentheorie jedoch eine ganze Menge nichtklassische Zustände, denen – wenn wir sie mit der subjektiven Wahrnehmung parallel set-

Man könnte jetzt denken – und in quantentheoretischen Diskurszusammenhängen ist diese Position derzeit häufig zu vernehmen –, dass mit der Dekohärenztheorie auch das Messproblem und damit ebenso die Deutungsprobleme der Quantentheorie gelöst sind.⁵³

Insbesondere für die Entdecker und Protagonisten der Dekohärenztheorie, Erich Joos, Claus Kiefer und H. Dieter Zeh, ist dies nicht der Fall. Was sind die Gründe?⁵⁴

zen – kein offensichtlicher Sinn gegeben werden kann. Zum Beispiel ist quantenmechanisch gesehen die Superposition $|\Psi\rangle = |\text{Neuron feuert}\rangle + |\text{Neuron feuert nicht}\rangle$ ein völlig legaler Zustand. Warum die Kohärenzen in solch einem Zustand keine Rolle spielen, wurde erst vor kurzem von Max Tegmark quantitativ untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Umgebung die beiden Alternativen wieder sehr schnell unterscheidet und damit die Kohärenzen zerstört [...]. Tegmark schätzt typische Zeitskalen bis herab zu $t = 10^{-20}$ s ab. Das heißt wir haben keine Chance, ›seltsame‹ Wahrnehmungen zu machen, da obige Superposition viel zu instabil ist. Offensichtlich lässt sich also die Quantentheorie bis ins Gehirn des Beobachters hinein erfolgreich fortsetzen« (Joos 2002, 191).

53 Siehe etwa Tegmark und Wheeler (2001).

54 Schlosshauer fasst die Bedenken der Protagonisten der Dekohärenztheorie folgendermaßen zusammen: »On the other hand, even leading adherents of decoherence have expressed caution or even doubt that decoherence has solved the measurement problem. Joos (2000, p. 14) writes:

›Does decoherence solve the measurement problem? Clearly not. What decoherence tells us, is that certain objects appear classical when they are observed. But what is an observation? At some stage, we still have to apply the usual probability rules of quantum theory.‹ Along these lines, Kiefer and Joos (1999, p. 5) warn that ›One often finds explicit or implicit statements to the effect that the above processes are equivalent to the collapse of the wave function (or even solve the measurement problem). Such statements are certainly unfounded.‹

In a response to Anderson's (2001, p. 492) comment, Adler (2003, p. 136) states ›I do not believe that either detailed theoretical calculations or recent experimental results show that decoherence has resolved the difficulties associated with quantum measurement theory. Similarly, Bacciagaluppi (2003b, p. 3) writes ›Claims that simultaneously the measurement problem is real [and] decoherence solves it are confused at best.‹ Zeh asserts (Joos et al., 2003, Ch. 2) ›Decoherence by itself does not yet solve the measurement problem (...) This argument is nonetheless found wide-spread in the literature. (. . .) It does seem that the measurement problem can only be resolved if the Schrödinger dynamics (. . .) is supplemented by a nonunitary collapse (. . .)« (Schlosshauer 2005, 3).

Schauen wir erneut auf die für die Dekohärenztheorie zentrale Unterscheidung zwischen *reinen* und *gemischten Zuständen*. In reinen Quantenzuständen sind die Phasenbeziehungen von Bedeutung, sie tragen eine Information (nämlich die, dass eine Phaseninterferenz auftritt). Wenn man jetzt aber unterschiedliche Wellenfunktionen mit reinen Zuständen in Superposition bringt, sich also überlagern lässt, so ergibt sich zwar eine neue Wellenfunktion mit komplexer Struktur. Doch diese stellt weiterhin eine Superposition dar. Von einer globalen Perspektive aus betrachtet ist also nicht einzusehen, wie ein gemischter Zustand, in dem (nicht-lokale) Interferenzen keine Rolle mehr spielen, aus einer Summe reiner Zustände hervorgehen kann.

Die Dekohärenztheorie geht in pragmatischer Weise von der Hilfsannahme aus, dass die vielfältigen Verschränkungen, mit denen ein Messgerät mit der Welt verbunden ist, vernachlässigt werden können und man die komplexen Überlagerungen von reinen Zuständen als einen gemischten Zustand betrachten kann. Der Preis hierfür ist jedoch, dass alle weiteren Verschränkungen mit der Welt, die mit der Annahme der universellen Geltung der Schrödinger-Gleichung vorausgesetzt werden müssen, zugleich ignoriert werden müssen.⁵⁵ Ob man will oder nicht – es muss weiterhin ein Schnitt in die Welt gelegt werden, der durch den Formalismus nicht gedeckt ist. Zeh formuliert das Problem folgendermaßen:

»Die reduzierte Dichtematrix sieht genau so aus, *als ob* sie das gewünschte statistische Ensemble von Zeigerstellungen A_n darstelle. Damit *scheint* das Problem des Meßprozesses gelöst! Diese plausibel erscheinende Interpretation stellt aber vielmehr das verbreitetste Mißverständnis über die Dekohärenztheorie dar. [...] Der Grund für das Mißverständnis rührt daher, daß eine Dich-

55 »Der Unterschied zwischen reinen und gemischten Ensembles besteht also gerade in den (nicht-diagonalen) Interferenztermen. Bei reinen Ensembles tragen die Phasen zwischen den Eigenzuständen der Superposition zusätzliche Information. Es leuchtet unmittelbar ein, dass keine unitäre Transformation der Dichtematrix eines reinen Zustandes in diejenige eines Gemisches überführt werden kann. Es kann jedoch darüber spekuliert werden, inwiefern unter bestimmten Umständen die nicht-diagonalen Terme der Dichtematrix *praktisch* vernachlässigt werden können. Dies führt auf den »Dekohärenz-Ansatz«, der unter anderem im Zusammenhang mit dem Messproblem diskutiert wird. Dekohärenz allein leistet jedoch noch keine Lösung des Messproblems, wenn man nicht zugleich bereit ist, auf eine Beschreibung *individueller* Systeme (einzelne Teilchen etc.) zu verzichten. Schließlich ist auch inkohärente Superposition immer noch eine Superposition – obwohl jedes Messgerät immer nur einen Wert anzeigt« (Passon 2010, 134).

tematrix schlichtweg nicht zwischen Verschränkung und einem Ensemble unterscheiden kann, wie man an der globalen Wellenfunktion ersieht.

Die Dichtematrix wurde eingeführt als eine Größe, die alle am Subsystem zu messenden Eigenschaften *im Sinne der Wahrscheinlichkeitsinterpretation* richtig und vollständig wiedergeben kann. Sie würde zu deren Begründung selber aber auf ein zirkuläres Argument führen und unzutreffende Voraussagen für solche Messungen machen, die nicht nur das Subsystem betreffen (wie etwa bei Bell'schen Experimenten).

Andererseits bleibt aber festzustellen, daß die Dichtematrix für alle *praktischen* Zwecke im genannten Sinne ein gerechtfertigtes Instrument ist. [...] Man darf also *so tun, als ob* ein Kollaps in eine der autonomen Komponenten schon beim ersten irreversiblen Dekohärenzvorgang stattgefunden *hätte*.

Dekohärenz beschreibt also einen *scheinbaren* Kollaps in quasi-klassische Zustände. Die Frage ist: Genügt das, wenn wir nur beschreiben wollen, was wir beobachten? Dazu müssen wir zwar akzeptieren, daß wir nur eine der *n*-Komponenten wahrnehmen, aber ob und wann die übrigen durch einen Kollaps aus der Realität verschwinden, bleibt uns verborgen. «⁵⁶

Die Generierung klassischer Welten durch Dekohärenz setzt ein offenes Universum voraus, das alle seine Subsysteme von außen mit hinreichendem Rauschen versorgt, so dass man die Phasenbeziehungen der sich überlagernden Wellenfunktionen vernachlässigen kann. Wir können das Problem auch so umschreiben: Die klassisch erscheinenden gemischten Zustände können nur bestehen, wenn es hinreichend klassisch erscheinende gemischte Zustände gibt, welche die reinen Zustände nicht als reine Zustände erscheinen lassen.

Der Charme und die Erklärungskraft der Dekohärenztheorie besteht darin, Quantensysteme als offene Systeme zu betrachten. Auf diesem Wege lässt sich das Messproblem umgehen, indem nun das *Rauschen der Umwelt* als das *Medium* erscheint, in dem sich Quantensysteme als klassische Phänomene manifestieren können.

Wir begegnen hier *volens nolens* den Problemen einer System-Umwelt-Theorie, die individuelle Subsysteme annehmen muss, dann aber zuzugestehen hat, dass sich das Ganze nicht als Summe seiner Teile

56 Zeh (2011, 7 f.).

auffassen lässt, sondern erst die Ignoranz zwischen den Subsystemen die Bedingung der Möglichkeit von Systemdifferenzierung darstellt.⁵⁷

57 Insbesondere Schlosshauer hat die Problematik zusammenfassend aufgearbeitet: »Note that decoherence derives from the presupposition of the existence and the possibility of a division of the world into ›system(s)‹ and ›environment.‹ In the decoherence program, the term ›environment‹ is usually understood as the ›remainder‹ of the system, in the sense that its degrees of freedom are typically not (cannot be, do not need to be) controlled and are not directly relevant to the observation under consideration (for example, the many microscopic degrees of freedom of the system), but that nonetheless the environment includes ›all those degrees of freedom which contribute significantly to the evolution of the state of the apparatus‹ (Zurek, 1981, p. 1520). This system–environment dualism is generally associated with quantum entanglement, which always describes a correlation between parts of the universe. As long as the universe is not resolved into individual subsystems, there is no measurement problem: the state vector [...] of the entire universe evolves deterministically according to the Schrödinger equation [...], which poses no interpretive difficulty. Only when we decompose the total Hilbert-state space \mathbb{H} of the universe into a product of two spaces [...], and accordingly form the joint-state vector [...], and want to ascribe an individual state (besides the joint state that describes a correlation) to one of the two systems (say, the apparatus), does the measurement problem arise. Zurek (2003b, p. 718) puts it like this: ›In the absence of systems, the problem of interpretation seems to disappear. There is simply no need for ›collapse‹ in a universe with no systems. Our experience of the classical reality does not apply to the universe as a whole, seen from the outside, but to the systems within it.‹ Moreover, terms like ›observation,‹ ›correlation,‹ and ›interaction‹ will naturally make little sense without a division into systems. Zeh has suggested that the locality of the observer defines an observation in the sense that any observation arises from the ignorance of a part of the universe; and that this also defines the ›facts‹ that can occur in a quantum system. Landsman (1995, pp. 45–46) argues similarly: ›The essence of a ›measurement,‹ ›fact‹ or ›event‹ in quantum mechanics lies in the nonobservation, or irrelevance, of a certain part of the system in question. (...) A world without parts declared or forced to be irrelevant is a world without facts.‹ However, the assumption of a decomposition of the universe into subsystems—as necessary as it appears to be for the emergence of the measurement problem and for the definition of the decoherence program – is definitely nontrivial. By definition, the universe as a whole is a closed system, and therefore there are no ›unobserved degrees of freedom‹ of an external environment which would allow for the application of the theory of decoherence to determine the space of quasiclassical observables of the universe in its entirety. Also, there exists no general criterion for how the total Hilbert

Wenn Physiker davon ausgehen, dass die Schrödinger-Gleichung das Verhalten des Gesamtuniversums beschreibt, dann funktioniert die Geschichte so lange korrekt, solange keine Beobachter vorhanden sind, die nur über ein begrenztes Wissen um ihre Einbettung in das Universum verfügen und entsprechend selektiv agieren müssen. Hiermit gelangen wir aber zu dem paradoxen Bild einer Einheit, die nur als Differenz zu haben ist, einer verschränkten Ganzheit, die nur als zerteilte Unbestimmtheit begriffen werden kann, oder eben zu einer Viele-Welten-Theorie, die das Problem des Beobachters als irrelevant erklärt, indem sie es in den Bereich einer illusionären menschlichen Subjektivität verschiebt.

Dekohärenztheoretiker haben in der Regel eine hohe Affinität zur Viele-Welten-Theorie, die auf den Schnitt in die Welt verzichtet. Solange man in kosmologischen Dimensionen denkt, ist solch eine Betrachtungsweise recht fruchtbar. Wenn es aber auf individuierte Systeme ankommt, benötigt die Dekohärenztheorie Umwelten, die Systeme generieren, die dann wiederum für andere Systeme Umwelten darstellen, um diese als klassische Identitäten stabilisieren zu können.

Ohne Zweifel hat die Dekohärenztheorie zu einer Reihe empirisch bestätigter Einsichten in die Zeitdynamiken von Quantenprozessen geführt. Als Universaltheorie ist sie jedoch nicht weniger paradox als die Quantenmechanik im Sinne der Kopenhagener Deutung. Beide beschreiben einen Zirkel, in denen klassische und nicht-klassische Begriffe miteinander verbunden und in einen rekursiven Konstitutionszusammenhang gebracht werden. Die Kopenhagener Interpretation unterbricht diesen Zirkel, indem sie eine epistemische Grenze postuliert, die nicht erlaubt, nach der Realität der Quantenprozesse zu fragen. Die Dekohärenztheorie beginnt mit der umfassenden Realität der Wellenfunktion, gelangt von den reinen Zuständen zu Realitäten, die klassisch erscheinen, ohne jedoch die Grenze angeben zu können, wo die gemischten Zustände, die immer noch als Superpositionen von reinen Zuständen zu denken sind, ihre Reinheit verlieren. Damit bleibt Dekohärenz eine ›Zauberformel‹, die – wenn gleich sie in vielen empirischen Fragen durchaus sinnvoll ist – das Interpretationsproblem der Quantentheorie auch nicht lüften kann,

space is to be divided into subsystems, while at the same time much of what is called a property of the system will depend on its correlation with other systems. This problem becomes particularly acute if one would like decoherence not only to motivate explanations for the subjective perception of classicality [...], but moreover to allow for the definition of quasiclassical ›macrofacts.« (Schlosshauer 2005, 8).

sondern bestenfalls erneut mystifiziert.⁵⁸ Auch mit der Dekohärenztheorie findet die Quantenphysik nicht zu einer Einheit. Auch sie braucht interpretative Supplemente, die außerhalb der Theorie liegen.⁵⁹ Das Bezugsproblem des Übergangs von der Wellengleichung zu einer klassischen Welt kann auch hier nicht gelöst werden, lässt sich

58 In diesem Sinne dann auch Mittelstaedt: »Das Zauberwort, mit dem das Unerklärliche erklärt werden soll, heißt Dekohärenz. Damit ist das sich Herausbilden einer klassischen Welt aus einer quantenmechanischen Basis gemeint, die Emergenz von klassischen Eigenschaften aus einem im Allgemeinen nichtklassischen Verhalten. Wie diese Dekohärenz konkret aussieht und unter welchen besonderen Bedingungen sie sich ereignet, das vermag gegenwärtig niemand überzeugend zu sagen. Es gibt unzählige Vorschläge und Erklärungsmodelle, die aber alle ihre Schwachstellen haben und maßgeblichen Einwänden ausgesetzt sind« (Mittelstaedt 2000, 68).

59 Einen guten Überblick in die Dekohärenztheorie im Kontext der großen Deutungsangebote gibt Schlosshauer (2005). Abschließend kommt er zu folgendem Resümee: »We are still left with a multitude of (albeit individually well-localized quasiclassical) components of the wave function, and we need to supplement or otherwise to interpret this situation in order to explain why and how single outcomes are perceived. Accordingly, we have discussed how environment-induced superselection of quasiclassical pointer states together with the local suppression of interference terms can be put to great use in physically motivating, or potentially disproving, rules and assumptions of alternative interpretive approaches that change (or altogether abandon) the strict orthodox eigenvalue-eigenstate link and/or modify the unitary dynamics to account for the perception of definite outcomes and classicality in general. For example, to name just a few applications, decoherence can provide a universal criterion for the selection of the branches in relative-state interpretations and a physical argument for the noninterference between these branches from the point of view of an observer; in modal interpretations, it can be used to specify empirically adequate sets of properties that can be ascribed to systems; in collapse models, the free parameters (and possibly even the nature of the reduction mechanism itself) might be derivable from environmental interactions; decoherence can also assist in the selection of quasiclassical particle trajectories in Bohmian mechanics, and it can serve as an efficient mechanism for singling out quasiclassical histories in the consistent-histories approach. Moreover, it has become clear that decoherence can ensure the empirical adequacy and thus empirical equivalence of different interpretive approaches, which has led some to the claim that the choice, for example, between the orthodox and the Everett interpretation becomes ›purely a matter of taste, roughly equivalent to whether one believes mathematical language or human language to be more fundamental‹ (Tegmark, 1998, p. 855)« (Schlosshauer 2005, 38).

jedoch in den infiniten Regress ineinander verschachtelter System-Umwelt-Referenzen verschieben.

5 Konsistente-Geschichten-Theorie: Selektive Existenzen

Im Folgenden kommen wir mit der *Konsistente-Geschichten-Interpretation* zu einer neueren Deutung der Quantentheorie, die unter den Physikern zunehmend an Attraktivität gewinnt. Auch hier kommt dem Informationsbegriff eine wichtige Stellung zu. Doch im Gegensatz zu Zeingers *»it-from-bit«*-Perspektive besteht der Ausgang der Argumentation gerade darin, die mit der Kopenhagener Deutung formulierte epistemische Grenze *nicht* anzuerkennen.

Damit arbeitet sich die Konsistente-Geschichten-Interpretation an dem Bezugsproblem der mit der Quantentheorie postulierten Erkenntnissschranke ab. Es wird hier gleichsam die Rückkehr zum platonischen Standpunkt angestrebt. Wie in Platons Höhlengleichnis kann man jetzt als menschlicher Beobachter zwar nicht die Wirklichkeit erfassen. Dennoch wird von einer absoluten Gesetzmäßigkeit ausgegangen, die ein entsprechend mathematisch begabtes Wesen formulieren könnte. Es wird hier also eine Rückkehr zu einer ordentlichen Welt angestrebt, in der die Verhältnisse durch ein universales physikalisches Gesetz bestimmt sind. Man hat dies jetzt allerdings in Hinblick auf die quantenphysikalische Einsicht zu leisten, dass man es mit einer schwächeren, stochastisch konditionierten Kausalität zu tun hat.

Die orthodoxe Quantentheorie gibt Wahrscheinlichkeiten an, was in einem Experiment bei einer Messung zu erwarten ist. Man kann hier also etwas darüber aussagen, was zum Zeitpunkt *A* zu erwarten ist, und man kann formulieren, was nach der Messung von *A* zum Zeitpunkt *B* zu erwarten ist. Doch es lässt sich nichts darüber aussagen, was in der Zeit *zwischen* der Messung von *A* und *B* geschehen ist.

Robert Griffiths konnte nun zeigen, dass sich mit entsprechenden statistischen Instrumenten sehr wohl Wahrscheinlichkeiten berechnen lassen, die es erlauben, Aussagen darüber zu treffen, was zwischendurch erwartbar gewesen ist.⁶⁰ Auf diese Weise lassen sich konzeptionelle Einsichten in die Quantentheorie gewinnen, die eine weitere Möglichkeit ihrer Deutung eröffnen.

60 Griffiths (1984).

Die Grundidee der Konsistente-Geschichten-Interpretation lässt sich recht einfach erklären, denn die grundlegenden Konzepte sind uns bereits aus Feynmans Quantenelektrodynamik vertraut.⁶¹ Um von A nach B zu kommen, können unterschiedliche Wege genommen werden. Wenn beispielsweise ein Elektron bei der ersten Messung den Wert Spin_{up} zeigt und bei der zweiten Messung ebenfalls Spin_{up} , dann heißt dies nicht, dass es zwischendurch auch diesen Wert besessen haben muss.

Wenngleich die Kopenhagener Interpretation zwar gebietet, nicht weiter zu fragen, lassen sich hierüber sehr wohl systematische Überlegungen anstellen. So kann in unserem Beispiel etwa gefragt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Elektron zwischendurch den Wert $\text{Spin}_{\text{down}}$ angenommen hat, um dann auf dem Weg erneut in Spin_{up} umzukippen, so dass das gleiche Ergebnis erscheint, als hätte das Elektron in der Zwischenzeit seinen Zustand nicht verändert. Die wahrscheinlichkeitstheoretischen Mittel der Quantenmechanik werden hier also genutzt, um Aussagen darüber zu generieren, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Geschichte zu einem bestimmten Ergebnis geführt hat. Verschiedene Geschichten, die zum gleichen Ergebnis führen, werden dabei als $\text{›konsistente Geschichten‹}$ betrachtet. Wenn man nur schaut, was am Ende herauskommt, braucht einen nicht zu interessieren, auf welchem Wege das Ziel erreicht wurde.

Insbesondere der Kosmologe und Quantenphysiker John Hartle sowie der Teilchenphysiker Murray Gell-Mann haben die Idee der multiplen Geschichten zu einer eigenständigen Interpretation der Quantentheorie ausgebaut. Wie schon in der Viele-Welten-Theorie wird dabei von einer universellen Geltung der Schrödinger-Gleichung ausgegangen und entsprechend werden all die vielfältigen Multiversen, die sich aus der Wellenfunktion ergeben, prinzipiell als ›real‹ betrachtet.

Hartle und Gell-Mann verbinden nun Everetts Idee der Parallelwelten mit dem Befund, dass Informationsgewinnung nur auf Basis einer *abstrahierenden Selektivität* möglich ist.

Falls man nur mit beliebiger Genauigkeit und Auflösung auf die Welt schauen könnte, so würden sich auf allen Ebenen multiple Überlagerungen und verschränkte Quantenzustände zeigen. Dies ist aber für informationsverarbeitende Systeme nicht möglich, da aufgrund ihrer begrenzten Eigenkomplexität nicht jede Information für sie einen Unterschied machen kann. Die Operationsweise kognitionsfähiger Systeme beruht gewissermaßen auf selektiver Blindheit.⁶²

61 Siehe zur Einführung etwa Thorndike (2006).

62 Spencer-Die Fullerene haben ihren Namen in Gedenken an den Erfinder und Architekten Buckminster Fuller, der in seinen Arbeiten selbsttra-

Wenn kognitive Systeme aber nur mit einem groben Raster auf die Welt schauen können, dann lassen sich Cluster von unterschiedlichen Geschichten bilden, die für einen Beobachter keinen Unterschied machen. Die verschiedenen Weisen, wie ein Ergebnis realisiert werden kann, haben für ihn gleichsam keine Bedeutung, da sie für die Beobachtung nicht informativ sind. Gell-Mann gibt das Beispiel eines Pferderennens. Für den, der Geld auf ein Pferd setzen möchte, interessiert nur, ob dieses gewinnt, nicht jedoch, was sonst noch alles im Kontext des Pferderennens passiert. Es wird hier also hoch selektiv auf eine Information abgezielt, die dann erinnert wird. Alles andere hingegen bleibt irrelevant und kann sich entsprechend auch als eine Überlagerung mehrerer alternativer Geschichten darstellen.⁶³

Gell-Mann differenziert jetzt zwischen *feinkörnigen* und *grobkörnigen* Geschichten, die sich dadurch unterscheiden, auf welche Weise Information gesammelt und genutzt wird. Ob die Welt als eine subtile Kontextur sich überlagernder multipler Welten erscheint oder als ein grobes Raster, in dem nur einige wenige Alternativen realisiert sind, stellt sich für ihn nun als eine Frage der Informationsverarbeitung dar. Das, worauf die Messung abzielt, konfiguriert jetzt gleichsam die Muster, zu denen sich dann unterschiedlichste Geschichten in einer einzigen konsistenten Historie zusammenfinden.⁶⁴

gende Strukturen entwickelt hat, die den Fußballmolekülen ähneln (vgl. Krause/Lichtenstein 1999). Brown formuliert dann: »Existence is selective blindness« (Spencer-Brown 2005, 192).

63 »Die Serie von acht Pferderennen dient nicht nur als Metapher, sondern als ein reales Beispiel einer sehr grobkörnigen Geschichte des Universums. Da wir nur die Liste der Siege betrachten, besteht die Grobkörnigkeit darin:

1. sämtliche Zeitpunkte in der Geschichte des Universums mit Ausnahme jener, in denen die Rennen gewonnen werden, außer Betracht zu lassen,
2. zu den betrachteten Zeitpunkten nur die an den Rennen beteiligten Pferde zu verfolgen und sämtliche anderen Objekte im Universum auszuklammern und
3. unter diesen Pferden nur die Sieger der Rennen zu verfolgen; alle Teile des Pferdes mit Ausnahme der Nasenspitze werden vernachlässigt (Gell-Mann 1994, 217.).

64 »Bei quantenmechanischen Geschichten des Universums bedeutet Grobkörnigkeit in der Regel, daß man nur bestimmte Dinge zu bestimmten Zeitpunkten und bis zu einer bestimmten Gliederungstiefe verfolgt. Eine grobkörnige Geschichte kann als eine Klasse alternativer feinkörniger Geschichten betrachtet werden, die alle die gleichen Dinge verfolgen, sich aber im Hinblick auf alle möglichen Verhaltensweisen dessen, was nicht verfolgt, sondern aufsummiert wird, voneinander unterscheiden. [...] Sämtliche feinkörnige Geschichten des Universums werden derart in Klassen eingeteilt, daß jede feinkörnige Geschichte in einer und nur in

Um das Gedankenexperiment von Schrödingers Katze weiter fortzuführen: Wenn man in die Kiste reinschaut, ergibt sich ein eindeutiges Ergebnis. Die Katze ist entweder lebendig oder tot. Allerdings können jetzt viele Geschichten dazu geführt haben, dass die Katze tot ist. Ob sich das Tier vor seinem Tod rechts herum im Kreis gedreht hat oder eine Minute still verharrt hat, ob das todbringende radioaktive Präparat vor 10 oder vor 11 Minuten zerfallen ist, ist für den Beobachter irrelevant – es sei denn, er führt eine extra Beobachtung durch, um hierdurch eine Differenz zu generieren, die einen wahrnehmbaren Unterschied erzeugt. Er könnte beispielsweise noch eine pathologische Untersuchung durchführen lassen, welche den Todeszeitpunkt genauer definieren lässt. Da er jedoch auch hier nur mit einer begrenzten Selektivität hinschauen kann, ergeben sich wiederum eine Vielzahl alternativer Geschichten, die zum gleichen Ergebnis führen können.

Da der Schnitt, welcher mit dem Sammeln einer bestimmten Art von Information einhergeht, irreversibel eine bestimmte Wirklichkeitsicht ausschneidet, erhält man jeweils unterschiedliche Gruppen von Geschichten, die sich *nicht* miteinander vermischen. Man erhält also keine Geschichte, in der die Katze zugleich tot als auch lebendig erscheint. Eine einfache Erklärung für die Aufspaltung in definierte Gruppen grobkörniger Geschichten liefert die Dekohärenztheorie. Der Zustand ›tote Katze‹ stabilisiert sich praktisch unmittelbar, da bei normalen Temperaturen eine Vielzahl von molekularen Prozessen den Tod ›messen‹ und damit makroskopisch stabilisieren.⁶⁵

Aus Perspektive der Konsistente-Geschichten-Interpretation haben wir also auf der einen Ebene von einem reinen Quantenzustand auszugehen, in dem die Interferenzen nicht verschwinden. Auf der anderen Ebene kann aber dieser Zustand nicht beobachtet werden, da jede Beobachtung Selektivität voraussetzt. »Der Quantenzustand des Universums gleicht« jetzt »einem Buch, das die Antworten auf unzählige verschiedene Fragen enthält. Doch ohne eine Liste von Fragen, die man an das Buch richtet, ist es relativ nutzlos.«⁶⁶ Eine

einer Klasse enthalten ist. Diese vollständigen disjunkten Klassen bilden die grobkörnigen Geschichten [...]. Mathematiker würden diese grobkörnigen Geschichten ›Äquivalenzklassen‹ feinkörniger Geschichten nennen. Jede feinkörnige Geschichte ist in einer und nur einer Äquivalenzklasse enthalten, und die Mitglieder der Klasse werden als äquivalent behandelt« (Gell-Mann 1994, 217 f.).

65 »Sobald ein Quantenereignis mit dem quasiklassischen Bereich korreliert (und so der Zustand der Messung eintritt), wird das spezifische Ergebnis an einem bestimmten Geschichtszweig zu einer Tatsache« (Gell-Mann 1994, 234).

66 Gell-Mann (1994, 212).

Frage erzeugt jetzt aber wiederum ihre jeweils spezifische Selektivität. Sie interessiert sich für etwas und schließt damit alles mögliche Andere aus und entsprechend lässt sich formulieren, dass »die Fragen sich letztlich immer auf alternative Geschichten im Universum beziehen.«⁶⁷

Die grobkörnigen Geschichten erscheinen damit als eine Konsequenz der Tatsache, dass man eben nur auf eine grobe und damit selektive Weise fragen kann.⁶⁸

Da biologische Formen per se ›informationsverarbeitende Systeme‹ darstellen, die nur bestimmte Informationen aufnehmen und nutzen können – Gell-Mann spricht hier von ›*information gathering and utilizing systems (IGUS)* – leben diese zwangsläufig in grobkörnigen Geschichten.

Um mit Bauberger zu sprechen:

»Schon informationsverarbeitende Einzeller sind IGUSE, aber noch mehr Kakerlaken, bis hin zur Komplexität des menschlichen Organismus. Diese IGUSE bilden ihre Begriffe, mit denen sie Welt repräsentieren in einer solchen Weise, dass diese geeigneten grobkörnigen Klassen entsprechen, zwischen denen Dekohärenz eintritt. Denn nur in solchen Begriffen ist überhaupt Informationsverarbeitung möglich. Wenn alles mit allem interferiert, gibt es keine Fakten, kein Wissen über die Vergangenheit (z. B. in welcher Richtung Nahrung zu finden ist), und damit keine Informationsverarbeitung. *Daher lebt ein IGUS in einer solchen klassischen Welt und schneidet mit seinem Bewusstsein, also seinen Erinnerungen, jeweils eine Ebene aus den vielen Möglichkeiten der Wellenfunktion heraus.*«⁶⁹

Das Quantenuniversum würde demnach eine beobachterabhängige baumartige Struktur disjunkter grobkörniger Geschichten ermöglichen, zwischen denen es keine quantenmechanische Interferenz gibt, die aber dennoch alle gleichzeitig in die eine Wellenfunktion des Universums eingebettet sind. Grobkörnige Geschichten heben die feinkörnigen Geschichten nicht auf. Letztere haben für erstere aller-

67 Ebd.

68 »Wie kommt es [dass man es bei makroskopischen Ereignissen wie bei einem Pferderennen] mit echten Wahrscheinlichkeiten zu tun hat, die sich nach den üblichen Regeln addieren, während die Quantenmechanik auf der feinkörnigen Ebene lediglich Größen liefert, deren Addition durch Interferenzterme erschwert wird? Die Antwort lautet, daß man, um echte Wahrscheinlichkeiten zu erhalten, hinreichend grobkörnige Geschichten betrachten muß« (Gell-Mann 1994, 217 f.).

69 Bauberger (2009, 171).

dings keinen Informationswert. Sie machen keinen Unterschied und sind für ein IGUS entsprechend nicht wahrnehmbar.⁷⁰

All die Dilemmata und Paradoxien der Quantenmechanik würden sich aus dieser Perspektive daraus ergeben, dass wir unseren eigenen (gemeinsam produzierten) grobkörnigen Geschichten nicht entrinnen können. In den quantenmechanischen Experimenten stellen wir auf Basis von Messgeräten, die selbst bereits zu einer grobkörnigen Geschichte geworden sind, hoch selektive Fragen an Quantensysteme. Entsprechend können sich dann auch die Antworten nicht als feinkörnige Geschichten offenbaren. Superpositionen und Interferenzterme verschwinden mit der Messung – was übrig bleibt, sind alternative grobkörnige Geschichten, die zufällig als Ergebnis ausgewählt werden.⁷¹

Abstrakter gefasst geht die Konsistente-Geschichten-Interpretation also davon aus, dass sich aus Schwankungen in der Quantenwelt Informationsgewinne ziehen lassen, die sich zu grobkörnigen Geschichten verdichten, die dann sowohl Material für weitere Geschichten liefern als auch ihre selektiven Zugriffe auf Welt bahnen. Wir begegnen hier einer quantentheoretischen Fassung des »*order-from-noise*«-Prinzips,⁷² nach dem Systeme Strukturgewinne aus Informationen ihrer Umwelt gewinnen, wobei diese dem System überwiegend ein Rauschen anbieten, welches dieses wiederum zum Systemaufbau nützen kann. Grobkörnige Geschichten erscheinen hier synonym

70 Auch unser Bewusstsein erscheint aus dieser Perspektiv als ein Prozess, der nichts anderes tut, als Informationen zu nutzen und zu generieren. Die Besonderheit des Bewusstseins bestünde dann gerade darin, die vielfältigen parallel ablaufenden psychischen und neurologischen Prozesse nochmals zu einer extrem grobkörnigen Geschichte zu verdichten: »Da der Suchscheinwerfer des Bewusstseins viele parallel ablaufende psychische Prozesse nicht beleuchtet, werden diese Vorgänge, in den extrem grobkörnigen Geschichten, an die wir uns bewußt erinnern, aufsummiert« (Gell-Mann 1994, 234). »Den uns vertrauten Erfahrungsbereich erhält man dadurch, daß man auf diesen maximalen Bereich ein extrem hohes Maß an zusätzlicher Grobkörnigkeit anwendet, das den Fähigkeiten unserer Sinne und Instrumente entspricht« (Gell-Mann 1994, 238).

71 »Da die Quantenmechanik in der Praxis immer auf Mengen dekohärenter grobkörniger Geschichten angewandt wird, kann sie Wahrscheinlichkeiten vorhersagen« (Gell-Mann 1994, 220).

72 v. Foerster (1981). »Komplexe adaptive Systeme funktionieren am besten in einem Zwischenbereich zwischen Ordnung und Unordnung. Sie nutzen die durch annähernde Bestimmtheit des quasiklassischen Bereichs gelieferten Regelmäßigkeiten und profitieren gleichzeitig von den Unbestimmtheiten (die man als Rauschen, Schwankungen, Wärme, Unbestimmtheit usw. beschreiben kann), die bei der Suche nach »besseren« Schemata sogar hilfreich sein können« (Gell-Mann 1994, 507).

mit der selektiven Unterscheidung (und damit Konstitution!) von Information. Information entsteht hier gleichsam als ein kontingentes Segment, welches aus der unendlichen Fülle feinkörniger Geschichten ausgeschnitten wird, um hiermit einhergehend eine spezifische Selektivität und Orientierung zu generieren.

Nichtwissen erscheint damit als Voraussetzung für den Aufbau quasiklassischer Strukturen. Hiermit ergibt sich auch eine etwas andere Perspektive auf den Begriff der Entropie. Auch die Entropie wäre jetzt sozusagen relativ zum Beobachter zu begreifen. Als theoretische Konzeption würde sie jetzt nur noch im Kontext grobkörniger Geschichten Sinn ergeben.⁷³

73 »Entropie ohne Grobkörnigkeit ist nutzlos. [...] Wir können fragen, in welchem Sinne die Mischung der Gase wirklich zu einer Zunahme der Unordnung führt, zumal da sich jedes Sauerstoff- und Stickstoffmolekül zu jedem Zeitpunkt an irgendeinem Ort aufhält (zumindest in der klassischen Näherung) und daher der Zustand zu jedem Zeitpunkt einen genau so hohen Grad an Ordnung aufweist wie zu jedem früheren Zeitpunkt (vorausgesetzt, man beschreibt den Ort jedes einzelnen Moleküls und nicht die Verteilung von Sauerstoff und Stickstoff).

Die Antwort darauf lautet, daß die Entropie – wie die effektive Komplexität, der algorithmische Informationsgehalt und weitere von uns besprochene Größen – von der Grobkörnigkeit abhängt, von der Gliederungstiefe, auf der das System beschrieben wird. Zwar ist es, mathematisch gesehen, richtig, daß die Entropie eines in vollkommener Detailgenauigkeit beschriebenen Systems nicht zunehmen, sondern konstant bleiben würde. In Wirklichkeit aber wird ein aus vielen Teilen bestehendes System immer nur durch einige seiner Variablen beschrieben, und die Ordnung in diesen relativ wenigen Variablen verteilt sich mit der Zeit auf andere Variablen, bei denen sie nicht länger als Ordnung zählt. Das ist die eigentliche Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik«. [...] »Wir können diese Form der Grobkörnigkeit mit der quantenmechanischen Grobkörnigkeit in Beziehung zu setzen versuchen. Erinnern wir uns daran, daß in einen maximal quasiklassischen Bereich, der aus alternativen grobkörnigen Geschichten des Universums besteht, diese Geschichten so feinkörnig wie möglich mit dem dekohärenten und fast klassischem Verhalten übereinstimmen. Wie bereits früher erwähnt, liefert ein quasiklassischer Bereich in der Quantenmechanik auf diese Weise eine Art theoretisches Minimum der Grobkörnigkeit des Universums, das in der Beschreibung eines einzelnen Objekts einem Maximum an Individualität entspricht. Das gleiche Minimum gilt in vielerlei Hinsicht für die in der Definition der Entropie verwendete Grobkörnigkeit. Im Falle seiner Gültigkeit sind die feinkörnigsten Makrozustände, die man zur Definition der Entropie heranziehen kann, jene, denen man im quasiklassischen Bereich begegnet« (Gell-Mann 1994, 321).

Mit Gell-Mann lässt sich der Konsistente-Geschichten-Ansatz gar zu einer Weltperspektive erweitern, in der sich verschiedene IGUSE in einem Teilbereich ihrer grobkörnigen Geschichten überlappen, während sie in anderen Teilbereichen in unterschiedlichen Welten zu Hause sind. Wir würden jetzt also nicht mehr nur eine baumartige Struktur disjunkter grobkörniger Geschichten antreffen, die in unterschiedlichen Parallelwelten realisiert werden. Vielmehr hätten wir jetzt auch Arrangements zu erwarten, in denen verschiedene Aspekte verschiedener Geschichten in Hinblick auf geteilte Selektivitäten partiell zusammenlaufen können. Zugleich würden aber die beteiligten Systeme aufgrund der fehlenden Einsicht in die darunterliegende quantenmechanische Dynamik blind für die Realisationsbedingungen der jeweils anderen Systeme sein müssen. Wir kämen hiermit zu einer komplex verschachtelten Welt, in der Sphären von Wissen und Unwissenheit einander wechselseitig bedingen, ohne jedoch aufeinander durchgreifen zu können:

»Angenommen, die Quantenmechanik des Universums erlaube, mathematisch gesehen, mehrere mögliche maximal quasiklassische Bereiche, die wirklich nichtäquivalent seien. Nehmen wir ferner an, komplexe adaptive Systeme entwickeln sich eigentlich, um eine bestimmte Grobkörnigkeit dieser maximal quasiklassischen Bereiche zu nutzen. Dann würde jeder Bereich eine Reihe alternativer grobkörniger Geschichten des Universums liefern, und Informationssammelungs- und verarbeitungssysteme (IGUSE) würden in jedem einzelnen Fall die Ergebnisse der verschiedenen probabilistischen Verzweigungen am Baum möglicher Geschichten registrieren, der in den beiden Fällen ein recht unterschiedliches Aussehen hätte!

Bestände zwischen den ansonsten unterschiedlichen quasiklassischen Bereichen ein bestimmter Grad an Übereinstimmung in den verfolgten Phänomenen, dann könnten die beiden IGUSE einander gewahr werden und sogar in gewissem Umfang miteinander kommunizieren. Doch ein Großteil dessen, was ein IGUS verfolgt, könnte das andere IGUS nicht direkt wahrnehmen. Nur mit Hilfe einer quantenmechanischen Berechnung oder Messung könnte ein IGUS das gesamte Spektrum der vom anderen wahrgenommenen Phänomene erfassen. (Dies mag manch einen an die Beziehung zwischen Mann und Frau erinnern.)

Könnte ein Beobachter, der einen Bereich benutzt, wirklich erkennen, daß andere Bereiche – mit ihren eigenen Mengen sich verzweigender Geschichten und ihren eigenen Beobachtern – als alternative Beschreibungen der möglichen Geschichten des Uni-

versums verfügbar sind? Dieser faszinierende Fragenkomplex ist von Science-Fiction-Autoren aufgeworfen worden (die manchmal im Anschluss an den russischen Theoretiker Starobinsky den Ausdruck ›Koboldwelten‹ verwenden), doch erst jetzt schenken ihm die Spezialisten auf dem Gebiet der Quantenmechanik die gebührende Beachtung«. ⁷⁴

Wenn man sich auf Gell-Manns Argumentationsweise einlässt, ergibt sich eine Perspektive, mit der sich die klassische und die quantenmechanische Weltbeschreibung zusammen denken lassen – beide unterscheiden sich jetzt nur noch in Hinblick auf die Körnigkeit der Auflösung, mit der die Welt angeschnitten wird. Darüber hinaus wird der Blick auf die besondere Selektivität von Beobachtern gerichtet, die in einer Welt leben, in der andere Beobachter bestehen, die nicht die gleiche Selektivität teilen. ⁷⁵

Welcher Preis ist für die Konsistente-Geschichten-Interpretation zu zahlen? Zunächst einmal ist darauf hinzuweisen, dass Griffiths seinen Ansatz in Bezug auf geschlossene Systeme formuliert hat. Für den Übergang zu stabilen, grobkörnigen Geschichten stellt sich also wieder (wie schon bei der Dekohärenztheorie) das Problem, dass das ganze Universum jetzt gleichzeitig als ein geteiltes und als ein ungeteiltes System aufgefasst werden muss. Es müsste also zugleich

74 Gell-Mann (1994, 244 f.).

75 In diesem Sinne formuliert dann Bauberger in emphatischer Weise: »Diese Ontologie ist in einer gewissen Weise faszinierend, weil sie eine wirklich konsistente Lösung der Interpretationsprobleme der Quantenmechanik darstellt und weil sie gleichzeitig die klassische und die quantenmechanische Beschreibung perfekt verbindet. Sie beruht auf einer Vorentscheidung, die sich manchen Physikern aufdrängt, die lange mit der Quantenmechanik gearbeitet haben: die Wellenfunktion bzw. den Zustandsvektor, also die quantenmechanische Beschreibung der Welt, als Repräsentation der eigentlichen Wirklichkeit anzusehen. Unser Problem, die Quantenmechanik zu verstehen, beruht in diesem Konzept darauf, dass wir als ein IGUS, also ein informationsverarbeitendes System, notwendig (weil wir Information verarbeiten) auf grobkörnige klassische Beschreibungen angewiesen sind, die aus der Wellenfunktion immer nur eine Ebene herauschneiden. Quantenmechanisch beschrieben existieren wir gleichzeitig in vielen verschiedenen klassischen Zuständen, aber nur einer davon ist unserem jeweiligen Bewußtsein zugänglich. Gell-Mann optiert also für eine Priorität der quantenmechanischen Beschreibung gegenüber der klassischen Beschreibung. Wie sollte das einem Quantenmechaniker nicht sympathisch sein? Nicht umsonst spricht Bub von der ›neuen Orthodoxie‹ der Quantenmechanik« (Bauberger 2009, 172).

als ein einheitliches System wie auch als ein System mit einer Umwelt verstanden werden.⁷⁶

Mit Blick auf die wichtige Stellung der ›IGUSE‹ treffen wir hier auf ein System – man könnte auch sagen: einen Beobachter –, das bzw. der sich gleichsam am eigenen Schopfe aus dem Sumpf feinkörniger Quantenwelten herauszieht. Auch der Konsistente-Geschichten-Theorie bleibt nichts anderes übrig, als sich auf dem Paradoxon zu gründen, einen Beobachter voraussetzen zu müssen, der Informationen generieren muss, um eben diese zu erklären.

Darüber hinaus stellt sich bei der Analyse möglicher Ensembles konsistenter Geschichten heraus, dass keineswegs nur Geschichten übrigbleiben, die mit der klassischen Welterfahrung übereinstimmen. Vielmehr sind auch eine Reihe recht bizarrer Welten zu erwarten. So attraktiv die Konsistente-Geschichten-Interpretation auch sein mag, sie gibt aus sich heraus keine schlüssige Erklärung dafür, warum uns unsere Welt in der vertrauten und stabilen Form erscheint.⁷⁷ Hier auf

76 Hierzu Schlosshauer: »This approach intrinsically requires the notion of local, open systems and the split of the universe into subsystems, in contrast to the original aim of the consistent-histories approach to describe the evolution of a single closed, undivided system (typically the entire universe). The decoherence-based studies then assume the usual decomposition of the total Hilbert space H into a space H_S , corresponding to the system S , and H_E of an environment E .« (Schlosshauer 2005, 35).

77 Hierzu wieder Schlosshauer: »It is not at all clear a priori that at least some of these histories should represent any meaningful set of propositions about the world of our observation. Even if a collection of such ›meaningful‹ histories is found, it leaves open the question how to select such histories and which additional criteria would need to be invoked. Griffith's (1984) original aim in formulating the consistency criterion was only to allow for a consistent description of sequences of events in closed quantum systems without running into logical contradictions. Commonly, however, consistency has also been tied to the emergence of classicality. For example, the consistency criterion corresponds to the demand for the absence of quantum interference—a property of classicality—between two combined histories. It has become clear that most consistent histories are in fact flagrantly nonclassical (Albrecht, 1993; Dowker and Kent, 1995, 1996; Gell-Mann and Hartle, 1990, 1991b; Paz and Zurek, 1993; Zurek, 1993). [...] For instance, when the projection operators [...] are chosen to be the time-evolved eigenstates of the initial density matrix [...], the consistency condition will automatically be fulfilled, yet the histories composed of these projection operators have been shown to result in highly nonclassical macroscopic superpositions when applied to standard examples such as quantum measurement or Schrödinger's cat. This demonstrates that the consistency condition cannot serve as a sufficient criterion for classicality« (Schlosshauer 2005, 34).

die anthropozentrische Antwort zurückzugreifen, ›weil wir sie eben so und nicht anders beobachten‹, würde wiederum ein subjektivistisches Element in die Physik einführen, was ursprünglich jedoch mit Bezug auf eine universalistisch geltende Schrödinger-Gleichung vermieden werden sollte.

Solange es aber nicht gelingt, den Übergang von der Quantenwelt zu den erfahrbaren klassischen Welten konsistent zu erklären, leistet die Konsistente-Geschichten-Interpretation in einem entscheidenden Punkt nicht das, was sie zu leisten beansprucht. Wir treffen hier zwar auf eine hochgradig elaborierte Theorieform, in der dekohärenz- und informationstheoretische Ansätze geschickt verbunden werden – eine Theorie, die sowohl den kaum mehr zu negierbaren Status der Wellenfunktion als auch die Tatsache der Phänomenologisierung selektiver klassischer Welten ernst nimmt. Dennoch: Der gordische Knoten der Quantentheorie ist auch hiermit nicht durchschlagen. Das Paradoxon einer Theorie, die offensichtlich funktioniert, sich jedoch einer schlüssigen Interpretation verwehrt, bleibt bestehen.

6 Emergenz: Abschied von der Weltformel

Robert Laughlin formuliert in seiner Monografie mit dem deutschen Titel »Abschied von der Weltformel«⁷⁸ die Vermutung, dass die vermeintlich universellen Naturkonstanten und Gesetze möglicherweise selbst emergente Produkte kollektiver Ordnungszustände darstellen. Sie wären hiermit also keineswegs fundamental, sondern ihrerseits abgeleitet zu sehen, entstanden aus einer Geschichte von Symmetriebrüchen innerhalb der Entwicklung des Universums, aus der heraus sich bestimmte, jedoch nicht notwendige Gesetzmäßigkeiten entfaltet haben.⁷⁹

78 Laughlin (2007). Der Titel der englischsprachigen Originalausgabe lautet: »A Different Universe. Reinventing Physics from the Bottom Down«.

79 Hierzu Laughlin ausführlicher an anderer Stelle: »So the triumph of the reductionism of the Greeks is a pyrrhic victory: We have succeeded in reducing all of ordinary physical behavior to a simple, correct Theory of Everything only to discover that it has revealed exactly nothing about many things of great importance. In light of this fact it strikes a thinking person as odd that the parameters e , h , and m appearing in these equations may be measured accurately in laboratory experiments involving large numbers of particles. The electron charge, for example, may be accurately measured by passing current through an electrochemical cell, plating out metal atoms, and measuring the mass deposited, the separation of the atoms in the crystal being known from x-ray diffraction.«

Die emergenztheoretische Deutung der Quantentheorie radikalisiert das Bezugsproblem der in der Quantenmechanik uneindeutigen Mikro-Makro-Beziehung. Wir erinnern uns, dass das Beobachterproblem auch als eine Frage der *Kontextualisierung* verstanden werden kann. So wird etwa in der Dekohärenztheorie eine hinreichend strukturierte Umwelt gebraucht, um ein klassisches System zu definieren, und ebenso bettet die Bohm'sche Mechanik die Messbeobachtung in ein holistisches Universum ein, das die spezifischen Eigenschaften der beobachteten Teilchen definiert. Die Emergenztheorie fragt nun spezifischer nach den kollektiven Kontexten, welche ein Phänomen hervorbringen und impliziert damit eine eigenständige Lösung des Deutungsproblems der Quantentheorie.

Die Grundidee der Emergenz lässt sich mit dem Nobelpreisträger Philip Warren Anderson durch die drei Worte »*More is different*« ausdrücken.⁸⁰ Wenn Physiker von emergenten Phänomenen sprechen, dann gehen sie von der Annahme aus, dass Objekte kollektive Eigenschaften gewinnen können, die eine Regelmäßigkeit zeigen,

tion (11). Simple electrical measurements performed on superconducting rings determine to high accuracy the quantity the quantum of magnetic flux $hc/2e$ (11). A version of this phenomenon also is seen in superfluid helium, where coupling to electromagnetism is irrelevant (12). Four-point conductance measurements on semiconductors in the quantum Hall regime accurately determine the quantity e^2/h (13). The magnetic field generated by a superconductor that is mechanically rotated measures e/mc (14, 15). These things are clearly true, yet they cannot be deduced by direct calculation from the Theory of Everything, for exact results cannot be predicted by approximate calculations. This point is still not understood by many professional physicists, who find it easier to believe that a deductive link exists and has only to be discovered than to face the truth that there is no link. But it is true nonetheless. Experiments of this kind work because there are higher organizing principles in nature that make them work. The Josephson quantum is exact because of the principle of continuous symmetry breaking (16). The quantum Hall effect is exact because of localization (17). Neither of these things can be deduced from microscopics, and both are transcendent, in that they would continue to be true and to lead to exact results even if the Theory of Everything were changed. [...] This fundamental things in nature the Theory of Everything is irrelevant. P. W. Anderson's famous and apt description of this state of affairs is »more is different« (2). The emergent physical phenomena regulated by higher organizing principles have a property, namely their insensitivity to microscopics, that is directly relevant to the broad question of what is knowable in the deepest sense of the term« (Laughlin/Pines 1999).

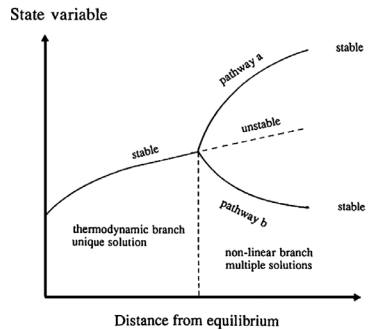
80 Anderson (1972).

welche nicht allein auf die Gesetzmäßigkeiten der Grundbestandteile zurückzuführen ist, aus denen das Objekt zusammengesetzt ist. In der Physik spielen emergenztheoretische Erklärungen insbesondere in den sogenannten Phasenübergängen eine wichtige Rolle.

Hier zeigt sich oftmals eine kollektive Änderung des Ordnungszustands, die zu einer neuen Ausrichtung der beteiligten Elemente führt. Immer wenn etwa ein Gas zur Flüssigkeit oder ein Metall vom unmagnetischen zum magnetischen Zustand übergeht, findet ein *spontaner Symmetriebruch* statt. Ein zuvor ungeordnetes Ensemble wird jetzt einem spezifischen Ordnungsparameter unterworfen, der die beteiligten Teile in ihrer Ausrichtung versklavt. Die weitere Entwicklung des Kollektivs wird nun an eine bestimmte Konfiguration gebunden, die dann den Keim für weitere Strukturbildungsprozesse bilden kann. Welche konkrete Ausrichtung dabei letztendlich gewählt wird, ist zunächst kontingent, doch sobald ein Muster stabilisiert wird (z. B. den magnetischen Nordpol nach rechts), werden alternative Optionen supprimiert.

Das Geschehen während der Phasenübergänge lässt sich recht gut mit der Chaos-Theorie bzw. mit der Theorie dynamischer Strukturen beschreiben.⁸¹ Zunächst bilden sich unterschiedliche Ordnungsparameter, die gleichzeitig nebeneinander bestehen können. Minimale Schwankungen in den Anfangsbedingungen führen jedoch zur Stabilisierung einer Ordnung, die dann zum übergreifenden Attraktor des gesamten Systems wird. Die nun entstehende Ordnung ist nicht mehr (allein) durch die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile des Systems erklärbar, sondern ergibt sich als eine kollektive Eigenschaft.

Diese Ordnung entsteht auf Basis einer Kette von *Symmetriebrüchen*, die zu einer bestimmten Pfadabhängigkeit führt. Die hiermit erscheinenden Ordnungen kommen zur Existenz, *weil sie eine bestimmte Geschichte haben*, die ihre jeweils spezifische Regelmäßigkeit generiert hat, nicht jedoch deshalb, weil auf der Mikroebene die physikalischen Bestandteile zu dieser Ordnung führen müssen. Die Theorie der Emergenz führt damit zu einer Erklärung, warum aus einfachen physikalischen Gesetzen eine Fülle komplexer



81 Siehe zur Theorie chaotischer dynamischer Systeme Takens (2011).

82 Aus Prigogine/Nicolis (1989, 72).

Strukturen und Verhaltensweisen entstehen können, die jedoch nicht aus diesen Gesetzen vorhersagbar sind, da sie auf kontingenten Pfadabhängigkeiten beruhen.⁸³

All dies hat zunächst noch nichts mit quantentheoretischen Fragestellungen zu tun. Die Entstehung neuer Eigenschaften auf Basis von Symmetriebrüchen lässt sich bereits mit den theoretischen Mitteln der klassischen Physik erklären. Die Theorie der *dissipativen Strukturen* zeigt auf, wie fern vom thermodynamischen Gleichgewicht spontan systemische Zusammenhänge und Vorformen des Lebendigen entstehen können.⁸⁴ Umgekehrt lässt sich aber fragen, ob nicht die Interpretationsprobleme der Quantentheorie möglicherweise vor dem Hintergrund der Idee der Emergenz in einem anderen Licht erscheinen. Erinnern wir uns beispielsweise an die quantentheoretische Erklärung der Supraleitung durch Bardeen, Cooper und Schrieffer. Diese beruht da-

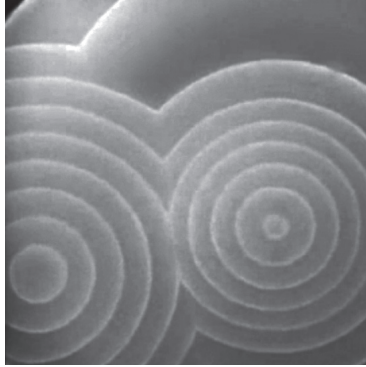


Abb. 20: Hier die spontane Entstehung von Ordnungsmustern in der Belousov-Zabotinsky Reaktion⁸⁵

83 Hierzu Laughlin: »Die Vorstellung einer Symmetriebrechung ist einfach: Materie erwirbt kollektiv und spontan eine Eigenschaft oder ein bevorzugtes Verhalten, das in den hier zugrunde liegenden Regeln selbst nicht vorhanden war. Wenn Atome sich beispielsweise zu einem Kristall ordnen, nehmen sie bevorzugte Positionen ein, obwohl diese Positionen vor der Ausbildung des Kristalls keinerlei Präferenzen besessen haben. Wenn ein Stück Eisen magnetisch wird, so wählt der Magnetismus spontan eine Richtung, in die er weist. Diese Effekte sind bedeutsam, weil sie beweisen, dass Ordnungsprinzipien der primitiven Materie einen eigenen Willen vermitteln und sie in die Lage versetzen können, kollektives Verhalten zu zeigen. Wir sagen, die Materie treffe diese Entscheidung »zufallsbestimmt« – das heißt, auf der Grundlage irgendeiner ansonsten belanglosen Ausgangsbedingung oder eines äußeren Einflusses –, aber das erfasst den Kern der Sache nicht richtig. Sobald die Entscheidung getroffen ist, wird sie »wirklich« und hat nichts Zufälliges mehr an sich. Die Symmetriebrechung liefert uns ein einfaches und überzeugendes Beispiel dafür, wie die Natur, obwohl ihr einfache Regeln zugrunde liegen, ganz aus sich heraus eine komplexe Fülle ausbilden kann« (Laughlin 2007, 77 f.).

84 Siehe grundlegend Prigogine (1979).

85 Videogramm aus <http://www.youtube.com/watch?v=bH6bRt4XJcw>. Video erstellt von Jane Babiarz von der University of Chicago.

rauf, dass sich Elektronen, die ansonsten nur individuiert auftreten, moderiert durch die Kristallgitter des metallischen Leiters, zu Paaren zusammenschließen, die nun wiederum in einen kollektiven Quantenzustand übergehen können (siehe Kap. IV.5).

Die Supraleitung lässt sich also als ein Phasenübergang verstehen und damit einhergehend erscheinen jetzt auch die Eigenschaften von Elektronen als emergente, hochgradig kontextabhängige Qualitäten. Homolog hierzu haben auch die Untersuchungen zum Quanten-Hall-Effekt gezeigt, dass sich wichtige Naturkonstanten – wie die Elementarladung des Elektrons – aus unreinen Proben bestimmen lassen, insofern diese eine hinreichende Größe haben.⁸⁶ Die ebenfalls mit dem Nobelpreis honorierte Entdeckung des fraktionalen Quanten-Hall-Effekts hat zudem gezeigt, dass die Ladung des Elektrons keine

86 »Der klassische Hall-Effekt (1879 von dem amerikanischen Physiker Edwin Hall entdeckt) tritt auf, wenn eine Platte, durch die ein Strom fließt, zusätzlich in ein Magnetfeld gebracht wird: Unter dem Einfluß des Magnetfeldes driftet ein Teil der durch die Platte fließenden Elektronen zur Seite, und an den Seitenkanten der Platte wird eine Spannung gemessen, die sogenannte Hall-Spannung.

Den Hall-Effekt nutzten Physiker schon frühzeitig zur Untersuchung von Halbleitermaterialien aus, weil man erkannt hatte, daß die Hall-Spannungsmessungen zur Bestimmung der Beweglichkeit, Driftgeschwindigkeit und Konzentration der Ladungsträger dienen können. Bei solchen Messungen, die er im Hochmagnetfeldlaboratorium in Grenoble durchführte, das von seinem Doktorvater Gottfried Landwehr geleitet wurde, entdeckte Klaus v. Klitzing 1980 den Quanten-Hall-Effekt, als er den Leitungsmechanismus in MOSFET-Transistoren bei tiefen Temperaturen (4 Kelvin = -269°C) und unter dem Einfluß starker Magnetfelder (14 Tesla) untersuchte; 1985 erhielt er dafür den Nobelpreis.

Beim Quanten-Hall-Effekt (QHE) besteht die Probe aus einer mikroskopisch dünnen Schicht, in der die Elektronen sich wie in der Ebene eines Blatts Papier nur in zwei Dimensionen bewegen können. Wirkt nun ein starkes Magnetfeld senkrecht auf diese Ebene ein und mißt man die Hall-Spannung an den Seitenkanten, so zeigt die Hall-Spannung nicht, wie klassisch zu erwarten gewesen wäre, einen linearen Verlauf als Funktion des Magnetfeldes, sondern es treten Sprünge und Plateaus auf. Die Plateaus dieser Quantensprünge hängen erstaunlicherweise nicht, wie der klassische Hall-Effekt, vom Material oder der Geometrie der Probe ab, sondern stellen sich als das Vielfache immer derselben Zahl h/e^2 heraus. Diese Zahl, die Von-Klitzing-Konstante $R_k = h/e^2 = 25812,8070$, ist demnach eine universelle Naturkonstante wie h , das Plancksche Wirkungsquantum, und e , die Ladung des Elektrons; d. h. eine räumlich und zeitlich unveränderliche Größe« (Information TU-Berlin, 1996, Download am 19.10.2011 unter <http://archiv.pressestelle.tu-berlin.de/pi/1996/pi168.htm>).

unteilbare Einheit darstellt, sondern seinerseits von makroskopischen Ordnungszuständen abhängig ist.⁸⁷

Gehen wir im Folgenden etwas ausführlicher auf Laughlins Argumentation ein.

Zunächst stellt Laughlin am Beispiel der Elementarladung dar, dass die hiermit verbundene Idee nur in der Einbettung in kollektive Kontexte Sinn ergibt. Entsprechend macht es für ihn auch keinen Unterschied, ob man fundamentale physikalische Konstanten als emergente oder reduktionistische Größen betrachte.⁸⁸ Hiermit ergibt sich auch ein anderes Verständnis der Gesetze der klassischen Physik.

87 »Der fraktionale Quanten-Hall-Effekt enthüllt, dass angeblich unteilbare Größen – in diesem Fall die elektrische Elementarladung e – durch die Selbstorganisation von Phasen zerlegt werden können. Anders gesagt, die fundamentalen Dinge sind nicht notwendigerweise grundlegend. [...]. Die Entdeckung des fraktionalen Quanten-Hall-Effekts bereitete dieser Verworrenheit aufgrund seiner Exaktheit jedoch schlagartig ein Ende. Exakte Sachverhalte lassen sich nie mit ungefähren Theorien erklären. Mit der Beobachtung exakt gequantelter fraktionaler Quanten-Hall-Plateaus war die Existenz neuer Materiephasen, in denen die elementaren Anregungszustände – die Teilchen – einen exakten Bruchteil von e tragen, bewiesen. Die Anregungszustände der Phasen, die Dan und Horst als erstes entdeckt haben, trugen die Ladung $e/3$, was im Licht der Quarks, den angeblich grundlegenden Bestandteilen der Protonen und Neutronen, getragenen Ladung $e/3$ ein besonders faszinierendes Ergebnis ist. Seither hat man einen riesigen, kaskadenartig verzweigten Baum solcher Phasen entdeckt, von denen jede durch einen anderen Bruchteil gekennzeichnet ist« (Laughlin 2007, 124 f.).

88 »Gewöhnlich sehen wir diese Ladung als Baustein der Natur, der keinen kollektiven Kontext benötigt, um einen Sinn zu ergeben. Selbstverständlich wird diese Vorstellung durch die einschlägigen Experimente widerlegt. Diese zeigen, dass die Elektronenladung nur in einem kollektiven Kontext Sinn ergibt – und dieser Kontext kann entweder durch das leere Vakuum des Raums bereit gestellt werden, das die Ladung in der selben Weise modifiziert, wie die atomaren Wellenlängen, oder durch irgendwelche Materie, die den Effekten des Vakuums zuvorkommt. Überdies erfordert die Fähigkeit der Materie, vorrangig in Erscheinung zu treten, dass die hier wirkenden Organisationsprinzipien die gleichen sind, die auch im Vakuum am Werk sind, weil die Effekte sonst ein Wunder wären. Wie sich herausstellt ist das Rätsel der Elektronenladung kein einmaliger Fall. Alle fundamentalen Konstanten setzen den Kontext einer Umgebung voraus, um einen Sinn zu ergeben. In der Praxis gibt es in der Physik keine Unterscheidung zwischen reduktionistischen und emergenten Größen. Sie ist lediglich eine künstliche Erfindung und ähnelt eher unserer Gewohnheit, unbelebten Objekten manchmal ein Geschlecht zuzuweisen« (Laughlin 2007, 41).

Newtons Gesetze, die das Verhalten bewegter Körper beschreiben, lassen sich jetzt ebenfalls als abgeleitete kollektive Prozesse rekonstruieren.⁸⁹

Für Laughlin erklärt sich hierdurch auch der Übergang von der quantentheoretischen Beschreibung zu unserer klassischen Welterfahrung. Die klassischen Objekte brauchen jetzt nämlich gar nicht mehr aus kleineren Entitäten zusammengesetzt gedacht zu werden. Vielmehr hat auch hier zu gelten, dass die kleinen Objekte erst als Ausdruck einer Struktur makroskopischer Ordnungsphänomene verstanden werden können:

»Der bei Weitem wichtigste Effekt der Phasenorganisation besteht darin, dass sie Objekte dazu bringt, zu existieren. Dieser Punkt erschließt sich schwer und wird leicht übersehen, weil wir gewohnt sind, uns die Herausbildung fester Substanzen als Zusammenschluss newtonscher Kugeln vorzustellen. Atome sind jedoch keine newtonschen Kugeln, sondern flüchtige quantenmechanische Wesen, denen die wichtigste Eigenschaft eines Objekts fehlt – eine feststellbare Position. Deshalb enden Ansätze, freie Atome in newtonschen Begriffen zu beschreiben, stets in unsinnigen Aussagen wie der, dass sie weder hier noch dort, sondern gleichzeitig überall seien. Es ist ihre Zusammenballung zu großen Objekten, die einer newtonschen Beschreibung der Atome einen Sinn verleiht, nicht umgekehrt. Man könnte dieses Phänomen mit einem noch zu drehenden Film von Steven Spielberg vergleichen, in dem eine gewaltige Anzahl winziger Geister die Arme einhakt und auf diese Weise Körperlichkeit erlangt. Damit das eintritt, müssen es ungeheuer viele sein. Es wird nicht ausreichen, einfach

89 »Lenkt man einen Strahl von Heliumatomen auf eine atomar perfekte, feste Oberfläche, so prallt dieser nicht in alle Richtungen davon ab, sondern wird wie ein Lichtstrahl in Regenbogenmustern gebrochen. [...] Atome sind überhaupt keine Billardkugeln, sondern Wellen, ebenso wie ihre Bestandteile, die sich in der Weise zu Atomen verbinden, wie Schwingungen des Wassers sich zu einer Brandungswoge vereinigen. Damit haben Newtons legendäre Gesetze sich als emergent erwiesen. Sie sind keineswegs fundamental, sondern eine Folge des Zusammenschlusses von Quantenmaterie zu makroskopischen Flüssigkeiten und Feststoffen – eine Erscheinung kollektiver Organisation. [...] Viele Physiker beharren darauf, das zu leugnen, so erstaunlich das sein mag. Bis heute veranstalten sie Konferenzen zu dem Thema und sprechen routinemäßig davon, dass Newtons Gesetze ein für große Systeme gültiger ›Grenzfall‹ der Quantenmechanik seien – obwohl man nie eine legitime Annäherung an diesen Grenzfall gefunden hat« (Laughlin 2007, 58).

nur Atome zu einem sehr großen Molekül zu verbinden. Fullerene zum Beispiel – fußballförmige Moleküle aus sechzig oder mehr Kohlenstoffatomen – zeigen eine sehr klare Streuung und sind demnach immer noch messbar quantenmechanischer Natur. Wächst die Probe aber auf makroskopisch viele Atome an, so wird die Unterscheidung zwischen inneren Bewegungen und der kollektiven Bewegung des ganzen Körpers *qualitativ* – und letzterer gewinnt newtonsche Realität. Man kann sich nur deshalb weiterhin Atome als newtonsche Objekte vorstellen, weil ein emergentes Phänomen den Irrtum unerheblich werden lässt. Das tut es jedoch nur für die Bewegung des Körpers als Ganzen. Die inneren Vibrationsbewegungen bleiben hingegen vollständig im Quantenbereich. Die kollektive Emergenz von Objekten ist das Prinzip hinter dem Phänomen der Supraeffekte, die in extrem kalten Umgebungen auftreten«.90

Da jetzt materielle Objekte als Phänomene kollektiv organisierter Quantenmaterie verstanden werden können, vermutet Laughlin, dass sich auch das Licht möglicherweise emergenztheoretisch erklären ließe. Hinweise hierfür ergeben sich aus der Tatsache, dass Schall und Licht im Experiment ähnliche Quanteneigenschaften zeigen. Schall lässt sich als koordiniertes Bewegungsmuster elastischer Körper verstehen. In gleichem Sinne könnte man jetzt auch Licht als ein kollektives emergentes Phänomen betrachten, das darauf beruht, dass das Vakuum in Schwingung gerät. Diese Perspektive würde jedoch

90 Laughlin (2007, 76). In Hinblick auf die zunehmende Bewährung einer Theorie des 4-dimensionalen Quanten-Hall-Effekts würden dann auch die Elementarteilchen der Hochenergiephysik ein emergentes Phänomen makroskopischer Ordnungsphänomene darstellen. Hierzu Zhang: »The logical structure of physics may not be a simple one-dimensional line, but rather a multiply connected or braided topology, very much like Escher's famous Waterfall. Instead of going up in energy, we move down in energy! Atoms, molecules, and quantum liquids are made of elementary at very high energies. But at low energies, they interact strongly with each other to form quasi-particles, which look very much like the elementary particles themselves! Over the past 40 years, we have learned that the strong correlation of these matter degrees of freedom does not lead to ugliness and chaos, but rather to extraordinary beauty and simplicity. The precision of flux quantization, Josephson frequency, and quantized Hall conductance are not properties of the basic constituents of matter, but rather are emergent properties of their collective behaviour. Therefore, by exploring the connection between elementary particle and condensed matter physics, we can use experiments performed at low energies to understand the physics at high energies« (Zhang 2004, 698 f.).

voraussetzen, dass das Vakuum selbst einen Phasenzustand darstellt, den die Quantenmaterie annehmen kann.⁹¹ Hiermit würden also das Vakuum wie auch die klassische Materie als unterschiedliche Phasen bzw. unterschiedliche Ordnungszustände der Quantenmaterie erscheinen.⁹²

91 »Die Quanteneigenschaften des Schalls stimmen mit denen des Lichts überein. Diese Tatsache ist wichtig, da sie alles andere als offensichtlich ist, wenn man davon ausgeht, dass Schall eine kollektive Bewegung elastischer Materie ist, Licht dagegen angeblich nicht. [...] Erwärmt man den Raum, so ist er selbstverständlich nicht leer, sondern gefüllt mit Licht, dessen Farbe und Intensität von der Temperatur abhängt. [...] Ähnlich ist ein warmer Kristall mit Schall erfüllt. In beiden Fällen erklärt sich die spezielle Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität quantitativ aus dem Planck-Gesetz. Diese simple Formel leitet sich aus der Annahme ab, dass Licht oder Schall nur in diskreten Beträgen erzeugt oder vernichtet werden können. In Wahrheit entspricht die Formel für die Wärmekapazität eines kristallinen Festkörpers ganz einfach jener für die des leeren Raums, in der man die Lichtgeschwindigkeit durch die Schallgeschwindigkeit ersetzt hat. Das emergente Quantum des Schalls, bekannt als Phonon, ist dem Lichtquant oder Photon angemessen analog. Die physikalische Äquivalenz der beiden Teilchenarten ist durch eine große Zahl von Experimenten bestätigt worden, von denen einige sehr schön und clever sind. [...]. Die Analogie zwischen Phononen und Photonen wirft die Frage auf, ob das Licht selbst emergent sein könnte. Hier muss man das legitime Problem des Vakuums als einer Phase sorgfältig von dem falschen Problem trennen, ob es eine uns bekannte Phase ist. [...] Nicht alle Phasen der Materie sind entdeckt, und aus ersten Grundsätzen können sie gewiss nicht deduziert werden. Dies gilt sogar in der Welt der Alltagschemie und erst recht in der weit größeren Welt möglicher mikroskopischer Grundlagen des Universums« (Laughlin 2007, 165 f.).

92 »Viele andere Aspekte des Vakuums sehen verdächtig nach Emergenz aus. Da gibt es beispielsweise die große Einfachheit seiner quantenfeldtheoretischen Beschreibung, was ungewöhnlich ist, weil solche Beschreibungen für normale Materie tendenziell kompliziert werden, sofern sie nicht emergent sind – wie das in einem Supraleiter oder Suprafluid der Fall ist. Außerdem haben wir eine Hierarchie der Skalen, die Tendenz der Phänomene, bei weiter zunehmenden Längen und Zeiten sich einander nach und nach unterzuordnen. Kühlt man das Vakuum von sehr hohen Temperaturen aus ab, so stellt man sich vor, dass es schrittweise Ereignissen mit der Bezeichnung Vereinigungsübertragung unterworfen ist, in denen die bekannten Naturkräfte sich nacheinander von ihren fundamentalen Vorläufern abspalten. Ähnlich kondensiert das Metall Holmium aus der Gruppe der seltenen Erden, wenn es von sehr hoher Temperatur ausgehend abgekühlt wird, zunächst bei 2993 Kelvin zu einer Flüssigkeit, wird dann bei 1743 fest, entwickelt anschließend bei

Laughlin vermutet, dass sich über die Theorie der Emergenz auch weitere grundlagentheoretische Probleme der Quantentheorie lösen lassen.

So könne die Unvereinbarkeit von Quanten- und Relativitätstheorie möglicherweise dadurch überwunden werden, dass die von Einstein entdeckte Relativität von Raum und Zeit nicht mehr als Grundprinzip der Physik, sondern ebenfalls als eine abgeleitete emergente Gesetzmäßigkeit betrachtet wird. Das Gewebe der Raumzeit würde damit nicht mehr den Urgrund darstellen, auf dem sich alles weitere abspielt, sondern ebenfalls als ein Ordnungsphänomen komplexer Quantenphänomene erklärt werden.⁹³

Ebenso könnte sich mit Hilfe der Emergenz eine physikalische Lösung für das Problem der Renormierung in der Quantenfeldtheorie ergeben (vgl. Kap. III.2). Von der Theorie her gesehen, hat man hier auch sehr nahe Koppelungen in die Berechnung der Wegpfade mit einzubeziehen, was aber rechnerisch zu unsinnigen Ergebnissen führt. Praktisch hilft man sich hier mit einem in Hinblick auf ma-

130 Kelvin eine spezielle Art von spiralförmigen Magnetismus, worauf die Spirale bei 20 Kelvin kippt und zu einem schwachen Ferromagneten wird. Zwischen 130 und 20 Kelvin variiert die Steigung der Spirale fortwährend, als wäre sie eine Gummischraube, die entlang der Achse gestreckt wird. Bei jedem dieser Übergänge spalten sich die durch verschiedene elastische Verdrehungen übertragenen ›Kräfte‹ zwischen den Elektronen im Metall in schöner und angemessener Analogie mit dem, was im Vakuum geschieht, von ihren Vorläufern ab« (Laughlin 2007, 170).

93 »Einstein war ein Künstler und Gelehrter. Seine Herangehensweise an die Physik könnte man so zusammenfassen: minimale Hypothesenbildung, niemals experimentellen Befunden widersprechen, vollkommene logische Konsistenz fordern und unbegründeten Überzeugungen misstrauen. Die unbegründete Überzeugung seiner Zeit war der Äther, genauer gesagt die der Relativität vorangehende naive Version des Äthers. Die unbegründete Überzeugung unserer Zeit ist die Relativität selbst. Es würde vollkommen seinem Naturell entsprechen, sich die Fakten erneut vorzunehmen, sie im Geist umzuwerfen und zu dem Schluss zu kommen, dass sein geliebtes Relativitätsprinzip keineswegs fundamental, sondern emergent ist – eine kollektive Eigenschaft der die Raumzeit konstituierenden Materie, die bei großen Längenskalen zunehmend exakt wird, bei kurzen hingegen versagt. Diese Vorstellung unterscheidet sich von seiner ursprünglichen Idee, ist aber logisch vollständig damit vereinbar und sogar aufregender und potenziell bedeutender. Ich würde meinen, dass das Gewebe der Raumzeit nicht nur die Bühne bildet, auf der das Leben sich abspielt, sondern ein Ordnungsphänomen darstellt, hinter dem vielleicht noch mehr liegt« (Laughlin 2007, 190).

thematische Konsistenz recht problematischen Verfahren, mit dem sich jeweils zwei unbrauchbare Ergebnisse gegenseitig aufheben. Aus einer emergenztheoretischen Perspektive würde sich eine plausible Erklärung dafür ergeben, warum das Verfahren funktioniert: Die berechneten Eigenschaften sind per se durch übergeordnete kollektive Prozesse determiniert und gerade deshalb spielen die lokalen mikroskopischen Prozesse keine Rolle. Die Grundgleichungen wären hiermit zwar falsch, würden aber dennoch zum richtigen Ergebnis führen. Die theoretischen Ungereimtheiten der Quantenfeldtheorie würden damit gleichsam auf einem reduktionistischen Selbstmissverständnis beruhen, das die eigentliche Natur der beschriebenen Prozesse verkennt.⁹⁴

Insofern man bereit ist, die Quantentheorie unter dem Paradigma der Emergenz zu begreifen, ergibt sich eine wichtige Konsequenz für das Verständnis der Physik. Die Suche nach den letzten Gesetzen des Universums erscheint nun sinnlos. Da aus einer emergenztheoretischen Perspektive die wesentlichen Gesetzmäßigkeiten unserer Welt auf kontingenten Verzweigungen innerhalb einer sukzessiven Folge von Symmetriebrüchen beruhen, ergibt es wenig Sinn, nach einem übergreifenden fundamentalen Prinzip zu suchen.⁹⁵ Wenn man ein

94 »Kurz nachdem die Theorie von Bardeen-Cooper-Schrieffer eingeführt worden war, fand man heraus, dass die Sprache der Quantenfeldtheorie sich besonders gut eignete, um wichtige Eigenschaften von Supraleitern zu beschreiben [...] Das führte schließlich zu der Praxis, alles an der Supraleitung mittels der Feldtheorie zu beschreiben, und damit indirekt zu der Vorstellung, dass Quantenfelder die Supraleitung verursachen. [...] Das ist so lächerlich wie der Glaube, das Wetter würde durch den Getreidepreis verursacht. In Wahrheit funktioniert die Quantenfeldtheorie, weil die emergente Universalität der Supraleitung sie zum Funktionieren bringt, nicht umgekehrt. Die in die Feldtheorie hineinverschlüsselten mikroskopischen Gleichungen der Quantenmechanik unterscheiden sich von denen des realen Materials und sind deshalb falsch. Es gibt nur eine Möglichkeit mit falschen Gleichungen anzufangen und zur richtigen Antwort zu gelangen – dafür muss die zu berechnende Eigenschaft robust unempfindlich gegenüber den Details, also emergent sein. Aus der Supraleitung lässt sich demnach nicht ableiten, dass die Quantenfeldtheorie ein überlegenes Rechenverfahren darstellt, sondern dass Quantenfelder ihrerseits emergieren können« (Laughlin 2007, 149). Siehe zu einer emergenztheoretischen Erklärung der Raumzeit auf Basis quantentheoretischer Überlegungen Ausari/Smolin (2008).

95 Dies würde dann auch erklären, warum es der Physik bislang nicht so recht gelingen mag, die Mikro-Makro-Übergänge von den Elementarteilchen zu den biochemischen Eigenschaften zu erklären, die unser Leben bestimmen. Das Problem stellt sich, wie Lévy-Leblond herausstellt, selbst

solches finden würde, dann wäre es so trivial, dass praktisch keine weitergehenden Aussagen über die Welt getroffen werden können. All das, was man in dieser Welt an interessanten und bemerkenswerten Phänomenen antreffen kann, würde demgegenüber auf einer individuierten Geschichte beruhen, die zwar im Einklang mit diesem Grundgesetz stehen würde, jedoch darüber hinaus keine weitergehenden Vorhersagen ermöglicht. Die »Emergenz« setzt damit »dem Mythos von der absoluten Macht der Mathematik ein Ende«. ⁹⁶ Wir hätten uns hiermit endgültig von der Weltformel zu verabschieden.

bei so scheinbar einfachen Phänomenen wie dem Wasser: »Diejenige Etappe des Wiederaufstiegs [von den Quarks und Gluonen zur belebten Materie], die gegenwärtig noch am besten verstanden wird, ist die, die es erlaubt, von der Ebene der Kerne und Elektronen aus die der Atome und Moleküle zu rekonstruieren. [...] Auf jeden Fall – das mag überraschend erscheinen – ist der Schritt des Wiederaufstiegs, der am nächsten an unsere Ebene heranführt, indem er den Übergang von den Eigenschaften der Atome und Moleküle zum Verhalten der gewöhnlichen Materie realisiert, tatsächlich problematischer als der vorangegangene. Gewiss haben wir viele Verhaltensweisen der gewöhnlichen Materie, zumindest dem Prinzip nach, verstanden und vor allem auf der Basis ihrer elektronischen Struktur geklärt: die elektrische und Wärmeleitfähigkeit, die Kohäsionseigenschaften der Stoffe, die Zustandsänderungen (fest/flüssig/gasförmig) etc. Aber je stärker es die Atome und Moleküle selbst betrifft, sind die Details dieser Eigenschaften weit davon entfernt, gut erklärt zu sein. [...] Nehmen wir das Beispiel Wasser, H₂O. Von diesen Molekülen kennen wir ihre Zusammensetzung, ihre geometrische Form, die Abstände zwischen den verschiedenen Atomen, ihre Schwingungsniveaus etc. Besser noch, wir kennen die Wechselwirkungen zwischen diesen gepaarten Molekülen sehr gut – dieselben Wechselwirkungen, die die Gesamtheit einer flüssigen Masse beherrschen. Aber überzugehen vom Verhalten eines, zweier, auch dreier Wassermoleküle zu dem einer großen Zahl – dazu sind wir kaum in der Lage, und wir wären völlig unfähig dazu, wenn wir nicht über die experimentelle Erfahrung verfügten, vorherzusagen zu können, dass das Eis auf dem Wasser schwimmt, und auf diese Weise dieses banale Alltagsphänomen zu verstehen (Lévy-Leblond 2011, 16 ff.).

96 »Der Übergang zum Zeitalter der Emergenz setzt dem Mythos von der absoluten Macht der Mathematik ein Ende. Leider ist dieser Mythos in unserer Kultur immer noch tief verwurzelt. Das zeigt sich regelmäßig in der Presse und in populären Medien, welche für die Suche nach ultimativen Gesetzen, weil sie die einzige wissenschaftliche Tätigkeit sei, die sich lohne – ungeachtet der starken und überwältigenden experimentellen Beweise, dass genau das Gegenteil der Fall ist. Den reduktionistischen Mythos können wir dadurch widerlegen, dass wir die Korrektheit der Regeln beweisen und dann sehr kluge Leute auffordern, von ihnen aus-

Fassen wir die Idee der Emergenz⁹⁷ nochmals zusammen: Die emergenztheoretische Perspektive beschreibt die Entstehung makroskopischer Strukturen als eine Geschichte von Symmetriebrechungen, die Ordnungsparameter hervorbringt, welche mikroskopische Zustände versklaven. Angefangen bei der Physik über die Biologie und Kognitionswissenschaften bis hin zur Soziologie hat sich das Paradigma der Emergenz in vielen Disziplinen als fruchtbar erwiesen.⁹⁸ Das Konzept der Selbstorganisation gehört heutzutage zum semantischen Haushalt unserer Gesellschaft und ist mittlerweile durch vielfältige Anschauungen unterlegt.

Die Theorien zur Emergenz wurden anhand klassisch beschreibbarer physikalischer Prozesse entwickelt. Sie beschreiben also, wie sich globale Ordnungsparameter aus *lokalen* Wechselwirkungsprozessen entwickeln, die dann wiederum diese Prozesse rekursiv organisieren. Eine wichtige Lehre, welche die Physik aus der Quantentheorie ziehen musste, besteht allerdings in der Einsicht, dass die Schrödinger-Gleichung *nicht-lokal* zu verstehen ist. Verschränkung ist entsprechend als eine physikalische Wirklichkeit zu akzeptieren. Was Emergenz unter nicht-klassischen Bedingungen bedeuten kann, entzieht sich jedoch jeglicher Vorstellung:

»Die Symmetriebrechung ist unter anderem deswegen so schwer aus den ihr zugrundeliegenden Gesetzen der Quantenmecha-

gehend etwas vorherzusagen. [...] Der Mythos, kollektives Verhalten folge aus der Gesetzmäßigkeit, geht in der Praxis genau in die falsche Richtung. Stattdessen folgt Gesetzmäßigkeit aus kollektivem Verhalten, ebenso wie andere daraus hervorgehende Dinge wie etwa Logik und Mathematik. Unser Geist kann das, was die physische Welt macht, nicht deshalb antizipieren und meistern, weil wir Genies sind, sondern weil die Natur das Verständnis erleichtert, indem sie sich selbst organisiert und Gesetzmäßigkeit hervorbringt« (Laughlin 2007, 305).

97 Wenn der Physiker von Emergenz spricht, hat er meistens eine sehr genaue Vorstellung der Mechanismen, entsprechend denen die übergeordneten makroskopischen Prozesse versklaven. Die Prozesse der Autokatalyse und wechselseitigen Katalyse, welche zu Symmetriebrechungen führen, sind hier in der Regel genau benennbar (s. etwa Prigogine 1979). Wenn demgegenüber Sozialwissenschaftler von Emergenz sprechen, werden oftmals schwammigere Konzepte verwendet, die vielfach kaum erklären können, auf Basis welcher Mechanismen das emergente Phänomen entsteht. Vgl. Heintz (2004).

98 Vgl. allgemein zur Emergenz Krohn/Küppers (1992) und Jantsch (1982), zu den Kognitionswissenschaften etwa Maturana (1985), Varela (1988), zur Soziologie Luhmann (1993). Siehe als Einführung zu einer Theorie des Komplexen auch Kauffman (1978).

nik abzuleiten, weil die Welt in ihrem Aufbau verwickelt oder verschränkt ist. [In der Berechnung der Wellenfunktion] spielen komplexe, interdependente Regeln eine Rolle. [...] Anhand dieser Regel[n] werden die verschiedenen Eingangsgrößen – in diesem Fall Informationen über Positionen und Ausrichtungen [...] in eine Zahl umgewandelt. Die deterministische Bewegung der Quantenmechanik bedeutet die logische und systematische Entwicklung der Regel in der fortschreitenden Zeit. Die Verschränkung steht für die Interdependenz der Regel. [...] Quantenverschränkung gehört zu den Dingen, die man leicht verstehen, aber fast unmöglich glauben kann.⁹⁹

Die Annahme nicht-lokaler emergenter Beziehungen ruiniert alle Versuche, der Quantentheorie eine Anschaulichkeit zurückzugeben, die mit den Mitteln des Common Sense nachvollziehbar ist.

Die Emergenztheorie setzt an dem Bezugsproblem des Mikro-Makro-Übergangs an und scheint hiermit eine Lösung der Deutungsprobleme der Quantentheorie anzubieten. Sie rekurriert dabei auf die Anschauungen aus der Theorie der *dissipativen Strukturen*. Dieser Theorieansatz wurde auf Basis klassischer physikalischer Konzepte entwickelt und lässt sich entsprechend diagrammatisch in Referenz auf lokal wirksame Kausalbeziehungen versinnbildlichen, die dann zu einer übergreifenden Musterbildung und –stabilisierung führen. Theoriebautechnisch spricht nichts dagegen, emergenz- und quantentheoretische Beschreibungen zu kombinieren. Hierbei werden allerdings nicht-lokale Beziehungen in ein Modell eingeführt, das sich nur als lokale Theorie anschaulich plausibilisieren kann. Mathematisch lässt sich die Sache verstehen, doch zugleich entschwindet damit vollkommen die Referenz auf lebensweltliche Anschauungen, die eine solche Theorie nachvollziehen und damit ›glauben‹ lassen.

7 Zusammenschau: Von der Physik zur Metaphysik?

Schauen wir zunächst nochmals auf das Bezugsproblem, das den in diesem Kapitel vorgestellten neueren Deutungen der Quantentheorie zugrunde liegt. Wir treffen auf eine Quantentheorie, die auch in ihren befremdlichen Vorhersagen mittlerweile empirisch bestätigt ist. Erklärungswürdig erscheint jetzt weniger die Quantenwelt denn das Auftreten von Phänomenen, die klassische Eigenschaften aufweisen.

⁹⁹ Laughlin (2007, 88 f.).

Wir treffen also jetzt auf eine in jeder Hinsicht selbstbewusst gewordene Quantenphysik, die auch gegenüber der Mathematik ihre konzeptionelle Hoheit wiedergewonnen hat. Man traut sich jetzt wieder vermehrt zu, sich von physikalischen Konzepten und Anschauungen leiten zu lassen. Auch in Bezug auf die Frage der Interpretation der Quantentheorie lautet die Devise jetzt nicht mehr nur ›halte den Mund und rechne‹. Auch in der Physik wird jetzt wieder vermehrt darüber nachgedacht, wie Quantentheorie und Welterfahrung zueinander in Beziehung gesetzt werden können.

Bis auf die emergenztheoretische Perspektive knüpfen alle in diesem Kapitel vorgestellten Deutungen der Quantentheorie an die in den vorangehenden Kapiteln vorgestellten kanonischen Interpretationen an.

Die informationstheoretischen Ansätze, wie sie mit v. Weizsäcker und Zeilinger vorgestellt wurden, stellen eine Erweiterung – man kann auch sagen ›eine Radikalisierung‹ der Kopenhagener Deutung dar. Ihre erkenntnistheoretische Pointe, dass die Quantentheorie etwas über die Grenzen unseres Wissens aussage, wird nun ontologisch gewendet. Information erscheint jetzt als der eigentliche Stoff, aus dem die Quantenwelt gewebt ist.

Der Dekohärenz-Ansatz stellt ebenso wie die Konsistente-Geschichten-Interpretation eine Weiterentwicklung des Pfades dar, der bereits mit der Everettschen Viele-Welten-Theorie eingeschlagen wurde. Die ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ folgt der Grundintuition der Ensemble-Interpretation. Man möchte weiterhin die Welt als den klassischen physikalischen Gesetzen folgend betrachten, hat nun aber mit einzubeziehen, dass sich die empirischen Verhältnisse im mikroskopischen Bereich als verschränkt – und damit nicht-lokalen Gesetzmäßigkeiten folgend – zeigen.

Allein mit der Emergenz kommt eine konzeptionelle Grundidee mit ins Spiel, die über die bereits bekannten Standarddeutungen hinausgeht. Hier wird die Theorie der dynamischen Systeme für das Verständnis kollektiver Quantenphänomene fruchtbar gemacht, indem die grundlegende Bedeutung von Symmetriebrüchen für die Selbstorganisation raumzeitlicher Strukturen herausgearbeitet wird.

Betrachten wir im Folgenden wieder das Verhältnis von Anschaulichkeit und Abstraktion in den hier vorgestellten Ansätzen.

Die abstrakteste Konzeption bildet die informationstheoretische Radikalisierung. Wenn wir Information begreifen als ›einen Unterschied, der einen Unterschied macht‹, gelangen wir zu einer Welt, die aus nichts anderem besteht als *aus sich selbst formierenden Unterschieden*. Entsprechend steht für v. Weizsäcker der Begriff der ›Information‹ auch synonym für das Maß an Gestaltfülle. In der ›it-from-bit‹-Deutung wird diese Perspektive in eine Hochabstrak-

tion getrieben, so dass hier als Fundamentalbaustein von Welt nur noch die Uralternative des Q-Bits übrig bleibt. Ein solcher Informationsbegriff zeigt sich aber bei genauerem Hinsehen vollkommen sinnentleert, denn die offene Frage einer abstrakten Informationstheorie blendet die Frage aus, für wen oder was ein Unterschied einen Unterschied macht.

Da es aber kein beobachterunabhängiges Verständnis darüber geben kann, was einen Unterschied macht, wird hiermit wieder die brisante Frage des Beobachters virulent, denn ein Unterschied macht nur für einen Beobachter einen Unterschied. Die Binäralternative Bit funktioniert nur, wenn sie zugleich eingebettet ist in die richtige Klassifikation sowie in einen Mechanismus, der die Nützlichkeit der Information (v. Neumann: *utility*) berücksichtigt. Zudem sind noch das Problem der Redundanz und das hiermit verbundene Gesetz der abnehmenden Information zu beachten. All dies zusammen genommen lässt deutlich werden, dass die Informationsverarbeitung komplexer Systeme nur zu fassen ist, wenn man der Information über die abstrakte Kategorisierung als binäre Entscheidungsalternative hinausgehend noch eine Bedeutungsdimension zugesteht.¹⁰⁰ Hiermit ist aber auch anzuerkennen, dass Information für verschiedene Beobachter etwas anderes bedeutet.¹⁰¹

Um aber mit solch vertrackten Verhältnissen umgehen zu können, bräuchten wir eine komplexe Informationstheorie, die Information und Verstehen als einen mehrgliedrigen, sich selbst konditionierenden Prozess begreift. Es wundert deshalb nicht, dass v. Weizsäcker hier den Ausweg in einer kantianischen Interpretation der Quantentheorie sucht, die den Unterschied, den ein Quantenexperiment im Wissen des Beobachters macht – und die hiermit einhergehende Entstehung einer irreversiblen Zeit –, als das eigentliche Geheimnis der Quantentheorie betrachtet.

Die informationstheoretische Deutung ist also entweder so abstrakt formuliert, dass sie nicht mehr viel aussagt, oder es bleibt als Alternative nichts anderes übrig, sie an einen beobachter- und systemabhängigen Informationsbegriff zu binden, wodurch jedoch die ursprüngliche Eleganz und Einfachheit der Interpretation wieder korrumpiert wird.

Was dies bedeutet, lässt sich am Beispiel der Konsistente-Geschichten-Interpretation erahnen. Wir treffen hier auf eine kybernetische Fassung eines Beobachters, der nun als ein *information gathering*

100 Siehe zu einer kurzen Einführung in die Problematik v. Baeyer (2003).

101 Beispielsweise ergibt ein in chinesischen Zeichen geschriebener Artikel im Kontext deutscher Schriftsprache keinen Sinn. Die Information geht hier verloren.

and utilizing system (IGUS) konzeptionalisiert wird, das aufgrund seiner eigenen Selektivität bestimmte Segmente aus der Wellenfunktion ausschneidet.

Unsere vertraute Welt distinguiert phänomenalisierter Entitäten erscheint jetzt nur noch als eine relative Wirklichkeit eines bestimmten systemischen Zusammenhangs, der auf eine bestimmte Sorte von Informationen aus dem unbegrenzten Raum anderer möglicher Informationen abzielt. Die *Uralternative* der Entscheidung eines Quantensystems wäre damit durch ein IGUS aufgespannt, das als Beobachter eine bestimmte Frage an die Quantenwelt stellt und hiermit die Wirklichkeit in dieser Frage zu einer eindeutigen Bestimmung herausfordert, wenngleich alles andere unbestimmt bleibt. Die wohl merkwürdigste Konsequenz dieser Interpretation besteht darin, dass Systeme als aus einer Vielzahl konsistenter Geschichten zusammengesetzt zu sehen sind, die in Hinblick auf die von ihnen gestellten Fragen alle zur gleichen Antwort führen. Die ultimative Realität des Universums würde dann ein unterschiedsloses und zeitloses Urgewebe darstellen, in dem immer schon alles da gewesen ist und das durch die Gesetzmäßigkeiten bestimmt ist, die durch die Schrödinger-Gleichung des Universums bestimmt werden. Darüber hinaus hätten wir mit einer Vielzahl beobachter- und systemrelativer Realitäten zu rechnen, in denen IGUS Informationen generieren, an denen sie sich ausrichten und über die sie eine Geschichte in Raum und Zeit gewinnen.

Unsere Zukunft systemrelativ als kontingente Auswahl aus einem Alternativenraum zu verstehen, der durch die Wellengleichung aufgespannt wird, steht durchaus im Einklang mit unserem Alltagserleben. Hier erfahren wir eine festgelegte Vergangenheit und eine offene Zukunft.

Dass sich aber auch die Vergangenheit in multiple, voneinander abweichende Realisationsoptionen auffächert, die alle gleichzeitig zur Gegenwart beitragen, ist nicht mehr mit unserer Erfahrung in Einklang zu bringen. Diese Option würde zudem bedeuten, dass nicht nur unser subjektives Erleben, sondern auch die durch objektive Messungen generierten Welten nichts anderes darstellen als beobachterabhängige Illusionen, welche die zugrunde liegende feinkörnige Quantenrealität verdeckt. Unsere Welt würde jetzt nichts anderes darstellen als ein Sammelsurium in sich konsistenter System-Umwelt-Arrangements einander partiell kompatibler Geschichten, die jeweils unterschiedliche, sich teilweise überlappende Weltsphären generieren.

Die Konsistente-Geschichten-Interpretation erscheint hiermit als ein quantenphysikalischer Platonismus, demzufolge wir aufgrund unseres Beobachterstatus in einer Höhle gefangen sind und deshalb

immer nur die Schattenbilder einer Welt erfahren können, die in ihren Grundgesetzlichkeiten zwar mathematisch beschreibbar, von uns jedoch nicht erfahrbar ist.

Die emergenztheoretische Perspektive scheint auf den ersten Blick zu ähnlichen Konsequenzen zu führen. Auch hier führt eine Kette von Symmetriebrüchen zu einer Individuierung von Systemen, die damit ihre eigene Geschichte bekommen. Darüber hinaus ist hier jedoch ein weiterer Preis zu zahlen. Wir müssen Abschied nehmen von der platonischen Idee einer Weltformel, die das Universum beschreibt.

Wir treffen jetzt auf lokal stabilisierte und temporal gültige Realitäten, die nicht einfach eine beobachterabhängige Illusion sind, sondern als emergente Qualitäten eine eigenständige Realität geworden sind. Praktisch für alle Fragen, die für die Physik wie auch für unser Leben von Bedeutung sind, sind jetzt Erklärungen zu finden, die auf kontingenten Geschichten aufeinander abfolgender Symmetriebrüche beruhen. All dies geschieht zudem in einer Quantenwelt, deren Prozesse ihrer Natur nach in einer nicht-lokal beschreibbaren Weise miteinander verschränkt sind. Auch hier begegnen wir einer Konzeption von Welt, die zwar in Teilbeschreibungen ihrer Phänomenbereiche nachvollziehbar ist, jedoch als Ganzes nicht nur unvorstellbar ist und jeder Anschauung spottet, sondern darüber hinaus auf eine endgültige mathematische Formalisierung zu verzichten hat, da auf allen Beschreibungsebenen mit Emergenz zu rechnen ist.

Sowohl die Konsistente-Geschichten-Theorie als auch die emergenztheoretische Perspektive münden in einen systemtheoretischen Konstruktivismus, der die Beobachterabhängigkeit informationsverarbeitender Prozesse anzuerkennen hat und sich damit in einen rekursiven Strudel der Begründungsverhältnisse begibt, der nicht mehr zwischen Grund und Begründetem unterscheiden lässt.

Genau dies hat die moderne Physik heutzutage wohl anzuerkennen, insofern sie versucht, ihre quantenphysikalischen Grundlagen auf eine interpretativ schlüssige Weltkonzeption auszudehnen.

Der einzige erkenntnistheoretische Ausweg aus den hier aufgeworfenen Dilemmata besteht darin, die Geltung der Quantentheorie für den Gegenstandsbereich der klassischen Welt zu negieren. Die ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹, welche in Kreisen der analytischen Philosophie recht beliebt ist, verfolgt diesen Weg. Wir können auf diesem Wege zwar bei einer klassischen Anschauung der Welt bleiben. Doch hierfür muss über eine mathematische Näherung ein Prozess eingeführt werden, für den es jenseits des Wunsches nach einem beobachterunabhängigen Wellenkollaps keine physikalisch konzeptionelle Begründung gibt. Dieser Ansatz stellt also letztlich nichts anderes dar als einen mathematischen Trick, mit dem man zeigen kann, dass die Wirklichkeit prinzipiell auch anders sein könnte, falls

der Trick kein Trick wäre. Anders als im Dekohärenz-Ansatz und in der Konsistente-Geschichten-Interpretation kann der Mechanismus, der den Übergang von der Quantenwelt zu klassischen Phänomenen erklärt, nicht aus der Physik selbst abgeleitet werden. Um zu einer weniger bizarren Physik zu gelangen, muss hier also auf eine Idee zurückgegriffen werden, die außerhalb – also *Meta* – der Physik liegt.

Mit dem vergleichenden Blick auf die gegenwärtigen Interpretationen der Quantentheorie können wir hier also die These wagen, dass man entweder hinzunehmen hat, dass die konsequente Ausformulierung der Quantenphysik in Dimensionen führt, die klassischerweise in den Bereich der Metaphysik gehören, oder man fügt der Physik von außen etwas hinzu, um eine Ontologie zu erhalten, die von der Physik heutzutage nicht mehr gedeckt ist. Als dritte Alternative bleibt nur der Weg, die Physik mit ihren eigenen Mitteln bis zu einem Punkt weiterzuverfolgen, in der Grund und Begründetes sowie Beobachter und Beobachtetes nicht mehr auseinanderzuhalten sind.

V OPERATIVE SCHLIESSUNG VON THEORIE: DAS BEISPIEL DER STRINGTHEORIE

»Natürlich bin ich nicht so vermessen, die hohe Mathematik dieser Theorien verstehen zu wollen, aber ich stimme normalerweise mit Feynmans Bemerkung überein, dass man einen Beweis ohnehin erst glauben soll, wenn man ihn anschaulich nachvollziehen kann, oder gar mit Wheelers Rat, wonach man als Physiker erst dann mit dem ›Rechnen‹ beginnen solle, wenn man das Ergebnis geraten (also verstanden) hat. [...]

Aber leider, so muss man lesen, entspricht der M-Theorie bisher kein (verstehbares) ›fundamentales Prinzip‹, was Witten als ein ›großes Rätsel‹ bezeichnet. Trotzdem soll sie eine ›theory of everything‹ sein (noch mehr Rätsel!). Aber es gibt ›absolutely no tie to experiment‹. Und dabei habe ich bisher immer gedacht, Physik sei eine empirische Wissenschaft. Dennoch führt diese Theorie zu ›new physical (!) insights and beautiful things‹ (wie das?). [...] WAS genau kann man aus der M-Theorie ableiten (und was ist die nun eigentlich)? Haben die Mathematiker, welche diese Theorie vornehmlich betreiben, jemals die enormen begrifflichen Probleme der QuantenMECHANIK verstanden und verinnerlicht? Nehmen sie die bedeutenden Experimente, die derzeit von Niederenergiephysikern (vor allem auf dem Gebiet der Laserphysik) durchgeführt werden, überhaupt zur Kenntnis? Quantenmechanik *ist* eine empirische Theorie (sonst wäre niemand auf so etwas Abwegiges gekommen). Aber offenbar könnten die Resultate der vorliegenden Experimente die Erkenntnisse des reinen Geistes nur stören! Und leider scheint der reine Geist sich mangels begrifflicher Phantasie eher klassisch zu bewegen. [...]

[Wissen die] etwas von Quantennichtlokalität und Zustandsverschränkung, die eine solche Trennung in der Quantentheorie gar nicht erlauben? Einen Quantenzustand kann man nicht durch räumliche Randbedingungen festlegen. [...]

Lassen Sie sich den letzten Absatz von Taubes auf der Zunge zergehen: ›String theorists have no idea where that progress (!) is

leading them.« According to Harwey, they ›still have to figure out what the hell it all has to do with reality«. Diese Frage lässt immerhin die mögliche Antwort ›gar nichts‹ zu. Nur – woher wissen dann die Herren eigentlich, dass sie Physik betreiben? Vorerst sollte man ihre Beschäftigung als das bezeichnen, was sie bisher ist: ein sehr interessantes Gebiet der Mathematik (unter Benutzung von Begriffen, die vage der Physik entlehnt sind).

Besten Gruss H. Dieter Zeh¹

Das folgende Kapitel fällt auf den ersten Blick etwas aus der Reihe der mit diesem Buch angestrebten Rekonstruktion, denn der primäre Gegenstand der Stringtheorie ist nicht die Frage nach der angemessenen Deutung oder Interpretation der Quantentheorie. Vielmehr bildet die Stringtheorie den derzeit am meisten verbreiteten Ansatz einer physikalischen Universaltheorie, mit der versucht wird, Quantentheorie und Relativitätstheorie sowie Teilchenphysik und Kosmologie in produktiver Weise zu vereinen. Sie ist ursprünglich aus der Teilchen- und Hochenergiephysik entstanden, hat sich dann allerdings innerhalb der theoretischen Physik als eine eigenständige Theorieform entfaltet.

Gerade dieser Punkt ist für unsere Diskussion von hohem Interesse, denn am Beispiel der Stringtheorie kann nochmals aufgezeigt werden, wie sich eine Theorie im Zuge der Ausdifferenzierung der theoretischen Physik in ihren zentralen Konzepten und Anschauungen operational schließt, um auf diesem Wege ein konsistentes System zu bilden, an das weitere Theoriearbeit angeschlossen werden kann.

Was sich am Beispiel einiger quantentheoretischer Theorieprojekte bereits angedeutet hat – man denke hier etwa an Feynmans Quantenelektrodynamik – wird mit der Stringtheorie auf die Spitze getrieben. Ein Zweig der theoretischen Physik richtet sich hier in einem selbst gesponnenen Theoriegewebe ein, das auf konzeptionellen Anschauungen beruht, die jedoch kaum noch durch einen Weltbezug – die Referenz auf empirisch beobachtbare Sachverhalte und deren Beziehungen – gedeckt sind, sondern überwiegend auf theoriegetriebenen Anschauungen beruhen, die innertheoretische Suchbewegungen anleiten. Da die Stringtheorie darüber hinaus bislang in einem eher geringen Ausmaße empirische Anschlussmöglichkeiten eröffnet, steht sie *pars pro toto* für die Folgeprobleme der Gesamtdisziplin Physik, die sich mittlerweile in solch extreme theoretische Höhen- und Spitzenprojekte ausdifferenziert hat.

1 Zeh (1999).

Die Stringtheorie, wenngleich institutionell hochgradig erfolgreich, ist unter Physikern nicht nur als Theorieansatz recht umstritten, sondern man wirft ihr oftmals vor, im strengen Sinne keine physikalische Wissenschaft mehr darzustellen. Dieser Konflikt steht damit paradigmatisch für die Frage, wie Theoriearbeit unter den gegenwärtigen Reflexionsverhältnissen vonstattengeht und was dies für das Selbstverständnis der zeitgenössischen Physik bedeutet.

All dies lässt den Exkurs zur Stringtheorie und der Dynamik der mit ihr verbundenen innerphysikalischen Auseinandersetzungen lohnenswert erscheinen, denn hier können die gegenwärtigen Verhältnisse von physikalisch-konzeptioneller Anschauung, Mathematik und Experimentalphysik nochmals pointiert herausgearbeitet werden.

Beschreiben wir zunächst mit Brian Greene die Ursprünge der Stringtheorie, um dann ihre moderne Konzeption in den Grundzügen darzustellen.² Anschließend werden wir uns ausführlicher mit der innerphysikalischen Auseinandersetzung um die Stringtheorie beschäftigen, um abschließend auf dieser Grundlage die derzeitigen Bedingungen physikalischer Theoriebildung ausführlicher zu reflektieren.

Geschichte der Stringtheorie

Der Mathematiker Gabriele Veneziano entdeckte 1968 eine Formel, mit der sich Datenmuster aus Messergebnissen zur starken Kernkraft beschreiben lassen. Er hatte jedoch keine Vorstellung darüber, was die mathematische Beschreibung physikalisch oder sonst wie anschaulich bedeuten könnte.

Leonard Susskind, Holger Nielsen und Yoichiro Nambu entwickelten daraufhin die Idee, dass die mathematischen Eigenschaften durch kleine elastische Stränge, die gleichsam Fäden von Energie darstellen, erklärt werden können. Der Formalismus bekommt hierdurch eine gewisse Anschaulichkeit, an der jetzt auch physikalisch konzeptionelle Überlegungen ansetzen können. Die Grundidee der Stringtheorie war hiermit geboren. Später zeigte sich jedoch, dass sich die Wechselwirkungen der Kernkräfte mit diesem Modell nicht erklären lassen.

Wenngleich sich der String-Ansatz für die empirische Fragestellung, für die er entwickelt wurde, unfruchtbar erwies, begannen einige wenige Wissenschaftler aus der theoretischen Physik die mathematischen Möglichkeiten des String-Modells auszuloten. Mit der sogenannten Superstringtheorie gelang es ihnen schließlich, einen Ansatz zu entwickeln, mit dem die unterschiedlichen Elementarteil-

2 Greene (2006; 2008).

chen sozusagen als sich selbst konstituierende Schwingungsfäden beschrieben werden können.³ Die Stringtheorie beginnt dabei mit einer klassischen Modellierung der Welt. Die Fäden werden zunächst als klassische Objekte konstruiert, um dann bei Bedarf zusätzlich noch eine Quantisierung einzuführen:

»Der mathematische Formalismus, der der Stringtheorie zugrunde liegt, beginnt mit Gleichungen, die die Bewegung eines winzigen, unendlich dünnen *klassischen* Fadens beschreiben – Gleichungen, die weitgehend schon vor dreihundert Jahren von Newton hätten aufgeschrieben werden können. Diese Gleichungen werden dann *quantisiert*. Das heißt, durch ein systematisches Verfahren, das die Physiker im Laufe von mehr als fünfzig Jahren entwickelt haben, werden die klassischen Gleichungen in eine quantenmechanische Form gebracht, so daß Wahrscheinlichkeiten, Unschärfe, Quantenfluktuationen und so fort Eingang finden. [...] Allem Anschein nach muß die vollständige Formulierung der String/M-Theorie mit der traditionellen Vorgehensweise brechen und von Anfang an eindeutig quantenmechanischen Charakter haben. Gegenwärtig weiß niemand, wie das geschehen soll.«⁴

Innerhalb der Stringtheorie erscheinen die verschiedenen Elementarteilchen durch ineinander überführbare Symmetrieprinzipien miteinander verbunden. Auf diese Weise kommt man in der theoretischen Modellierung zu Teilchen, die auf einem Photon basieren, aber einen doppelt so großen Spin aufweisen. Empirisch sind solche Teilchen bislang nicht entdeckt worden, aber theoretisch ist die Idee verlockend, dass es sich hier um ein sogenanntes Graviton handeln könnte. Dieses würde dann, homolog zu den anderen bekannten Teilchen, welche die Feldwechselwirkung moderieren, die Gravitationskraft vermitteln. Die Stringtheorie bietet hiermit eine Möglichkeit,

3 »Die Superstring-Theorie geht auf eine Idee zurück, die man das ›Bootstrap-Prinzip (*bootstrap*, ›Stiefelschlaufe‹) nennt, in Anlehnung an die alte englische Redewendung *to put oneself up by one's own bootstraps*, was so viel bedeutet wie ›es aus eigener Kraft zu etwas bringen‹, oder ›sich am eigenen Schopf aus dem Sumpf ziehen‹. Dem lag die Annahme zugrunde, man könne eine bestimmte Klasse von Elementarteilchen so behandeln, als seien sie in selbstkonsistenter Weise aus Kombinationen ihrer selbst zusammengesetzt. Sämtliche Teilchen fungierten demnach sowohl als Konstituenten wie auch (sogar, in gewisser Weise die Fermionen) als Quanten der Kraftfelder, die die Konstituenten zusammenhalten. Außerdem sollen sie als Bindungszustände der Konstituenten auftreten« (Gell-Mann 1994, 195).

4 Greene (2006, 440 f.).

das bislang nicht befriedigend gelöste Problem der Verbindung von Quantentheorie mit der allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Schwerkraft beschreibt, anzugehen.⁵

Man hatte jetzt also ein wichtiges physikalisches Problem gefunden, auf das der mathematische Formalismus der Stringtheorie zu passen scheint. 1984 gelang die mathematisch widerspruchsfreie Formulierung der Stringtheorie. Von nun an rückte die Stringtheorie praktisch über Nacht ins Zentrum der Aufmerksamkeit der theoretischen Physik.

Schwingende Fäden anstelle von Teilchenpunkten

Worauf beruht die Grundkonzeption der Stringtheorie? Ihre Grundidee besteht darin, sich Teilchen nicht mehr punktförmig, sondern als einen in der Länge ausgedehnten schwingenden Energiefaden vorzustellen. »Laut der Stringtheorie haben diese Saiten aus schwingender Energie keine Dicke, sondern nur eine Länge und sind daher eindimensionale Gebilde.«⁶ Da Strings in verschiedenen Modi und Frequenzen schwingen können, lässt sich jetzt die Teilchenwelt von einem Grundbaustein, dem String, her beschreiben, aus dem sich durch unterschiedliche Schwingungsmuster das ganze Spektrum der Teilchenwelt aufgrund von Symmetrieüberlegungen generieren lässt. So schwingen schwere Teilchen rascher, während einem masselosen Teilchen wie dem Photon oder dem postulierten Graviton sehr sanfte und leichte Schwingungsmuster zugeordnet werden. Weitere Teilcheneigenschaften, wie die elektrische Ladung oder der Spin, werden durch kompliziertere Merkmale der Stringschwingung abgebildet. Wohlgemerkt: Niemand hat derzeit einen String gesehen und jenseits der mathematischen Konsistenz der Stringtheorie gibt es für eindimensional ausgedehnte Fadenteilchen keine Hinweise für deren Existenz.

Die Stringtheorie umschifft gewissermaßen die Probleme, welche sich bei der Verbindung von Quantentheorie und Gravitationstheorie

5 »Statt die Stringtheorie als quantenmechanische Theorie der starken Kernkraft zu betrachten, erklärten sie, die Theorie sei zwar als ein Versuch zum Verständnis dieser Kraft entwickelt worden, bedeute in Wirklichkeit aber die Lösung eines anderen Problems: Es handle sich um die erste quantenmechanische Theorie der Gravitationskraft. Das masselose Spin-zwei-Teilchen, das von der Stringtheorie vorhersagt werde, sei das Graviton, daher erhielten die Gleichungen der Stringtheorie zwangsläufig eine quantenmechanische Beschreibung der Gravitation« (Greene 2008, 382 ff.).

6 Greene (2008, 389).

ergeben. Wir erinnern uns: In Größenordnungen der Planck-Länge treten hochgradig bizarre Quantenphänomene auf, in denen Zeit, Raum und Kausalität durcheinandergeraten. Eine Quantifizierung der Raumzeit hätte damit Konsequenzen, die weder durch die Relativitätstheorie noch durch irgendeine empirische Beobachtung gedeckt sind. Da aber jetzt die Stringtheorie annimmt, dass die Strings eine Größe haben, die deutlich über der Planck-Länge liegt, würden also in Bezug auf die Gravitation die störenden Quantenprozesse gar nicht erst auftreten können. Das Problem der Vereinigung dieser nicht zu vereinbarenden theoretischen Ansätze wird durch das Postulat der Strings sozusagen wegdefiniert.

Das mathematische System der Superstringtheorie bringt allerdings die Eigenart mit sich, dass mindestens neun Raumdimensionen angenommen werden müssen, damit die Theorie konsistent formuliert werden kann:⁷

»Das ist ein Ergebnis von grundsätzlich anderer Art, eines, das es in der Geschichte der Physik noch nicht gegeben hat. Vor den Strings hat noch nie eine Theorie irgendeine Aussage über die Anzahl der räumlichen Dimensionen im Universum getroffen.«⁸

»[M]ehr Dimensionen bedeuten mehr mögliche Schwingungsmuster [...]. [W]enn ein String in einer vierten räumlichen Dimension schwingen kann, ist er in der Lage, mehr Schwingungsmuster auszuführen, als er es in dreien könnte [...]. [D]ie Zahl der unabhängigen Schwingungsmuster (muss) eine ganze bestimmte Bedingung [erfüllen]. Wird die Bedingung verletzt, verlieren die mathematischen Grundlagen der Stringtheorie ihre Gültigkeit, und die Gleichungen werden sinnlos. In einem Universum mit drei Raumdimensionen ist die Zahl der möglichen Schwingungsmuster so klein, dass die Bedingung nicht erfüllt wird. Auch fünf, sechs, sieben oder acht Dimensionen ändern nichts an diesem Umstand. Erst bei neun Raumdimensionen ist die Bedingung hinsichtlich der Zahl von Schwingungsmustern vollkommen erfüllt. Das ist die Art und Weise, wie die Stringtheorie die Zahl der Raumdimensionen bestimmt.«⁹

7 »Die Gleichungen der Superstringtheorie sind mathematisch nur schlüssig, wenn das Universum *neun* Dimensionen des Raums oder, unter Einbeziehung der Zeitdimension, *zehn* Raumzeitdimensionen besitzt« (Greene 2008, 404 f.).

8 Greene (2008, 413).

9 Ebd., 416 f.

Um im Sinne unseres bisherigen Duktus wieder das Verhältnis von Mathematik und konzeptioneller Anschauung sowie zu den Befunden aus der Experimentalphysik aufzuzeigen: Wir treffen hier auf ein mathematisches Modell, das auf der Konzeption eines schwingenden Urfadens beruht, für den es bislang keine empirische Evidenz gibt, das jedoch unter der Annahme einer zehndimensionalen Raumzeitmathematisch konsistent formuliert werden kann. Während die Quantentheorie mit einem empirischen Problem begann, für das sich eine mathematische Lösung fand, für die es noch keine physikalisch-konzeptionelle Anschauung gab, beginnt die Stringtheorie mit einer konzeptionellen Idee (die Welt besteht aus schwingenden Saiten), die sich mathematisch durchführen lässt (neundimensionale Schwingungsräume) und für die sich dann Problemfelder finden lassen, die durch das Modell vermeintlich gelöst werden (das Problem der Quantisierung der Schwerkraft).

Hiermit deutet sich eine neue Qualität innerhalb der physikalischen Theoriebildung an, denn eine solche Theoriebildung findet ihren Ausgangspunkt kaum noch in empirischen Problemlagen. Vielmehr stehen jetzt vermehrt die Form- und Strukturmöglichkeiten hoch abstrakter mathematischer Modelle im Vordergrund, deren mögliche Verbindungen zur theoretischen Physik jetzt systematisch ausgelotet werden.

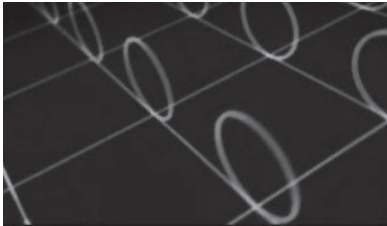


Abb. 20: Auf einer Fläche angeheftete Extradimension¹⁰

Was lässt sich aber nun mit den hinzugewonnen Raumdimensionen theoretisch anfangen? Welche Eigenschaften zeigen sie? Da die zusätzlichen Raumdimensionen bislang empirisch nicht nachweisbar sind, müssen sie in sich auf engem Raum aufgewickelt sein. Man kann sich das jetzt etwa so vorstellen, dass an einer der uns aus dem Alltag bekannten drei Raumdimensionen zusätzliche Dimensionen angeheftet sind, die dann aber so stark gekrümmt sein müssen, dass sie sich im Verhältnis zu unseren vertrauten Größenordnungen in sehr kleinen Ringen abschließen.¹¹ Mit den derzeitigen Möglich-

¹⁰ Bildquelle: http://www.speed-light.info/speed_of_light/extra_dimension.jpg (download 11.7.2011).

¹¹ »Nach dem Kaluzu-Klein-Ansatz ist auf sehr kleinen Skalen an jedem Punkt des uns vertrauten Raums eine kreisförmige Extradimension angeheftet« (Greene 2008, 411).

keiten der Experimentalphysik lassen sich Verhältnisse bis in einen Bereich von etwa einem Hundertstel Mikrometer untersuchen. Die verborgenen Dimensionen müssten also aus empirischen Gründen unterhalb der Nachweisgrenze eingefaltet sein, denn man hat sie bislang noch nicht beobachtet.

Die Gleichungen der Stringtheorie legen Rahmenbedingungen fest, die Aussagen darüber erlauben, in welchen topologischen Formen die Zusatzdimensionen auftreten. Als eine Lösung haben sich die so genannten Calabi-Yau-Räume gezeigt. Dabei ergibt sich für die Stringtheorie jedoch das Problem, dass diese Räume nicht eindeutig definiert sind. Es ist eine riesige Zahl von Lösungen denkbar, die mit diesen Modellen vereinbar sind.¹² Die Stringtheorie führt derzeit also keineswegs zu einer schlüssigen Weltformel. Sie stellt eher eine mathematische Metatheorie dar, die Gruppen von Modellen beschreibt, die prinzipiell im Einklang mit den derzeitigen physikalischen Konzepten über die Gesetze unseres Universums stehen könnten.

Zudem hat sich gezeigt, dass es nicht nur eine Stringtheorie gibt, sondern mindestens fünf verschiedene Varianten, die jeweils von einer anderen Modellierung ausgehen und entsprechend andere Weisen der Beschreibung des Universums generieren.

Die unterschiedlichen Stringtheorien lassen sich wiederum in ein übergreifendes mathematisches Modell überführen, das jedoch eine Raumdimension mehr, also mit der Zeitdimension zusammen elf Dimensionen benötigt. Diese übergreifende Konzeption wird unter dem Titel M-Theorie referiert:

»Als Ende der achtziger und Anfang der neunziger Jahre viele Physiker eifrig nach einer Erklärung der einen oder der anderen Stringtheorie suchten, war das Rätsel der fünf Versionen kein Problem, das die Wissenschaftler in ihrem Forschungsalltag beschäftigte, sondern nur eine jener wenig aufregenden Fragen, von denen jeder annahm, sie würden in ferner Zukunft behandelt werden, wenn das Verständnis der einzelnen Stringtheorien erheblich weiter gediehen sei.

Fast aus heiterem Himmel wurden diese bescheidenen Hoffnungen im Frühjahr 1995 bei weitem übertroffen. Gestützt auf die Vorar-

12 »Unsere heutige Kenntnis der String-Gleichungen liefert uns nämlich keinen Hinweis darauf, welche Form wir aus dem großen Angebot auswählen sollen. Aus Sicht der bekannten Gleichungen ist jeder Calabi-Yau-Raum so gut wie jeder andere. Die Gleichungen bestimmen noch nicht einmal die Größe der Zusatzdimensionen. Da wir die Extradimensionen nicht sehen, müssen sie klein sein, doch wie klein genau, ist ebenfalls eine ungelöste Frage« (Greene 2008, 418).

beiten zahlreicher Stringtheoretiker [...], entdeckte Edward Witten – seit zwei Jahrzehnten der namhafteste Stringtheoretiker der Welt – eine verborgene Einheit, die alle fünf Stringtheorien miteinander verband. Wie Witten zeigte, sind die fünf Theorien nicht etwa verschieden, sondern in Wirklichkeit fünf unterschiedliche Möglichkeiten, eine einzige Theorie mathematisch zu analysieren. [...] Die für die Vereinheitlichung verantwortliche Master-Theorie wird vorläufig als M-Theorie bezeichnet, wobei die schillernde Konnotationsvielfalt des Platzhalter M – Master? Majestätisch? Mutter? Magisch? Mysterium? Matrix? – darauf wartet, von den weltweiten Forschungsanstrengungen, die im Anschluss an Wittens beflügelte Einsicht unternommen werden, mit endgültiger Bedeutung gefüllt zu werden.«¹³

Die M-Theorie zeigt etwas andere topografische Eigenschaften als die untergeordneten Stringtheorien. In ihr kommen nicht nur Strings vor, sondern auch mehrdimensionale schwingende Membranen. Dies inspirierte Gerhard 't Hooft und Leonard Susskind dazu, ein Modell zu entwickeln, entsprechend dessen unsere Alltagsrealität nichts anderes darstellt als eine »holographische Projektion von physikalischen Prozessen, die auf fernen, zweidimensionalen Flächen stattfinden«.¹⁴

Theorie ohne Empirie

Wie bereits gesagt, es gibt derzeit keine explizit nur durch die Stringtheorie abgeleitete Vorhersage, die durch die Experimentalphysik bestätigt wurde. Prinzipiell ist dies jedoch nicht ausgeschlossen. Möglicherweise könnte es mit genaueren Messverfahren gelingen, größere Strings nachzuweisen oder in Sphären vorzudringen, in denen sich die postulierten eingefalteten Dimensionen offenbaren. Umgekehrt ist die Stringtheorie bislang auch nicht widerlegt worden. Mit Blick auf ihre komplexen mathematischen Modellierungsleistungen ist jedoch zu fragen, ob es innerhalb der Stringtheorie überhaupt noch um die Frage der experimentellen Verifikation oder Widerlegung gehen kann. Einiges spricht dafür, dass eine solchermaßen hochgetriebene Theorie einen Formenreichtum bietet, über den sich Theorie in mehr oder weniger produktiver Weise mit sich selbst beschäftigen kann, um damit in ihrer metatheoretischen Anlage weitgehend unabhängig von empirischen Ergebnissen forschen und arbeiten zu können.

13 Greene (2008, 425 f.).

14 Greene (2008, 425 f.). Siehe auch Susskind (1994).

Wie bereits erwähnt, beruht die Stringtheorie auf einer Modellierung, die zunächst mit den Methoden der klassischen Physik beginnt. In mehrdimensionalen Räumen schwingende Fäden oder Membranen können mit dem Instrumentarium der Newtonschen Physik beschrieben werden. Erst sekundär wird dann eine Quantisierung der Variablen eingeführt. Das Modell beruht damit auf einer vom Hintergrund unabhängigen Raumzeit, die gleichsam das Gefäß darstellt, in dem sich das schwirrende Gewebe schwingender Fäden und Membranen abspielt.

Viele Stringtheoretiker sind sich durchaus bewusst, dass hiermit eine Anfangsentscheidung getroffen worden ist, die theoretisch problematisch ist und irgendwann einer Korrektur bedarf. Wie und ob dies geleistet werden kann, bleibt auch aus theoretischer Perspektive eine offene Frage:

»Allem Anschein nach muß die vollständige Formulierung der String/M-Theorie mit der traditionellen Vorgehensweise brechen und von Anfang an eindeutig quantenmechanischen Charakter haben.

Gegenwärtig weiß niemand, wie das geschehen soll. Doch für viele Stringtheoretiker steht fest, daß eine derartige Verankerung der quantenmechanischen Prinzipien in der theoretischen Beschreibung des Universums die nächste große Umwälzung für unser Verständnis der Welt bedeuten wird. So meint Cumrun Vafa: »Ich glaube, daß eine Neuformulierung der Quantenmechanik viele ihrer Rätsel lösen wird. Allgemein geht man wohl davon aus, daß die unlängst entdeckten Dualitäten auf einen neuen, geometrischeren Rahmen der Quantenmechanik schließen lassen, in dem Raum, Zeit und Quanteneigenschaften untrennbar miteinander verbunden sind.« Und Edward Witten: »Ich glaube, der logische Status der Quantenmechanik wird sich in einer Weise verändern, wie sich der logische Status der Gravitation gewandelt hat, als Einstein das Äquivalenzprinzip entdeckt hat. Dieser Prozess ist bei der Quantenmechanik noch lange nicht abgeschlossen, doch ich denke, man wird eines Tages auf unsere Zeit zurückblicken als die Epoche, wo er begann.«

Mit vorsichtigem Optimismus dürfen wir hoffen, daß eine Neuformulierung der Quantenmechanik im Rahmen der Stringtheorie einen leistungsfähigeren Formalismus hervorbringen wird, der in der Lage sein wird, uns viele Fragen zu beantworten, zum Beispiel warum es so etwas wie Raum und Zeit gibt. Vielleicht kommen

wir dann auch der Beantwortung der Leibnizschen Frage einen Schritt näher – warum es überhaupt etwas gibt und nicht nichts.«¹⁵

All dies lässt deutlich werden, dass die Stringtheorie ein für die theoretische Physik attraktives, jedoch keinesfalls unumstrittenes Projekt darstellt. Wir treffen hier auf eine außerordentlich hohe mathematische Eleganz und auf eine faszinierende Grundidee, doch ebenso schnell kommt der Verdacht auf, dass es sich bei alledem nur noch um ein mathematisches Glasperlenspiel handeln könnte, indem sich theoretische Formen auf theoretische Formen beziehen, ohne dabei jedoch einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn für die Physik generieren zu können.

Lassen wir hier *pars pro toto* neben dem Eingangszitat von Dieter Zeh zwei weitere kritische Physikerstimmen zu Wort kommen. Lee Smolin, der seinerseits versucht, die Gravitation über einen primär quantentheoretischen Ansatz zu erklären, der im Gegensatz zur Stringtheorie Raum und Zeit als abhängige Variablen betrachtet,¹⁶ formuliert etwa:

»Supersymmetrie und höhere Dimensionen haben sich als Fälle erwiesen, in denen enorme Anstrengungen unternommen werden mussten, um die Konsequenzen der vorgeschlagenen Vereinheitlichung zu verbergen. [...] Im Falle höherer Dimensionen stehen fast alle Lösungen der Theorie im Widerspruch zu den Beobachtungen. Die seltenen Lösungen, die etwas Ähnliches wie unsere Welt offenbaren, sind instabile Inseln in einem riesigen Ozean von Möglichkeiten, die fast alle vollkommen exotisch aussehen.

Kann die Stringtheorie die Probleme vermeiden, die die früheren höherdimensionalen und supersymmetrischen Theorien heimsuchten? Das ist unwahrscheinlich – einfach schon deshalb, weil es in ihnen viel mehr zu verbergen gibt als in der Kaluzu-Klein-Theorie oder den supersymmetrischen Theorien. Der von der Stanford-Gruppe vorgeschlagene Mechanismus zur Stabilisierung der höheren Dimensionen könnte Erfolg haben, aber der Preis ist hoch, führt er doch zu einer enormen Ausdehnung der Landschaft vermuteter Lösungen. Der Preis für die Vermeidung der Probleme, die das Schicksal der Kaluzu-Klein-Theorie besiegelten, ist daher im günstigsten Fall die Akzeptanz eines von Stringtheoretikern ursprünglich abgelehnten Standpunkts: Dass nämlich eine enorme Zahl von Stringtheorien als potenzielle Beschreibung der Natur gleich ernst zu nehmen seien. Daraus folgt, dass die ursprüngliche

15 Greene (2006, 440 f.).

16 Siehe zur Grundidee der Quantenschleifengravitation Smolin (2004).

Hoffnung auf eine eindeutige Vereinheitlichung und damit falsifizierbare Vorhersagen zur Elementarteilchenphysik aufgegeben werden muss.«¹⁷

Smolin verweist hier aus einer Popperianischen Perspektive auf den wunden Punkt der Stringtheorie. Da sich mit ihr eine solche Vielfalt an Modellen des Universums bauen lässt, sagt sie streng genommen nichts aus. So wie sich für jede Lebenslage ein Bibelspruch finden lässt, lassen sich für nahezu jeden empirischen Sachverhalt stringtheoretische Lösungen anbieten. Die Theorie verfügt aus sich heraus also kaum mehr über Erklärungskraft zu sagen, warum die Dinge so sind, wie wir sie vorfinden.

Im gleichen Sinne formuliert Laughlin aus einer emergenztheoretischen Perspektive:

»Die Stringtheorie dreht sich um die Untersuchung einer imaginären Art von Materie, die sich aus langgezogenen Objekten, den Strings, zusammensetzt, nicht aus punktförmigen Teilchen, aus denen, wie experimentell gezeigt worden ist, alle bekannten Materiearten – einschließlich heißer nuklearer Materie – bestehen. Es macht ungeheuren Spaß über die Stringtheorie nachzudenken, weil viele ihrer inneren Beziehungen unerwartet einfach und schön sind. Abgesehen davon, dass sie den Mythos von der ultimativen Theorie stützt, hat sie jedoch keinen praktischen Nutzen. Es gibt keine experimentellen Beweise für die Existenz von Strings in der Natur, und die spezielle Mathematik ermöglicht es auch nicht, bekanntes experimentelles Verhalten leichter vorherzusagen oder zu berechnen. Außerdem sind die komplexen, mit den mächtigen Beschleunigern von heute zugänglichen spektroskopischen Eigenschaften des Raums in der Stringtheorie nur als ›Niedrig-Energie-Phänomenologie‹ zu erklären, was eine abwertende Bezeichnung für transzendente, emergente Eigenschaften der Materie ist, die nicht von grundlegenden Prinzipien aus zu berechnen sind. In Wahrheit ist die Stringtheorie ein Schulbeispiel für eine Trügerische Truthenne, ein schöner Satz von Ideen, die immer knapp außerhalb der Reichweite bleiben werden. Weit davon entfernt, eine wunderbare technische Hoffnung für ein großartigeres Morgen abzugeben, ist sie stattdessen die tragische Folge eines überholten Glaubenssystems – in dem Emergenz keine Rolle spielt und dunkle Gesetze nicht vorkommen.«¹⁸

17 Smolin (2009, 271).

18 Laughlin (2007, 309).

Die Stringtheorie spaltet offensichtlich die theoretische Physik. Die einen sehen in ihr die Chance zum Übergang in ein ultimatives Verstehen von Welt, die anderen betrachten sie als ein nutzloses mathematisches Formenspiel, das die Weltverhältnisse eher mystifizierend verklärt denn erhellen kann.

Theoriebildung und operationale Schließung

Versuchen wir zunächst, die Fronten mit Blick auf das Verhältnis von Anschauung, Theorie und empirischer Forschung etwas genauer zu klären. Wir erinnern uns, dass sich gegen Ende des 19. Jahrhunderts die Mathematik von der Physik als eine eigenständige wissenschaftliche Disziplin ausdifferenziert hat. Gegenstand ihrer Wissenschaft ist die Vertiefung der Einsichten in die mathematische Formbildung in Referenz auf eine strenge Beweisführung in Hinblick auf die Regeln der vollzogenen mathematischen Operationen. Mit Hilfe der hoch abstrakten Formsprache der Mathematik konnte sich die junge Disziplin der Quantenphysik von den klassischen physikalischen Konzeptionen lösen und eine Theorie generieren, welche zunächst auf jegliche physikalische Anschauung verzichten konnte. Nach dem Erfolg der Quantentheorie konnte die Physik langsam die konzeptionelle Deutungshoheit über die Quantentheorie wiedergewinnen, um diese in ein fruchtbares Wechselspiel von Experiment und physikalischer Theoriebildung zu überführen.

Die Stringtheorie kann gewissermaßen als eine Chimäre aus Mathematik und Physik angesehen werden, die sich selbst zu einer eigenständigen, autonomen Wissenschaftsdisziplin entwickelt hat. Sie folgt dabei der metatheoretischen Entscheidung, alles aus schwingenden Fäden aufgebaut zu sehen und konstruiert auf dieser Basis ein mathematisches Formenspiel, das sich auf mögliche Passungen in Hinblick auf die Befunde der Experimentalphysik und der theoretischen Physik untersuchen lässt.

Eine gute Vorarbeit zur disziplinären Schließung der Stringtheorie hat Richard Dawid mit seinem Aufsatz »Wenn Naturwissenschaftler über Naturwissenschaftler streiten« geleistet. Rekurrieren wir nun etwas ausführlicher auf seine Arbeit, um abschließend seine Argumentation im Sinne unserer Zwecke etwas anders zu gewichten.

Zunächst weist Dawid darauf hin, dass es innerhalb der Physik schon immer Theoriebildungen gab, in denen hochgradig spekulativ vorgegangen wird. Allerdings waren diese in der Regel so angelegt, dass in absehbarer Zeit empirisch überprüfbare Hypothesen aus ihr

abgeleitet werden konnten. So konnte etwa das ›Standardmodell‹ der Elementarteilchen, das in den 1960er-Jahren entwickelt wurde, wenige Jahre später durch die experimentellen Befunde aus der Hochenergiephysik unterfüttert werden.¹⁹ Demgegenüber ist seit den 25 Jahren, in denen die Stringtheorie diskutiert wird, keine hinreichend eindeutige Formulierung einer Theorieanlage formuliert worden, so dass sich belastbare und empirisch überprüfbare Hypothesen generieren ließen: »Die Stringtheorie bleibt auch über dreißig Jahre nach ihrer ersten Formulierung eine sehr unvollständige Theorie. Weder ein vollständiger konzeptioneller Rahmen noch die quantitative Berechnung konkreter stringtheoretischer Prognosen scheinen heute in Reichweite.«²⁰

Man könnte den akademischen Erfolg der Stringtheorie jetzt durch die mikropolitischen Dynamiken einer Gemeinde von theoretischen Physikern erklären, bei der es ja immer auch um die Besetzung von Lehrstühlen mit Vertretern des eigenen Paradigmas geht. Diese Erklärung hält Dawid jedoch für wenig überzeugend. Zum einen gehören die Stringtheoretiker in der Regel zu der Gruppe der besonders begabten und intelligenten Physiker. Bei diesen wäre eigentlich – sobald sie auf Lehrstühlen verankert sind – nicht zu erwarten, dass sie ihre Forschung nur aus Opportunitätsgründen betreiben. Zum anderen zeichnen sich Stringtheoretiker nicht unbedingt dadurch aus, alle dem gleichen vorgegeben Pfad zu folgen. Sie bilden eher eine recht heterogene Gruppe, in der unterschiedlichste theoretische Projekte verfolgt und ausprobiert werden.²¹

Üblicherweise sind die Stringtheoretiker durchaus offen für Kritik an ihrem Ansatz. »Sie räumen ein, dass das Fehlen einer empirischen Bestätigung und die großen Mängel im Verständnis der Theorie gravierende Probleme darstellen. Sie vertreten jedoch die Position, dass die innertheoretische Bewertung der Theorie sowie deren Entwicklungsdynamik dennoch starke Indizien für deren Gültigkeit liefern. Wenn Stringtheoretiker diese Indizien auch ohne empirische Bestätigung in gewissem Grade als Erfolg anrechnen, so basiert dies ihrem

19 Siehe hierzu aus Perspektive der *science studies* die wichtige Studie von Pickering (1984).

20 Dawid (2008, 400).

21 »Als zumindest ebenso augenfälliges Charakteristikum des stringtheoretischen Diskussionsstils könnte man etwa einen sehr offenen und undogmatischen Umgang mit neuen Ideen und eine starke Neigung zum Hinterfragen überkommener Denkweisen anführen. Im Bereich der Stringtheorie arbeitet unbestreitbar ein beträchtlicher Anteil der innovativsten und kreativsten Physiker der Gegenwart. Das Bild einer fremdgesteuerten Masse, die unkritisch den Vorgaben einiger Propheten folgt, erscheint daher kaum angemessen« (Dawid 2008, 408).

Verständnis nach nicht auf einer willkürlichen Absenkung von Kriterien wissenschaftlichen Erfolges, sondern auf einer durch die Theorie selbst induzierten Stärkung theoretischer Bewertungssätze.«²² Zudem werde »das Vertrauen in die Stringtheorie dadurch erhöht, dass die Theorie Verbindungen und Zusammenhänge zwischen Phänomenen offenlegt, die zur Zeit der Konstruktion der Theorie nicht ersichtlich waren.«²³ In den Augen der Stringtheoretiker lässt die »Gesamtheit der theoretischen Argumente zur Stützung der Stringtheorie« die »Annahme plausibel erscheinen, dass die heute vorhandenen empirischen Daten, auch wenn sie keinen direkten Beleg für die Stringtheorie liefern, in ihrer Gesamtheit dennoch nur diese als universale und kohärente physikalische Beschreibung zulassen. Rein theoretische Argumente erhalten hier also eine ungewöhnlich starke Rolle in der Bewertung der Gültigkeit einer wissenschaftlichen Theorie.«²⁴

Der letztbenannte Aspekt ist entscheidend für unsere Diskussion, denn er zeigt auf, dass hier eine veränderte Form des Physik-Betreibens am Entstehen ist, die in eine weitere disziplinäre Ausdifferenzierung der Physik mündet. Mit der Stringtheorie begegnen wir einem Gebiet der theoretischen Physik, das sich darauf spezialisiert hat, die Potenziale theoretischer Formen auszuloten, und sich in seinem Alltagsgeschäft weitgehend von experimentalphysikalischen Anschlüssen gelöst hat.

Physik kommt hier als Theorie zu sich selbst. Das, was in den Fächern der Geistes- und Sozialwissenschaften schon längst geschehen ist,²⁵ passiert nun auch in der Physik: Die Beschäftigung mit

22 Dawid (2008, 405).

23 Ebd., 406.

24 Ebd., 407.

25 Siehe etwa Mayntz zur konstitutionellen Wirklichkeitsferne der Rational Choice Theorie: »Da *Rational Choice* die am besten ausgearbeitete, am weitesten formalisierte und mathematisch eleganteste Sozialtheorie ist, entzündet sich die Diskussion heute vor allem am augenscheinlichen Widerspruch zwischen dem auch in der Soziologie benutzten Modell des rationalen Akteurs und den dieses Modell in Frage stellenden Ergebnissen der kognitiven Psychologie, der experimentellen Spieltheorie und der experimentellen Wirtschaftsforschung. Einerseits wird behauptet, dass die experimentellen Ergebnisse das Modell des rationalen Akteurs empirisch widerlegen und damit unbrauchbar machen (zum Beispiel Frohlich/Oppenheimer 2006); dem wird entgegengehalten, dass diese experimentellen Ergebnisse zwar eine Herausforderung für die formale Modellierung darstellen, den Kern des Modells des rationalen Akteurs aber nicht antasten (zum Beispiel Gintis 2005). Der Punkt, an dem mangelnde Wirklichkeitsnähe die Fruchtbarkeit eines theoretischen Modells

den Möglichkeiten bestimmter Theorieformen bildet jetzt auch hier einen eigenen, unabhängigen Diskurs, der sich in gewisser Distanz zur empirischen Relevanz perpetuieren und fortentwickeln kann. Hiermit verschwindet aber auch für die Naturwissenschaften der sichere Hafen einer eindeutigen Selbstkonditionierung durch das Paar empirische Beobachtung/mathematische Beschreibung.²⁶

Es werden jetzt unterschiedliche mathematische Modelle und physikalische Konzeptionen möglich, von denen aus die physikalische Welt betrachtet und analysiert werden kann. So wie etwa in der Soziologie grundlegende metatheoretische Entscheidungen – etwa die Frage, ob man von einem systemtheoretischen Blickwinkel oder akteurstheoretisch anfängt – kaum mehr durch die empirischen Sachlagen berührt werden können, begegnen wir jetzt auch in der Physik einer Pluralität theoretischer Zugänge. Theoretische Physik lässt sich auf Basis der Stringtheorie betreiben, aber ebenso aus einer emergenztheoretischen Perspektive oder nach einem reduktionistischen Baukastenprinzip, wie es mit der Quantenschleifengravitation verfolgt wird.²⁷

Für die gegenwärtige theoretische Physik scheint die Leitdifferenz *empirisch/mathematisch* nicht mehr auszureichen, um die theoretischen und methodologischen Entwicklungen des Faches zu konditionieren. Es wird hiermit deutlich, dass auch die Physik ein *sinnförmiges* Unternehmen ist, dass *nolens volens* von der Wahl willkürlich gesetzter Ausgangsunterscheidungen abhängig ist. Ob man reduktionistisch herangeht oder die Prozesse von makroskopischen Ordnungsprinzipien her beschreibt, ob man die Modellierung mit Teilchen, Stringfäden oder ›Wellen aus nichts‹ beginnt, zeigt sich selbst als kontingente Theorieentscheidung. Sie beruht auf der Wahl eines metatheoretischen Bezugspunktes, der – sobald einmal gewählt – einen mathematischen und konzeptionellen Strukturreichtum entfaltet,

beeinträchtigt, ist schwer zu bestimmen; er hängt mit einer methodologischen Grundsatzentscheidung zusammen, der Wahl zwischen einem eher empirisch-induktiven oder eher axiomatisch-deduktiven Vorgehen. Wenn wir theoretische Modelle durchspielen wollen, sind wirklichkeitsnahe Verhaltensannahmen nicht zentral« (Mayntz 2006, 14).

26 »Die Diskussion um den gegenwärtigen Status der Stringtheorie kreist in direktem Gegensatz dazu um die Frage, wie weit gerade die konsequente Anwendung streng formalisierter und als kanonisch anerkannter naturwissenschaftlicher Argumentationsformen in deren angestammten Fachgebiet vom etablierten Wissenschaftsparadigma wegführen kann und darf. Die Prinzipien wissenschaftlichen Handelns stehen im Rahmen der Debatte um Stringphysik gerade dort zur Disposition, wo sie am sichersten verankert schienen« (Dawid 2008, 416).

27 Siehe zu Letzterem etwa Smolin (2009)

an dem man sich orientieren kann, mit dessen Hilfe Beschreibungen angefertigt werden können und aus dem sich dann gegebenenfalls auch empirisch überprüfbar Hypothesen ableiten lassen.

Sobald eine solchermaßen entwickelte Theorieform einen gewissen Grad an interner Ausdifferenzierung erreicht hat, wird die Frage der empirischen Relevanz für die Theoriearbeit immer unbedeutender. Die Theorieform selbst erscheint dann so strukturreich, dass allein das Ausloten ihrer Möglichkeiten ein hinreichend attraktives Projekt darstellt, um intelligente Physiker zu faszinieren. Derzeit verfügt die Physik noch nicht über eine Reflexionstheorie, um solch komplexe Theorieverhältnisse angemessen beschreiben oder verstehen zu können. Bislang bleibt ihr nur der Streit unterschiedlicher Schulen, ohne dabei jedoch über eine Sprache zu verfügen, die Ursachen der offensichtlichen Differenzen ans Licht zu bringen.

Diese liegen in der Geschichte einer zunehmend ausdifferenzierten und in unglaubliche Höhen getriebenen Wissenschaft, die gerade deshalb, weil sie in ihren Theorieprojekten so erfolgreich ist, der Tatsache begegnet, dass ihre Ausgangsunterscheidungen kontingent sind.

Nicht nur für die Quantentheorie wird damit die Einsicht von Bohr virulent, dass jegliche Weltbeschreibung auf sinnförmigen Begriffen beruht.²⁸

Sobald man bereit ist, diese Sachlage zu akzeptieren, wird aber auch deutlich, dass man die Idee aufgeben muss, dass die mathematischen Modelle der Physik die Welt repräsentieren können.²⁹ Die

28 Siehe in diesem Sinne auch Fuchs: »Gesetzt, die Leitdifferenz bzw. die Form der Physik sei *empirisch/mathematisch*, dann müßte die Beobachtung oder Messung eben auch eine mathematische Repräsentanz finden. Was man stattdessen sieht, so der erste Eindruck, ist, daß das Beobachten bzw. der Beobachter empirisch und mathematisch keine klare Bearbeitung finden. Das könnte daran liegen, daß die Operation der Beobachtung im *blinden Fleck* der Physik verschwindet: Systemtheoretisch gesehen, ist auch die Physik ein sinnförmiges Unternehmen, das die Einheit des Schemas beobachtbar/unbeobachtbar nicht mitbeobachten kann, und das heißt schließlich, daß die Welt, in der beobachtet wird, von der Welt, die beobachtet wird, nicht unterscheidbar ist« (Fuchs 2009).

29 »Mit dem Begriff der Repräsentation fällt die Vorstellung, daß das System Merkmale seiner Umwelt copiert. Auch von Simulation wird man nicht sinnvoll sprechen können, denn auch das setzt eine Analogie voraus. An die Stelle solcher Erkenntnisbegriffe muß die Vorstellung treten, daß das System eigensinnig Komplexität aufbaut und dadurch in immer stärkerem Maße unwahrscheinlich, irritierbar, stöbar, enttäuschbar wird. Aber wenn es gelingt, die Autopoiesis unter solchen Bedingungen struktureller Komplexität trotzdem fortzusetzen, hat das System darin einen internen Anhaltspunkt dafür, daß es »richtig liegt«, obwohl es nicht wissen kann, wo und wie, da man niemals unabhängig von dem eigenen

entwickelten physikalischen Theoriegebilde sind gerade deshalb erfolgreich, weil sie sich auf Ebene der Sinnbezüge systemisch abschließen, weil ihre Theorieform operational geschlossen ist. Ihre Erklärungs- und Beschreibungskraft entwickeln sie gerade deshalb, weil sie definierten operativen Pfaden folgen, weil sie ihre metatheoretischen Ausgangsunterscheidungen stabil halten und weil sie erst auf diesem Wege eine stabile Semantik konstruieren können, mit der sich den Unschärfen nicht-wissenschaftlicher Alltagssprache trotzen lässt. Erst auf diese Weise lassen sich empirische und theoretische Daten so ordnen, dass sie theoriefähig werden, also dass sie wahr/falsch-Aussagen generieren lassen, welche die weitere Theoriebildung produktiv irritieren.³⁰

Es gilt auch hier die kybernetische Einsicht, dass Offenheit nur durch Geschlossenheit erreicht werden kann³¹ und dass »die Zahl der Außenkontaktstellen sehr viel geringer sein muß als die Zahl der Innenkontaktstellen, so daß ein Ereignis viele Veränderungen zur Folge haben kann und kleine Ursachen, wenn das System in Resonanz versetzt wird, weitreichende Wirkungen auslösen können«. ³² Erst die semantische Geschlossenheit hinreichend ausdifferenzierter Theoriegebilde bildet die Voraussetzung für die Kontakt- und Resonanzfähigkeit gegenüber einer Umwelt, die damit freilich weiterhin nicht im Sinne des Konzepts der Repräsentation erreicht werden kann.³³

Umweltentwurf (Fremdreferenz) wird feststellen können, was in der Umwelt ›an sich‹ der Fall ist.« (Luhmann 1998, 317).

30 Üblicherweise wird dies mit Popper (2007) unter dem Begriff der Falsifikation gefasst. Mit Blick auf die durch einen Soziologen beobachtbare Praxis von Wissenschaftlern stellt sich die Sachlage jedoch keineswegs so dar, dass eine Theorie, sobald sie hinreichend entwickelt und ausdifferenziert ist, durch einzelne Experimente widerlegt wird. Vielmehr stellt das Experiment gleichsam einen Dialog der Theorie mit der Natur dar. Wie in jedem kommunikativen Prozess entscheidet das Verstehen, was gehört wird. Auf welche Weise ein theoretisches Gebilde durch ein experimentelles Ergebnis irritiert wird, ist keineswegs, wie man annehmen könnte, durch ›objektive‹ Sachlagen bestimmt, sondern durch innere, von der Theorie selbst gesetzte Zwänge. Herausgearbeitet hat dies schon Fleck (1980). Siehe zu einem neueren Blickwinkel Rheinberger (2006).

31 Vgl. Ashby (1956).

32 Luhmann (1998, 467).

33 »Gegen naheliegende Missverständnisse muß immer wieder darauf hingewiesen werden, daß die Geschlossenheit des Systems seine Offenheit keineswegs ausschließt, sondern gerade Bedingung dafür ist, daß das System zu einer komplexen und distanzierten Umwelt in Kontakt treten kann. Ebenso unbestreitbar ist, daß in einer völlig entropischen Welt ohne Diskontinuitäten keine Wissenschaft, ja überhaupt kein Beobachten sich entwickeln könnte. [...]

Ein hochgradig ausdifferenziertes physikalisches Fachgebiet wie die Hochenergiephysik, aus dem heraus die Stringtheorie entwickelt wurde, kommt nicht umhin, sich nochmals in primär theoretisch und primär experimentell vorgehende Teildisziplinen aufzuspalten. Die Theorien werden nun überwiegend auf Basis theoretischer Überlegungen überprüft und entwickelt, während die Experimentalphysik vorwiegend an der methodischen Entwicklung von Experimentalsystemen arbeitet. Dass dabei physikalische Subdisziplinen entstehen, die einander nur noch mit Sprachlosigkeit oder wechselseitigem Unverständnis begegnen können, liegt in der Natur solcher Differenzierungsprozesse. Auch die Physik hat nun zu erleiden, was Philosophie und Soziologie schon längst erfahren mussten. Man kann nicht anders, als in dem Linguakäfig selbstgesponnener Bedeutungsgewebe zu leben, um hierfür den Preis zu zahlen, dass selbst der Nachbar einen nicht mehr versteht, insofern er nicht die gleichen metatheoretischen Unterscheidungen teilt.

Die Auseinandersetzung um die Stringtheorie lässt verschiedene Aspekte der zeitgenössischen physikalischen Theoriebildung deutlich werden. Die zentralen Konzepte physikalischer Theorien repräsentieren keine äußere Realität. Sie beruhen primär auf internen Anschauungen und Konzepten, die dann in immer raffinierteren Bezügen entfaltet und ausdifferenziert werden. Niemand hat jemals ein String gesehen, doch mit der Anschauung einer eindimensionalen, schwingenden Saite lässt sich eine mathematische Theorie entfalten, welche die Relativitätstheorie und die Quantentheorie in einer produktiven Weise rekombinieren lässt.

Dies heißt aber jetzt auch, dass es nicht nur *eine* physikalische Theorie geben kann, denn welche Grundanschauungen jeweils gewählt werden, ist *kontingent*. Ob man mit Strings beginnt, die vom Hintergrund unabhängig in einem gegebenen Raum hängen, oder mit der Quantenschleifengravitation über Quantenprozesse erst einen Raum konstituiert, sind Ausgangsentscheidungen, die *vor* Beginn der Theoriearbeit getroffen werden müssen. Auch für die Physik wird hiermit die Unterscheidung von Theorie und Meta-Theorie bedeutsam. Letztere muss jetzt als eine notwendige, jedoch nicht durch den Untersuchungsgegenstand selbst konditionierte Entscheidung über jene die Theorie fundierenden konzeptionellen Anschauungen gesehen werden. Dies heißt aber jetzt auch, dass es in der Physik mehrere, wenn nicht gar viele Theorien geben kann und dass die Vertreter der jeweiligen Theorien sich einander mit Unverständnis begegnen.

Oder um mit Spencer-Brown zu formulieren: die Welt muß durch eine Unterscheidung zerteilt werden, woraufhin man es mit der Trinität von Diesseits, Jenseits und Grenze zu tun hat« (Luhmann 1998, 303).

Gerade der Befund, dass die derzeit elaboriertesten Theorieprojekte der Physik keineswegs in einer einheitlichen Universaltheorie konvergieren, sondern vielmehr auf babylonische Verhältnisse zulaufen, lässt deutlich werden, worin unter den gegebenen Verhältnissen die Leistung, aber auch die Entfremdung physikalischen Weltverstehens liegt.

All dies lässt die Auseinandersetzung um das Verständnis und die Deutung der Quantentheorie in einem etwas kühleren Licht erscheinen. Es lässt vermuten, dass die Auseinandersetzung um die Frage, welche Erklärung als für das Deutungsproblem der Quantentheorie angemessen erscheint, nicht durch physikalische Theorie selbst, sondern nur durch die Meta-Theorie der gewählten Ausgangsanschauung, also durch Metaphysik, entschieden werden kann. Hiermit wäre dann aber auch von dem Traum der *einen* Physik Abschied zu nehmen.

VI QUANTENTHEORIE UND MYSTIK

Die mit der Quantentheorie aufgeworfenen Paradoxien des Beobachters stellen ein Einfallstor für die Verschränkung religiöser und wissenschaftlicher Semantiken dar. Ein kurzer Blick auf das Portfolio eines esoterischen Buchladens zeigt, dass Quantensemantiken *en vogue* sind. Sei es ein neues Weltbild, indem östliche Weisheiten und westliche Wahrheiten vereint sind,¹ die Verbindung von Quantentheorie und jüdischer Mystik,² Versuche zur Erklärung von Nahtod-Erlebnissen³ oder die Suche nach den wissenschaftlichen Begründungen des christlichen Offenbarungsglaubens⁴ – die unterschiedlichen Interpretationen der Quantentheorie bieten eine Reihe von semantischer Figuren an, die sich für religiöse oder gar magische Weltbilder⁵ ausbeuten lassen.

Auch liegt es nahe, quantentheoretische Figuren zur Erklärung des Geheimnisses des Bewusstseins heranzuziehen. Durchaus namhafte Wissenschaftler haben hierzu Vermutungen angestellt. Allerdings finden solche Überlegungen in der Regel auf einer hoch spekulativen Ebene statt. Hinsichtlich der hierfür notwendigen Verbindungsglieder bestehen derzeit noch keine belastbaren empirischen Befunde.⁶

1 Man denke hier etwa an Fritjof Capras ›Tao der Physik‹ (Capra 2000).

2 Siehe etwa Laitmanns ›Quantum Kabbala‹ (Laitmann 2007).

3 So van Lommel (2011).

4 Durch entsprechende Publikationen hervorgetreten ist hier beispielsweise Günter Ewald, seinerseits Mathematiker, Physiker und Mitglied im Kuratorium der Evangelischen Zentralstelle für Weltanschauungsfragen (Ewald 2006, 62 ff.).

5 Siehe hierzu nur allein die wachsende Zahl der Kurse zur ›Quantenheilung‹ auf dem Esoterikmarkt.

6 So haben etwa Eccles und Beck (1991) versucht, mit ihren Berechnungen aufzuzeigen, dass neuronale Prozesse durch Quantenvorgänge moduliert werden können. Bislang liegen zwar noch keine experimentellen Befunde vor, die dafür sprechen, dass die neuronale Informationsverarbeitung durch diese Prozesse beeinflusst wird oder dass Gehirne gar Quantenrechner darstellen. Dies hindert Penrose (1998) und Hameroff (1987) jedoch nicht, dahingehend zu argumentieren, dass in bestimmten Mikrofasern des Gehirns sehr wohl kohärente Quantenzustände vorkommen können und dass sich über eine neue Theorie der Quantengravitation möglicherweise auch die Frage des Bewusstseins klären ließe (siehe zur Kritik von Penrose

All dies ist jedoch nicht Gegenstand dieses Kapitels.⁷ Wir möchten hier vielmehr mit Peter Fuchs der Vermutung nachgehen, ob nicht die Quantentheorie als eine bis ins Extrem hochgetriebene Theorieform *nolens volens* zu Problemstellungen gelangt, die von ihrer Struktur her gesehen denen der Mystik ähnlich sind.⁸

Unter Mystik verstehen wir mit Tugendhat eine Weltbeschreibung,⁹ die einerseits in Distanz – wenn nicht gar in Gegensatz – zu religiösen Erklärungen und Weltbildern geht,¹⁰ die sich aber andererseits dem Paradoxon einer Welt zu stellen sucht, die eine Einheit darstellt, in ihrer Beschreibung und sinnlichen Erfahrung jedoch nur als Differenz zu haben ist.

Jede Theorie, die sich selbst als eine Universaltheorie begreift,¹¹ verstrickt sich zwangsläufig in die Problematik, dass man die »Exo-

Grush/Smith Churchland 2008). Siehe zu einer guten Einführung in quantentheoretische Ansätze zur Erklärung des Bewusstseins Stapp (2007).

7 Ebenso wenig begreifen wir hier mystisches Denken weder als eine Form der intuitistischen Welterkenntnis, die beispielsweise auch Werner Heisenberg am Höhepunkt seiner Schaffensperiode erfahren konnte, noch ist hier eine Nähe zum Psychologismus gemeint, zu der beispielsweise Wolfgang Pauli neigte (vgl. Fischer 2008; 2010).

8 Fuchs (2008, 56).

9 Tugendhat (2006; 2007).

10 »Der Weg zur Mystik wird darin bestehen, daß man das Gewicht, das die eigenen Wünsche für einen haben, relativiert oder geradezu leugnet, also eine *Transformation des Selbstverständnisses*. Der Weg der Religion hingegen besteht darin, daß man die Wünsche läßt wie sie sind, und stattdessen eine Transformation der Welt mittels einer Wunschprojektion vornimmt« (Tugendhat 2006, 122).

11 »Theorien mit Universalitätsanspruch sind leicht daran zu erkennen, daß sie selbst als ihr eigener Gegenstand vorkommen (denn wenn sie das ausschließen wollten, würden sie auf Universalität verzichten müssen). Damit sind, und das gilt für alle »global theories« (auch zum Beispiel für die Quantenphysik), bestimmte Sektionen der klassischen Wissenschaftstheorie außer Kraft gesetzt; so vor allem alles, was mit unabhängiger Bestätigung (confirmation) des Wahrheitsanspruchs der Theorie zu tun hat. [...] Theorien mit Universalitätsanspruch sind also selbstreferentielle Theorien. Sie lernen an ihren Gegenständen immer auch etwas über sich selbst. Universale Theorie betrachtet ihre Gegenstände und sich selbst als einen ihrer Gegenstände als selbstreferentielle Verhältnisse. Sie setzt keine unhinterfragten erkenntnistheoretischen Kriterien voraus, sondern setzt, wie neuerdings auch viele Philosophen und Naturwissenschaftler, auf eine naturalisierte Epistemologie. Das heißt wiederum: ihr eigenes Erkenntnisverfahren und ihr Annehmen oder Verwerfen von dafür geltenden Kriterien ist für sie etwas, was in ihrem eigenen Forschungsbereich,

welt« nur aus der »Endoperspektive« heraus erkunden kann,¹² letztere aber nicht negiert werden darf, sondern selbst wiederum als konstituierend für das zu Beobachtende begriffen werden muss. Die Quantentheorie hat mit v. Weizsäcker folgerichtig davon auszugehen, dass auch ein menschlicher Organismus quantenmechanisch zu beschreiben ist und – insofern man einen monistischen Erklärungsanspruch verfolgt – auch das menschliche Bewusstsein.¹³ Universaltheorien führen zu der Konsequenz, dass jeder operative Vollzug der Forschungspraxis neue blinde Flecken erzeugt. Sie erscheinen damit in der eigentümlichen Situation, dass gerade, wenn sie in ihren Beschreibungen sehr genau und exakt werden, damit auf der anderen Seite die hierdurch ausgeblendete Komplexität in die Beschreibung wieder eindringt.

Das Ganze ist nicht in den Griff zu bekommen und entsprechend kommt jeder wissenschaftliche Versuch der Ausdeutung der Welt hier an eine Grenze. Letztere kann nur im Medium Sinn stattfinden, wodurch jedoch das Dilemma entsteht, dass wir positiv-sprachlich nur die Ergebnisse von Sinn nachverfolgen können, nicht jedoch auf das Medium selber durchgreifen können.¹⁴ Nachverfolgbar bleiben nur die ausgeflaggtten konkreten Gegenstände der Sinnproduktion innerhalb der Subjekt-Objekt-Dichotomie (in diesem Sinne ist ein abstrakter Gedanke ebenso als ein Gegenstand zu betrachten wie ein Baum, denn er tritt repräsentierbar gegenüber).

Formtheoretisch gesprochen, muss die Seite jenseits des Bezeichnen-baren im *unmarked space* bleiben, ist aber zugleich mitzuführen, damit die Form überhaupt funktioniert. Der *unmarked space* von Sinn kann jedoch nicht selber sinnförmig sein oder sinnförmige Elemente enthalten, sonst würde er auf der markierbaren Seite liegen. Er ist in einer *negativ-sprachlichen* Weise *leer* (was hier nicht zu verwechseln

in einer Disziplin des Teilsystems der modernen Wissenschaft geschieht« (Luhmann 1993, 9 f.).

12 Rössler (1992).

13 Siehe v. Weizsäcker (1994, 534 ff.).

14 Um es mit Luhmann auszudrücken: »Mit dem Begriff des Mediums ist es festgelegt, daß Sinn nicht beobachtet werden kann – ebensowenig wie das Licht. [...] Die Unbeobachtbarkeit von Sinn gibt denn auch einen ersten Hinweis darauf, daß dies etwas mit Religion zu tun haben könnte. [...] Man kann von innen an die Grenzen dieses Mediums stoßen; aber diese Grenzen haben dann nicht die Form einer überschreitbaren Linie, sondern, mit der schönen Metapher Husserls, die Form eines Horizontes. Und so ist die Welt sinnverarbeitender Systeme nur als Horizont gegeben – freilich nicht als ferne, irgendwo anders gezogene Linie, sondern als Implikat der Rekursivität jeder einzelnen Operation: als Implikat ihrer Identifizierbarkeit« (Luhmann 2000a, 16).

ist mit dem *positiv-sprachlichen* Begriff ›Leere‹, mit dem ein leerer Raum *bezeichnet* wird).

Formal gilt an dieser Stelle das Wittgensteinsche Gebot: »Worüber man nicht sprechen kann, darüber muss man schweigen«.¹⁵ Aus der Logik der Kommunikation gilt aber auch, »worüber man nicht sprechen darf, lässt sich kommunizieren«. Hiervon nährt sich die Religion und sie ist in diesem Sinne mit Luhmann vor allem als ein kommunikatives Phänomen zu verstehen. Sie entsteht durch den formal unmöglichen, aber praktisch vollziehbaren *re-entry* der Sinnform in die Form, durch den »Wiedereintritt der Differenz von vertraut/unvertraut ins Vertraute und Umgängliche«.¹⁶ Die Religion muss die Tatsache, dass sie etwas tut, was nicht möglich ist, verdecken. Dies geschieht durch die Anweisung ›Glaube!‹ und durch die Setzung eines Dogmas, dessen Anzweiflung mit einem Tabu belegt wird.¹⁷

Ein für Mystik empfänglicher Denker durchschaut den Trick, bleibt aber weiterhin an der verborgenen Seite interessiert. Er sucht weiterhin die Einheit, wohl wissend dass nur die Differenz verfügbar ist, was ihn aber nicht daran hindert, die Einheit in der Differenz zu reflektieren.

Die vorangehenden Kapitel haben deutlich werden lassen, wie viel die Auseinandersetzung um die Interpretation der Quantenphysik mit dieser Reflexionsfigur gemein hat. Insofern sich die Quantentheorie der Frage ihrer sinnhaften Interpretation stellt – man sie also nicht nur als eine Rechenvorschrift versteht, mit der man die Ergebnisse bestimmter Experimente beschreiben kann – berührt sie Fragen, mit denen sich auch die mystischen Traditionen beschäftigen.¹⁸ Mit Blick auf den universellen Charakter der Quantentheorie lässt sich mit Fuchs feststellen: »Spitzenprobleme der Mystik sind von der Anlage und vom Argumentationsduktus her auch Spitzenprobleme der Theorie, die ihr zustoßen, wenn sie ihre Grundbegriffe nur hinreichend radikal reflektiert«.¹⁹

15 Wittgenstein (1990, Proposition 7).

16 Luhmann (2000a, 83).

17 Deshalb kommen verschiedene Religionen miteinander in einen Konflikt, denn der jeweilige »Vollzug des re-entry und die von daher bestimmte Ausmalung der Transzendenz« geschieht in unterschiedlicher Weise (Luhmann 2000a, 85), was jedoch innerhalb der Religion nicht reflektiert werden kann, da sonst die Kontingenz des Geschehens offenbar würde.

18 Siehe zur mystischen Tradition des Judentums etwa Scholem (1973), für das Christentums in Referenz auf Meister Eckhart Flasch (2008), für den Buddhismus Conze (1983) und für den Islam Schimmel (1995) sowie exemplarisch für das Werk von Aziz Nasafi Ridgeon (1998).

19 Fuchs (2008, 56).

Insofern man diesen Sachverhalt als Theoretiker einmal begriffen hat, bleiben nur noch drei Auswege:

- Man postuliert in *positivistischer* Manier eine epistemische Grenze. Diesen Weg gehen Bohr und Heisenberg mit der Kopenhagendeutung, wenngleich hier deutlich wird, dass eigentlich schon mehr gesagt wurde, als man hätte sagen dürfen (wer hat jemals eine ›unstetige Änderung‹ einer ›Wahrscheinlichkeitsfunktion‹ gesehen bzw. einen Beobachter ertappt, der diese Änderung hervorruft?).
- Man stellt fest, dass die Dinge eben komplex sind und aufgrund der Verschränkung der Beobachtungsprozesse mit dem Gegenstand nur als Paradoxie beschreibbar sind, und versucht jetzt, mit den sich hieraus ergebenden Verstörungen irgendwie zurechtzukommen.²⁰
- Man beginnt, sich im Grenzgebiet von Wissenschaft und Mystik umzuschauen, wohl wissend, dass hier weder Ontologie noch Epistemologie einen sicheren Halt geben können.

Für Quantenphysiker, die eine gewisse Affinität zu philosophischen Fragestellungen haben und weiterhin dazu tendieren, Wissenschaft und Weltsinn zusammenzudenken, übt der zuletzt genannte Pfad einen gewissen Reiz aus, denn hier können und dürfen die großen Fragen nach der Einheit und nach der Ordnung oder gar dem Sinn des Ganzen zusammen gedacht werden.

Die Quantenphysik ist in einer Zeit entstanden, in der in intellektuellen Kreisen zunehmend am Wert naturwissenschaftlicher Rationalität gezweifelt wurde. Ihr wurde Ferne zur eigentlichen menschlichen Lebenswelt vorgeworfen und man suchte nach Formen der Rückbesinnung zum ›Eigentlichen‹, was jedoch durch die naturwissenschaftlichen Denkformen immer weniger geleistet werden konnte. Die Kluft zwischen objektivistischer Weltbeschreibung und der subjektiv erfahrbaren Lebenswirklichkeit erschien immer tiefer und unüberbrückbarer.²¹ Mit ihrem Verzicht auf Anschaulichkeit

20 Dies ist die Perspektive der soziologischen Systemtheorie: »Im Unterschied dazu [zur Transzendentalphilosophie, in der das transzendente Subjekt die Synthesen leistet, die zur Ordnung seiner Erfahrungswelt notwendig sind] führt die systemtheoretische Analyse zu der Einsicht, daß die Welt das Bewußtsein und Kommunikation *überfordere* und in *diesem* Sinne transzendent sei. So verstanden wirkt der Hinweis auf Transzendenz nicht beruhigend, sondern *beunruhigend*« (Luhmann 2000a, 109).

21 Siehe paradigmatisch für diese Form der Kritik Spenglers »Untergang des Abendlandes« (Spengler 2007 [1923]). Später dann reflektierter und

und der Dominanz mathematischer Formen scheint die Quantenphysik einerseits den Bruch zwischen lebensweltlicher Anschauung und physikalischer Theoriebildung noch weiter zu vertiefen. Andererseits stellt ihre Theorieanlage den Determinismus in Frage und eröffnet hierdurch ein Tor für subjektphilosophisch inspirierte Interpretationsweisen des Weltgeschehens. Die vermeintliche Nähe der Quantenphysik zu einer rationalitätsfeindlichen Ideologie hat dann auch einige Wissenssoziologen zu der Fehlannahme geführt, dass sich die Besonderheiten der Theorieentwicklung der Quantenphysik vor allem als eine Anpassung an die esoterischen, antirationalistischen und individualistischen Strömungen der Weimarer Republik verstehen lassen.²²

Die in den vorangehenden Kapiteln vorgelegten Rekonstruktionen zeigen demgegenüber auf, dass sich die Paradoxien in der Deutung der Quantentheorie primär aus den Bezugsproblemen der physikalischen Theoriebildung selbst ergeben, also vor allem als Folgeerscheinung einer auf die Spitze getriebenen Theorieform zu verstehen sind.

Die sich hieraus ergebende Nähe zu Fragestellungen der Mystik kann deshalb nicht als eine Regression in theorie- und reflexionsfeindliche Sphären verstanden werden. Im Gegenteil, der Bezug zu mystischen Denkformen liegt nahe, insofern das mit der Kopenhagener Deutung formulierte Reflexionsverbot in Hinblick auf eine weitergehende Theoriereflexion überschritten wird.

Im Folgenden soll dies am Beispiel der Überlegungen von drei renommierten Quantenphysikern vorgestellt werden.

Schrödinger: »Die Vielheit ist bloßer Schein«

Erwin Schrödinger hat bekanntlich Zeit seines Lebens mit der Kopenhagener Deutung gehadert und nach alternativen Verständnisweisen gesucht. Zudem haben ihn schon immer transdisziplinäre Grenzüberschreitungen gereizt, in denen Fragen nach den Eigenheiten des Lebens²³ und der Beziehung zwischen Geist und Materie thematisiert werden. In unserem Zusammenhang ist besonders eine Vortragsreihe unter dem Titel »Mind and Matter« von Interesse, die Schrödinger Oktober 1956 am Trinity College in Cambridge gehalten hat. Insbesondere in seinem Vortrag »Das arithmetische Paradoxon. Die

ohne den Pathos des Untergangs Husserls »Krisis der europäischen Wissenschaften« (Husserl 1996 [1936]).

22 Siehe vor allem Forman (1971; 1981).

23 Berühmt geworden ist hier Schrödingers Abhandlung (1946) »Was ist Leben. Die lebendige Zelle mit den Augen des Physikers«. Hier wurden »aperiodische« Makromoleküle als Träger von Information vermutet, was schließlich die Entdeckung der DNA durch Watson und Crick gebahnt hat.

Einheit des Bewußtseins« werden deutliche Bezüge zu mystischen Denkformen entwickelt. Schauen wir uns deshalb die Argumentation dieser Rede etwas genauer an. Schrödinger beginnt mit dem Problem, dass sich eine umfassende naturwissenschaftliche Weltbeschreibung *nolens volens* in eine »doppelte Sinninklusion« – Fuchs spricht hier von »doppelter Verschränkung«²⁴ – verwickelt. Die Beschreibung der Welt verläuft selbst sinnhaft und deshalb kann der Beschreibende nicht getrennt vom Beschriebenen verstanden werden. Darüber hinaus ist jedoch jeder Schnitt, den ein Beobachtungsprozess machen kann, selbst wieder mit anderen Prozessen verschränkt. Eine monistische Beschreibung der Welt führe deshalb in das Paradoxon, dass sich isolierte Beobachter (hier im Plural) nicht finden lassen, man also streng genommen nur einen Beobachtungsprozess vorfinde:

»Der Grund dafür, daß unser fühlendes, wahrnehmendes und denkendes Ich in unserem naturwissenschaftlichen Weltbild nirgends auftritt, kann leicht in fünf Worten ausgedrückt werden: Es ist selbst dieses Weltbild. Es ist mit dem Ganzen identisch und kann deshalb nicht als Teil darin enthalten sein. Hierbei stoßen wir freilich auf das arithmetische Paradoxon: Es gibt scheinbar eine sehr große Menge solcher bewußten Iche, aber nur eine einzige Welt. Das beruht auf der Art der Entstehung des Weltbegriffs. Die einzelnen privaten Bewußtseinsbereiche überdecken einander teilweise. Der ihnen allen gemeinsame Inhalt, indem sie sich sämtlich decken, ist die reale Außenwelt«. Bei alledem bleibt aber ein unbehagliches Gefühl, das Fragen auslöst wie: Ist meine Welt wirklich die gleiche wie die deine? Gibt es *eine* reale Welt, verschieden von den Bildern, die auf dem Weg über die Wahrnehmung in einen jeden von uns hineinprojiziert werden? Und wenn es so ist, gleichen diese Bilder der realen Welt oder ist diese, die Welt »an sich«, vielleicht ganz anders als die Welt, die wir wahrnehmen?

Solche Fragen sind sehr geistreich, aber nach meiner Meinung sehr dazu angetan, in die Irre zu führen. Sie sind durchweg Antinomien oder führen auf solche, die ich das arithmetische Paradoxon nenne: den *vielen* Bewusstseins-Ichen, aus deren sinnlichen Erfahrungen die *eine* Welt zusammengebraut ist. Die Lösung des Zahlenparadoxons würde alle solche Fragen beiseite schaffen und sie nach meiner Überzeugung als Scheinprobleme entlarven.«²⁵

Schrödinger sieht nur zwei Auswege, die aus diesem Dilemma führen. Der eine entspricht der Leibnizschen Monadenlehre. Jede Monade führt zu einer »Welt für sich«. Es »ist keine Verbindung zwischen

24 Fuchs (2009).

25 Schrödinger (1959, 39).

ihnen. Die Monade ›hat keine Fenster‹, sie ist ›incommunicado‹.«²⁶ Streng genommen ist dieser Weg kaum mit den Erkenntnissen der Quantentheorie in Einklang zu bringen, denn hier spricht vieles dafür, die Vorstellung isolierbarer Identitäten zugunsten einer konditionierten Koproduktion verschränkter System/Umwelt-Verhältnisse aufzugeben. Schrödinger sieht nur einen anderen Ausweg, nämlich das Postulat einer Alleinheit, die jedoch nicht mehr begrifflich, sondern nur noch mystisch zu fassen ist:

»Offenbar gibt es nur einen anderen Ausweg: die Vereinigung aller Bewußtseine in eines. Die Vielheit ist bloßer Schein; in Wahrheit gibt es nur *ein* Bewußtsein. Das ist die Lehre der Upanishaden, und nicht nur der Upanishaden allein. Das mystische Erlebnis der Vereinigung mit Gott führt stets zu dieser Auffassung, wo nicht starke Vorurteile entgegenstehen; und das bedeutet: leichter im Osten als im Westen.«²⁷

Schrödinger bleibt in seiner Argumentation insofern redlich, als er herausstellt, dass diese Einsicht nur in Form einer Paradoxie oder von Gleichnissen zu haben ist, die zu Ungereimtheiten führen:²⁸

»Wenn wir aber nicht in Gleichnissen reden wollen, so müssen wir bekennen, daß wir es hier mit einer jener typischen Antinomien zu tun haben, die darauf zurückgehen, daß es uns jedenfalls bisher nicht gelungen ist, ein einigermaßen verständliches Weltbild aufzubauen, ohne unseren eignen Geist, den Schöpfer des ganzen Weltbildes, daraus zu verbannen, derart, daß für ihn kein Platz ist. Der Versuch ihn hineinzuzwängen, führt notwendig auf Ungereimtheiten.«²⁹

Da diese Ungereimtheiten jedoch in der Sache der Natur selbst liegen, ist der Ausweg, sie auf Basis einer naturwissenschaftlichen Objek-

26 Ebd. 40.

27 Ebd. 40 f.

28 Gumbrecht bemerkt in gleichen Sinne zu Schrödingers redlicher Haltung: »Ausgehend von einer Schleife der Reflexion über das Verhältnis zwischen wissenschaftlicher Beobachtung und den Phänomenen, gelangt er dort zu der Frage nach dem ›Ort, wo der Geist die Materie berührt‹. Dies ist einer der Momente, wo Schrödinger ›redlich‹ genug ist, um sich nicht zu einer eindeutigen Antwort zu zwingen – die er nicht hat. Auf der anderen Seite läßt ihn das Problem nicht los und provoziert die riskante, philosophisch besonderes interessante Vermutung, daß ein solcher Ort der Begegnung zwischen Geist und Materie vielleicht gar nicht existieren könnte« (Gumbrecht 2008, 17).

29 Schrödinger (1959, 49 f.).

tivierung zu überwinden, nicht nur versperert, viel schlimmer noch: Der organische Bezug zu unserem sinnlich erfahrbaren Leben wird durch den Versuch der Objektivierung zerstört:

»Ich habe schon früher die Tatsache erörtert, daß aus dem gleichen Grunde im physikalischen Weltbild alle Sinnesqualitäten fehlen, aus denen das Subjekt der Erkenntnis sich eigentlich zusammensetzt. Dem Modell fehlen Farben, Töne, Greifbarkeit. Ebenso und aus dem gleichen Grunde mangelt der Welt der Naturwissenschaften alles, was eine Bedeutung in bezug auf das bewußt anschauende, wahrnehmende und fühlende Wesen hat; von alledem enthält sie nichts. Vor allem denke ich an die sittlichen und ästhetischen Werte, Werte von jeder Art, an alles, was auf Sinn und Zweck des ganzen Geschehens Bezug hat. Nicht nur fehlt dieses alles, sondern es kann von einem rein naturwissenschaftlichen Standpunkt aus überhaupt nicht organisch eingebaut werden. [...] Am schmerzlichsten ist das völlige Schweigen unseres ganzen naturwissenschaftlichen Forschens auf unsere Fragen nach Sinn und Zweck des ganzen Geschehens. Je genauer wir hinsehen, um so zweckloser und sinnloser kommt es uns vor.«³⁰

Der objektivistische Reduktionismus des naturwissenschaftlichen Weltbildes führt *volens nolens* zum Nihilismus. Dieses Weltbild steht für Schrödinger jedoch im Widerspruch zu den Erkenntnissen der Quantenphysik. Vielmehr würden sich hier sehr wohl Parallelen zwischen naturwissenschaftlichen und religiösen Denkweisen zeigen, insofern man einen undogmatischen Zugang zum religiösen Denken pflegt:

»Ich wage, den Geist unzerstörbar zu nennen, denn er hat sein eigenes Zeitmaß; nämlich er ist jederzeit *jetzt*. Für ihn gibt es in Wahrheit weder früher noch später, sondern nur ein Jetzt, in das die Erinnerungen und die Erwartungen einbeschlossen sind. Doch ich gebe zu, daß unsre Sprache das nicht auszudrücken vermag; und ich gebe auch zu, daß ich jetzt von Religion, nicht von Naturwissenschaft, spreche, doch von einer Religion, die der Naturwissenschaft nicht widerspricht, sondern ihre Stütze in dem findet, was unvoreingenommene Naturwissenschaft ans Licht gebracht hat.«³¹

Schrödinger betritt hier die Sphäre des Unaussprechlichen und es wird hier – auch ohne einen analytischen Philosophen zu bemü-

30 Ebd.

31 Schrödinger (1959, f. 46).

hen – deutlich, dass ontologische und epistemologische Grenzüberschreitungen geschehen und Kategorien und Begriffe unscharf verwendet werden, was an sich innerhalb der wissenschaftlichen Denkform aus guten Gründen nicht statthaft ist. Dennoch können die hier formulierten Gedanken auch nicht ohne Weiteres abgewiesen werden, denn – insofern man sich auf die Quantenphysik als einer Universaltheorie einlässt – man begegnet unweigerlich jenen zirkulären Beobachtungsverhältnissen, die ihrer Natur nach auf unscharfen Sinnkonstellationen gegründet sind. Mit Harrison könnte man dies die »mystische Ironie von Schrödingers Denken nennen, sein Bewußtsein nämlich, das wissenschaftliche Erkenntnis ein *Nichtwissen* ist, sein Wissen darum, daß es im Kern des wissenschaftlichen Weltbildes einen blinden Fleck gibt – und zwar nicht irgendeinen blinden Fleck, sondern einen, der das objektive Gesichtsfeld erschließt. Als ›Subjekt‹ der Empfindung ebenso wie als Denken ist der Geist der eigentliche Wahrnehmungsvollzug, verwandelt er die Materie in Bedeutung und übersetzt er die Natur in Welt. Er öffnet uns die Augen dafür, wie die Dinge wirklich sind. Dieses Geschehen der Weltoffenbarung kann die Naturwissenschaft nicht sehen, da sie nur untersucht, was in ihrem Gesichtsfeld auftaucht.«³²

Von Weizsäcker ›offen für eine nahe Metaphysik‹

In der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg hat sich Carl Friedrich v. Weizsäcker, der prominente Schüler Heisenbergs, intensiv mit den erkenntnistheoretischen Fragen der neueren Physik beschäftigt. Zudem hat er in vielen seiner späteren Monografien versucht, unterschiedliche Felder der menschlichen Geistesgeschichte zu einer humanistischen Perspektive zusammenzudenken. v. Weizsäcker strebt dabei an, die mit der Moderne etablierte Trennung zwischen Naturwissenschaften, Philosophie und Religion zugunsten einer übergreifenden Zusammenschau zu überwinden, um damit den Menschen wieder in den Vordergrund zu rücken und entsprechend auch wieder metaphysische Fragen zu erlauben.³³

Insbesondere im »Aufbau der Physik«³⁴ wird in Hinblick auf die Theorieentfaltung der Quantentheorie eine kohärente Argumentation entfaltet, die sich in ihren Theoriekonsequenzen Denkfiguren annähert, die auch in der Mystik bekannt sind. Fassen wir die

32 Harrison (2008, 35).

33 Siehe hierzu vor allem »Der Garten des Menschlichen. Beiträge zur Geschichte der Anthropologie« (v. Weizsäcker 1980) und »Die Einheit der Natur« (v. Weizsäcker 1971) sowie »Zeit und Wissen« (v. Weizsäcker 1992).

34 v. Weizsäcker (1994).

v. Weizsäckersche Interpretation zunächst nochmals zusammen (s. bereits ausführlich Kap. IV.2).

Mit v. Neumanns Verallgemeinerung der Quantentheorie lassen sich physische, psychische und seelische Prozesse nicht wirklich voneinander trennen, denn im Sinne einer monistischen Theorie sind sie alle quantenphysikalisch zu beschreiben. Der wahrscheinlichkeitstheoretische Kalkül der Quantentheorie erzeugt einen Symmetriebruch zwischen Vergangenheit und Zukunft. Mit der Entstehung von Wissen durch den Prozess einer Beobachtung wird die Wahrscheinlichkeit in Gewissheit verwandelt und hiermit ändert sich der Weltzustand *irreversibel*. In der Beobachtung wird *Nicht-Wissen* zu *Wissen*.

Der hieraus abgeleitete Informationsbegriff überschreitet den cartesianischen Dualismus:

»Im Rahmen des in der Naturwissenschaft verbreiteten cartesianischen Dualismus fragte man, ob Information Materie oder Bewußtsein sei, und erhielt die zutreffende Antwort: keines von beiden. Manche Autoren bezeichneten sie dann als ›eine dritte Art der Realität‹.

Wir werden die positive Antwort wählen: Information ist das Maß einer Menge von *Form*. Wir werden auch sagen: Information ist ein Maß der *Gestaltenfülle*. Form ›ist‹ weder Materie, noch Bewußtsein, aber sie ist eine Eigenschaft von materiellen Körpern, und sie ist von Bewußtsein wißbar. Wir können sagen: Materie *hat* Form. Bewußtsein *kennt* Form.«³⁵

Aus der Quantentheorie folgt, dass Prozesse, die als Beobachtungen ein bestimmtes *Wissen* ausflaggen, *Wechselwirkungen* darstellen. Eine wichtige Einsicht der Quantenphysik besteht darüber hinaus in dem Befund, dass eine eindeutige Realität nur durch Beobachtung zu haben ist. Ohne Beobachtung verbleibt die Realität in der mit der Schrödinger-Gleichung formulierten Unbestimmtheit verschiedener, unterschiedlich wahrscheinlicher Möglichkeiten.

Da die Aufspaltung in Bewusstsein und Bewusstseinsgegenstand ebenfalls als ein Prozess konditionierter Koproduktion erscheint, sieht v. Weizsäcker eine starke strukturelle Homologie zwischen der Zeitstruktur der Ereignisse innerhalb der physikalischen Beschreibung und der phänomenologischen Welterfahrung. Beide finden in einer *umfassenden Gegenwart* statt, in der Ereignisse durch Wechselwirkung gleichsam *gezeitigt* werden:

35 Ebd., 166 f.

»Eigentliche Ereignisse gibt es nur in der für unbegrenzte Reflexion, also Wechselwirkung offenen Welt. Diese Offenheit umfaßt nicht nur den Raum, sondern auch die Zeit. Man wird die Formel wagen dürfen: Eigentliche Ereignisse gibt es nur in einer umfassenden Gegenwart. [...] Der individuelle Prozeß an *einem* Objekt wird jeweils unterbrochen durch das Ereignis seiner Wechselwirkung mit einem anderen Objekt; diese Wechselwirkung selbst ist aber wieder ein individueller Prozeß am Gesamtobjekt; könnte man die ganze Welt in die Beschreibung mit einbeziehen, so erwiese sich ihre Geschichte als ein einziger individueller Prozeß in einer allumfassenden Gegenwart.«³⁶

Hieraus folgert v. Weizsäcker, dass die Zeitmodi ›Vergangenheit‹ und ›Zukunft‹ ebenfalls durch Wechselwirkung konstituiert, also durch die Interaktion unterschiedlicher Objekte in einer umfassenden Gegenwart generiert werden:

»Folgen wir dieser Darstellung, so können wir sagen, inwiefern der Begriff des individuellen Prozesses von den Zeitmodi unabhängig ist. Der individuelle Prozeß an einem Objekt enthält die Abfolge an ihm möglicher, jeweils durch Wechselwirkung zu etablierender Ereignisse. Zwischen den Ereignissen ist *für dieses Objekt* keine Zeitfolge, sondern gleichsam umfassende Gegenwart. Die Zeitmodi konstituieren sich durch die Wechselwirkung. Die Faktizität der Vergangenheit bedeutet, daß vergangene Ereignisse an diesem Objekt aufbewahrt sind in ihrer Wirkung auf andere Objekte, also im Sinne der Möglichkeit der Vergangenheit durch ihre Wirkung auf die heute möglichen Ereignisse in der Welt: durch Dokumente. Die Offenheit der Zukunft bedeutet, daß *diesem* Objekt nicht anzusehen ist, welche Ereignisse durch seine Wechselwirkung mit anderen Objekten geschehen werden.«³⁷

Das Prinzip der Verschränkung impliziert nun jedoch, dass unterschiedliche Objekte, die miteinander wechselwirken können, nur näherungsweise als voneinander getrennte Objekte beschrieben werden können. Die hieraus entstehende Dynamik lässt sich allerdings nicht mehr mit den uns zur Verfügung stehenden sprachlichen Mitteln ausdrücken:

»Wir haben gesehen, warum die Trennbarkeit sich als eine sehr gute Näherung erweist, *wenn* man von Postulaten ausgeht, die die Trennbarkeit prinzipiell voraussetzen [...]. Die Wirklichkeit ist aber nicht in Strenge trennbar. Lokale Ereignisse sind nur genähert

36 Ebd., 616.

37 Ebd., 617.

als real zu beschreiben. Der wahre Gang der Welt dürfte weder räumlich noch zeitlich lokal sein.

Diesen Gedanken können wir verbal-begrifflich nur noch durch Negationen ausdrücken. Die uns verfügbare Physik beschreibt ihn nicht.«³⁸

Da aber jetzt v. Weizsäcker in Hinblick auf die Deutung der Quantentheorie vom Primat der Information ausgeht, liegt für ihn der Schluss nahe, ihren Kernprozess als ›geistig‹ zu betrachten. Dieser Prozess hätte dann mit Blick auf eine konkrete Wechselwirkung einen nicht-lokalen individuellen Charakter:

»Mit der Quantentheorie, so wie wir sie rekonstruiert und gedeutet haben, ist der Gedanke voll vereinbar, daß die Wirklichkeit ein nichträumlicher individueller Prozeß ist, den wir mit den uns geläufigen Worten als geistig zu beschreiben haben.«³⁹

Insofern man dieser Verständnisweise folgt, würde es mit v. Weizsäcker naheliegen, auch seelische Erfahrungen anzuerkennen, welche die Subjekt-Objekt-Dichotomie überschreiten. Die Quantenphysik sei damit prinzipiell offen für metaphysische Fragen (für eine »nahe Metaphysik«):

»Die Quantentheorie erscheint demnach offen für eine ›nahe Metaphysik‹. Sie wird bereit sein, seelische Erfahrungen anzuerkennen, die jenseits der klassisch beschreibbaren sinnlichen Erfahrung von der Körperwelt liegen. Solche Erfahrungen waren der Menschheit vor der Ära der Naturwissenschaft immer vertraut. Es bedeutet aber etwas anderes, sie anzuerkennen, nachdem die Wissenschaft ein kohärentes Weltbild aufgebaut hat; und zwar sie anzuerkennen nicht als eine Leugnung oder Sprengung des Weltbildes, sondern als eine Voraussetzung seiner Möglichkeit.«⁴⁰

Von Weizsäcker lässt hier offen, was mit den ›nicht klassisch beschreibbaren sinnlichen‹ Erfahrungsbereichen gemeint ist. Ob dies hier im Sinne nicht-dualer Erkenntnismodi einer mystischen Erfahrung oder gar als ein Anbieten an esoterische oder gar parapsychologische Denkformen zu verstehen ist, wird hier nicht deutlich.

Die schwierige Beziehung zwischen Religion, Magie und Mystik bleibt opak. Das reizvolle Grenzgebiet zwischen Wissenschaft und

38 Ebd., 617.

39 Ebd., 619.

40 Ebd., 638.

Mystik wird zwar betreten, jedoch fehlt das wichtige Warnschild ›Vorsicht Esoterik!‹.

Der eigentliche Verdienst von v. Weizsäcker besteht in dem Versuch, das Geheimnis der Zeit zu beleuchten. Dies führt zu dem Paradoxon einer Gegenwart, die nicht mehr nur als ein Punkt innerhalb einer Zeittrajektorie verstanden werden kann, sondern jetzt umgekehrt als eine umfassende Gegenwart zu begreifen ist, die gleichzeitig Dynamik, Kontingenz und Wechselbeziehung – und damit auch Vergangenheit und Zukunft beinhaltet.

Mit v. Weizsäcker zeigt sich die Zeit als das eigentliche Geheimnis der Quantentheorie. Die Schrödinger-Gleichung folgt einem *reversiblen* und damit deterministischen Zeitverlauf – im Sinne eines Blockuniversums operiert der Zeitparameter hier nicht anders als eine weitere Raumdimension. Doch die Entstehung von Wissen aufgrund einer Beobachtung verändert den Weltzustand *irreversibel*, da jetzt Wahrscheinlichkeit zur Gewissheit wird.⁴¹

Von Weizsäckers ›umfassende Gegenwart‹ einer nicht-lokal verschränkten Welt erscheint hiermit als der mystische Fluchtpunkt, um das Paradoxon einer Zeit zu lösen, die jetzt nicht mehr nur als eine Trajektorie erscheinen kann, sondern eher als ein nicht-lokal konfigurierter Raum zu sehen ist, in dem Vergangenheit und Zukunft kopräsent in einer dynamischen Wechselbeziehung eingefaltet sind.

Bohm: ›Kontinuierliches Entfalten des Ganzen in Bestandteile und erneutes Einfalten aller Teile in das Ganze‹

Unter der Gruppe der hervorragenden Quantenphysiker der zweiten Generation ist David Bohm wohl der Wissenschaftler, welcher sich am intensivsten mit möglichen spirituellen Dimensionen der Quantentheorie beschäftigt hat. Es ist jedoch müßig, die Gründe hierfür in einer Biografie zu suchen, die sich durch politisches Engagement in den USA auszeichnet, was dann zu einem Bruch mit seinem Geburtsland während der McCarthy-Ära geführt hatte.

An dieser Stelle interessieren vielmehr seine intensive Auseinandersetzung mit dem Werk von Jiddu Krishnamurti und die in diesem Zusammenhang entstandenen Schriften zur impliziten Ordnung. Versuchen wir im Folgenden deren Grundgedanken zu verdeutlichen:

Da sich Materie auch über die mit der Schrödinger-Gleichung aufgespannte Wellenfunktion beschreiben lässt, kann man die For-

41 Erinnern wir uns, wie Schrödinger das Problem der unstetigen Änderung der Wellenfunktion bearbeitet hat: »Von der Form, in der man die ψ -Funktion zuletzt gekannt, zu der neuen, in der sie wieder auftritt, führt kein stetiger Weg – er führte eben durch die Vernichtung« (Schrödinger 1935, 828).

men unserer Welt gleich einem Hologramm ebenfalls als Ergebnis verschachtelter Wellenbeziehungen begreifen. Sie erscheinen jetzt im Sinne einer ›Holobewegung‹ als ein kontinuierliches Einfalten und Entfalten des Ganzen. Das Universum selbst manifestiert sich aus dieser Perspektive als eine verdeckte, eingefaltete Ordnung – eben als eine implizite Ordnung:

»[D]ie Quantentheorie [zeigt], daß die Teilchen, aus denen die Materie besteht, ebenfalls als Wellen beschrieben werden können, die denen des Lichts ähneln. Man kann also im Prinzip Hologramme erzeugen, wenn man Elektronenstrahlen, Protonenstrahlen, oder Schallwellen benutzt [...]. Das wesentliche ist, daß die mathematischen Gesetze der Quantentheorie, die sich auf diese Wellen und daher auf jegliche Materie anwenden lassen, so verstanden werden können, daß sie eine Bewegung beschreiben, in der es ein kontinuierliches Entfalten des Ganzen in jeden Bestandteil und ein erneutes Einfalten aller Teile in das Ganze gibt. Ich werde diese universelle Bewegung von Einfaltung und Entfaltung ›Holobewegung‹ nennen.

Mein Vorschlag ist nun, daß die Holobewegung die zugrundeliegende Wirklichkeit darstellt, so weit wir dies überhaupt sagen können, und daß alle Einheiten, Objekte und Formen, wie wir sie normalerweise kennen, relativ stabile, unabhängige und autonome Ausprägungen der Holobewegung darstellen [...]. Wir sehen so das Universum in einer neuen Ordnung, die ich als eingefaltete Ordnung oder implizite Ordnung bezeichne.«⁴²

Bohm schlägt vor, auch das Denken und die Sprache als eine implizite Ordnung aufzufassen, um auf diese Weise zu einer übergreifenden monistischen Beschreibung zu gelangen. Hier sei dann im Prinzip dieselbe Bewegung zu beobachten wie in der ›impliziten Ordnung‹, welche die materielle Sphäre formatiert. Dies sieht Bohm dadurch begründet, dass die Quantentheorie selbst zeige, dass auch in der un belebten Natur so etwas wie ›Geist‹ vorhanden ist, insofern man hier in die Ein- und Entfaltung der ordnenden *Holobewegung* versteht:

»Anstatt anzunehmen, daß es zwei Ordnungen gibt – die explizite Ordnung der ausgedehnten Substanz und eine implizite Ordnung des Denkens – schlage ich vor, und dies weitgehend auf der Basis des Verständnisses der jüngsten Entwicklungen in der Physik, daß die implizite Ordnung auch für die Materie relevant ist. Wenn wir noch weitergingen und sagten, daß dies ebenso für die Materie gilt, aus der Gehirn und Nerven bestehen, dann würden sich vielleicht

42 Bohm (1988, 28).

Geist und Materie miteinander verbinden; und vielleicht existiert in der unbelebten Natur so etwas, dem Geist vergleichbar, das wenigstens implizit vorhanden ist. Legt man ein Saatkorn in die Erde hinein, entsteht schließlich belebte Materie.«⁴³

Da die implizite Ordnung als eine in sich selbst eingefaltete anzusehen ist, gibt es keine unterste Ebene, von der aus Wirklichkeit im Sinn einer eindeutigen Kausalitätsbeziehung festgelegt ist. Dies ergibt sich aus der Einsicht der Quantentheorie, dass die vormals klassisch beschreibbaren Phänomene nun *mehrdeutig* werden und erst durch den Kontext einer Beobachtung bestimmt werden können. Gegenstand und Kontext gehen nun Hand in Hand mit Kontingenz und *Mehrdeutigkeit*. Auch hier kommt innerhalb einer physikalischen Beschreibung wieder der Begriff der *Bedeutung* mit ins Spiel. Es zeige sich dann eine Homologie zwischen der Beschreibung (quanten-) physischer und geistiger Prozesse, denn in beiden Sphären gehe es um die Kontextualisierung von Mehrdeutigkeit durch Bedeutung:

»Es wird jedoch im allgemeinen dabei ignoriert, daß die Quantentheorie voraussetzt, daß keine solche unterste Ebene einer eindeutigen Wirklichkeit möglich ist. [...] Diese paradoxe Situation findet ihre Auflösung in Bohrs Interpretation, die besagt, daß die Quantentheorie überhaupt keine neuen grundlegenden Konzepte aufstellt. Sie fordert stattdessen, daß die Konzepte wie Ort und Impuls, die im Prinzip in der klassischen Physik eindeutig sind, in der Quantenmechanik mehrdeutig werden. Aber Mehrdeutigkeit ist nur das Fehlen einer definierten Bedeutung. Also führt Bohr, zumindest stillschweigend, den Begriff der Bedeutung als wesentlich für das Verständnis des Inhalts seiner Theorie ein.

Nun ist dies ein radikal neuer Schritt, und Bohr hat ihn nicht freiwillig getan, sondern er wurde durch die Mathematik, die die Quanteneigenschaften der Materie erfolgreich vorhergesagt hatte, dazu gezwungen. Diese Mathematik macht jedoch nur statistische Vorhersagen. [...] Die Bedeutung des Ergebnisses wird weitgehend vom Verhalten bestimmt, von dem man annahm, daß es durch die Teilchen selbst erklärt würde. Es gibt also in gewisser Hinsicht keine unterste Ebene, sondern man wird vielmehr feststellen, daß bis zu einem bestimmten Punkt die Bedeutung der Teilchen die gleiche Mehrdeutigkeit besitzt, die wir in geistigen Prozessen betrachten, wenn wir die Bedeutung betrachten.«⁴⁴

43 Ebd., 38.

44 Bohm (1988, 107).

Sowohl in der Physik als auch im Erleben hängt die Inhaltsebene von einem Kontext ab, der weitere Bedeutungsebenen enthält, die zur Bestimmung beitragen.⁴⁵ Dies führt Bohm zu der Vermutung, dass »alles, wir inbegriffen, eine verallgemeinerte Art von Bedeutung *ist*«. ⁴⁶ Bedeutung entfaltet Materie aus Energie, und Bedeutung formatiert Energieflüsse durch Materie. Da jedoch nur die Bedeutung selbstbezüglich sein könne, liegt für Bohm der Schluss nahe, dass Bedeutung für die Ausgestaltung der Gesamtdynamik von Welt grundlegender anzusehen sei als Materie und Energie:

»In gewisser Hinsicht entfalten Bedeutungen Bedeutungen. Aber es gibt keine Materie der Materie oder Energie der Energie. Für Materie und Energie scheint keine immanente Entfaltungsbeziehung zu existieren. Materie entfaltet in dieser Sichtweise durch die Bedeutung Energie und die Energie entfaltet Materie. Aber die Bedeutung verweist direkt auf sich selbst, und dies bildet in der Tat die Grundlage für die Möglichkeit der Intelligenz, die das Ganze verstehen kann, sich selbst inbegriffen. Auf der anderen Seite enthalten Materie und Energie ihren Selbstbezug zunächst nur indirekt durch die Bedeutung.«⁴⁷

Hierdurch eröffne sich die Möglichkeit für ein Verständnis des Ganzen »als selbstbezüglich durch die »Bedeutung, die es für sich selbst hat« – mit anderen Worten, durch das, was die Wirklichkeit selbst *ist*«. ⁴⁸ Bohm transferiert diesen Gedanken jetzt auch auf das phänomenologische Bewusstsein, das – insofern man bereit ist, diesen philosophisch und auch durchaus wissenschaftlich problematischen Sprung mitzugehen – aus dieser Perspektive als Teil des Ganzen nichts anderes darstellt als veränderbare Bedeutungsinhalte:

»Daher muß jede Umwandlung des Bewußtseins eine Umwandlung der Bedeutung sein. Das Bewußtsein *ist* dessen Inhalt, d. h.

- 45 Sowie: »Die Bedeutung irgendeiner bestimmten Inhaltsebene hängt daher wesentlich von ihrem Kontext ab, der möglicherweise unbegrenzt höhere und subtilere Bedeutungsebenen enthält, so wie eine bestimmte Form, die man in der Nacht wahrnimmt, die Bedeutung eines Schattens oder auch eines Angreifers haben kann, je nachdem, ob man zuvor etwas über herumstreuende Gestalten gehört hat, was man gegessen oder getrunken hat und so weiter. Man sieht also, daß diese Art der Abhängigkeit vom Kontext genau dem entspricht, was man in der Physik in Hinblick auf die Materie findet, wie auch in den Vorstellungen über Geist oder Bedeutung« (Bohm 1988, 109).

46 Bohm (1988, 110).

47 Ebd., 115.

48 Ebd., 116.

dessen Bedeutung. Wir könnten deshalb gewissermaßen sagen, daß wir die Gesamtheit unserer Bedeutungen *darstellen*.⁴⁹

Die implizite Ordnung der Bohm'schen Mechanik wird jetzt den verborgenen Dimensionen des menschlichen Bewusstseins gleichgesetzt. Auf diese Weise gelangen wir von einem physikalischen Holismus zu einer mystischen Perspektive, die einerseits eine Einheit von Welt und Bewusstsein postuliert, die sich dann aber durch verborgene Gesetzmäßigkeiten auszeichnet, die allerdings weder durch objektive Welterkenntnis noch durch subjektive Erfahrungen zugänglich sind. Die Verwicklung von Materie, Energie und Bedeutung als solche erscheint dem Bewusstsein jetzt verborgen, da sich die Bedeutung normalerweise nur mit sich selbst identifiziert, ohne sich jedoch die Bedingungen zugänglich zu machen, welche sie hervorbringen. Bedeutung manifestiert sich zwar in unserem Körper und in unseren Emotionen, sei sich jedoch nicht der Verbindung bewusst, in welcher sich Körper, Emotionen und Denken ineinander einfallen:

»Diese Dinge werden im Körper und in den Emotionen sichtbar, aber die Verbindung zwischen Körper, Emotionen und Denken bleibt verborgen. Es gibt Anzeichen dafür, daß es möglich ist, die Blockade zu entfernen, und dies kann eine sehr natürliche Erfahrung sein.«⁵⁰

Prinzipiell sei jedoch die Transzendenz dieser Beziehung möglich. Dies könne geschehen, indem die Programme, welche die Bedeutung generieren, sich als Programme erkennen. Hiermit verschwinde die Identifikation mit den Programmen und entsprechend könnten sich diese dann ändern und zu einem gewandelten Bewusstsein führen:

»[W]enn wir diese Programme erkennen, werden sie sich ändern. Gegenwärtig haben sie für uns nicht die Bedeutung von Programmen; sie bedeuten etwas sehr viel grundlegendes. Sie bedeuten *uns*.«⁵¹

Bohm entdeckt mit der Quantenphysik eine implizite Ordnung der Welt, bleibt dabei jedoch weder wie Schödinger bei der Paradoxie der Einheit in der Differenz stehen, noch versucht er wie v. Weizsäcker wissenschaftliche und religiöse Weltbeschreibungen in Einklang zu bringen.⁵² Vielmehr ruft er auf, selbst die mystische Praxis zu wagen

49 Ebd., 117.

50 Ebd., 132.

51 Ebd., 133.

52 Schrödinger weist mit dem arithmetischen Paradoxon auf das Problem der Entfaltung der Einheit in der Differenz hin und entdeckt hierbei

und im Erkennen des Erkennens zu erschauen, dass das, was wir vermeintlich darstellen, nur Programme sind, die sich verändern und auflösen, insofern wir diese als solche begreifen.

Der Weg des Mystikers besteht mit Tugendhat darin, sich von sich selbst zu befreien, indem »man das Gewicht, das die eigenen Wünsche für einen haben, relativiert« und hierdurch eine »*Transformation des Selbstverständnisses*« einleitet.⁵³ Bohm schlägt vor, die Erkenntnisse der Quantenphysik als Instruktion zu begreifen, den Schritt zur Umwandlung des Bewusstseins zu wagen.

Das Geheimnis der konditionierten Koproduktion

Am Anfang dieses Kapitels haben wir darauf hingewiesen, dass hinreichend komplexe Theorien, zudem wenn sie beanspruchen, eine Universaltheorie zu sein, Reflexionsformen hervorbringen, die den Denkfiguren der Mystik ähnlich sein können. Insbesondere die epistemologisch diesbezüglich recht sensible Systemtheorie hat dies früh verstanden.

Wie Fuchs immer wieder betont, stellen Systeme keine Dinge dar, sondern *sind* die Differenz von System und Umwelt. Aber wenn das System »Differenz ist, dann ist es: Nichts. Dann hat es kein ›Sein‹. Dann ist es nichts ›Seiendes‹.«⁵⁴ Wir können dann mit Fuchs nicht mehr sagen, »hier ist das eine, dort das andere System (so sehr uns die Sprache dazu nötig), sondern nur, daß das System (als Wort) dafür einsteht, daß ›etwas‹ weder hier noch dort ist, daß jede Bezeichnung eines ›hier‹, eines ›dort‹, eines ›hüben‹, eines ›drüben‹, die konditionierte Koproduktion ver-einseitigt, einschnürt und in gewisser Weise: vergewaltigt. Und schlimmer noch: Der Beobachter, der diese Ver-Einseitigung vornimmt, ist selbst: Resultante desselben Prozesses, wenn und insoweit wir ihn als System denken.«⁵⁵

Der Systembegriff führt gleichsam immer seine Nicht-Kommunizierbarkeit mit und aus diesem Grunde kann die Begegnung mit hinreichend elaborierten mystischen Denkformen helfen, das Bewusstsein in Hinblick auf die Grenzen des Sagbaren und die hieraus entstehenden Probleme der Darstellung und Kommunikation des Unsagbaren zu schärfen.

Parallelen zur altindischen Mystik der Upanischaden, um dann beim Unaussprechlichen zu landen.

v. Weizsäcker begegnet dem Paradoxon der Zeit, um in einer umfassenden Gegenwart verschränkter Wirklichkeiten die Bedingung der Möglichkeit für religiöse Erfahrungen zu entdecken.

53 Tugendhat (2006, 122), kursiv im Original.

54 Fuchs (2008, 61).

55 Fuchs (2008, 61).

Die Quantentheorie pointiert das Problem, indem sie uns zwingt, die Koproduktion von System-Umwelt-Verhältnissen als real anzunehmen. In der soziologischen Systemtheorie lässt sich die Einführung von Systemen zunächst noch als ein *Trick* verstehen. Man beginnt mit der Behauptung, dass es Systeme gibt, und mit Hilfe dieses Postulats lässt sich jetzt in bestimmter Weise auf die Welt schauen, was dann mehr oder weniger interessante Ergebnisse produziert. Ob es nun Systeme wirklich gibt oder nicht, ist hier nicht wirklich von Belang (ebenso wenig braucht es den Rational-Choice-Theoretiker im Vollzug seiner Forschungsprogramme zu interessieren, ob es den rational handelnden Akteur wirklich gibt). Auch mit einem ungedeckten Scheck lässt sich die Marktlage sondieren. Entsprechend lässt sich mit dem Systembegriff auch dann etwas über soziale Wirklichkeiten herausfinden, wenn das Konstrukt metatheoretisch unsauber gebaut ist bzw. die Existenz von Systemen nicht bewiesen ist.

Für die Quantenphysik stellt sich das Problem jedoch anders dar. Hochrangige Physiker aus mehreren Generationen haben sich hart daran abgearbeitet, um zu zeigen, dass die Quantentheorie in ihrem Kern nur einen mathematischen Trick darstellt und die mit der Nichtvertauschbarkeit der Operatoren einhergehende Unbestimmtheitsrelation als ein Artefakt einer mathematischen Beschreibung begriffen werden kann. Die vielfältigen Befunde einer immer raffinierter werdenden Experimentalphysik zeigen jedoch auf, dass es Quantensysteme *wirklich* gibt. Es bleibt der Physik also nichts anderes übrig, als mit ›Wellen von nichts‹ zu rechnen, sich den hieraus ergebenden informationstheoretischen Paradoxien zu stellen und mit System-Umwelt-Verhältnissen zu arbeiten, die ihrer Natur nach nicht-lokal verschränkt zu begreifen sind.

Die Quantenphysik gelangt gewissermaßen *unfreiwillig* zu den Paradoxien der Systemtheorie und in diesem Sinne scheuen sich die meisten Physiker aus gutem Grunde, das Grenzgebiet zwischen Mystik und Wissenschaft zu betreten. Ihr Zaudern ist verständlich, weil dieses Gebiet vermint ist. Esoterischer Unsinn, religiöse Dogmen und Halbwahrheiten aus dem New-Age-Umfeld tummeln sich hier und sind oftmals nur schwer zu unterscheiden von den Denkformen anspruchsvoller und ernst zu nehmender mystischer Reflexion.

Auf der anderen Seite führt jedoch auch für die moderne Physik mittelfristig kein Weg an der Erkenntnis vorbei, dass in ihren Gegenständen Reflexionsverhältnisse eingewoben sind, die nicht mehr in den Kategorien ›Beobachter‹ und ›Objekt‹ zu fassen sind, sondern einen Systembegriff verlangen, der nicht mehr auf ›Sein‹, sondern auf ›Reflexion‹ gegründet ist.

Selbst die Physik führt nicht mehr zur Einheit – wenngleich sie nach der Welttheorie sucht.

VII FORMPROBLEME EINER UNIVERSALTHEORIE – SYSTEMTHEORETISCHE REFLEXIONEN

In den vorangehenden Kapiteln haben wir versucht, eine Rekonstruktion der Quantentheorie zu leisten, welche die Bezugsprobleme in den Vordergrund stellt, die durch die (Quanten-)Physik erzeugt wurden und dann zu Lösungen geführt haben, die wiederum neue Bezugsprobleme für die Physik hervorrufen. Auf diesem Wege konnte ein tieferes Verständnis der Theorieentscheidungen und -bewegungen der Quantentheorie und der hiermit aufgeworfenen Paradoxien gewonnen werden. Es wurde deutlich, dass die bis heute andauernde Auseinandersetzung um die angemessene Deutung der Quantentheorie nicht nur ein Oberflächenphänomen darstellt, sondern tief in Theorieformen selbst eingewoben ist. Die Geschichte der Auseinandersetzung um die richtige Deutung der Quantenphysik verweist auf eine paradoxe Theorieanlage, die zwar entfaltet, jedoch nicht aufgelöst werden kann. Das Dilemma scheint offenbar in die Form und Anlage dieser Theorie selbst eingewoben. Die Quantentheorie würde damit also in ihrem Kern eine Reflexionsform darstellen, der die Deutungsproblematik unentrinnbar eingeschrieben ist und zwar unabhängig von der gewählten Interpretation:

- Die Kopenhagener Interpretation sieht sich gezwungen, den Beobachter einzuführen, wengleich er in dem quantentheoretischen Formalismus selbst nicht vorkommt. Mit v. Neumann bleibt hier nichts anderes übrig, als willkürliche Schnitte in die Welt zu legen, um auf diese Weise eine Beschreibung der Welt zu bekommen, mit der man in der (Forschungs-)Praxis etwas anfangen kann.
- Die Viele-Welten-Theorie steht in Verbindung mit der Dekohärenztheorie vor dem Problem, das Universum als geschlossenes System zu begreifen, aber gleichzeitig eine infinite Kaskade offener Umwelthorizonte voraussetzen zu müssen, um entsprechend dem order-from-noise-Prinzip eindeutige Formen emergieren zu lassen.
- Die informationstheoretischen Deutungsansätze stehen vor dem Dilemma, dass Information nur in einem Kontext Sinn macht, der dann wiederum als informiert zu betrachten ist.
- Im emergenztheoretischen Holismus erscheinen Relata als Ergebnis von Relationen. Grund und Begründung wechseln ihre Rollen. Mit Blick auf die nicht-räumlich zu verstehende quantenmechanische Verschränkung gelangen wir jetzt in eine Welt, in der sich Anfang und Ende, Ursache und Wirkung sowie Mikro- und Makroebene vollends in einen Strudel rekursiver Koproduktionen auflösen. Hiermit verschwindet jedoch auch die platonische

Hoffnung auf eine Weltformel, in der sich physikalische Theorie verlässlich einrichten könnte.

In der Einleitung haben wir vermutet, dass sich die Theorieentwicklung der Quantentheorie mit einem systemtheoretisch geschulten Blick leichter verstehen und aufschließen lässt, da hier bereits eine besondere Sensibilität für die Eigenarten von Theorieanlagen mit rekursiven Beobachtungsverhältnissen vorausgesetzt werden kann.

In diesem Kapitel ist deshalb ausführlicher auf die (soziologische) Systemtheorie einzugehen, da hier einige Ressourcen zu erwarten sind, die dazu beitragen können, die Paradoxien der Quantentheorie noch deutlicher zu verstehen. Von ihrer Anlage gesehen stellen sowohl die Quantentheorie als auch die soziologische Systemtheorie Globaltheorien mit Universalitätsanspruch dar. Solche Theorieentwürfe zeichnen sich dadurch aus, dass sie als Gegenstand in sich selber vorkommen.¹

Die soziologische Systemtheorie stellt eine Universaltheorie dar, denn sie hat den Anspruch, soziale Semantiken und Beobachtungsverhältnisse zu rekonstruieren, hat dabei jedoch mitzubehandeln, dass sie als Theorie selbst eine sozial konditionierte Semantik, ein gesellschaftlich bedingtes Beobachtungsverhältnis darstellt. Die Quantentheorie muss spätestens seit ihrer mathematischen Ausarbeitung durch v. Neumann als eine Universaltheorie angesehen werden, da nun die Messprozeduren (einschließlich des Experimentators) ebenfalls quantentheoretisch beschrieben werden müssen.

1 Um mit Luhmann zu sprechen: »Theorien mit Universalitätsanspruch sind leicht daran zu erkennen, daß sie selbst als ihr eigener Gegenstand vorkommen (denn wenn sie das ausschließen wollten, würden sie auf Universalität verzichten müssen). Damit sind, und das gilt für alle ›global theories‹ (auch zum Beispiel für die Quantenphysik), bestimmte Sektionen der klassischen Wissenschaftstheorie außer Kraft gesetzt; so vor allem alles, was mit unabhängiger Bestätigung (confirmation) des Wahrheitsanspruchs der Theorie zu tun hat. [...] Theorien mit Universalitätsanspruch sind also selbstreferentielle Theorien. Sie lernen an ihren Gegenständen immer auch etwas über sich selbst. Universale Theorie betrachtet ihre Gegenstände und sich selbst als einen ihrer Gegenstände als selbstreferentielle Verhältnisse. Sie setzt keine unhinterfragten erkenntnistheoretischen Kriterien voraus, sondern setzt, wie neuerdings auch viele Philosophen und Naturwissenschaftler, auf eine naturalisierte Epistemologie. Das heißt wiederum: ihr eigenes Erkenntnisverfahren und ihr Annehmen oder Verwerfen von dafür geltenden Kriterien ist für sie etwas, was in ihrem eigenen Forschungsbereich, in einer Disziplin des Teilsystems der modernen Wissenschaft geschieht« (Luhmann 1993, 9 f.). Siehe zum »Design und Potential von Universaltheorien« auch die Arbeit von Gaiser (2002).

Wenngleich beide Theorieprojekte unterschiedliche Gegenstandsbereiche haben, erscheint eine Gegenüberstellung allein schon deshalb lohnenswert, weil hierdurch tiefere Einblicke in die Theoriearchitektur solcher Projekte gewonnen werden können. Zu denken ist hier etwa an die Konsequenzen aus der Einbeziehung des Beobachters und die Paradoxien, welche aufgrund zirkulärer Begründungsverhältnisse entstehen.

Theorien mit Universalitätsanspruch verstricken sich zwangsläufig in die Problematik, dass man die »Exowelt« nur aus der »Endoperspektive« heraus erkunden kann.² In der Forschungspraxis lässt sich mit den hieraus folgenden Rekursivitäten in einer pragmatischen Weise umgehen, nämlich indem man einen bestimmten, willkürlichen Schnitt in die Welt legt, um weiterarbeiten zu können. In anderen Forschungsfragen kann der Schnitt dann an einer anderen Stelle gesetzt werden. Das zu Messende und zu Bestimmende wird jetzt einfach anders kontextualisiert.

In Hinblick auf ihrer grundlagentheoretische Verortung stehen Universaltheorien aufgrund ihrer autologischen Verwobenheit mit der Praxis nicht mehr außerhalb des untersuchten Feldes, sondern sind selbst Teil von ihr. Sie stellen selbst ein epistemisches System dar und müssen als solches in der Einheit von Erkennen und Handeln vieles unscharf stellen, um wenigstens andere deutlich erkennen und fokussieren zu können. Universaltheorien führen zu der Konsequenz, dass jeder operative Vollzug der Forschungspraxis nolens volens neue blinde Flecke erzeugt. Sie erscheinen damit in der eigentümlichen Situation, dass gerade, wenn sie in ihren Beschreibungen sehr genau und exakt werden, damit auf der anderen Seite die hierdurch ausgeblendete Komplexität in die Beschreibung wieder eindringt.

Insbesondere die soziologische Systemtheorie verfügt über eine ausgearbeitete Reflexion der hiermit verbundenen wissenschafts- und erkenntnistheoretischen Konsequenzen. Für sie ist »reduzierte Komplexität« nicht »ausgeschlossene Komplexität, sondern aufgehobene Komplexität. Sie hält den Zugang zu anderen Kombinationen offen – vorausgesetzt, dass ihre Begriffsbestimmungen beachtet und theoriestellenadäquat ausgewechselt werden. Wenn freilich das Begriffsbestimmungsniveau aufgegeben würde, würde auch der Zugang zu anderen Möglichkeiten der Linienziehung im Nebel verschwinden und man hätte es wieder mit unbestimmter, unbearbeiteter Komplexität zu tun.«³

Die Quantentheorie begegnet an verschiedenen Stellen dem Begriff der Information und dem hiermit assoziierten Problem der Komplexitätsreduktion. Es scheint sogar, dass der Informationsbegriff eine

2 Rössler (1992).

3 Luhmann (1993, 12). Vgl. auch Vogd (2009).

wichtige, wenn nicht sogar die zentrale Rolle einnehmen muss, um die Eigenarten der Quantenphysik überhaupt verstehen zu können.⁴ Allein schon deshalb ist die Begegnung der beiden Theorieanlagen hier vielversprechend. Darüber hinaus weisen die unterschiedlichen, theoriekonform durchführbaren Deutungen der Quantentheorie auf eine möglicherweise interessante Theoriedynamik hin, die vielleicht auch für die weitere Entwicklung der soziologischen Systemtheorie von Interesse sein könnte.

Möglicherweise könnte ein fundierter Vergleich der epistemischen und erkenntnistheoretischen Bedingungen der beiden Theorieanlagen gar die Entstehung einer allgemeinen Theorie erkennender Systeme anregen. Luhmann selbst vermutete, dass die »Konsolidierung der Physik als Quantenphysik« sowie die Entdeckung der »Unentscheidbarkeitstheoreme der Logik« hierbei möglicherweise einen wichtigen Beitrag leisten können.⁵

4 Siehe etwa Zeilinger (1999b; 2005), v. Weizsäcker (1994), Schrödinger (1935) und im Rahmen der »Konsistente-Geschichten-Interpretation« Gell-Mann (1994).

5 »Die Quantenphysik hat mit ihrer These der Indeterminiertheit der Materie und der nur probabilistischen Grundlagen aller Alltagssicherheiten Aufsehen erregt. Aber Physiker argumentieren nicht selten so, als ob mit Indeterminiertheit oder Unbestimmtheit eine Eigenschaft der Materie bezeichnet sei, und geben sich damit zufrieden. Da es aber Negativitäten (wie Indeterminiertheit) und Probabilitäten nur als Zustände eines Beobachters gibt, muß die Quantentheorie als Theorie des Beobachters integriert werden; und in der Tat ermöglichen ihre Gleichungen es nur, auf Grund von Beobachtungen andere Beobachtungen vorauszusagen. Nichts anderes ist der Inhalt ihrer physikalischen Gesetze. Sie beschreiben den Beobachter als physikalisches Phänomen. Die Grenzen der Bestimmbarkeit sind Bestandteile der physikalischen Gesetze selbst; es bedarf zu ihrer Ermittlung keiner zusätzlichen Annahmen« (Luhmann 1998, 505 f.). Für die Paradoxien einer Logik, die den Beobachter ernst nimmt, ergibt sich für Luhmann etwa folgender Anschluss: »Das Konzept der Beobachtung zweiter Ordnung ist mit den Gödel-Ergebnissen kompatibel, denn es löst das Unwahrscheinlichkeitsproblem durch eine Beobachtung von außen. Es antwortet außerdem auf das Problem der Zirkularität, indem es den Beobachter anweist, zu beobachten, wie andere Beobachter ihre Zirkel entfalten, und ihn dann zu dem autologischen Schluß zwingt, daß auch er Selbstreferenzprobleme durch Unterscheidungen auflösen muß. Die second order cybernetics weist einen Ausweg aus denjenigen Problemen der Erkenntnistheorie, die sich in der Diskussion unseres Jahrhunderts als Zentralprobleme epistemologischer Kontroversen herausgeschält hatten. Nur ist damit noch nicht entschieden, wie weit daraufhin die Erwartungen abgeschwächt werden müssen, die die Tradition mit den Reflexionstheorien des Wissenschaftssystems verknüpft hatte« (Luhmann 1998, 508).

I Wichtige Stationen der Rekonstruktion

Wir beginnen im Folgenden zunächst mit einem Rückblick auf die bislang geleistete Rekonstruktion, um die wesentlichen Theoriefiguren der Quantentheorie und die hiermit einhergehenden Deutungsansätze für die weitere Diskussion präsent zu halten.

Am Anfang von Kapitel I stand das Problem der Strahlung schwarzer Körper, welches erst mit der Einführung des Planckschen Wirkungsquantums einer Klärung zugeführt werden konnte. Zwei inkommensurable mathematische Beziehungen, die jeweils einen Teilbereich der empirischen Verhältnisse beschreiben, wurden von Planck zunächst in einer mathematischen Interpolation zusammengeführt. Man hatte jetzt zwar eine richtige Beschreibung der empirischen Verhältnisse, jedoch noch keine physikalische Erklärung des gefundenen Zusammenhangs. Im Rekurs auf die Wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation der Entropie konnte Planck eine physikalische Deutung der mathematischen Formel liefern. Seine diesbezügliche Erklärung beruht auf der Anschauung, dass die Gesamtenergie sozusagen in diskrete Pakete aufgeteilt wird, die in unterschiedlich wahrscheinlichen Arrangements angeordnet werden können.

Einstein hat die Idee des Wirkungsquantums auf alle elektromagnetischen Wellen verallgemeinert. Empirisch zeigte sich dies sinnvoll, doch hierfür war das Dilemma des Welle-Teilchen-Dualismus als Preis hinzunehmen. Wie nicht zuletzt im Doppelspaltexperiment deutlich wird, begegnen wir dann zwei Beschreibungsebenen, die nicht ineinander überführt werden können. Die Teilchentheorie ist nicht mit den beobachteten Beugungs- und Interferenzphänomenen in Einklang zu bringen. Die Wellenbeschreibung kann nicht die gequantelten Verhältnisse beim Energietransfer erklären.

Darüber hinaus zeigt sich, dass sich Quantenprozesse nicht mehr als ortsabhängige Veränderungen der potenziellen und der kinetischen Energie beschreiben lassen. Sie können nicht mehr auf Basis von Bewegungsgleichungen mit einer entsprechenden Differenzialrechnung rekonstruiert werden. Hiermit ist aber entweder die Idee des Determinismus – und hiermit verbunden die starke Fassung des Kausalitätsgesetzes – oder ein anderer wichtiger Satz der klassischen Physik – etwa das Gesetz der Energieerhaltung – aufzugeben. Eine andere, nicht-klassische Beschreibungsweise wird jetzt nötig.

Der entscheidende Schritt zur Lösung des Problems der Quantisierung bestand darin, eine so abstrakte Beschreibung des Problems zu finden, dass man auf die Anschauung der Elektronenbahn verzichten kann. Dies gelang zum ersten Mal mit Heisenbergs Matrizenmechanik. Auf diesem Wege konnte man jetzt einen Teil der klassischen Physik hinter sich lassen, um doch zugleich in dem Sinne weiterma-

chen zu können, dass Mathematik und Experiment weiterhin in einer engen Wechselbeziehung stehen.

Der von Heisenberg entdeckte Formalismus führt über die Vertauschungsrelation auf die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation, nach der Ort und Impuls nicht beide genau bestimmt werden können. Dies führt zur Vorhersage einiger Besonderheiten von Quantensystemen: Sie haben eine schwächere Kausalität, eine schwächere Logik und es besteht geringere Austauschbarkeit in Verbänden, das heißt es bestehen weniger Freiheitsgrade als in einer klassischen Beschreibung des gleichen Sets von Variablen.

Die Quantentheorie beruht auf einer hoch abstrakten Mathematik, deren Modellierung zwar in Übereinstimmung mit den empirischen Befunden steht, die sich jedoch nicht so ohne Weiteres in eine physikalisch-konzeptionelle Anschauung übersetzen lässt. Wie schon bei Planck wird hiermit wieder das Bezugsproblem der physikalischen Deutung der Quantentheorie virulent.

Praktisch unmittelbar mit ihrer Entdeckung entstanden Versuche, der Quantenphysik wieder klassische Anschauungsformen zurückzugeben.

Schrödinger entwickelte seine Wellengleichung, um eine Modellierung der Quantentheorie zu generieren, die auch physikalisch-anschaulich Sinn ergibt. Die Grundintuition bestand darin, Materie als Wellen zu beschreiben. Die Hoffnung, die Wellenfunktion ψ im Sinne eines klassischen physikalischen Verständnisses als Potenzialwelle deuten zu können, ließ sich jedoch nicht halten. Die mit der Wellenfunktion angestrebte Anschaulichkeit war damit wieder ruiniert.

Born demgegenüber ging weiterhin von der Teilchennatur der Elektronen aus und interpretierte die mit der Wellenfunktion formulierte Beziehung als eine Wahrscheinlichkeitsdichte, die ausdrückt, mit welcher Häufigkeit bei wiederholtem Experiment ein Elektronenteilchen an einem bestimmten Ort zu erwarten ist. Das Verhalten der untersuchten Quantensysteme wäre damit durch klassisch beschreibbare Teilchenbewegungen determiniert zu sehen.

Doch auch hiermit war das Deutungsproblem der Quantenphysik nicht wirklich gelöst, denn das mit der Schrödinger-Gleichung gegebene Eigenwertproblem lässt sich nur lösen, wenn von einer wie auch immer zu verstehenden Ausbreitung der Wellenfunktion ψ ausgegangen wird, bei der unterschiedliche Wellen miteinander interferieren und deshalb nur bestimmte Werte als Eigenlösungen eingenommen werden können. Da aber in der Überlagerung unterschiedlicher Wellenmuster auch negative Wahrscheinlichkeitsamplituden vorkommen und entsprechend verrechnet werden, lässt sich die Interpretation des statistischen Kalküls nicht mit klassischen Mitteln bewältigen (in der klassischen Physik sind Wahrscheinlichkeiten Koeffizienten,

die zwischen 0 und 1 liegen können, also nur einen positiven Wert annehmen können, was einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0 bis 100 % entspricht).

Der unhintergehbare Welle-Teilchen-Dualismus wirft ein Dilemma auf, das sich nicht mit den Hausmitteln der klassischen physikalischen Konzeptionen bewältigen lässt. Man verfügt mit der ausformulierten Quantentheorie zwar jetzt über einen brauchbaren mathematischen Formalismus, doch was all dies physikalisch-konzeptionell bedeuten soll, verschließt sich einer einfachen Deutung.

Bohr verneinte schließlich die Möglichkeit einer realistischen Interpretation der Quantenphysik und schlug stattdessen vor, mit dem Wellenbild und dem Teilchenbild zwei komplementäre, sich im Bereich der Quantenwelt gegenseitig ergänzende Beschreibungsweisen zu verwenden. Je nachdem, auf welche Weise man eine Messung vornimmt, erscheine dann jeweils ein anderer Aspekt. Quantenobjekt und Messvorrichtung seien entsprechend jeweils zusammen zu denken, woraus jedoch folgt, dass niemals ein vollständiges Bild eines Quantenobjekts erreicht werden könne, da niemals beide Beschreibungen gleichzeitig Sinn ergeben. Hieran anschließend gingen Bohr und Heisenberg in der Kopenhagener Interpretation in Hinblick auf die subatomaren Wirklichkeiten von einer nicht überschreitbaren epistemischen Grenze aus. Auch der ontologische Status der Quantenwelt bleibe hiermit undefiniert, denn man könne aufgrund der Erkenntnisstranken nicht wirklich wissen, mit was man es da zu tun habe, bzw. man könne nur wissen, dass die Beschreibungsweisen der klassischen Physik hier versagen.

Der Preis, der für das Komplementaritätsprinzip gezahlt werden muss, besteht in der weder physikalisch noch durch den mathematischen Formalismus gedeckten These vom Wellenkollaps. Aus dieser Perspektive bleibt jetzt nichts anderes übrig, als den Wellenkollaps zu ontologisieren (›wenngleich niemand jemals eine kollabierende Welle beobachtet hat‹) und ein Tabu einzurichten, das es verbietet, weitere Fragen zu stellen (›prinzipiell lässt sich nicht mehr über Quantenzustände wissen‹).

Mit v. Neumanns »Mathematischen Grundlagen der Quantentheorie« fand die Quantentheorie ihren formalen Abschluss. Sie wird jetzt definitiv als eine nicht-klassische Theorie rekonstruiert und erhält ihre Legitimation aufgrund der inneren mathematischen Konsistenz und aufgrund der Tatsache, dass sie die einzige derzeit bestehende Theorie darstellt, die in der Lage ist, die experimentellen Befunde angemessen zu beschreiben. Entsprechend v. Neumanns mathematischer Rekonstruktion der Quantenmechanik ist jetzt davon auszugehen, dass die Schrödinger-Gleichung auch für die klassische Welt gilt – und damit prinzipiell für das ganze Universum. Das Mess-

instrument, mit dessen Hilfe Quantenobjekte beobachtet werden, ist aus dieser Perspektive ebenfalls quantentheoretisch zu beschreiben.

Die Frage, welcher Teil des Prozesses den Schnitt in der Wellenfunktion auslöst, lässt sich damit jedoch aus prinzipiellen Gründen nicht mehr beantworten. v. Neumann löst das Problem des infiniten Regresses durch die Setzung eines willkürlichen Schnittes, demzufolge die Wellenfunktion kollabiert, ohne dabei angeben zu müssen, ob der gelegte Schnitt auch physikalisch einen Unterschied darstellt. Das Messproblem lässt sich dann entsprechend durch die Wahl eines jeweils definierten Bezugsrahmens in einer Weise bearbeiten, dass die Experimente im Sinne des Formalismus der Quantentheorie Sinn ergeben. Die Paradoxie des Welle-Teilchen-Dualismus bleibt zwar erhalten, wird aber umschifft, indem man einen mathematischen Formalismus hat, mit dem sich rechnen lässt und mit dessen Hilfe man in Referenz zu der im Experiment gewählten Basis einen Schnitt setzen kann, über den die undefinierte Grenze zwischen der klassischen Beobachtung eines bestimmten Messergebnisses und der quantenmechanischen Beschreibung unterbestimmter Verhältnisse wieder eingeholt werden kann.

Sowohl Einsteins Arbeit zum EPR-Gedankenexperiment als auch Schrödingers Katzenbeispiel verweisen auf die offenen Enden der Quantenphysik. Nicht zuletzt wird hier schon auf die »System-im-System-Paradoxie« hingewiesen. Der Sachverhalt, der hier aufscheint, ist mehr als nur eine Spiegelung in der Spiegelung, denn mit dem Prinzip der Verschränkung bekommen wir es darüber hinaus mit nicht-lokalen Prozessen zu tun.

Mit der »Machtübernahme der Mathematik in der Quantentheorie« (v. Weizsäcker)⁶ rücken die epistemischen und ontologischen Verunsicherungen, die mit der Quantentheorie einhergehen, zunächst in den Hintergrund. Man kann nun rechnen, ohne wirklich zu begreifen. Man kann jetzt mit der Quantentheorie arbeiten, ohne sie wirklich verstehen zu müssen.

Als Primärreferenz der Quantentheorie erscheinen jetzt die Formsprache der Mathematik und eine bizarre Empirie, die mit der mathematischen Beschreibung in Beziehung gesetzt werden kann.

Kapitel II beschäftigt sich mit der Suche nach Alternativen im Anschluss an die Kopenhagener Interpretation. Die mathematische Formulierung der Quantentheorie bleibt in diesen Deutungs- und Erklärungsversuchen unangetastet.⁷ Es wird jedoch die physikalische Intuition der Kopenhagener Deutung in Frage gestellt, nach der die Messbeobachtung den Kollaps der Wellenfunktion bewirkt, um auf

6 v. Weizsäcker (1994, 511).

7 In der Bohmschen Mechanik wird sie allerdings um eine Gleichung erweitert.

diese Weise eine Welt von Tendenzen und Möglichkeiten in eine klassische Wirklichkeit definiter Zustände zu überführen.

Jede dieser Alternativen beruht auf einer jeweils spezifischen Ontologie, von der aus versucht wird, den Formalismus der Quantenphysik zu deuten. Gemeinsames Moment aller Ansätze ist der Anspruch, die mit der Kopenhagener Deutung inhärent gegebene Beobachterproblematik zu überwinden.

Die Ensemble-Theorie geht vom klassischen Teilchenbild als ontologischer Basis aus, um mit Hilfe statistischer Überlegungen den Beobachter zu bannen. Die Wahrscheinlichkeiten der ψ -Funktion erscheinen jetzt als objektive Eigenschaften streuender Teilchen. Das Dilemma bleibt jedoch, dass diese Ensembles in Hinblick auf konjugierte Wahrscheinlichkeiten miteinander verschränkt sind, also eine Beziehung angenommen werden muss, welche die für eine klassische Beschreibung konstitutive Individualität der Teilchen in Frage stellt.

Die Viele-Welten-Theorie geht demgegenüber vom ontologischen Primat der mit der Schrödinger-Gleichung aufgespannten Wellenfunktion aus. Das Wahrscheinlichkeitskalkül wird hiermit aus der objektiven physikalischen Beschreibung getilgt, tritt allerdings als ausgeschlossenes Drittes über das Postulat des subjektiven Zufalls wieder in die Welt mit ein. Ebenso schleicht sich der ausgeschlossene Beobachter über das Problem der zu wählenden Basis in das Kalkül hinein.

Die Bohmsche Mechanik wählt einen ontologischen Ausgangspunkt, demzufolge sowohl der Teilchen- als auch der Wellencharakter als »real« betrachtet werden, und entwickelt hieraus die Vorstellung einer durch die Schrödinger-Gleichung gesteuerten Führungswelle, auf der die Teilchen reiten. Die konsequente Durchführung dieser Idee führt zu einem holistischen Universum, in dem die Eigenschaften von Teilchen als hochgradig kontextualisiert, das heißt auf nicht-lokale Weise durch das Rest-Universum geprägt zu sehen sind.

Jede der drei vorgestellten Alternativen zeigt sich – insofern konsequent durchgeführt – als eine Entfaltung der Paradoxie einer nicht-klassischen Theorieanlage, die den wunderlichen Charakter der Quantentheorie mehr bestätigt denn beruhigend in klassische Gefilde überführt. Es zeigt sich, dass der Versuch, die Quantenphysik auf Basis festgezurrtter ontologischer Prämissen deuten zu wollen, nolens volens zu neuen Paradoxien führt.

Kapitel III handelt von den Ergebnissen und Erfolgen der quantentheoretisch inspirierten Experimentalphysik. Zunächst lässt sich feststellen, dass quantenphysikalische Zugänge in recht unterschiedlichen, heterogenen Forschungsfeldern erfolgreich angewendet werden und dass entsprechend mittlerweile unter Physikern kaum mehr ein

Zweifel besteht, dass die Quantentheorie eine physikalische Fundamentaltheorie darstellt.

Das mit der Quantentheorie aufscheinende Dilemma, dass man über einen mathematischen Formalismus verfügt, der sich anschaulich nur schwer deuten oder verstehen lässt, wird durch die Befunde der modernen Experimentalphysik nochmals pointiert. Die Experimente im Anschluss an das Bell-Theorem zeigen auf, dass Verschränkung und die nicht-lokale Kontextualität von Teilcheneigenschaften empirisch überprüfbare Sachverhalte darstellen.

Der Casimir- und der Aharonov-Bohm-Effekt zeigen auf, dass leerer Raum nicht leer von Wirkung ist und auch die delayed-choice- und quantum-eraser-Experimente lehren, dass Quanteneffekte nicht als Artefakte der Messinteraktion verstanden werden können. Die Herleitung der Quantenelektrodynamik und die Erklärung von Suprafluidität und Supraleitung als makroskopische Quantenphänomene ergeben nur Sinn, wenn man der Wellenfunktion einen gewissen Realitätscharakter zugesteht. Da auch die seltsamsten Implikationen der Quantenphysik bislang nicht am Realitätstest gescheitert sind, ist der Weg zu einer klassischen Erklärung dieser Phänomene weitgehend verbaut.

Innerhalb der Gemeinde der Physiker verändert sich nun die Perspektive. Mit Quantenphänomenen zu rechnen, gehört mittlerweile zu den Routinetätigkeiten eines Physikers. Das Bizarre ist für ihn jetzt normal. Das Vertraute erscheint jetzt erklärungs würdig. Als ungelöstes Problem der Quantenphysik erscheint vor allem die klassische Physik – und damit einhergehend: die scheinbar stabile und eindeutige Welt unserer Alltagserfahrung.

In Kapitel IV begegnen wir einer in jeder Hinsicht selbstbewusst gewordenen Quantenphysik. Sich ihres unbestreitbaren Status einer physikalischen Universaltheorie bewusst geworden, kann sich die Quantenphysik langsam von der Herrschaft der Mathematik lösen. Wie beispielsweise mit der Quantenfeldtheorie deutlich wird, ist es für die Legitimität ihrer Anwendung jetzt nicht mehr nur ausschlaggebend, ob eine konsistente und widerspruchsfreie mathematische Beweisführung vorliegt. Man lässt sich nun wieder vermehrt von physikalischen Konzepten und Anschauungen leiten. Auch in Fragen der Interpretation lautet die Devise jetzt weniger ›halte den Mund und rechne‹. In der (theoretischen) Physik wird auch wieder darüber nachgedacht, wie sich Quantentheorie und Welterfahrung zueinander in Beziehung setzen lassen.

Hiermit entstehen neue Varianten der Deutung und Interpretation. Allerdings beruhen diese physikalischen Konzepte jetzt kaum mehr auf klassischen Anschauungen, entsprechend denen physikalische Phänomene in eine unmittelbare Beziehung zu Beobachtungen und

Alltagserfahrungen gebracht werden können. Vielmehr entstehen jetzt innerhalb unterschiedlicher physikalischer Theorieansätze Modelle, die auf theorieimmanenten Veranschaulichungen beruhen, also in Hinblick auf ihre Evidenz nicht mehr unmittelbar an physikalische Welterfahrungen angekoppelt sind, sondern vor allem auf der konsistenten Durchführung theoretisch begründeter Konzepte beruhen. Die Primärreferenz ist jetzt nicht mehr die mathematisch beweisbare Form, sondern die physikalisch-theoretische Konzeption. Mathematik wird zwar weiterhin gebraucht, doch die Physik traut sich jetzt wieder zu, Rechenricks und Lücken im mathematischen Beweis in Kauf zu nehmen, insofern ihre Modelle erfolgreich funktionieren.

Verschiedene theoretische Anschauungen und Konzeptionen führen dabei zu unterschiedlichen Varianten der Deutung und Interpretation der Quantentheorie.

Die ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ führt die Grundintuition der Ensemble-Interpretation fort. Hier möchte man die Welt weiterhin als den klassischen physikalischen Gesetzen gehorchend behandeln. Da man aber nun anzuerkennen hat, dass die empirischen Verhältnisse im mikroskopischen Bereich als verschränkt – und damit nicht-lokalen Gesetzmäßigkeiten folgend – zu betrachten sind, führt man das Hilfskonstrukt eines zufallsbedingten, irreversiblen Kollapses der Wellenfunktion ein. Um zu einer weniger bizarren Physik zu gelangen, muss hier also auf eine Idee zurückgegriffen werden, die gleichsam jenseits der Physik liegt.

Demgegenüber stellen informationstheoretische Ansätze eine Radikalisierung der Kopenhagener Deutung dar. Die erkenntnistheoretische Pointe dieses Zugangs besteht darin, dass Information – all das (und nur das), was man wissen kann – als der eigentliche Stoff gesehen wird, aus dem die (Quanten-)Welt gewoben wird. Wenn Information begriffen wird als ein Unterschied, der einen Unterschied macht, begegnen wir hier einer Welt, die aus nichts anderem besteht als aus sich selbst formierenden Unterschieden. Ein solcher Informationsbegriff zeigt sich aber bei genauerem Hinsehen vollkommen sinnentleert. Das offene Problem einer abstrakten Informationstheorie bleibt die Frage, für wen oder was ein Unterschied einen Unterschied macht. Damit wird jedoch wieder das Problem des Beobachters virulent, denn ein Unterschied macht nur für einen Beobachter einen Unterschied. Eine beobachterunabhängige Definition dessen, was einen Unterschied macht, läuft ins Leere. Nolens volens muss also der Beobachter als Kontext einer informationstheoretischen Beschreibung wieder eingeführt werden. Um aber mit solch vertrackten Verhältnissen umgehen zu können, bräuchten wir eine komplexere Informationstheorie, die Information und Verstehen als einen mehrgliedrigen, sich selbst konditionierenden Prozess begreift.

Der Dekohärenz-Ansatz, ebenso die Konsistente-Geschichten-Interpretation, stellen Weiterentwicklungen des Pfades dar, den bereits Everett mit seiner Viele-Welten-Theorie eingeschlagen hat. Wir treffen hier auf eine kybernetische Konzeption des Beobachters. Dieser erscheint nun als ein IGUS (Information Gathering and Utilizing System), das aufgrund seiner eigenen Selektivität bestimmte Segmente aus der Wellenfunktion ausschneidet. Die phänomenalisierte Welt distinguierbarer klassischer Entitäten erscheint jetzt als eine relative Wirklichkeit eines bestimmten systemischen Zusammenhangs, der auf eine bestimmte Sorte von Unterschieden aus dem unbegrenzten Raum anderer möglicher Informationen abzielt. Die ultimative Realität des Universums würde demgegenüber ein unterschiedsloses und zeitloses Urgewebe darstellen, in dem immer schon alles da gewesen ist und das im Wesentlichen durch Gesetzmäßigkeiten bestimmt ist, wie sie durch die Schrödinger-Gleichung formuliert werden. Darüber hinaus hätten wir mit einer Vielzahl beobachter- und systemrelativer Realitäten zu rechnen, in denen IGUS Informationen generieren, an denen sie sich ausrichten und über die sie eine individuelle Geschichte in Raum und Zeit gewinnen können.

Ein weiterer, konzeptionell über die Standarddeutungen hinausreichender Deutungsansatz ergibt sich mit der Idee der Emergenz. Die in den 1970er-Jahren entwickelte Theorie der dynamischen Systeme wird jetzt für das Verständnis kollektiver Quantenphänomene fruchtbar gemacht, indem die grundlegende Bedeutung der Symmetriebrüche für die Selbstorganisation raumzeitlicher Strukturen herausgearbeitet wird.

Die emergenztheoretische Perspektive scheint auf den ersten Blick zu ähnlichen Konsequenzen zu führen wie die Konsistente-Geschichten-Theorie. Auch hier führt eine Kette von Symmetriebrüchen zu einer Individuierung von Systemen, die damit ihre eigene Geschichte bekommen. Darüber hinaus ist hier jedoch ein weiterer Preis zu zahlen. Eine solchermaßen informierte Physik hat auch von der platonischen Idee einer Weltformel Abschied zu nehmen, mit der sich das Universum beschreiben ließe. Auf allen Ebenen treffen wir jetzt auf lokal stabilisierte und temporär gültige Realitäten, die nicht einfach nur eine beobachterabhängige Illusion darstellen, sondern als emergente Qualitäten dynamischer Prozesse zu einer manifesten Realität geronnen sind. All dies geschieht zudem auf Basis von Quantenprozessen, die ihrer Natur nach miteinander in einer nicht-lokal beschreibbaren Weise verschränkt sind.

Der vergleichende Blick auf die zeitgenössischen Versuche zur konzeptionellen Interpretation des quantentheoretischen Formalismus führt zu der Vermutung, dass die konsequente Ausformulierung der

Quantenphysik in Dimensionen führt, die klassischerweise in den Bereich der Metaphysik gehören.

In Kapitel V wird am Beispiel der Stringtheorie nochmals besonders deutlich aufgezeigt, wie physikalische Theorien eine konzeptionell-anschauliche Autonomie gewinnen können, die es gestattet, sich überwiegend mit den eigenen selbstgenerierten Formen zu beschäftigen, um sich auf diese Weise auch von der engen Bindung an empirisch überprüfbare Sachlagen lösen zu können.

Kapitel VI pointiert die Formprobleme der Quantentheorie, indem verfolgt wird, wie ihre offenen Enden in Bereiche ausgedehnt werden, die mystischen Denkformen zuzurechnen sind. Wir treffen hier auf eine Gratwanderung an den Grenzgebieten zwischen Physik und Metaphysik, die mit einem solchen Theorieprojekt möglicherweise bereits inhärent angelegt sind.

2 Würdigung der Quantenphysik und ein Plädoyer gegen den Soziologismus

Es gibt wohl kaum eine wissenschaftliche Theorie, die dem Common Sense so sehr widerspricht wie die Quantentheorie. In diesem Sinne ist es an dieser Stelle zunächst angebracht, diese außerordentlichen Sonderleistungen der Physik etwas ausführlicher aus soziologischer Perspektive zu würdigen. Wir treffen hier auf eine historisch einmalige gesellschaftliche Lagerung, die zu einer Ausdifferenzierung eines autonomen Wissenschaftssystems geführt hat, das solch hochgetriebene Theorieformen gestattet. Wir begegnen darüber hinaus einer Binnendifferenzierung des Systems der ›harten‹ Wissenschaften in eine Experimentalphysik und eine theoretische Physik sowie darüber hinaus in eine ihrerseits autonome, d. h. von der physikalischen Theoriebildung unabhängig gewordene Mathematik. Nur durch diese Trias wurde eine Entwicklung möglich, in der im Spiel von Mathematik und Experiment Theorieformen ausprobiert werden konnten, die nicht nur jeder physikalischen Anschauung spotten, sondern gar bewusst auf die aus der klassischen Physik vertrauten Konzepte verzichten konnten. Erst indem in der Mathematik die abstrakte Form zu sich selber gefunden hatte, konnte jener mathematische Formenreichtum entstehen, aus dem heraus ein neuer Dialog mit der Natur möglich wurde.

Die produktiven Entwicklungen der Quantentheorie nähren sich aus dem Spannungsfeld von Physik und Mathematik. Sie gehen weder in der platonischen Idee einer reinen, logisch deduzierbaren Formlehre auf noch in einem wie auch immer gearteten Positivismus,

der glaubt, die Regeln der Welt aus beobachtbaren Mustern ableiten zu können. Die technologischen Fortschritte der Experimentalphysik, die Entwicklungen der mathematischen Formsprache und die theoretische Physik sind in der Quantenphysik eine einzigartige Symbiose eingegangen, die in Folge zu einer recht befremdlichen physikalischen Theorie führt, die dazu zwingt, zentrale Annahmen der klassischen Physik aufzugeben. Es verwundert nicht, dass Physiker wie Einstein oder Schrödinger, die die Eigenheiten dieser Theorie besonders gut verstanden hatten, zeitlebens mit ihr haderten. Die Quantentheorie erscheint im neuen Jahrtausend zwar als eine universelle Theorieanlage, die bislang jedem Falsifikationsversuch trotzen konnte, dennoch verwehrt sie sich weiterhin einer eindeutigen physikalisch konzeptionellen Anschauung, wie die andauernde Auseinandersetzung um eine ihr angemessene Interpretation zeigt.

Die Frage nach der physikalischen Deutung ist weit mehr als nur ein Spiel der Sprache. Es geht hier vielmehr um Grundfragen der Ontologie und der Epistemologie, um das, was Wirklichkeit ist, um das, was erkannt werden kann, und um das, was das Erkennen mit der Wirklichkeit macht. Die Quantentheorie führt all diese Fragen einer experimentellen Reflexion zu – mit denkwürdigen Ergebnissen.⁸

Man kann hier nur davor warnen, all dies nur als soziale Konstruktion misszuverstehen. Natürlich ist auch das Wissen der Quantenphysik gemacht und hergestellt worden.⁹ Naturwissenschaftliche Fakten sind Produkte, die in den Laboren fabriziert und als sprachlich-semantische Konstruktionen von den Medien (überwiegend in Form von Schrift und Bild) verbreitet werden. Doch davon auszugehen, dass es sich hier nur um soziale Konstruktionen handelt, ist ein soziologistischer Fehlschluss. Wenn ein Soziologe entdeckt, dass auch Naturwissenschaftler nichts anderes tun können, als innerhalb ihrer Sprache Typisierungen zu typisieren, dann gilt dieser Befund nur im Falle einer bestimmten Form der Beobachtung, nämlich mit Blick auf sprachliche bzw. schriftsprachliche Handlungen, die sich dann als Typisierung von sprachlichen Typisierungsprozessen beschreiben lassen.¹⁰

8 Selbst die Frage, ob die Wellenfunktion als ein ›reales physikalisches Objekt‹ betrachtet werden kann, wird jüngstens im Wechselspiel von theoretischer Reflexion und empirischem Design in den Bereich der empirisch überprüfbareren Fragestellungen überführt. Vgl. den in »Nature« diskutierten Beitrag von Pusey et al. (2011).

9 Die folgenden Abschnitte beruhen teilweise auf einer Ausarbeitung, die bereits in Vogd (2010) veröffentlicht wurden.

10 An dieser Stelle natürlich der Verweis auf Berger und Luckmann (2003).

Eine solche soziologische Beschreibung erzeugt gewissermaßen ihre eigene Ontologie, doch selbstredend stellen sich für die Physiker die Beobachtungsverhältnisse anders dar. Ihnen geht es um physikalische Realitäten und nicht um soziale Konstruktionen. Mit Blick auf die Referenz des Codes wahr/falsch geht es ihnen primär um die Beschreibung eines physikalischen Wirklichkeitsausschnitts, der methodologisch in einer Weise reduziert wurde, dass wissenschaftliche Aussagen möglich werden. Experimentalsysteme und ihre methodologischen Auswertungsapparaturen erlauben es den Wissenschaftlern, Wahrheiten zu erfahren. In ihrer Forschung werden ständig neue Beobachtungsmöglichkeiten ausgeflaggt, die jeweils eigene Fakten als sichtbares Datum erzeugen. Genau dies meint wohl auch Karin Knorr-Cetina, wenn sie von der »Fabrikation von Erkenntnis« spricht.¹¹ Natürlich wird hier Wissen hergestellt – wenn man so will »konstruiert«. Doch lassen sich diese Vorgänge nicht primär als soziale Konstruktion begreifen, sondern sind eher als besondere Formen der Beziehung zwischen Forschungsgegenstand, technischen Prozeduren und bewusstseinsvermittelter Wahrnehmung zu rekonstruieren. Auch die Natur und die Dinge treten hiermit in den Dialog mit ein, um das zu klären, was der Fall ist. Die Experimente der Quantenphysik stellen Fragen an die Natur und die physikalische Theoriebildung stellt eine Form dar, die Antworten zu reflektieren. In der Quantenphysik geht es – wie in jeder Naturwissenschaft – vor allem um einen »Dialog mit der Natur«.¹²

Dass darüber hinaus auch noch sozial gehandelt wird und die Ergebnisse dann auch in sprachlich zypisierender Form kommuniziert werden, ist eine andere Sache – man denke allein an die Rolle der Fachpublikation für die Reproduktion, Qualitätssicherung und Fortschreibung der wissenschaftlichen Erkenntnisproduktion. Für die Wissenschaft als Ganzes ist Kommunikation zwar von zentraler Bedeutung – ohne Kommunikation gibt es kein Wissenschaftssystem –, doch dies darf nicht in einer Weise missverstanden werden, die naturwissenschaftlichen Formen der Beobachtung mit Kommunikation zu verwechseln. Wenn Naturwissenschaftler in einen »Dialog mit der Natur« treten, wissen sie selbst am besten, dass ihr Gegenstand nicht sinnförmig vorliegt, dass also der Dialogbegriff nur eine Me-

11 Knorr-Cetina (1991). Vgl. auch Fleck (1980), Latour und Woolgar (1985) sowie Rheinberger (2006). Siehe aus dem Umfeld der Science Studies mit Bezügen zur Quantenphysik Pickering (1984).

12 Die Dialogmetapher hat noch einen anderen Sinn. Sie verweist mit Blick auf das Eigenverhalten dynamischer Systeme auf die Tatsache, dass deren Strukturen nicht mehr deduktiv, sondern nur noch interaktiv hervorgebracht werden können. Vgl. Prigogine und Stengers (1990).

tapher für Beobachtungsverhältnisse darstellt, welche die von ihnen untersuchten Objekte zwar nicht zum Sprechen bringen, jedoch zu Manifestationen anregen, die dann mit den im Medium der Sprache formulierten Modellen in Beziehung gesetzt werden können.

Hochgetriebene Theorie, die sich in ihren Abstraktionen in hohem Maße von der lebensweltlichen Wirklichkeit löst, steht nicht im Widerspruch zur Möglichkeit von Welterkenntnis. Im Gegenteil, erst ein hinreichend elaboriertes und mit eigenen, intern konditionierten Konsistenzzwängen ausgestattetes Theoriegebilde stellt die Bedingung zur Möglichkeit von Reflexion und Erkenntnisgewinnung dar.

Wissenschaft wird erst dann dialogfähig, wenn sie autonom wird, also den eigenen Betrieb in Anbetracht überfordernder Weltkomplexität selbst konditionieren und programmieren kann, um auf diesem Wege eine gewisse Sensibilität für die Eigenarten der untersuchten Wirklichkeiten zu gewinnen. Erst eine hinreichend entwickelte theoretische Form bündelt wissenschaftliche Untersuchungen zu ertragreichen, aneinander anschließenden Projekten, zwischen denen über die Theorie eine funktionale Beziehung gestiftet werden kann. Auf diese Weise entsteht eine Limitationalität, derzufolge Einschränkungen, die sich aus einer Untersuchung oder einem Experiment ergeben, auch den Variationsbereich von anderen Untersuchungen einschränken, so dass nicht immer von vorne angefangen werden muss und man aus vergangenen Erfahrungen lernen kann.¹³ Theoretische Geschlossenheit und empirische Sensibilität sind in diesem Sinne kein Gegensatz. Erst eine hinreichend laborierte Theorie gestattet einen Dialog mit der Natur, der Neues und Unerwartetes entdecken lässt. In diesem Sinne ist es dann auch wichtig zu begreifen, dass die theoretische Physik nicht in der Mathematik aufgeht, sondern einen eigenständigen konzeptionell-theoretischen Raum bewirtschaftet.

Moderne Wissenschaft – dies ist hier wichtig zu betonen – ist gerade deshalb erfolgreich, weil sie Institutionen geschaffen hat, die eine theoretische Selbstbezüglichkeit gestatten, über die sich radikal in Distanz zu den Realitätsannahmen des Common Sense gehen lässt. Die hochgetriebenen Theoriekonstrukte der Quantenphysik – dies wurde in den vorhergehenden Kapiteln deutlich – profitieren von der institutionellen Trennung von Mathematik und Physik. Erst indem auch ein Teil der physikalischen Tradition eingeklammert und probenhalber durch die virtuelle Formenwelt der Mathematik ersetzt werden kann, entsteht die notwendige Mannigfaltigkeit, aus der heraus solch ein unwahrscheinliches Gebilde wie die Quantentheorie entstehen kann. Ohne imaginäre Zahlen ist das Rechnen mit dem Irrealen – wie sonst sollte man ›Wellen von nichts‹ bezeichnen, in denen negative Wahrscheinlichkeiten verrechnet werden? – nicht möglich.

¹³ Vgl. Luhmann (1998, 396 ff.).

Ohne den unendlich dimensionalen Hilbertraum lässt sich eine Welt, die durch nichtlokale Beziehungen konfiguriert wird, nicht abbilden.

Was für die Mathematik gilt, trifft auch für die theoretische Physik zu. Die hohe innerphysikalische Prominenz phantastischer und grotesker Weltkonzepte – man denke hier etwa an die Viele-Welten-Theorie, derzufolge jeder einzelne Mensch in unzähligen Kopien alternativer Geschichten vorkommt, oder ein Blockuniversum, in dem Vergangenheit und Zukunft gleichzeitig existieren – zeigen sich jetzt als theorieimmanente Konsequenzen quantenphysikalischer Theoriebildung. Ein Forschungsprogramm, das die durch die Theorie selbst generierten Konsistenzwänge weiterverfolgt, hat Erfolg. Selbst gewagte Formbildungsprozesse funktionieren.

Erstaunlicherweise erweist sich die Quantentheorie in unterschiedlichsten Feldern der Physik als brauchbar – sei es in der Elektrodynamik, der Hochenergiephysik, der Optik, der Akustik, der Kosmologie oder den emergenten kollektiven Phänomenen, die im Bereich tiefer Temperaturen anzutreffen sind. Dies ist umso erstaunlicher, als ihr Kern, wie er durch die Schrödinger-Gleichung formuliert ist, die Nicht-Vertauschbarkeit von Operatoren und damit Verschränkung impliziert. Die Freiheitsgrade eines Quantensystems sind geringer als die eines klassisch beschreibbaren Systems mit gleicher Anzahl von Observablen. Insofern aber die Quantenphysik als die eigentliche physikalische Grundlagentheorie akzeptiert wird, heißt dies auch, dass die Unbestimmtheit von Weltzuständen akzeptiert werden muss, denn aufgrund beschränkter Freiheitsgrade können Quantensysteme niemals vollständig bestimmt sein.

Da aber die Quantentheorie offensichtlich in allen ihren empirischen Anwendungsbereichen funktioniert, gilt das Primat, dass unsere Welt in Wirklichkeit mindestens so bizarr ist wie die Quantentheorie (denn ansonsten würde Letztere an ihr scheitern). Im Dialog mit der Natur ist die Quantentheorie als ein sich selbst konditionierendes Theoriegebilde hinreichend resonanzfähig geworden, um auf allen Ebenen der Physik, Chemie und künftig wohl auch in der Biologie¹⁴ Fragen an die Welt zu stellen, die und deren Antworten dem gesunden Menschenverstand spotten.

Die Quantenphysik ist und bleibt eine harte Naturwissenschaft. Die mit ihr aufscheinende Beobachterthematik hat weder etwas gemein mit den wissenssoziologischen Diskursen zum Relativismusproblem¹⁵ noch mit der Erfahrung eines Ethnologen, dass ein Forscher irgendwie auch das untersuchte Feld mit beeinflusst. Die

¹⁴ Wie Collini et al. (2010) zeigen, scheint beispielsweise auch der Prozess des Licht-Erntens in der Photosynthese durch Quantenprozesse formatiert.

¹⁵ Vgl. Meja/Stehr (1982).

Quantenphysik liefert vielmehr exakte Beschreibungen der von ihr untersuchten Wirklichkeiten, muss dabei aber feststellen, dass ihre Objekte keine Essenz in sich haben, also nicht aus jenen letzten Teilchen bestehen, aus denen man zuvor alles zusammengesetzt gedacht hatte. Beobachterabhängigkeit meint hier einfach nur den Befund, dass eine exakte physikalische Beschreibung jetzt immer auch den Kontext der Beobachtung mitführen muss, da es ohne Kontext das zu untersuchende Phänomen nicht gibt.

Was der Beobachter ist, kann die Quantenphysik jedoch nicht sagen.

3 Die Interpretationsprobleme der Quantentheorie im Lichte systemtheoretischer Reflexion

Die Geschichte der Quantentheorie ist zugleich die Geschichte des Dilemmas ihrer Deutung. Dies wird mit der hier vorgelegten Rekonstruktion überdeutlich. Auf der einen Seite finden wir mit der Schrödinger-Gleichung einen überzeugenden mathematischen Formalismus vor, der auf eine Experimentalphysik trifft, welche selbst die bizarrsten Vorhersagen der Quantentheorie zu bestätigen scheint. Auf der anderen Seite ist die Quantentheorie, wenngleich mehr als hundert Jahre alt, weit davon entfernt, zu einer einheitlichen physikalisch-konzeptionellen Deutung zu finden.

Die folgenden Ausführungen gehen von der These aus, dass dieses Dilemma – eine erfolgreiche Theorie, doch das Scheitern ihrer Interpretation – in der Theorieanlage selbst liegt. Der systemtheoretisch geschulte Blick lässt vermuten, dass die Quantentheorie in ihrem Kern nicht von Gegenständen handelt, die der positiv-sprachlichen Sphäre des Seins zugerechnet werden können. Vielmehr spricht alles dafür, dass sie es mit jenen aus der Systemtheorie bereits bekannten ›Unjekten‹ zu tun bekommt,¹⁶ welche mit Günther nur negativ-sprachlich als Reflexionsbeziehungen konzeptionalisiert werden können. Die Quantentheorie würde damit nolens volens den Raum der klassischen zweiwertigen Logik überschreiten müssen. Um mit ihr nicht nur rechnen, sondern sie auch verstehen zu können, wäre damit eine transklassische Reflexionslogik im Sinne von Gotthard Günther notwendig, die es gestattet, mit polykontexturalen Verhältnissen umzugehen, die jetzt unterschiedliche logische Räume aufspannen,¹⁷

¹⁶ Siehe zum Begriff und Konzept des ›Unjekts‹ Fuchs (2001).

¹⁷ Günther (1963; 1978). Siehe zu einer Einführung in Günthers Konzeption der Polykontexturalität Ort (2007), Kaehr (1993) und Klagenfurt (2001).

welche dann systematisch miteinander in Beziehung gesetzt werden können.

Im einfachsten Fall wird hier neben der Subjekt-Objekt-Dichotomie der klassischen Identitätslogik ein zweiter Ort der Reflexion in Betracht gezogen. Hiermit ergeben sich zwei Beobachter als zwei getrennte systemische Zusammenhänge, was eine Reihe von Konsequenzen mit sich bringt. Mit Günther finden wir nun eine ›Es-, Ich-, Du-Struktur‹ vor, wobei ›Ich‹ und ›Du‹ jetzt zwei unterschiedliche Systeme darstellen. Wir treffen damit auf zwei ›Beobachter‹, die sich jeweils in Hinblick auf Autonomie (Eigenlogik der Systeme → Ego und Alter Ego) und Heteronomie (Sach- und Umweltdeterminiertheit → ›Es‹) wechselseitig reflektieren können. Die Positionierung über drei Orte ergibt also unterschiedliche Reflexionsmöglichkeiten. Das Es-Ich-Verhältnis lässt sich weiterhin im Sinne der klassischen Identitätslogik als eine Spiegelung von Sein beschreiben, entsprechend der ein Beobachter dem Sein nichts hinzufügt, sondern dieses einfach nur erkennt. Beim Ich-Du-Verhältnis stellt sich die Sachlage jedoch anders dar.¹⁸ Das ›Du‹ erscheint im reziproken Austauschverhältnis nun als ein anderes ›Ich‹ und damit als ein anderer systemischer Zusammenhang, der jetzt selbst eine Subjekt-Objekt-Relation – und dadurch eine eigenständige, zweite klassische Kontextur – ausbildet. Diese erscheint jetzt als ein weiterer ›Beobachter‹, der je nach Standortabhängigkeit und der sich hieraus ergebenden Reflexionsperspektive etwas anderes beobachten lässt.

Die Reflexion des einen systemischen Zusammenhangs durch den jeweils anderen fügt der Welt etwas hinzu, was durch die Spiegelung von Sein im Subjekt nicht gedeckt ist. Der Beobachter im jeweils anderen System ist nicht per se gegeben, sondern muss gewissermaßen ›erfunden‹, also durch Zurechnung konstruiert werden.

Das Subjekt erscheint jetzt selbst synonym mit dem unbeobachtbaren Beobachterstatus, der erst – und nur – durch Reflexion zugeschrieben werden kann, aber selbst in der Welt nicht zu beobachten ist. Die Zuschreibung selbst macht den Unterschied, denn sobald als Reflexion vollzogen, tritt sie unweigerlich in das Verhältnis, das die Systeme zueinander haben, mit ein. Die durch die Reflexion entstandene Beziehung ändert die Systeme. Eine entsprechende Reflexion fügt der Welt etwas Neues hinzu. Es wird etwas in die Welt hineinbeobachtet, was diese verändert. Systeme, insofern hinreichend

18 Um hier mit Ort zu sprechen: »[Kein] ›Ich‹ reflektiert ein ›Du‹ einfach nur als ein Objekt. Wie ich bereits angedeutet habe, gesteht es dem ›Du‹ autologisch Subjektivität zu, obwohl das ›Du‹ dem ›Ich‹ so fremd bleibt, wie jedes andere Objekt. Da die Reflexion des ›Du‹ also kein einfaches ›Sein‹ reflektiert, sondern ›Reflexion‹, kann sie diese nur als ›leeren Akt‹ reflektieren, das heißt als Wille oder als Handlung« (Ort 2007, 145).

reflexionsfähig, reagieren auf Systeme – und verändern damit ihre Dynamik –, indem sie andere Systeme hinsichtlich ihres Status definieren müssen.

In einer polykontexturalen Welt steht eine Vielfalt von Systemen zueinander in einer heterarchischen Beziehung¹⁹ und bildet jetzt ein komplexes Arrangement aus Einzelsystemen, die sowohl autonom als auch heteronom beschrieben werden können und sich wechselseitig sowohl als Funktion ihrer selbst als auch als Funktion ihrer wechselseitigen Beziehung reflektieren und konstituieren.

Notwendig wird eine komplexe, polykontexturale Beschreibung immer dann, wenn wir es mit rekursiven, sich auf sich selbst verweisenden Prozessen zu tun haben. Das Paradebeispiel hierzu ist natürlich der ›Beobachter‹ selbst. Jede Theorie des Beobachters verstrickt sich in Widersprüche, sobald sie diesen positiv, das heißt seinslogisch, zu begreifen sucht. Denn entweder verschwindet der Beobachter mit seiner Objektivierung aus dem Feld der Analyse und erscheint dann bestenfalls als ein mysteriöses Epiphänomen, das es eigentlich nicht geben kann, oder man ist geneigt, es als ein inneres Seelenwesen zu verdinglichen, was dann jedoch erhebliche epistemologische Probleme mit sich bringt, also auch nicht dazu beiträgt, das Problem zu erhellen. Mit Günthers Konzeption einer polykontexturalen Logik ergibt sich demgegenüber die Möglichkeit, den Beobachter deontisch als eine Reflexionsinstanz zu betrachten, die gleichsam aus dem Negativen, aus dem Nicht-Sein ordnend in Reflexionsprozesse eingreift. Die aus dem Alltagsleben bekannten Subjekt-Objekt-Relationen erscheinen jetzt als Eigenwerte der Reflexion, die einhergehend mit einem Reflexionsprozess temporär ausfallen.²⁰ Positiv-sprachlich

19 »Ein System ist dann heterarchisch, wenn mindestens zwei verschiedene Subsysteme auf zwei verschiedene Weisen miteinander verbunden sind« (Klagenfurt 2001, 139).

20 Hieraus ergibt sich mit Günther auch die Unterscheidung zwischen Positivsprache und Negativsprache: »Wenn in der Heideggerschen Philosophie vom Nichts die Rede ist, dann kann gemäß der klassischen Negation, die streng symmetrisch sich gegenüber der Positivität verhält und vermittels ihres Aussagebereichs ein isomorphes System zusammen mit der Assertivität bildet, nur von einem Nichts die Rede sein, das in sich das total verneinte Sein – und nichts weiter! – trägt. [...] D. h., wenn die Sprache des Seins verstummt, dann kommt aus dem Nichts auch nur noch Schweigen. Sie müssen sich beide der gleichen metaphysischen Sprachgestalt bedienen, die auch in der Verneinung noch vom Sein redet, und das ist eben die Positivsprache. Im Nichts ruht, klassisch gedacht, keine höhere Verneinungskraft, als sie durch die Wahrheit des Seins geliefert wird. [...] Die Weltgeschichte selber, die Willen und Denken umfasst, ist universal-thematisch die Weltgeschichte des Nichts. Die Freiheit des

gesehen erscheint der Beobachter jetzt als ein Artefakt, dem Entscheidungen zugerechnet werden müssen, da aufgrund einer komplexen Systemik die Verhältnisse nicht vollkommen bestimmt sind und deshalb nichts anderes übrig bleibt, als den Zufall in Struktur umzuwandeln. Um hier mit Baecker zu sprechen: »Zufall« heißt einerseits Unsicherheit und andererseits Material für abweichende Elemente und Operationen. »Entscheidung« heißt Angewiesenheit auf ein auf den Moment angewiesenes, durch nichts vorwegzunehmendes, schließlich dem (internen) Beobachter zuzuweisendes Ereignis.«²¹

Die polykontexturale Logik führt – und dies ist hier der entscheidende Punkt – auch zu einer weiteren Bedeutung des Begriffs vom Nichts. Während in der klassischen Logik das Nichts nur als eine absolute Verneinung des Seins begriffen werden kann, geht das Negative aus einer reflexionslogischen Perspektive mit Freiheitsgraden einher, die das Sein mit Potenzialität durchziehen und Neues ermöglichen, da jetzt Entscheidungen und Weichenstellungen erzwungen werden, die nicht allein durch das Sein gedeckt sind. Systeme erscheinen damit gleichsam als Kontingenzmaschinen, die auf Gedeih und Verderb ihren selbst generierten Zufälligkeiten ausgeliefert sind. Systeme stellen Reflexionsbeziehungen dar, die gleichzeitig Wissen und Nicht-Wissen generieren und deshalb nicht umhinkommen, in

Willens entspringt aus dem Nichts und niemals aus dem Sein, weil letzteres ja »gewesene Freiheit«, also Verlust der Entscheidung ist, wie wir weiter oben bemerkt haben.

Vom Denken her gesehen ist der transzendente Ort aller Handlung immer der Freiraum des Nichts. Daraus ergibt sich für die Negativsprache, deren Grundidee wir hier in knappen Andeutungen eingeführt haben, die folgende Einsicht: Dieselbe ist keine Sprache, die in dem uns vertrauten Sinn Erkenntnisse vermittelt, die sich auf ein vorgegebenes Sein beziehen. Sie ist vielmehr ein allgemeiner Codex für Handlungsvollzüge. Wenn wir die Gleichungen $p = N1.2.1.2.1.2$ (.) oder $p = N2.12.1.2.1$ p ermitteln, so handelt es sich nicht um Sachgehalte *per se*, die festgestellt werden und die uns sagen, was » p « eigentlich ist, sondern um eine Aufforderung, durch einen Wahlakt zu entscheiden, durch welche Negationsfolge p als eine mit sich selbst identische Objektivität festgestellt werden soll. Die beiden Negationsfolgen sind einander völlig ebenbürtig, und es gibt keinen theoretischen Grund, die eine der anderen vorzuziehen. In beiden Gleichungen handelt es sich um eine in sich selbst zurücklaufende Negationsrelation, also um einen Kreis, der wie alle Kreise in doppeltem Drehsinn durchlaufen werden kann, und es gibt keine theoretische Instanz im ganzen Universum, die uns mitteilen könnte, welcher Drehsinn dem anderen vorgezogen werden sollte« (Günther 1980, zitiert nach der Onlineversion, verfügbar unter http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg_bibliographie.htm).

21 Baecker (2007).

jedem Schritt ihres Prozessierens eine neue Balance zu erfinden, was als bestimmt und was als unbestimmt zu gelten hat. Sie müssen eine Beziehung zu anderen Systemen knüpfen, ohne jedoch über hinreichend Informationen verfügen zu können, welche eine eindeutige Berechnung und Determination dieser Beziehungen erlauben.

Systeme dürfen aus dieser Perspektive also nicht mit Monaden verwechselt werden, die ein wie auch immer geartetes Ding an sich darstellen. Sie reproduzieren sich vielmehr als Reflexionsverhältnis in Koproduktion mit einer Welt, die Unordnung und andere Systeme enthält.²² Auf diese Weise kann sich die Erklärung emergenter Prozesse auch vom Substanzbegriff lösen, denn wenn Systeme auf

22. Insofern man mit Günther die Entstehung von Leben mit der Bildung von Systemen gleichsetzt, entsteht Leben nicht aus einer Welt von Unordnung, wie Schrödinger in seiner berühmten Abhandlung »Was ist Leben« angenommen hatte (Schrödinger 1946). Vielmehr kann Leben entsprechend v. Foersters ›order-from-noise‹-Prinzip erst in einem (logischen) Raum entstehen, der zugleich Ordnung und Unordnung enthält: »The noise is something which is capable of instigating a process that absorbs lower forms of order and thereby converts a corresponding degree of disorder into a system of higher order. In other words: it is a synthesis of the order-from-order and the order-from-disorder ideas. Having discarded Schrödinger's simple order-from-order concept we obtain now two basic principles: Schrödinger: order-from-disorder von Foerster: order-from-(order-plus-disorder)

In both cases the logical equivalent of disorder is a distribution of logical terms. But what is distributed is different. Schrödinger's principle refers to the distribution of individual values; von Foerster's concept refers to the distribution of value-systems. In the first case the internal structure of the logical system which suffers the distribution is changed: a theory of formal certainties is transformed into a theory of probabilities. In the second case nothing of this sort happens: The distribution does not concern the elements which constitute a given system but the system itself as an inviolate entity

This gives us two entirely different meanings of distribution and consequently of disorder. von Foerster's distinction of disorder and noise is a profound one and opens up much deeper perspectives than his unassuming demonstration with the magnetized cubes suggests at first sight. Of course everything depends now on the question whether we will be able to define a logical operator that would represent a distribution not of values but of closed value-systems. It will not be necessary to discuss value-distribution« (Günther 1976, zitiert nach der Onlineversion, verfügbar unter http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg_bibliographie.htm).

Reflexionsbeziehungen basieren, dann sind sie weder Subjekt noch Objekt:

»Das System als Differenz ist definitionsgemäß kein ›Ding‹, kein Raum, keine Hülle, kein Be-Inhalter. Es ist, wenn man so will, ein transklassisches ›Unjekt‹, über das sich mit herkömmlichen Erkenntnismöglichkeiten kaum reden lässt. Im Duktus der negativen Theologie ist es wie Gott, von dem man nichts aussagen kann, ohne ihn einzuschränken, ohne seine Andersheit zu verkennen. Und hier ist es ein ›Ununterschiedenes‹, das (paradox) nur als Unterschiedenes unterschieden (ideiert) werden kann – hängend an der Konstruktion eines Beobachters, der Unterscheidung und Bezeichnung handhabt, aber selbst (genommen als System) hinter seinen Operationen verschwindet und nur so etwas wie die Spur basaler Selbstreferenz hinterlässt – als irgendwie Situiert-sein in einer Zusammengehörigkeit, die wiederum nicht ›Ding‹ ist, sondern die Reproduktion von Differenz. [...] Das Problem zeigt sich auch, wenn man nach der Form des Systems fragt. Die beobachtungsleitende Unterscheidung ist System/Umwelt, die bekannte Formel: $\text{System} = \text{System/Umwelt}$, wobei das Zeichen Barre als Symbol der Einheit der Differenz fungiert. Anders ausgedrückt: Die Einheit der Unterscheidung ist: Differenz, das in der Unterscheidung Ausgeschlossene ersichtlich: das System als Einheit.«.²³

Insofern man den systemtheoretischen Beobachter nicht in einer Weise essentialisiert, in der man Systeme fälschlicherweise als transzendente Subjekte begreift,²⁴ und stattdessen mit Günther ihre Koproduktion auf Basis polykontexturaler Reflexionsverhältnisse mitdenkt, stellt die systemtheoretische Reflexion ein hilfreiches Instrument dar, um die Eigenarten der quantentheoretischen Theoriebewegungen mit einer hohen analytischen Schärfe nachzuzeichnen.²⁵

Die Systemtheorie pointiert die Tatsache der Koproduktion und lässt deutlich werden, dass außerhalb von Systemen immer schon mehr ist als einfach nur Unordnung. Hierdurch wird einer autistischen Rezeption des Systembegriffs, die zum Bild selbstgenügsamer

²³ Fuchs/Hoegl (2011).

²⁴ Siehe in diesem Sinne etwa die Kritik von Kastl (1998) an Luhmanns Autopoiesis-Konzept.

²⁵ Um es mit Baecker zu pointieren »Der Systembegriff« ist »kein Begriff der Lösung aller Probleme, sondern ein Begriff der Bestimmung und Schärfung aller Probleme, mit denen es Beobachter im Umgang mit der Komplexität selbstorganisierender Prozesse aktuell zu tun haben« (Baecker 2007, 12).

Monaden führt, eine Absage erteilt. Letztlich lässt sich die Systemtheorie nur angemessen verstehen, wenn sie in eine Kommunikationstheorie eingebettet wird, da erst die (wechselseitige) Reflexion des Anderen den Ausgangspunkt für die deontische Bewegung bildet, aus der dann Systeme und Beobachter emergieren können.²⁶ Aus diesem Grunde versteht eine solchermaßen verstandene Systemtheorie ihre zentrale Aufgabe in der Entfaltung der Paradoxie des Beobachters.

Zugleich ergibt sich hiermit ein systemisches Verständnis emergenter Phänomene.²⁷ Das Konzept der Emergenz lässt sich jetzt so verstehen, dass im Prozess einer Reflexion Ordnungsparameter entstehen, die nicht (allein) durch das Sein der konstituierenden Elemente gedeckt sind. Hiermit entstehen (neue) Strukturen, die selbst wieder als Elemente für weitere Reflexionsprozesse – und damit weiterer Emergenz – fungieren können. Wir begegnen hier komplexen Prozessen ineinander verschachtelter Reflexionsverhältnisse, in denen nicht von vornherein festgelegt ist, was in welchem Kontext als Element erscheint. Die Bestimmung von dem, was Element und was Kontext ist, geschieht systemrelativ, also jeweils in Bezug auf den Auswahlbereich, den ein systemischer Zusammenhang für seine eigene Reproduktion wählt.

26 In diesem Sinne ließe sich dann Baeckers (1999) »Form und Formen der Kommunikation« auch als ein kommunikationstheoretischer Umbau des Formkalküls von Spencer-Brown verstehen, der dann aus guten Gründen nur noch wenig mit diesem gemein haben kann.

27 In Erklärungen, welche sich unter dem Stichwort der ›Emergenz‹ zusammenfassen lassen, werden die zu erklärenden Phänomenbereiche in einer modalen, nicht mehr jedoch in einer kausalen Beziehung zueinander gesehen. Die theoretische Leerstelle der Ermöglichungsbeziehung fungiert hier gleichsam als ein semantischer Operator, der anzeigt, dass es weitergeht. Der Trick besteht hier sozusagen darin, an der strengen kausalen Schließung der Denkformen festzuhalten. Zugleich hält man sich dennoch eine Möglichkeit offen, deren Grenzen zu unterlaufen, ohne dabei jedoch sagen zu müssen, wie dies genau geschieht. Entsprechend könnte man sagen: Der Begriff Emergenz steht hier sozusagen als Metapher für die Notwendigkeit einer Brücke zwischen den Gegenstandsreichen, ohne dabei die Trennung zwischen den kausalen Denkformen unterschiedlicher Monokontexturen wirklich aufgeben zu können. Emergenz erklärt gewissermaßen dort, wo nicht erklärt werden kann. Die Idee der Emergenz reflektiert sozusagen das Eingeständnis der Wissenschaft, dass man mit den eigenen Bordmitteln – also auf Basis der bislang getroffenen Unterscheidungen – nicht weiterkommt. Unweigerlich stoßen wir hier an die Grenze der modernen Unterscheidung einer (klassischen) Wissenschaft und einer Metaphysik, die sich aus transklassischen Reflexionsbeziehungen ergibt und entsprechend eine Negativsprache benötigt.

Hieraus folgt mit Luhmann die Einsicht, dass »Systeme höherer (emergenter) Ordnung von geringerer Komplexität sein können als Systeme niedriger Ordnung, da sie Einheit und Zahl der Elemente, aus denen sie bestehen, selbst bestimmen, also in ihrer Eigenkomplexität unabhängig sind von ihrem Realitätsunterbau. [...] Emergenz ist demnach nicht einfach Akkumulation von Komplexität, sondern Unterbrechung und Neubeginn des Aufbaus von Komplexität.«²⁸ Hieraus ergibt sich dann die wichtige Konsequenz, dass Systeme ein höheres reflexives Potential haben können als das Ganze, in das sie eingebettet zu denken sind.²⁹

28 Luhmann (1993, 43 f.).

29 Um es mit Günther auszudrücken: »On the other hand, when we speak of individual centers of self-reflection in the world and call them subjects we obviously do not refer to retroverted self-reflection. Such individual centers have, as we know very well, a genuine environment (which the Universe has not!) and what they reflect is this very environment. It stands to reason that these systems of self-reflection with centers of their own could not behave as they do unless they are capable of ›drawing a line‹ between themselves and their environment. We repeat that this is something the Universe as a totality cannot do. It leads to the surprising conclusion that parts of the Universe have a higher reflective power than the whole of it, as has been recognized for a long time. In Hegel's logic the phenomenon of reflection is subdivided into three parts: He defines them as:

a) retroverted reflection (Reflexion-in-sich) b) transverted reflection (Reflexion-in-Anderes) c) retroverted reflection of retroversion and transversion (Reflexion-in-sich der Reflexion-in-sich und Anderes).

Section (a) represents the physical system of the external world described by its specific reflective properties. But (b) and (c) signify the additional capacities of reflection which sub-systems of the Universe must possess if they are to be called subjects.

This shows that the early philosophic theory of reflection is still ahead of the present logical state of cybernetics. We talk about self-organizing systems and their environments; but Hegel's distinction between (a), (b) and (c) shows that this is not enough. A self-reflective system which shows genuine traits of subjective behavior must be capable of distinguishing between two types of environment and be able to react accordingly. First it must reflect an ›outside‹ environment which lies beyond its own adiabatic shell and second it must be capable of treating (b) as an environment to (c). [...] If there was no such environment, i.e., if they were locked in their initial position no structure could originate. But it is equally obvious that a second environment is required as place of origin of the ›noise‹. In our example the three orders (a), (b) and (c) are rather haphazardly thrown together. They do not represent a fully organized system of reflection – although there is reflection of a very artful kind –

Entfaltung der Paradoxie des Dualismus

Im Prinzip lässt sich schon das Bohrsche Komplementaritätsprinzip als eine polykontexturale Beschreibung der vertrackten Verhältnisse im Doppelspaltexperiment lesen. Von einem logischen Ort aus gesehen gilt die Wellenbeschreibung, von einem anderen Standpunkt die Teilchenbeschreibung. Beide Beschreibungen sind weder aufeinander logisch reduzierbar noch kann ihre Unvereinbarkeit als eine Falsifikation der jeweils anderen Perspektive verstanden werden. Sie sind vielmehr komplementär zueinander zu sehen und stehen für unterschiedliche logische Räume, die im Sinne des Ganzen zusammenzudenken sind. Die Bezugsprobleme der Quantentheorie erzwingen hier Kausalitäts- und Bedingungsbeziehungen standortabhängig zu reflektieren. Das für die zweiwertige Logik geltende Gesetz des ausgeschlossenen Dritten ist hier im Sinne einer mehrwertigen Reflexionsperspektive zu überschreiten, in der dann gilt: »sowohl als auch«. ³⁰

Aus der reflexionslogischen Perspektive stellen Quantensysteme keine Objekte dar und entsprechend lässt sich die Beobachterproblematik der Quantenphysik als ein Artefakt einer monokontexturalen Beschreibung verstehen, die komplexe Beobachtungsverhältnisse als Subjekt-Objekt-Beziehungen zu fassen versucht. Die Auseinandersetzung um die richtige Interpretation der Quantentheorie ließe sich hiermit als eine Entfaltung der Paradoxie des Beobachters vor

but the arrangement gives at least an approximate idea of what is meant when we say that a system showing subjective traits of behavior must have an inner and an outer environment. And it must have the inherent ability to distinguish between the two.

This leads us back to transjunction and to our interpretation of transjunctive values as operations of rejection. We stated that if a system is rejected the value which acts as rejector places itself outside of it. By doing so, it establishes a boundary or a logically closed surface for the rejected system. In other words: it makes a distinction between the system and something else, i.e., an environment« (Günther 1976, zitiert nach der Onlineversion, verfügbar unter http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg_bibliographie.htm).

- 30 Es verwundert in diesem Sinne dann auch nicht, dass Quantenphysiker schon früh dazu neigen, das Willensproblem unter einer polykontexturalen Perspektive zu reflektieren: »Von außen betrachtet ist der Wille kausal determiniert, von innen betrachtet ist der Wille frei. Mit der Festlegung dieses Sachverhaltes erledigt sich das Problem der Willensfreiheit. Es ist nur dadurch entstanden, dass man nicht darauf geachtet hat, den Standpunkt der Betrachtung ausdrücklich festzulegen und einzuhalten«. Max Planck, 1946 (hier zitiert nach Watzlawick 1978).

dem Hintergrund einer positiv-sprachlichen Beschreibung, die der Subjekt-Objekt-Dichotomie nicht entkommen kann, reformulieren.

Versuchen wir diesen Gedanken im Folgenden etwas ausführlicher vor dem Hintergrund der bislang geleisteten Rekonstruktion zu entfalten. Auf diese Weise lässt sich die Abarbeitung an der Interpretation der Quantentheorie als eine systematische Entfaltung der Paradoxie des Beobachters verstehen.

Eine solche Reformulierung lässt sich gut mit René Descartes beginnen, denn Descartes steht für den Durchbruch des modernen Wissenschaftsverständnisses, das auf kausale Erklärungen setzt und teleologischen Erklärungen eine Absage erteilt. Die Welt und ihre Gegenstände werden nun nicht mehr auf ein verborgenes (göttliches) Ziel hin ausgerichtet gesehen. Vielmehr sind die Dinge innerhalb der Objektwelt jetzt mechanisch, das heißt als Resultat einfacher physikalischer Kräfte und Wirkungen zu verstehen. Die Wissenschaft kommt nun als erklärende Wissenschaft zu sich selbst, um sich von jetzt an gegenüber allen anderen Erklärungsansprüchen abzusetzen – vor allem gegenüber der Metaphysik. Folgerichtig spielen in Descartes' Philosophie auch physiologische Denkmodelle eine wichtige Rolle. Der menschliche Körper mit seinem Gehirn wird entsprechend als eine Gliedermaschine betrachtet, die gleich einem Roboter funktioniert.

Wir finden in Descartes einen Beobachter vor, der nichts anderes tut, als zwischen innen und außen zu unterscheiden, um genau durch diese Operation sich selbst als Beobachter hervorzubringen. Die Unterscheidung von Selbst- und Fremdreferenz konstituiert den Beobachter und sobald dieser unterschieden ist, kann zwischen innen und außen, Subjekt und Objekt unterschieden werden. Das Entscheidende an dieser Perspektive ist nun, dass das Erkennen keine andere Wahl mehr hat, als durch Bezeichnen eine Unterscheidung zu treffen, um dann zwischen den beiden Grenzen der Unterscheidung hin- und herzupendeln, also entweder die Innenseite oder die Außenseite zu bezeichnen, sich also entweder selbstreferenziell als Subjekt zu konstituieren oder fremdreferenziell eine Außenwelt zu behaupten.

Formtheoretisch gesprochen begegnen wir hier der Figur des re-entry, die eine Oszillator-Funktion, nämlich das Pendeln zwischen den Referenzen ›innen‹ und ›außen‹ als paradoxe Figur hervorbringt.³¹

31 Immer wenn eine Beobachtung sich selbst zum Gegenstand macht, wird auf operativer Ebene die Bewegung des Hineinnehmens der Unterscheidung in sich selbst vollzogen. Dieser Vorgang wird von Spencer-Brown (2005) als re-entry bezeichnet. Die mit der Unterscheidung zwischen etwas und dem unmarked space gezogene Grenze wird gleichsam immer wieder untertunnelt und so für die Konstitution eines Eigenwerts genutzt,

Mit der Sprache wird die Subjekt-Prädikat-Objekt-Relation dann sowohl grammatisch als auch semantisch institutionalisiert, sodass auch hier kein Entkommen aus dem Prozess des Unterscheidens mehr möglich ist. Gleiches gilt für das Bewusstsein. Als ein sich selbst reflektierender Prozess verfängt es sich zwangsläufig in jenem infiniten Regress, entsprechend dem sich jeder Beobachter, der Wahrnehmung beobachtet, durch diese Operation zugleich als ein inneres Seelenwesen hervorzubringen scheint, welches dann selbst wiederum mit

der nun gleichsam als Artefakt dieses Prozesses ausflaggt. Die Figur ist paradox, denn wie kann etwas identisch mit sich selbst sein, was doch erst als Produkt seiner selbst entsteht? Entparadoxiert wird dieser Prozess bei Spencer-Brown durch den Verbrauch von Zeit, nämlich indem der Beobachtungsprozess nur dadurch einen sinnvollen Bezug zur Welt herstellen kann, indem er ständig zwischen Selbst- und Fremdreferenz hin- und heroszilliert. Ein Verharren in einer Position oder Stelle würde die Form gleichsam erstarren lassen und die Bedingungen ihrer eigenen Konstitution – das Werden bzw. den Prozess ihrer sich wiederholenden Genese – unterminieren. Der Prozess würde damit zum Ende kommen und hiermit würden auch die mit dem Beobachtungsprozess entstehenden Gestaltungen verschwinden.

Der Verweis auf den Formkalkül ist in diesem Zusammenhang mehr als eine Gedankenspielerei, denn er kann hier helfen, ein Verständnis von der dichotomen Dynamik von Beobachtungsprozessen zu gewinnen. Formtheoretisch erscheinen Subjekt und Objekt – bzw. systemtheoretisch gesprochen: Selbst- und Fremdreferenz – als die paradoxe Form der Einheit einer Differenz. Wenn man jedoch eine Beobachtung unter dem Blickwinkel ihrer eigenen Prozessualität betrachtet, nämlich als ein kontinuierliches Geschehen, das als Produkt seines Operierens Muster und Identitäten in einer Kette aufeinanderfolgender Ereignisse ausflaggen lässt, verschwindet die Paradoxie. Um hier wieder mit Fuchs und Hoegl zu sprechen: »Durch den Formalismus der ›Laws of Form‹ betrachtet, erscheinen Paradoxien als unendlich in sich selbst wieder eintretende Unterscheidungen, mithin als Gleichungen, die sich nicht in einen der beiden möglichen Zustände markiert oder nicht-markiert auflösen lassen. [...] Wenn wir auch in einer unendlichen Gleichung nicht mehr wissen können, wo wir uns in der Form befinden, wir also nicht die arithmetischen Schritte zurück gehen können, so ist es gleichwohl möglich, algebraische Schritte abzuzählen, das heißt Muster zu finden, die als Einspiegelungen des gesamten Ausdrucks gedeutet werden können. Die Schrift der Form ermöglicht somit ein Rechnen mit der ›Selbstähnlichkeit‹ [...] unendlicher Ausdrücke, mit der musterhaften Ähnlichkeit von isolierbaren Sequenzen mit dem gesamten, unendlichen Arrangement, vergleichbar mit dem Grundton einer schwingenden Membran oder Eigenwerten von rekursiven Variationen« (Fuchs/Hoegl 2011, 194).

einem Sensorium ausgestattet zu denken ist – denn ansonsten ließe sich ja nicht beobachten, wie beobachtet wird, dass beobachtet wird.

Mit der Thematik der Selbstbeobachtung begegnen wir unweigerlich den Paradoxien des Wiedereintritts der Form in die Form. Immer wenn ein Beobachtungsprozess sich selbst zum Gegenstand nimmt, wird auf der operativen Ebene die Bewegung des Hineinnehmens der Unterscheidung in sich selbst vollzogen. Inhärent in die Operation des Unterscheidens eingelassen, entstehen nun der materialistische Determinismus und der das Geistige betonende Solipsismus als zwei denkbare Versionen von Welt. Ersterer geht als vermeintlich realistische Position davon aus, dass die ganze Welt gleich einem Uhrwerk im Prinzip eine riesige Maschine sei. Ein äußerer Beobachter, Gott oder der Laplacesche Dämon, könne in Kenntnis der Naturgesetze den Ablauf der Welt für alle Zeiten berechnen. Ein fühlendes, wahrnehmendes Ich oder Subjekt kommt in diesem Weltbild nicht vor. Als Gegenpol erscheint dann der subjektive Idealismus, demzufolge das Subjekt gleichsam die ganze Welt erträumt. Die vermeintliche Außenwelt existiert hier nur in unserer Phantasie. Ludwig Wittgenstein kam nach konsequenter philosophischer Überlegung bekanntlich zu dem Ergebnis, dass streng genommen der Solipsismus mit dem Realismus zusammenfallen müsse, da das metaphysische Subjekt nicht als ein Teil, sondern als eine Grenze der Welt aufzufassen sei, die durch eine Unterscheidungsoperation konstituiert wird.³²

32 » 5.631 Das denkende, vorstellende, Subjekt gibt es nicht. Wenn ich ein Buch schriebe ›Die Welt, wie ich sie vorfand‹, so wäre darin auch über meinen Leib zu berichten und zu sagen, welche Glieder meinem Willen unterstehen und welche nicht, etc., dies ist nämlich eine Methode, das Subjekt zu isolieren, oder vielmehr zu zeigen, daß es in einem wichtigen Sinne kein Subjekt gibt: Von ihm allein nämlich könnte in diesem Buch *nicht* die Rede sein. –

5.632 Das Subjekt gehört nicht zur Welt, sondern es ist eine Grenze der Welt.

5.633 Wo *in* der Welt ist ein metaphysisches Subjekt zu merken? Du sagst, es verhält sich hier ganz wie mit Auge und Gesichtsfeld. Aber das Auge siehst Du wirklich nicht. Und nichts am *Gesichtsfeld* läßt darauf schließen, daß es von einem Auge gesehen wird. [...]

5.64 Hier sieht man, daß der Solipsismus, streng durchgeführt, mit dem reinen Realismus zusammenfällt. Das Ich des Solipsismus schrumpft zum ausdehnungslosen Punkt zusammen, und es bleibt die ihm koordinierte Realität.

5.641 Es gibt also wirklich einen Sinn, in welchem in der Philosophie nichtpsychologisch vom Ich die Rede sein kann. Das Ich tritt in die Philosophie dadurch ein, daß ›die Welt meine Welt ist‹.

Das philosophische Ich ist nicht der Mensch, nicht der menschliche Kör-

Wir begegnen hier den Paradoxien eines Monismus, der Geist und Natur als Einheit unterscheiden will, dies aber nur realisieren kann, indem er eine Praxis vollzieht, die Subjekt und Objekt als Dualität hervorbringt.

Schauen wir nun etwas ausführlicher auf die Eigenarten von Descartes' Lösung. Bekanntlich postuliert er eine Trennung von Geist bzw. einer Seele und den deterministisch ablaufenden materiellen Prozessen. Die Gesetze der Letzteren lassen sich prinzipiell durch wissenschaftliche Methoden erkunden. Die Seele selbst stehe jedoch außerhalb dieser Prozesse. Die Erforschung der seelischen Dynamik gehört entsprechend nicht mehr in die Sphäre der Physik, sondern wird der Theologie oder Metaphysik überantwortet. Dieser Dualismus erschafft eine Reihe von epistemologischen Problemen – etwa die Frage, wie ein unabhängiges Seelenwesen mit der materiellen Welt wechselwirken kann, ohne die Gesetze der Physik (z. B. den Energieerhaltungssatz) zu verletzen. Auch lässt sich mit Blick auf die Erklärungskraft des Dualismus mit Wittgenstein feststellen, dass die »Annahme« einer unabhängigen Seele gar nicht das leistet, »was man immer mit ihr erreichen wollte«. ³³ Philosophisch ergibt Descartes' Antwort nur eine Scheinlösung. Aus soziologischer Perspektive ist hier jedoch feststellen, dass sich durch diesen Trick die Subjekt-Objekt-Paradoxie so weit besänftigen lässt, dass man ungestört mit der Praxis von Wissenschaft beginnen kann. Man braucht sich nicht unnötig mit den Schwierigkeiten des Beobachters herumzuschlagen und entledigt sich nebenbei auch der lästigen Problemen der Metaphysik.

Die Paradoxie der Subjekt-Objekt-Dichotomie wird beruhigt (jedoch nicht aufgehoben), indem man einen Monismus postuliert, sich diesem jedoch jetzt mit der eigenen Forschungspraxis aus der Perspektive eines erkenntnistheoretischen Dualismus nähert und gleichzeitig die hiermit verbundenen erkenntnistheoretischen Probleme ignoriert.

Dieser ›Trick‹ funktioniert hervorragend in Forschungsfeldern, die mit »Theorien mittlerer Reichweite« bearbeitet werden können, ³⁴ also in allen Bereichen, die raum-zeitlich begrenzte Zusammenhänge beschreiben und die zudem nicht allzu sehr durch nicht-lineare Wechselwirkungen formatiert werden.

per, oder die menschliche Seele, von der die Psychologie handelt, sondern das metaphysische Subjekt, die Grenze – nicht ein Teil – der Welt« (Wittgenstein 1990).

33 Wittgenstein (1990, 6.4312).

34 Engl. Theories of Middle Range. Siehe für die Soziologie Merton (1968 [1948]).

Die Quantentheorie stellt jedoch eine Theorie mit Universalitätsanspruch dar und entsprechend kann hier – wie auch in den Kognitionswissenschaften und der Systemtheorie – der Trick nicht mehr funktionieren, den forschungspraktisch notwendigen Dualismus dadurch zu reifizieren, dass man ihn in Hinblick auf die eigene Forschungspraxis neigiert.³⁵

Insofern die Quantentheorie sich nicht als eine Systemtheorie begreift, die davon ausgeht, dass sich die hiermit verbundenen Probleme positiv-sprachlich nicht lösen lassen, bleibt nichts anders übrig, als das Dilemma der Interpretation solch komplexer Verhältnisse in Form einer Kette von Paradoxien zu entfalten.

In jedem Schritt der Paradoxieentfaltung werden zunächst bestimmte Ontologien ausgeflaggt, also Seinsverhältnisse positiv-sprachlich im Sinne der Subjekt-Objekt-Dichotomie postuliert, um dann jedoch in einem nachfolgenden Schritt feststellen zu müssen, dass das Postulierte durch die Theorie nicht gedeckt ist. Die Interpretation der hiermit aufgespannten Theorieanlage kommt damit in eine Bewegung, die epistemisch wie auch ontologisch zwischen einer subjektivistischen, objektivistischen oder dualistischen Perspektive oszilliert.

Im Common Sense unserer Alltagsepistemologie gilt für viele Quantenexperimente der offensichtliche (weil sinnlich erlebbare) Befund, dass die Realität eine andere ist, wenn man hinschaut, als wenn man sie nicht beobachtet. Dies verleitet zu der Auffassung, dass ein Beobachter oder gar ein Subjekt die Wirklichkeit erschaffe. Im Hinblick auf die Verortung innerhalb der Dualität befinden wir uns nun auf dem Subjekt-Pol. Eine ernsthafte physikalische Betrachtung kommt jetzt aber zu dem Schluss, dass sich der Beobachter nicht identifizieren lässt. Eine Messung an einem Quantenexperiment führt auch dann zu einem Ergebnis, wenn keiner hinschaut (spätestens die Ergebnisse aus der Dekohärenz-Forschung lassen dies deutlich werden). Außerdem führt das Postulat eines Beobachters zu dem Problem des infiniten Regresses (was ist die Rolle weiterer Beobachter, welche die Beobachtung beobachten?).

Mit der Ensemble-Interpretation von Born, insbesondere dann aber auch in der Version von Popper, befinden wir uns nun innerhalb der epistemisch-ontologischen Oszillation auf dem Objekt-Pol. Die

35 Um das Dilemma mit Schrödinger von der anderen Seite, nämlich der des gescheiterten Monismus auszudrücken: »Der Grund dafür, daß unser fühlendes, wahrnehmendes und denkendes Ich in unserem naturwissenschaftlichen Weltbild nirgends auftritt, kann leicht in fünf Worten ausgedrückt werden: Es ist selbst dieses Weltbild. Es ist mit dem Ganzen identisch und kann deshalb nicht als Teil darin enthalten sein« (Schrödinger 1959, 40).

eigentliche Ursache der experimentellen Befunde wird hier in streuenden Teilchen gesehen. Entsprechend einer realistischen Position sollen diese unabhängig davon existieren, ob sie beobachtet werden oder nicht. Die Paradoxien der Quantentheorie werden hiermit zunächst als ein Artefakt von fälschlicherweise subjektiv interpretierten objektiven Wahrscheinlichkeiten verstanden. Diese Perspektive ist jedoch nicht mit dem Phänomen der Interferenz von Wahrscheinlichkeitswellen auf Basis der Schrödinger-Gleichung in Einklang zu bringen, denn diese beruht auf der Verrechnung negativer Wahrscheinlichkeiten aus einem imaginären Raum.

In einer weiteren Bewegung lässt sich die Annahme einer unabhängigen Realität dadurch retten, dass man die Theorie für unvollständig erklärt. Dies war Einsteins Intention, als er mit dem EPR-Gedankenexperiment darauf hingewiesen hat, wie absurd die Annahme verschränkter Teilchen sei, die über eine nicht-lokale Wechselwirkung als miteinander verbunden zu denken sind.

Da aber Verschränkung unmittelbar aus der Theorie folgt und sich später im Experiment auch als eine physikalische Realität gezeigt hat, liegt es nahe, einen Mittelweg zu versuchen. In diesem Sinne ist jetzt die Bewegung der Kopenhagener Interpretation nachvollziehbar, die sich zugleich auf den Subjekt- wie auch den Objekt-Pol bezieht, um damit dem Beobachtungsprozess eine konstitutive Rolle zuzugestehen. Wir erinnern uns daran, dass der entscheidende Durchbruch der Quantentheorie darin bestand, auf die *ex-ante*-Annahme von Teilchenbahnen zu verzichten und nur dem, was beobachtet- und messbar ist, einen Realitätsstatus zuzugestehen.

Schauen wir uns mit Heisenberg die Eigenarten dieser Positionierung nochmals etwas genauer an:

»Die Wahrscheinlichkeitsfunktion vereinigt objektive und subjektive Elemente. Sie enthält Aussagen über Wahrscheinlichkeiten oder besser Tendenzen (Potentia in der aristotelischen Philosophie), und diese Aussagen sind völlig objektiv, sie hängen nicht von irgendeinem Beobachter ab. Außerdem enthält sie Aussagen über unsere Kenntnis des Systems, die natürlich subjektiv sein müssen, insofern sie ja für verschiedene Beobachter verschieden sein müssen. [...] Die Beobachtung selbst ändert die Wahrscheinlichkeitsfunktion un stetig. Sie wählt von allen möglichen Vorgängen den aus, der tatsächlich stattgefunden hat. Da sich durch die Beobachtung unsere Kenntnis des Systems un stetig geändert hat, hat sich auch ihre mathematische Darstellung un stetig geändert, und wir sprechen daher von einem ›Quantensprung‹. Wenn man aus dem alten Spruch ›Natura non facit saltus‹ eine Kritik der Quantentheorie ableiten wollte, so können wir antworten, daß

sich unsere Kenntnis doch sicher plötzlich ändern kann und daß eben diese Tatsache, die un stetige Änderung unserer Erkenntnis, den Gebrauch des Begriffs ›Quantensprung‹ rechtfertigt. Der Übergang vom Möglichen und Faktischen findet also während des Beobachtungsaktes statt. Wenn wir beschreiben wollen, was in einem Atomvorgang geschieht, müssen wir davon ausgehen, dass das Wort ›geschieht‹ sich nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation zwischen zwei Beobachtungen. Es bezeichnet dabei den physikalischen, nicht den psychischen Akt der Beobachtung, und wir können sagen, daß der Übergang vom Möglichen zum Faktischen stattfindet, sobald die Wechselwirkung des Gegenstandes mit der Meßanordnung und damit mit der übrigen Welt ins Spiel gekommen ist.«³⁶

Die Paradoxie wird hier in einem ontologischen und epistemischen »gerrymandering« entfaltet.³⁷ Im Spannungsfeld von ›Wahrscheinlichkeit‹ und ›Wissen‹ taucht hier ein Beobachter auf, der die Wellenfunktion zum Kollaps bringt und damit sprunghaft zu ›Erkenntnis‹ führt. Dann wird jedoch zurückgerudert und betont, dass der Beobachtungsprozess physischer und nicht psychischer Natur sei. Der Subjekt-Pol wird damit zugleich reifiziert wie zurückgewiesen. Mit Blick auf die empirischen Sachverhalte ergibt dieser ontologische Schleuderkurs durchaus einen Sinn, denn die quantenphysikalische Wirklichkeit scheint sich genau so merkwürdig zu verhalten, wie von Heisenberg beschrieben. Dies mag zunächst paradox anmuten, doch mit Bohr lässt sich die Paradoxie ruhigstellen, indem man als Schutzschild eine epistemische Erkenntnisgrenze postuliert, die besagt, dass man einfach nicht mehr wissen könne.

Ein gewichtiges Problem bleibt jedoch bestehen: Wellenfunktionen kollabieren nicht. Ihr Zusammenbruch durch Beobachtung ist nicht durch die Schrödinger-Gleichung oder einen anderen quantentheoretischen Formalismus gedeckt. Es bleibt jetzt nichts anderes übrig, als mit v. Neumann die Sache pragmatisch anzugehen und in einer physikalischen Beschreibung, die keine Stelle für einen Schnitt vorsieht, einen willkürlichen Schnitt zu setzen.

Man kann sich dem Objekt-Pol jetzt von einer anderen Seite nähern, indem man die mit der ψ -Funktion implizierten Wellen als eine objektive physikalische Realität ansieht (so de Broglie und der frühe Schrödinger). Doch die Hoffnung, die Wellenfunktion ψ ›klassisch‹ als Potenzialwelle deuten zu können, lässt sich ebenfalls nicht halten. Da ψ in jedem Term der Schrödinger-Gleichung auftaucht, lässt sich

36 Heisenberg (2007, 78 ff.).

37 Woolgar (1985).

ψ nicht in einer Weise isolieren, dass seine Bedeutung in einfacher Weise verständlich wird, etwa indem ihm eine konkrete physikalische Dimension wie Masse, Ladung, Impuls, Energie etc. zugewiesen werden könnte. Man findet mit ψ jetzt bestenfalls ›Wellen von nichts‹ vor, was jedoch den Versuch einer realistischen Interpretation wieder ruiniert.

Eine weitere Variante, die Paradoxie der Subjekt-Objekt-Dichotomie zu entfallen, besteht darin, die beiden Pole zu einem extremen Dualismus auseinanderzuziehen, um dann den Subjekt-Pol einfach zu ignorieren. Genau dies geschieht in der Everettschen Viele-Welten-Interpretation. In den Paralleluniversen der universell geltenden Schrödinger-Gleichung erscheint das Subjekt jetzt nur noch als ein merkwürdiges Artefakt, das der Illusion unterliegt, in nur einer Welt zu leben. Selbstredend ist der physikalische Mechanismus, der zu dieser Täuschung führt, durch die Schrödinger-Gleichung nicht gedeckt, man muss ihn also dem Subjekt zurechnen – aber was ist dann das Subjekt?

Ein weiterer Trick, um den Paradoxien der Quantentheorie zu entgehen, besteht darin, ihren bizarren Charakter auf der einen Ebene anzuerkennen, um auf einer anderen Ebene ihren Geltungsbereich zu bestreiten. Dies geschieht mit der in Kreisen der analytischen Philosophie beliebten Spontaner-Kollaps-Theorie. Man erkennt nun zwar an, dass im subatomaren Bereich nicht-klassische Verhältnisse bestehen, in denen Verschränkung und nicht-lokale Beziehungen vorkommen. Hier herrscht dann das quantenphysikalische Primat, dass sich im Sinne einer Holobewegung die Relata aus den Relationen ergeben und nicht umgekehrt. Gleichzeitig wird jedoch postuliert, dass Wellenfunktionen spontan kollabieren, um hierdurch eine verlässliche Welt zu erhalten, die den objektiven Gesetzen der klassischen Physik gehorcht. Allerdings existiert (bislang) keine einzige physikalische Theorie, die den Mechanismus des spontanen Kollapses erklären könnte. Ex nihilo wird also auch hier ein erklärendes Prinzip zur Geltung gebracht, das streng genommen nichts erklärt. Entweder glaubt man an den Trick oder nicht.

Eine interessantere Entfaltung der Subjekt-Objekt-Dichotomie lässt sich demgegenüber in der Bohmschen Mechanik feststellen. Hier wird sowohl den bewegten Teilchen als auch der Wellenfunktion ein ontologischer Status zugewiesen, demzufolge beide als beobachterunabhängig ›real‹ anzusehen sind. Darüber hinaus kann auf das Hilfskonstrukt ›Wellenkollaps‹ verzichtet werden. Dies führt allerdings zum Modell eines holistischen Universums, in dem einfach alles miteinander über nicht-lokale Beziehungen verbunden ist. Mit der Einsicht, dass man die »Exowelt« nur aus der »Endoperspektive«

heraus erkunden kann,³⁸ führt diese Perspektive zwar zur Hoffnung einer »impliziten Ordnung«, die dann jedoch aus prinzipiellen Gründen einer gegenständlichen Erkenntnis verwehrt bleiben muss.

Da aber nun all diese prominenten Deutungsversuche der Quantentheorie das Beobachterproblem umkreisen, ohne es wirklich lösen zu können, lässt sich mit Bateson vermuten, dass die Frage ihrer Interpretation oder Deutung einfach falsch gestellt ist.³⁹ Unter diesem Blickwinkel erscheint die Tatsache, dass es recht unterschiedliche Lösungsansätze gibt, die alle eine gewisse Plausibilität haben, aber dennoch den gordischen Knoten nicht durchschlagen können, als der eigentlich interessante Befund.

Gehen wir im Folgenden deshalb ausführlicher der Vermutung nach, dass die Quantentheorie in dieser Hinsicht in hohem Maße mit der Systemtheorie verwandt ist. Hierfür spricht schon allein der empirische Erfolg des Dekohärenz-Ansatzes. Dieser gewinnt seine Erklärungskraft dadurch, dass er Quantensysteme als offene Systeme betrachtet. Auf diesem Wege kann das Messproblem – und mit ihm die Annahme willkürlicher Beobachterschnitte – umgangen werden, denn nun erscheint das Rauschen der Umwelt als das Medium, auf dessen Basis sich Quantensysteme als klassische Phänomene manifestieren können. Dies führt zu einer System-Umwelt-Theorie, die individuelle Subsysteme annehmen muss, dann aber zuzugestehen hat, dass sich das Ganze nicht als Summe seiner Teile auffassen lässt.

Wir begegnen hier der Einsicht, dass erst die Ignoranz zwischen den Subsystemen die Bedingung der Möglichkeit von Systemdifferenzierung darstellt. Der Dekohärenz-Ansatz benötigt jedoch eine fortschreitende Sukzession weiterer System/Umwelt-Grenzen, die dann jeweils auf der untergeordneten Ebene die System/Umwelt-

38 Die Begriffe »Exo-« und »Endowelt« wurden von Otto Rössler (1992) geprägt, der seinerseits eine klassische Interpretation der Quantentheorie vorlegt, entsprechend der die Paradoxien der Quantentheorie nur dadurch entstünden, dass wir die Welt eben nur von innen her, also stochastisch und durch die Schnittstellen der Beobachtung verzerrt, untersuchen können.

39 Was Bateson in Hinblick auf das Problem des Bewusstseins in »Geist und Natur. Eine notwendige Einheit« erkannt hat, würde demnach auch für das Beobachterproblem der Quantentheorie gelten: »Es muß einen Grund geben, weshalb diese Fragen niemals beantwortet sind. Ich meine, wir könnten das als ersten Schlüssel zur Antwort verwenden – die historische Tatsache, daß es so viele Menschen versucht haben und keinen Erfolg hatten. Die Antwort muss irgendwo verborgen sein. Es muß so sein: Allein schon das Stellen dieser Frage schickt uns immer auf eine falsche Spur, die den Fragesteller auf Abwege führt. Ein Ablenkungsmanöver« (Bateson 1987, 259 f.).

Grenze bestimmen lassen. Hierdurch wird allerdings das Universum als Ganzes problematisch. Entweder fasst man es als ein geschlossenes System auf – dann kann es allerdings keine klassischen Welten hervorbringen – oder es ist in unendlichen Rekursionen holistisch in sich selbst eingefaltet, um auf diese Weise ständig neue System/Umwelt-Verhältnisse zeitigen zu können.

Innerhalb der Systemtheorie wird diese Beziehung durch den Formkalkül von Spencer-Brown symbolisiert. Die Setzung einer Grenze zwischen System und Umwelt führt zur Unterscheidung einer markierten Innenseite, die jedoch die unmarkierte Außenseite voraussetzt, aus der die Grenze in Koproduktion zwischen innen und außen entsteht. Das re-entry repräsentiert jenes dynamische Untertunneln, das die hiermit erscheinende Form dadurch reproduziert, dass sie einer ständigen dynamischen Veränderung ausgesetzt wird.

Wir treffen hier auf jene ›System-im-System-Paradoxie‹, die bereits Schrödinger in seinem berühmten Aufsatz mit dem Katzenbeispiel formuliert hat. Hier wird deutlich, dass man sich die damit offenbarende Systemik nicht als ein Seinsverhältnis, sondern als ein Reflexionsverhältnis im Sinne von Günther vorzustellen hat. Gegenüber der klassischen führt die quantentheoretische Beschreibung zu einer beschränkten Anzahl von Freiheitsgraden und damit auch zu einer beschränkten Möglichkeit des Wissens. Dies bringt aber die Konsequenz mit sich, dass zwei miteinander verschränkte Systeme weniger Freiheitsgrade besitzen, als nötig wäre für die Definition der beiden systeminternen Relationen und der Beziehungsrelationen innerhalb der beiden Systeme. Systeme werden durch Interaktion (die mit Verschränkungen einhergeht) unberechenbar, was jedoch entsprechend dem order-from-noise-Prinzip die Bildung und Stabilisierung weiterer Systeme nährt, ja geradezu die Voraussetzung für ihre Entstehung darstellt.

Schauen wir nochmals auf Schrödingers Argumentation in dem berühmten Aufsatz mit dem Katzenbeispiel, da hier das Dilemma einer in dieser Weise informierten systemtheoretischen Reflexion deutlich wird:

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

unbefriedigt lässt – obwohl der Gesamtkatalog maximal ist, das heißt obwohl die ψ -Funktion des Gesamtsystems bekannt ist.«⁴⁰

»Von der Form, in der man die ψ -Funktion zuletzt gekannt, zu der neuen, in der sie wieder auftritt, führt kein stetiger Weg – er führte eben durch die Vernichtung. Kontrastiert man die zwei Formen, so erscheint die Sache als ein Sprung. In Wahrheit liegt ein wichtiges Geschehen dazwischen, nämlich die Einwirkung der zwei Körper aufeinander, während welcher das Objekt keinen privaten Erwartungskatalog besaß und auch keinen Anspruch darauf hatte, weil es nicht selbstständig war.«⁴¹

»Die Verschränkung ist nicht zeitbeständig. Sie bleibt zwar dauernd eine eindeutige Verschränkung aller Variablen, aber die Zuordnung wechselt.«⁴²

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

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

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

40 Schrödinger (1935, 826).

41 Ebd., 828.

42 Ebd., 847.

nun als ein dynamisches Feld, das in seinen Möglichkeitshorizonten Trennung und Individuierung sowie Verschränkung in vielfältigen Kombinationen realisieren kann.

Systeme können nur ein begrenztes Maß an Wissen haben. Interagierende Systeme verwenden einen Teil ihres Wissens, um ihre Relationen zu definieren. Aufgrund des begrenzten Gesamtwissens geht die Verschränkung zweier Systeme zugleich mit einer Vernichtung von Wissen innerhalb der beteiligten Systeme einher. Die Interaktion von Systemen geht somit unweigerlich mit der Entstehung von Kontingenz einher, die wiederum zu neuem Systemaufbau, zu einer neuen Zuordnung der Variablen genutzt werden kann.

Wir begegnen hier einer Reflexionsbeziehung, die durch die Vernichtung von Bestimmung, also durch das Negative genährt wird. Deshalb brauchen wir hier auch keinen Beobachter (im Sinne von: da ist jemand, der beobachtet), der die Wellenfunktion kollabieren lässt. Stattdessen begegnen wir einem sukzessiven Prozessgeschehen, das qua Interaktion permanent neue Kontingenzen entstehen lässt, die einer Bestimmung überführt werden müssen.

Unvermeidbar kommt hiermit auch eine informationstheoretische Perspektive mit ins Spiel. Elementare Quantensysteme bestehen aus einem Dual von einem bestimmten und einem unbestimmten Wert, wobei der merkwürdige Zusammenhang besteht, dass erst die Bestimmung des einen den anderen unbestimmt erscheinen lässt. Das Verhältnis von Wissen und Nicht-Wissen ist hiermit durch das Quantensystem konditioniert und stellt damit eine übergreifende Eigenschaft desselben dar. In einem elementaren Quantensystem kann also nur ein Wert bestimmt sein, während der andere unbestimmt bleiben muss, da das System eben nur ein Bit an Information tragen kann. Um es nochmals zu wiederholen: dennoch besteht zwischen beiden Werten ein Zusammenhang, denn erst die Bestimmung des einen lässt den anderen unbestimmt erscheinen. Anders als bei Zufallsprozessen, die klassisch beschrieben werden können, treffen wir hier auf eine Koproduktion von Bestimmtheit und Unbestimmtheit.⁴³ Das eine

43 »Physikalisch bedeutet dies, dass sich das Quantensystem mit der Wahrscheinlichkeit a_{02} im Zustand $= 0$ befindet (den Wert $>0<$ besitzt) und mit der Wahrscheinlichkeit a_{12} im Zustand 1 (Wert $>1<$). Der Wert des Bits selbst ist damit quantenmechanisch ungewiss, eine Beobachtung wird einen der beiden Werte mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit liefern. Ist aber mit dieser Ungewissheit nicht auch ein Verlust an Information verbunden?

In der Quantenmechanik ist hier strikt zwischen Superposition und dem klassischen Gemisch zweier Möglichkeiten zu unterscheiden. Wenn wir zum Beispiel an einem Ensemble von Photonen mit gleicher Wahrscheinlichkeit horizontale und vertikale Polarisationsdetektieren, so kann es

ist nicht ohne das andere zu haben. Das Verhältnis von Wissen und Nicht-Wissen ist hiermit konditioniert, ist also seinerseits bestimmt, denn es ergibt sich als eine verbundene – man könnte ebenso gut sagen holistische – Eigenschaft des übergreifenden Quantensystems.⁴⁴

Aus dieser Perspektive ergibt sich wiederum eine Denkbewegung, welche den Informationsbegriff ontologisiert und dies mit einer Reihe von Experimenten begründen kann, die implizieren, dass wirklich nur etwas in der Welt da ist, wenn man dies prinzipiell wissen kann.⁴⁵ Mit Zeilinger heißt es entsprechend:

»Information ist der Urstoff im Universum.«⁴⁶

»Naturgesetze dürfen keinen Unterschied machen zwischen Wirklichkeit und Information.«⁴⁷

Hierdurch erscheint jedoch auf der anderen, der ausgeblendeten Seite, die Frage der Kontextualisierung von Information, also wo und wodurch der Unterschied gemacht wird. Da ein klassisches Medium hierfür selbstredend nicht in Frage kommt, bleiben nur die mit der Schrödinger-Gleichung formulierten ›Wellen von nichts‹ übrig. Da aber ein radikalisierte Informationsbegriff dem Diktum der Kopenhagener Deutung folgt, dass keine Aussagen darüber gemacht werden dürfen, was zwischen den Messungen geschieht, hat es hier

sich dabei um ein inkohärentes Gemisch ohne irgendeinen Informationsgehalt gehandelt haben. Es könnte aber auch eine kohärente Superposition gewesen sein, zum Beispiel: $(H + V / \sqrt{2} = 45^\circ)$, das heißt, ein 45° Grad linear polarisiertes Ensemble mit eindeutig definierter Information. Wie wir später sehen, bildet diese Gleichzeitigkeit von Ungewissheit und definierter Information den Grundstein für die Sicherheit der Quantenkryptographie.

Die Möglichkeit der Superposition führt, zusammen mit den daraus folgenden Interferenzphänomenen, zu all den Paradoxa und Interpretationsproblemen der Quantenmechanik« (Weinfurter 2002, 122 f.).

44 »That state does not contain any information about the individuals; all information is contained in joint properties. In fact, now there cannot be any information carried by the individuals because the two bits of information are exhausted by defining that maximally entangled state, and no further possibility exists also to encode information in individuals« (Zeilinger 1999a, 639).

45 Siehe etwa die Delayed-Choice-, die Quantum-Eraser-, die Interferometer- oder die Interferenzexperimente mit größeren Molekülen (ausführlich in Kap. III.4).

46 Zeilinger (2005, 216 f.).

47 Ebd.

auch keinen Sinn mehr, von einer wellenförmigen Quantenmaterie auszugehen, die das Medium darstellt, auf dessen Basis all dies geschieht. Die Argumentation schließt sich hiermit hermetisch ab. Es wird die Paradoxie verdeckt, dass eigentlich in platonischer Manier eine Gleichsetzung von Theorie und Realität vorausgesetzt wird (ohne die mit der Schrödinger-Gleichung postulierten Interferenzt Terme gibt es keine Verschränkung), was jedoch auf anderer Ebene wieder bestritten werden muss (was zwischen den Messungen geschieht, gibt es nicht).

Auch die Substanztialisierung der Information zu dem Stoff, aus dem die Quantenwelt besteht, bringt nicht jene systemische Gegenbewegung zum Verschwinden, welche den Versuch, die nackte Information zu ontologisieren, zugleich wieder suspendiert.

Raffinierter entfaltet v. Weizsäcker die Subjekt-Objekt-Dichotomie. Auch er erkennt die wichtige Rolle des Informationsbegriffs an, negiert dabei jedoch nicht die Beziehung zwischen Medium und Form. Information erscheint bei ihm jetzt weder als Materie noch als Bewusstsein – sie ist hier also weder dem Objekt- noch dem Subjekt-Pol zuzurechnen. Information erscheint bei ihm vielmehr als die Instruktion von Gestalt – als Form, die dann die Materie einnehmen und die dann vom Bewusstsein gewusst werden kann. Um mit Günther zu sprechen, als Reflexionsbeziehung ist sie nur negativ-sprachlich zu fassen. Die Beziehung von Sein und Information wird hier jedoch noch nicht als ein systemisches Inklusionsverhältnis begriffen, sondern erscheint in eine hierarchisch gegliederte Dualität ausgelagert. Der philosophisch gebildete v. Weizsäcker begreift sehr wohl, dass der Rückgriff auf einen empirischen Beobachter keinen lautererem Ausweg darstellen kann – denn dieser lässt sich in der Beschreibung nicht finden (den Beobachter als Ding oder Seinsform gibt es hier nicht). Um das Dilemma zu beruhigen, greift er jedoch auf Kants Zaubertrick zurück, ein transzendentes Subjekt zu postulieren, das nun die Bedingung der Möglichkeit darstellt, eine dualistische Erfahrung in einer monistischen Welt zu beschreiben. Wir begegnen hier einer sehr subtilen Form des Dualismus, die an der Grenze einer konstruktivistischen Epistemologie gebaut ist, die vollkommen im Grundlosen gegründet ist. Von Weizsäcker entfaltet die Paradoxie der Quantentheorie auf höchstem Niveau, wohl wissend, dass die »Frage, wie der Beobachter sich selbst beschreiben könnte«, dennoch »offen« bleiben muss.⁴⁸

Die letzte Möglichkeit, sich der Beobachterproblematik zu stellen (oder müsste man nicht sagen: zu entziehen) besteht darin, die Paradoxie anzuerkennen und damit auf eine Hierarchie von Begrün-

48 v. Weizsäcker (1994, 531).

dungsverhältnissen – und damit auch auf eine ontologische Bestimmung – zu verzichten. ›Emergenz‹ wird jetzt zum Schlüsselbegriff. Die Vorstellung hierarchischer Kausalitätsketten wird jetzt aufgegeben zugunsten heterarchischer Ordnungsbeziehungen. Hier wachsen nicht nur bottom up aus Elementen Systeme auf. Umgekehrt können jetzt systemische Dynamiken top down jene Phänomene emergieren lassen, die man ›individuiierend‹ als Elemente bezeichnen kann. Hiermit lösen sich praktisch alle Beziehungen auf in bodenlose Welten polykontextural verschachtelter Verhältnisse. »Jeder Ort der Begründung wird in diesem Fundierungsspiel Grund und Begründetes zugleich. Orte sind untereinander weder gleich noch verschieden; sie sind in ihrer Vielheit voneinander geschieden. Die Ortschaft der Orte ist bar jeglicher Bestimmbarkeit«. ⁴⁹ Naturkonstanten und Naturgesetze – vielleicht sogar die Gravitationskraft – erscheinen jetzt selbst als emergente Phänomene von Ordnungsrelationen, die sich wiederum auf andere Ordnungsrelationen beziehen. Diese Reflexionsverhältnisse nähren sich aus jenen Symmetriebrüchen, die sich aus den immerfort perpetuierenden Relationierungen von Wissen und Nicht-Wissen ergeben.

All dies bleibt unvorstellbar und spottet jeglicher Anschauung, denn all diese Prozesse verlaufen verschränkt und nicht-lokal ab.

Unsere Konzepte von Welt spielen immer in der Anschauung eines dreidimensionalen Raumes, in dem lokale Wechselwirkungen zum Ausdruck kommen. Selbst beim Begriff des Systems und der hieraus abgeleiteten System-Umwelt-Grenze schwingt immer noch eine Behälter-Metapher mit. Unjekte sind nicht vorstellbar, ebenso wenig wie die quantenmechanischen ›Wellen von nichts‹, welche jene Reflexionsbeziehungen hervorbringen, die entsprechend den Einsichten der Quantentheorie unsere Welt gestalten.

Eine solchermaßen informierte Quantentheorie weiß um die Tatsache, dass ein solchermaßen informierter Systembegriff nicht mehr erlaubt, von Beobachtern, Subjekten, Objekten und anderen Dingen zu sprechen. Sie weiß, dass man hier – insofern man nur genau genug hinschaut – auf Leere stoßen würde.

Aus der Systemtheorie folgt, dass wir als informationsverarbeitende Systeme selbst die Welt nur aufgrund jener Selektivität anschneiden können, die sich aus unserer spezifischen Kombination von Wissen und Nicht-Wissen ergibt. Der blinde Fleck bleibt für jedes beobachtende System – und damit auch für das System der Wissenschaft – unhintergebar.

In diesem Sinne wäre dann auch die Einsicht der Konsistente-Geschichten-Theorie konsequent, dass jeder von uns – auch der Quan-

49 Kaehr (1993, 170 f.).

tenphysiker – in einen anderen Realitätsbereich eingesponnen ist und sich die unterschiedlichen Sphären nur teilweise überlappen. Jeder dieser Realitätsbereiche geht dann zwangsläufig mit dem Ausflaggen von Objekten (und Subjekten) einher. Es wird jeweils etwas gesehen, gedacht, reflektiert. Da man es im Fall von Quantensystemen jedoch mit Unjekten zu tun bekommt, besteht vielleicht der einzig gangbare Weg, sich Quantensystemen anzunähern, darin, den verschiedenen Geschichten zu folgen, in denen diese vorkommen; wohl wissend, dass man bei keiner Geschichte stehen bleiben darf. Die Geschichte von der Geschichte der Interpretation der Quantentheorie könnte uns dann zumindest eine Ahnung vermitteln, was Systeme im Allgemeinen und Quantensysteme im Besonderen ausmacht: Sie sind keine Objekte. Man kann allerdings positiv-sprachlich nicht anders, als objektivierend von ihnen zu sprechen.

Es ist wohl kein Zufall, dass gerade der mit der Idee der Emergenz vertraute Laughlin zu der Feststellung gelangt, dass quantenmechanische Materie aus »Wellen von nichts« bestehe.⁵⁰ Seinslogisch ist dieser Satz absurd, denn wie kann etwas zugleich sein und nicht sein. Erst reflexionslogisch in eine polykontexturale Betrachtungsweise eingebettet ergibt dieser Satz Sinn. Die Komplexität führt jetzt zu einer Reflexion, die nicht (allein) durch das Sein gedeckt ist. Der Ausdruck ›Wellen von nichts‹ kann aus dieser Perspektive also als eine Reflexion gelesen werden, die aus dem Nichts, dem Bedingungslosen informiert, in die Sphäre des Seins interveniert, um hier einen wirklichen Unterschied zu machen. Wenngleich die Bedeutung einen entscheidenden Unterscheid macht, ist sie ihrer Natur nach *essenzenlos*.

Sobald man Systeme begriffen hat, hat man sie nicht verstanden. Es bleibt also nichts anderes übrig, als das Denken in Bewegung zu halten, um den komplexen Gegenstand auf intelligente Weise von verschiedenen Seiten umkreisen zu können.

Die Quantentheorie stellt eines der anspruchsvollsten und erfolgreichsten Theorieprojekte der Menschheitsgeschichte dar. Sie ist eine, wenn nicht die Universaltheorie der Physik. Die Geschichte ihrer Deutung und die Auseinandersetzung um ihre Interpretation berührt jedoch weitaus mehr als nur das Feld der theoretischen Physik. Eine solche Theorieanlage zerstört darüber hinaus ontologische Gewissheiten. Sie stellt den Beobachter in Frage und sie lässt uns ahnen, was zu erwarten ist, wenn wir uns in anderen Feldern mit komplexen Phänomenen beschäftigen, die mit der Beobachterproblematik infiziert sind.

Zusammenfassend: Die Quantentheorie kann uns zeigen, was Theorie heutzutage leisten kann und dass Theorie unter den gegeb-

50 Laughlin (2007, 93).

nen Reflexionsverhältnissen nur in der Pluralität ihrer Interpretation und Deutung zu haben ist.

Hiervon könnten sich dann auch andere Wissenschaftsfelder, man denke etwa an die Wirtschaftswissenschaften, die Psychologie und auch die Politik- und Sozialwissenschaften inspirieren lassen, mehr Komplexität in ihrer Theoriebildung zu wagen. Anstelle weiterhin trivialen Modellbildungsprozessen im Sinne einer Pseudo-Naturwissenschaft zu folgen, könnte auch hier vermehrt versucht werden, Sprachen zu finden, über die sich heterogene Kausalitäten in multiplen Kontexten, die nur bei Beobachtung als konkrete Daten ausfallen, beschreiben lassen.

Während die Quantentheorie mit sich überlagernden Wahrscheinlichkeitswellen, der Gleichzeitigkeit unterschiedlicher Potenziale sowie deren kontingenter Bestimmung in Beobachtungsprozessen rechnen kann, um diese dann bei Bedarf auch noch informationstheoretisch zu fassen,⁵¹ trauen sich die Human- und Gesellschaftswissenschaften kaum ernsthaft mehr an jene Probleme heran, die für die Organisation unseres Alltags von wirklicher Relevanz sind. Von der Quantentheorie lernen, hieße hier, sich endlich der Komplexität der Wirklichkeit zu stellen.

Abschied von einer Welt ohne Sinn

Der Begegnung zwischen Quantenphysik und soziologischer Systemtheorie kann helfen, mit re-entranten Verhältnissen vertraut zu werden. Eine solche Begegnung kann dazu beitragen, »Welten ohne Grund zu bauen, und darin heimisch zu sein.«⁵² Im Spiegel der jeweils anderen Disziplin kann deutlich werden, dass jeder Versuch, die Beobachtungsverhältnisse im Sinne eindeutiger Subjekt/Objekt-Verhältnisse zu bestimmen, zum Scheitern verurteilt ist und man deshalb besser beraten ist, auf eine deontische Epistemologie umzustellen.

Kann die Quantentheorie aber auch etwas von einer systemtheoretisch informierten Soziologie lernen, das über die Einsichten der allgemeinen Systemtheorie hinausgeht? Wir vermuten ja.⁵³ Das Be-

51 Siehe etwa Zeilinger (2005).

52 Varela et al. (1992b, 325).

53 In diesem Sinne auch Peter Fuchs: »Was kann die Quantenphysik von der Allgemeinen Theorie der Sinnsysteme lernen? – Vor allem dies, wäre die Antwort darauf, daß sie sich im Blick auf ihre Sinnförmigkeit ein hohes Maß an Selbstreferenz gönnen können müßte, mehr Komplexität also im Einbezug des Umstandes, daß es sich auch bei ihr um ein soziales wie psychisch konditioniertes Sinnprozessieren handelt, das niemals an eine nicht-sinnförmige Welt anstoßen kann. Die hierzulande wenig

sondere der soziologischen Systemtheorie ist ihre Erfahrung mit dem Sinnbegriff, denn soziale Systeme sind Sinnsysteme. Sie ist dabei in der Lage, den Sinnbegriff gegenstandsbezogen von verschiedenen Seiten her zu entfalten, je nachdem, ob man vom Bewusstseinsprozess, der systeminternen Komplexitätsverarbeitung oder von der Kommunikation und den hier getroffenen Anschlüssen her denkt. Von der ersten Sphäre her betrachtet erscheint das »Phänomen Sinn« in »der Form eines Überschusses von Verweisungen auf weitere Möglichkeiten des Erlebens und Handelns«. ⁵⁴ Von der Sphäre der Kommunikation her gesehen erscheint Sinn komplexitätstheoretisch fundiert als ein Selektionszusammenhang, in dem aus einem begrenzten Arsenal von Möglichkeiten einzelne Optionen ausgewählt werden. Beide Sphären abstrahierend lässt sich Sinn als eine fortschreitende, sich selbst prozessierende Sukzession der Aktualisierung der »modaltheoretischen Unterscheidung von Wirklichkeit (Aktualität) und Möglichkeit (Potenzialität) bestimmen, und zwar als Begriff für die Einheit genau dieser Unterscheidung«. ⁵⁵ Auch der Sinnbegriff bekommt hiermit eine differenztheoretische Fassung. Er erscheint jetzt als ein selbstreferenzieller Reproduktionszusammenhang, als »ein Prozessieren nach Maßgabe von Differenzen, und zwar von Differenzen, die als solche nicht vorgegeben sind, sondern ihre operative Verwendbarkeit (und erst recht natürlich: ihre begriffliche Formulierbarkeit) allein aus der Sinnhaftigkeit selbst gewinnen. Die Selbstbeweglichkeit des Sinngeschehens ist Autopoiesis par excellence«. ⁵⁶

Die Homologien eines in dieser Form explizierten Sinnbegriffs mit den Reflexionsverhältnissen, zu denen die Quantentheorie die Physiker zwingt, sind überdeutlich. Um mit Hans-Peter Dürr zu rekapitulieren: »Die Wirklichkeit der neuen Physik ist Potenzialität, eine Welt der Kann-Möglichkeiten, sich auf verschiedene Art materiell, energetisch zu verkörpern«. Die zweiwertige Logik der Beschreibung der klassischen Welt erscheint dann nur als ein Sonderfall einer anderen, die Welt umfassender beschreibenden Logik,

gepflegte Philosophie der Physik könnte dann, wenn sie die Allgemeine Theorie der Sinnsysteme berücksichtigt, zur Reflexionsinstanz der Physik avancieren, die die quantentheoretischen (und relativitätstheoretischen) Unterscheidungen »gegenbeobachtet« oder besser: »zweitbeobachtet«. Dies alles heißt auch, daß die Intention auf eine physikalische Weltformel ohne Referenz auf die Unvermeidbarkeit von sinnförmigen Beobachtungsoperationen, ohne Rekurs auf jene doppelte Verschränkung, kaum zu jener »Einheitlichkeit« gelangen kann, die mit ihr erträumt wird« (Fuchs 2009, 10).

54 Luhmann (1993, 93).

55 Luhmann (2000a, 18 f).

56 Luhmann (1993, 101).

denn »in der Quantenwelt herrscht die mehrwertige Logik, also nicht nur Ja und Nein, sondern auch Sowohl/Als-auch, ein Dazwischen. Eben das Nicht-Greifbare, das Unentschiedene. Daran müssen wir uns gewöhnen.«⁵⁷

Der analytisch strenge und sowohl reflexionslogisch als auch Komplexitätstheoretisch begründete Sinnbegriff der soziologischen Systemtheorie könnte es der Physik leichter machen, sich von der platonischen Idee einer reinen Theorie zu lösen. Sinn geht niemals in reine Formen auf, wenn man hierunter ein widerspruchsfreies und eindeutig bestimmbares Gebilde versteht. Der derzeitige Stand der Quantentheorie lässt kaum einen Zweifel daran möglich, dass das, was die Welt zusammenhält, auf Kontingenz gebaut ist und gerade deshalb empirisch Reinheit im Sinne einer Einheit von Form und Reflexion nicht zu finden ist. Die reflexionslogische Einsicht führt zu der Konsequenz, dass die Welt nicht identisch mit sich selber sein kann, weil aus dem Nichts ständig jene Reflexion erwächst, die einen Unterschied macht.

Aus dieser Perspektive liegen Tegmark und Wheeler richtig mit ihrer Vermutung, dass eine allumfassende Theorie keine Begriffe mehr enthalten könne, denn sie dürfte keinen Sinn mehr enthalten. Eine solche Theorie würde alles determinieren, da sie alles richtig beschriebe, aber zugleich würde hiermit die Lebendigkeit des Universums eliminiert.⁵⁸

Die reale Welt ist anders. Innerhalb dieser Welt existieren systemische Verhältnisse, die Unbestimmtheit generieren, weil sie auf Nicht-Wissen gegründet sind. Gleichsam aus der Unwissenheit heraus entstehen Beobachter (um hier den Common-Sense-Begriff für re-entrante systemische Verhältnisse zu benennen) und sie verschwinden zugleich, wenn man sich ihnen positiv-sprachlich nähert, da jede Beobachtung das Beobachtete auflöst und in eine neue Beobachtung überführt. Genau dies meint Luhmann, wenn er das ›Sinngeschehen‹ als ›Autopoiesis par excellence‹ bezeichnet. Sinn selbst ist der kontinuierliche Vollzug von Kontingenz, die sukzessive Realisierung von

57 Dürr (2007).

58 Hier nochmals das Zitat: »Eine allumfassende Theorie müsste vermutlich gar keine Begriffe enthalten. Andernfalls würde man sehr wahrscheinlich eine Erklärung für ihre Begriffe in Form einer noch fundamentaleren Theorie suchen – und so immer weiter in unendlichem Regress. Mit anderen Worten, die Theorie müsste rein mathematisch sein, ohne erklärende Postulate. Vielmehr sollte ein unendlich intelligenter Mathematiker fähig sein, die gesamte Hierarchie der Theorien allein aus diesen ultimativen Gleichungen herzuleiten, indem er die von ihnen beschriebenen Eigenschaften des Universums herleitet – und die Eigenschaften seiner Bewohner und ihre Wahrnehmungen der Welt.« (Tegmark/Wheeler 2001).

Möglichkeit, die wiederum neue Möglichkeiten emergieren lässt. Die Quantentheorie lehrt uns, wie absurd – wie wirklichkeitsfremd – es ist, Welt sinnfrei erkennen oder beschreiben zu wollen.

Insofern Quantenphysiker bereit sind, dies anzuerkennen, folgt als zweiter Schritt die Einsicht, dass ihre Gegenstände unweigerlich in eine doppelten Sinninklusion verwickelt sind.⁵⁹ Zum einen kann jetzt physikalische Realität nur noch als kontext- und beobachtungsabhängige Entfaltung von Kontingenz (was anderes ist Sinn?) verstanden werden. Zum anderen findet jede Beschreibung dieser Prozesse innerhalb der Sprache im Medium Sinn statt, das – durch Kontingenz getrieben – Mehrdeutigkeiten und Unbestimmtheiten mitführen muss.

In diesem Sinne würden Niels Bohr und Werner Heisenberg mit der in der Kopenhagener Deutung formulierten Intuition richtig liegen, dass Quantensysteme durch die Alltagssprache niemals erreicht werden können. Nur wäre der Grund hierfür kein epistemischer, sondern ein ontologischer. Nicht weil wir die Welt nicht erkennen können, sondern weil die Welt in ihrem Inneren mit Sinn durchzogen ist, begegnen wir den Paradoxien einer Quantenphysik, die nur deshalb so erfolgreich sein kann, weil die Welt mindestens genauso bizarr ist wie eine komplexe Theorie, die an ihr nicht scheitert.

Weltbezug durch Weltverlust

Die soziologische Rekonstruktion der Theorieentwicklung der Quantenphysik hat aufgezeigt, wie Anschauung, Experiment und mathematische Entwicklungen im Zuge der Ausdifferenzierung einer wissenschaftlichen Disziplin in ein konstruktives Spannungsverhältnis treten können. Dies führte schließlich zu einer Theorie, die jeglichem Common Sense spottet, die sich aber offensichtlich im Einklang mit der Welt befindet, die sie beschreibt. Gerade der soziologische Blick lässt ahnen, wie unwahrscheinlich die Entstehung, Entwicklung und

59 Peter Fuchs spricht hier von ›doppelter Verschränkung‹: »Aber das bedeutet, daß die Quantenphysik es mit einer doppelten Verschränkung zu tun hat. Sie geht davon aus, daß Messung und Gemessenes im Mikrokosmos nicht unabhängig voneinander stattfinden. Es findet sich für sie kein archimedischer locus observationis mehr, von dem aus Beobachtung ›rein‹ zu halten wäre. Da jedoch die Quantenphysik so wenig wie irgendwelche Sinnsysteme über den Saum von Sinn hinauskommen kann, also ein sinnförmiges Unternehmen ist, fallen ihre Beobachtungen einer zweiten Verschränkung anheim: der von Sinn und Welt oder Sinn und Sein. Beobachtung ist nie und nirgends ein Gegenüber der beobachteten Welt« (Fuchs 2009, 10).

Stabilisierung einer solchen Theorieanlage ist. Wissenschaft setzt voraus, dass man Konzepte und Anschauungen entwickelt, die in Konflikt mit Tradition und Alltagskonzepten stehen, und dass man diese Konzepte kommunikativ hinreichend stabilisieren kann. Dies setzt die Abtrennung und operationale Schließung einer kommunikativen Sphäre der Wissenschaft voraus, von der aus – nun ungestört von den Problemen und Deutungsansprüchen des Alltags – Formen etabliert werden können. Wissenschaft muss also in die Lage kommen, ihre Konzepte in Hinblick auf ihre innere theoretische Konsistenz hin zu bewerten und muss deshalb davor geschützt werden, durch unnötigen Weltbezug belastet zu werden. Dies setzt – wiederum historisch gesehen ein recht unwahrscheinlicher Vorgang – die Institutionalisierung eines Wissenschaftssystems voraus, das sich in immer neue Subdisziplinen ausdifferenziert, in denen, entlastet von unmittelbaren Verwertungszwängen, spielerisch neue Formen ausprobiert werden können.

Das Paradebeispiel hierfür ist die Mathematik. Ihre Formen beziehen sich nur noch auf sich selber. Die hiermit verbundenen Referenzen zirkulieren in Medien eines Kommunikationssystems ›Mathematik‹, das sich vor allem mit Hilfe der Schriftlichkeit und der hierdurch möglichen Standardisierung der Formsprache die innere Konsistenz geben kann, die notwendig ist, um mathematische Anschauungen und Konzepte so weit stabilisieren zu können, so dass sie von anderen wissenschaftlichen Disziplinen als Hilfsmittel zur Modellierung ungewöhnlicher und gewagter Konzepte genutzt werden können. Erst auf diese Weise können unwahrscheinliche, vom Common Sense abweichende Theorien entstehen, die sich dann gegebenenfalls empirisch überprüfen lassen.

In diesem Sinne lässt sich mit Fuchs die Unterscheidung empirisch/mathematisch als die Leitdifferenz der klassischen Physik ansehen. Mathematische Formalisierung und Experimentalphysik treten hier in ein produktives Wechselverhältnis, in dem die mathematische Umsetzung der theoretischen Intuition das Experiment treibt und die hieraus gewonnenen empirischen Daten Anlass zu neuen, gewagteren theoretischen Modellierungen geben.

Mit der Entwicklung der Quantentheorie kommt aber noch eine weitere Unterscheidung mit ins Spiel, da nicht mehr vorausgesetzt werden kann, dass die mathematische Modellierung mit den gängigen physikalischen Konzepten und Vorstellungen übereinstimmt. Die nicht-klassische Physik kommt jetzt in die Lage, mathematische Modelle auszuprobieren und in ein Experimentaldesign zu überführen, die (noch) nicht auf einer physikalischen Anschauung beruhen, und umgekehrt, unterschiedliche physikalische Konzeptionen in Hinblick auf eigene innere Konsistenzansprüche zu entwickeln.

Damit erfährt aber jetzt auch die physikalische Theorie – wie schon zuvor die Mathematik – einen Verlust an Weltbezug. Physikalische Anschauungen brauchen nun nicht mehr mit den Common-Sense-Anschauungen der Welt übereinzustimmen, um die Entwicklung von Experimentalphysik und theoretischer Physik voranzutreiben. Im Gegenteil: Es können jetzt physikalische Konzepte ausprobiert werden, die radikal im Gegensatz zu den mit unserer Alltagserfahrung verbundenen Denkmodellen stehen.

Die Aufspaltung von mathematischen und physikalischen Anschauungen (auch die Mathematik beruht letztendlich auf Anschauung – und sei es nur die eines Graphen mit bestimmten topologischen Eigenschaften) führt zu einer Vervielfältigung der Möglichkeiten, physikalische Theorien zu bauen. Man kann jetzt primär von einer mathematischen Idee oder von einer physikalischen Anschauung her beginnen – erscheinen diese zunächst auch noch so bizarr –, um ein Theorieprojekt zu entfalten.

Sowohl die Arbeit der Physiker als auch die der Mathematiker ist dabei eine, die im Medium von Texten, das heißt in Form wechselseitiger Lektüre stattfindet. Die Texte der Mathematik und der Physik unterscheiden sich voneinander. Erstere präsentieren mehr Gleichzeitigkeit und strukturelle Bezüge, denn ihr Primärmedium ist die mathematische Formel, welche komplexe Beziehungen darstellt und in ihrem Aufeinander-Bezogensein zeigt.

Die Arbeit der Physiker wird demgegenüber in mehr sprachförmigen Texten reflektiert und aufeinander bezogen. Formeln haben zwar auch einen wichtigen und unverzichtbaren Status, sind aber eingebettet in umfangreichere Texte. Sprachlich formulierte Propositionen beziehen sich hier auf sprachlich formulierte Propositionen. Wie der Sozialwissenschaftler oder Philosoph liest auch der Physiker Theorie, um Theorie zu variieren. Darüber hinaus treten die Texte (Sätze, Begriffe und Sprache) in ein Verhältnis zur Mathematik (Gleichung und Zahl)⁶⁰ und zu Experimentalsystemen (Verzahnung technischer Konditionierungen mit dem Zufall). Theoriearbeit ist und bleibt aber innerhalb der Physik – anders als in der Mathematik – primär begrifflich semantische Arbeit. Es geht hier also um die Verschiebung und Neukonfiguration von Bedeutung. Physikalische Theoriearbeit erscheint damit immer auch als eine weltanschauliche Tätigkeit, und die von ihr verwendeten Vorstellungen sind dabei mehr als nur Metaphern.⁶¹

60 Siehe zu den Medienverhältnissen von Begriff und Zahl auch Rustemeyer (2006; 2009).

61 Oder um hier mit Rorty dem Weg Davidsons zu folgen, Metaphern sind gar keine Metaphern: »Denn dadurch, daß ihnen eine buchstäbliche Bedeutung beigelegt wird, wodurch sie dann zu ›vergilbten‹ Metaphern

Die Theoriearbeit gewinnt hierdurch erhebliche Freiheitsgrade, da sie gewissermaßen sowohl in Mathematik als auch in Hinblick auf physikalische Anschauung auf verschiedene Theoriebausätze und Medienschemata zurückgreifen kann. Ihre Leitdifferenz beruht jetzt auf der Trias empirisch/mathematisch/physikalisch-theoretisch, was dann jedoch in eine transklassische Physik mündet, die sich immer mehr in unterschiedliche Theorieanlagen und Deutungsoptionen diversifiziert. Unweigerlich geht diese jedoch mit dem Weltverlust von physikalischen Theorien einher (von nun an nur noch im Plural zu denken), da sich diese jetzt letztlich nur noch in ihre eigenen Formzwänge einspinnen können, um von dort aus einen Weltbezug zu konstruieren. Dies führt zwar einerseits zu immer gewagteren Theorien, die dann mit Blick auf die Koproduktion mit der Experimentalphysik auf immer seltsamere physikalische Phänomene treffen. Andererseits stellt sich aber jetzt in der Physik vermehrt die Frage, ob sich mit solch hochgetriebenen Theorieprojekten – siehe das Beispiel der Stringtheorie – Weiterkenntnis überhaupt noch vorantreiben lässt.

Der Vorwurf, dass die Suche nach der Weltformel letztlich nur zu Glasperlenspielen führt, die keine praktische Relevanz besitzen, ist unter den genannten wissenschaftssoziologischen Bedingungen nicht mehr so leicht von der Hand zu weisen. Damit wird aber auch in der Physik wie auch in der Gesellschaft beobachtbar, dass physikalische Theorien Konstruktionen der kommunikativen Sphäre des Wissenschaftssystems darstellen.

»Die ›hard sciences‹ sind erfolgreich, weil sie sich mit den ›soft problems‹ beschäftigen; die ›soft sciences‹ haben zu kämpfen, denn

werden, vergrößern sie den logischen Raum. Daher ist die Metapher ein wesentliches Instrument im Prozeß des Umwebens unserer Überzeugungen und Wünsche. Ohne sie gäbe es so etwas wie eine wissenschaftliche Revolution oder einen kulturellen Umbruch gar nicht, sondern nur den Vorgang der Veränderung der Wahrheitswerte von Aussagen, die in einem Vokabular formuliert werden, das nie wechselt. Davidsons Deutung des Metaphernbegriffs steht im Einklang mit der von Mary Hesse gegebenen Kennzeichnung der Theorie als einer metaphorischen Neubeschreibung des Explanandum-Bereichs. Nicht nur in der Kunst, sondern auch auf den Gebieten der Wissenschaft, der Moral und der Politik fühlen wir uns manchmal gedrängt, einen Satz zu äußern, der aufschlussreich und fruchtbar zu sein scheint, obwohl er auf den ersten Blick falsch wirkt. Solche Sätze sind am Anfang ihrer Laufbahn ›bloße Metaphern‹. Manche Metaphern sind jedoch insofern ›erfolgreich‹, als wir sie so unwiderstehlich finden, daß wir versuchen, ihnen zu einem Platz unter den Überzeugungen und damit zur Anwartschaft auf buchstäbliche Wahrheit zu verhelfen (Rorty 1993, 68).

sie haben es mit den ›hard problems‹ zu tun«. ⁶² Das v. Foerstersche Theorem gilt nicht mehr für die theoretische Physik. Auch sie begegnet jetzt den harten erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Problemen einer hochgradig ausdifferenzierten Wissenschaft, die Weltbezug nur deshalb herstellen kann, weil ihre Theorieformen sich weitgehend von den beobachtbaren Phänomenen der Welt gelöst haben.

Unweigerlich wird damit auch die Physik mit Sinnproblemen konfrontiert, die nicht mehr einfach durch den Verweis auf die Empirie oder Logik gelöst werden können. Dass die Quantentheorie ihr Deutungsproblem nach mehr als hundert Jahren erfolgreicher Anwendung nicht gelöst hat, zeigt auf, dass wir es auch hier mit der schwierigen Herausforderung der *soft science* zu tun bekommen, nämlich mit Sinn und damit mit Kontingenz und Vieldeutigkeit.

Heutzutage machen sich also auch in der Physik die großen Erzählungen verdächtig. Die transklassische Physik ist gleichsam auf »Welten ohne Grund« ⁶³ gebaut und enttäuscht damit die Hoffnung, sich der Sinnfragen durch die Physik oder Mathematik entledigen zu können. Homolog zu den Hochformen mystischer Reflexion kann uns die Auseinandersetzung um die Deutung der Quantenphysik allerdings eine Ahnung vermitteln, was das Geheimnis der konditionierten Koproduktion von System und Umwelt – Reflexion und Welt – für uns bedeuten kann, und uns möglicherweise dabei helfen, in Welten ohne Grund heimisch zu werden.

62 v. Foerster (1993, 161).

63 Varela et al. (1992a, 344).

LITERATUR

- Aharonov, Yakir/Bohm, David (1959): Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory. *The Physical Review* 115, 485-491.
- Aharonov, Yakir/Bohm, David (1961): Further Considerations on Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory. *The Physical Review* 123, 1511-1524.
- Albert, Z. David/Galchen, Rivka (2009): Bedroht die Quantenverschränkung Einsteins Theorie? *Spektrum der Wissenschaft* 9, 30-37.
- Allen, J.F./Misener, A.D. (1938): Flow of liquid helium II. *Nature* 141, 75.
- Anderson, P.W. (1972): More Is Different. Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science* 177, 393-396.
- Andrews, M. R. /Townsend, C. G. /Miesner, H.-J. /Durfee, D. S. /Kurn, D. M. /Ketterle, W. (1997): Observation of Interference Between Two Bose Condensates. *Science* 275, 637-641.
- Arndt, Markus/Nairz, Olaf/Vos-Andreae, Julian /Keller, Claudia/van der Zouw, Gerbrand & /Zeilinger, Anton (1999): Wave-particle duality of C60 molecules. *Nature* 680-682.
- Arroyo Camejo, Silvia (2006): *Scurrile Quantenwelt*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Ashby, William Ross (1956): *An introduction to Cybernetics*. New York: Wiley.
- Aspect, Alain/Dalbard, Jean/Roger, Gérard (1982): Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters* 49, 1804-1807.
- Ausari, H. Mohammed H./Smolin, Lee (2008): Self-organized criticality in quantum gravity. *Classical and Quantum Gravity* 25, 1-8 (elektronische Ressource: doi:10.1088/0264-9381/25/9/095016).
- Baecker, Dirk (1999): *Die Form des Unternehmens*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Baecker, Dirk (2007): *Rechnen lernen: Soziologie und Kybernetik*.
- Ballentine, Leslie E. (1970): The statistical Interpretation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics* 42, 358-381.
- Bardeen, J./Cooper, L.N./Schrieffer, J.R. (1957): Theory of Superconductivity. *Physical Review* 108, 1175-1204.
- Barret, Jeffrey (2011): *Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics*. Manuskript. Download am 27.2.2012 unter: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2011/entries/qm-everett/>. Stanford University.
- Bateson, Gregory (1987): *Geist und Natur: Eine notwendige Einheit*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Bauberger, Stefan (2009): *Was ist die Welt? Zur philosophischen Interpretation der Physik*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Baeyer, Hans Christian von (2003): *Das informative Universum. Das neue Weltbild der Physik*. München: C.H. Beck.

- Beck, Friedrich/Eccles, John (1991): Quantum aspects of brain activity and the role of consciousness. Proceedings of the National Academy of sciences of the United States of America 89, 11357-11361.
- Bekemeier, Bernd (1987): Martin Ohm (1792-1872). Universitäts- und Schulmathematik in der neuhumanistischen Bildungsreform. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Bell, John Steward (1964): On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. Physics 1, 195-200.
- Bell, John Steward (1986): Quantum field theory of without observers. Physics Reports 137, 49-54.
- Berger, L. Peter/Luckmann, Thomas (2003): Die gesellschaftliche Konstruktion der Wirklichkeit. Eine Theorie der Wissenssoziologie. Frankfurt/Main: Fischer.
- Bohm, David (1951): Quantum Theory. New York: Prentice Hall.
- Bohm, David (1952a): A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of »Hidden« Variables. I. Physical Review 85, 166-179.
- Bohm, David (1952b): A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of »Hidden« Variables. II. Physical Review 85, 180-193.
- Bohm, David (1988): Die verborgene Ordnung des Lebens. Grafing: Aquamarin.
- Bohm, David/Krishnamurti, Jiddu (1985): Vom Werden zum Sein. München: Goldmann.
- Born, Max (1954): The statistical interpretation of quantum mechanics. Nobel Lecture, December 11, 1954. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1954/born-lecture.pdf (download 14.10.2011)
- Born, Max/Wiener, Norbert (1926): Eine neue Formulierung der Quantengesetze für periodische und nicht periodische Vorgänge. Zeitschrift für Physik 36 (1926), S. 174-189. Zeitschrift für Physik 36, 174-189.
- Boyer, Timothy H. (1985): Das Vakuum aus moderner Sicht. Spektrum der Wissenschaft Oktober, 114-123.
- Brogie, Louis de (1924): Recherches sur la théorie des quanta (Researches on the quantum theory), Thesis, Paris, 1924. Paris.
- Brogie, Louis de (1927): La Mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement. In: Journal de Physique, Serie VI. VIII, Nr. 5, 1927, S. 225-241. Journal de Physique VI. VIII, 225-241.
- Bub, Jeffrey (2001): The bit commitment theorem. Foundations of Physics 31, 735-756.
- Bub, Jeffrey (2004): Why the quantum? Elektronische Ressource: <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0402149> (download 3.5.2011)
- Bub, Jeffrey (2008): Quantum Mechanics is About Quantum Information.
- Capra, Fritjof (2000): Das Tao der Physik. Bern [u.a.]: Scherz.
- Collini, Elisabetta /Wong, Cathy Y. /Wilk, Krystyna E. /Curmi, Paul M. G./Brumer, Paul (2010): Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature. Nature 463, 644-647

- Conze, Edward (1983): *Buddhistisches Denken*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Cushing, James T. (1994): *Quantum Mechanics. Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press.
- Cushing, James T./McMullin, Ernan (Hrsg.) (1989): *Philosophical Consequences of Quantum Theory. Reflections on Bell's Theorem*. Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame Press.
- Dawid, Richard (2008): Wenn Naturwissenschaftler über Naturwissenschaftlichkeit streiten. Die Veränderlichkeit von Wissenschaftsparadigmen am Beispiel der Stringtheorie. S. 395-416 in: Dirk Rupnow/Veronika Lipphardt/Jens Thiel/Christiana Wessely (Hrsg.), *Pseudowissenschaft*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Derrida, Jacques (1974): *Grammatologie*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Deutsch, David (1986): Three experimental implications of the Everett interpretation. S. 204-214 in: R. Penrose/C. J. Isham (Hrsg.), *Quantum Concepts of Space and Time*. Oxford: Clarendon Press.
- DeWitt, Bryce S. (1967): *Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory*. *Physical Review* 160, 1113-1148.
- Dorato, Mauro/Esfeld, Michael (2010): GRW as an ontology of dispositions. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*. 41, 41-49.
- Duane, William (1923): The transfer in Quanta of Radiation Momenton to Matter. *Proceedings of National Academy of Sciences* 9, 158-164.
- Dürr, Hans-Peter (2007): Geist und Materie. Interview mit Prof. Dr. Hans-Peter Dürr. *P.M. Magazin* 5/2007.
- Dürr, Hans-Peter (Hg.) (1991): *Physik und Transzendenz*. Bern München Wien: Scherz.
- Dürr, Hans-Peter/Dahm, Daniel L./zur Lippe, Rudolf (2005): *Potsdamer Denkschrift 2005*. http://vdw-ev.de/manifest/denkschrift_de.pdf (download 13.5.2011)
- Dürr, Hans-Peter/Oesterreicher, Marianne (2007): *Wir erleben mehr als wir begreifen. Quantenphysik und Lebensfragen*. Freiburg Basel Wien: Herder.
- Duwell, Armond (2007): Re-Conceiving quantum theories in terms of information-theoretic constrains. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*. 38, 181-201.
- Einstein, Albert (1905): Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Standpunkt. *Annalen der Physik* 17, 132-184.
- Einstein, Albert (1922): Über die gegenwärtige Krise der theoretischen Physik. Wiederabdruck in Karl von Meyern (1994): *Quantenmechanik und Weimarer Republik*. S. 233-239 in: (Hrsg.), Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.

- Einstein, Albert (1925): Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Sitzungsbericht der preussischen Akademie der Wissenschaften. Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 8. Januar. Berlin. http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/Einstein_archive/Einstein_1925_publication/Pages/paper_1925_00.html. Download 3.6.2011,
- Einstein, Albert/Podolsky, Boris/Rosen, Nathan (1935): Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* 47, 777-780.
- Emter, Elisabeth (1995): Literatur und Quantentheorie: die Rezeption der modernen Physik in Schriften zur Literatur und Philosophie deutschsprachiger Autoren (1925 - 1970). Berlin [u.a]: Gruyter.
- Engels, Friedrich (1962): Dialektik der Natur. S. 305-570 in: Karl Marx/Friedrich Engels (Hrsg.), Werke. Band 20. Berlin: Dietz.
- Englert, Berthold-Georg/Scully, Marlan O./Walther, Herbert (1995): Complementary and uncertainty. *Nature* 375,
- Esfeld, Michael (1999): Der Holismus der Quantenphysik: seine Bedeutung und seine Grenzen. *Philosophia Naturalis* 36, 157-185.
- Esfeld, Michael (2002): Quantentheorie: Herausforderung für die Philosophie! S. 197-217 in: Jürgen Audretsch (Hrsg.), Verschränkte Welt. Faszination der Quanten. Weinheim: Wiley-VCH.
- Esfeld, Michael (2004): Quantum entanglement an a metaphysics of relations. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics.* 35B, 601-617.
- Esfeld, Michael (2009): Physics and Causation. Elektronische Ressource: <http://philsci-archive.pitt.edu/4927/>
- Esfeld, Michael (2011): Das Wesen der Natur. *Spektrum der Wissenschaft* Juni, 54-59.
- Espósito, Elena (2007): Die Fiktion der wahrscheinlichen Realität. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Everett, Hugh (1957): »Relative State« formulation of quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics.* 29, 454-462.
- Ewald, Günter (2006): Gehirn, Seele und Computer. Der Mensch im Quantenzeitalter. Darmstadt: Wissenschaftliche Büchergesellschaft.
- Feynman, Richard P. (2010): QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. München: Piper.
- Fischer, Ernst Peter (2008): Über Kreativität in der Wissenschaft. Innere Bilder bei Heisenberg und Pauli. S. 77-85 in: Ingo Berensmeyer (Hrsg.), *Mystik und Medien*. München: Wilhelm Fink Verlag.
- Fischer, Ernst Peter (2010): Die Hintertreppe zum Quantensprung. Die Erforschung der kleinsten Teilchen von Max Planck bis Zeilinger. München: Herbig.
- Fisher, John C./Glaever, Ivar (1961): Tunneling Through Thin Insulating Layers. *Journal of Applied Physics.* 32, 172-177.
- Flasch, Kurt (2008): Meister Eckhart: Die Geburt der »Deutschen Mystik« aus dem Geist der arabischen Philosophie. München: Beck.

- Fleck, Ludwik (1980): Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Foerster, Heinz von (1981): *Observing Systems: Selected Papers of Heinz von Foerster*. Seaside, CA: Intersystems Publications.
- Foerster, Heinz von (1993): *Kybernetik*. Berlin: Merve.
- Forman, Paul (1971): *Weimar Culture, Causality and Quantum Theory, 1918-1927: Adaption by German Physicists and Mathematicans to a Hostile Intellectuall Environment*. *Historical Studies in the Physical Sciences* 3, 1-114.
- Forman, Paul (1981): Kausalität, Anschaulichkeit und Individualität. Oder: Wie Wesen und Thesen, die der Quantenmechanik zugeschrieben, durch kulturelle Werte vorgeschrieben wurden. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*. Sonderheft 22 »Wissenssoziologie«, 393-406.
- Forstner, Christian (2005): *Dialectical Materialism and the Construction of a New Quantum Theorie: David Joseph Bohm, 1917-1992*. Preprint 303. Max Planck Institut for the History of the Science. Preprint 303. Max Planck Institut for the History of the Science.
- Forstner, Christian (2007): *Quantenmechanik im Kalten Krieg*. David Bohm und Richard Feynmann. Diepholz: Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und Technik.
- Forstner, Christian (2008): Ein Außenseiter und Pseudowissenschaftler? David Bohms Quantenmechanik im Kalten Krieg. S. in: Dirk Rupnow/Veronika Lipphardt/Jens Thiel/Christiana Wessely (Hrsg.), *Pseudowissenschaft*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Fuchs, Peter (2001): *Die Metapher des Systems*. Studien zu der allgemein leitenden Frage, wie sich der Tänzer vom Tanz unterscheiden lasse. Weilerswist: Velbrück Wissenschaft.
- Fuchs, Peter (2004): *Der Sinn der Beobachtung*. Weilerswist: Velbrück.
- Fuchs, Peter (2008): *Die Modernität der Mystik und die Modernität der Theorie*. Anmerkungen zu einer überaus seltsamen Affinität. S. 55-76 in: Ingo Berensmeyer (Hrsg.), *Mystik und Medien*. München: Wilhelm Fink Verlag.
- Fuchs, Peter (2009): *Die doppelte Verschränkung – Das Konzept der Beobachtung in der Quantenphysik und in der »Allgemeinen Theorie der Sinnsysteme (ATS)« – Ein Essay*. Manuskript. Bad Sassendorf.
- Fuchs, Peter/Hoegl, Franz (2011): *Die Schrift der Form*. Peter Fuchs und Franz Hoegl über George Spencer-Browns »Laws of the Form«. S. 175-207 in: Bernhard (Hrsg.) Pörsken (Hrsg.), *Wiesbaden: VS-Verlag*.
- Gaiser, Anne Carolin (2002): *Das Potential und Design von Universaltheorien*. München.
- Gell-Mann, Murray (1994): *Das Quark und der Jaguar*. München, Zürich: Piper.
- Ghirardi, G.C./Rimini, A./Weber, T. (1986): *Unified dynamics for microscop systems*. *Physical Review D* 34, 470-491.

- Gray, Jeremy (1992): The Nineteenth-Century Revolution in Mathematical Ontology. S. 226-248 in: D. Giellies (Hrsg.), *Revolutions in Mathematics*. Oxford: Oxford University Press.
- Greene, Brian (2006): *Das elegante Universum. Superstrings, verborgene Dimensionen und die Suche nach der Weltformel*. München: Goldmann
- Greene, Brian (2008): *Der Stoff, aus dem der Kosmos ist. Raum, Zeit und Beschaffenheit der Wirklichkeit*. München: Goldmann.
- Griffiths, Robert B. (1984): Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics. *Journal of Statistical Physics* 36, 219-272.
- Grush, Rick/Smith Churchland, Patricia (2008): Lücken im Penrose-Parade. S. 221-250 in: Thomas (Hg.) Metzinger (Hrsg.), *Bewußtsein. Beiträge aus der Gegenwartsphilosophie*. Paderborn: mentis.
- Gumbrecht, Hans Ulrich (2008): *Die Nachhaltigkeit in Erwin Schrödingers Denken*. S. 9-20 in: Hans Ulrich Gumbrecht/Robert Pogue Harrison/Michael R. Hendrickson/Robert B. Laughlin (Hrsg.), *Geist und Materie – Was ist Leben? Zur Aktualität von Erwin Schrödinger*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Günther, Gotthard (1963): *Das Bewußtsein der Maschinen*. Baden Baden: Agis Verlag.
- Günther, Gotthard (1976): *Cybernetic Ontology and Tranjunctional Operations*. S. 249-328 in: ders. (Hrsg.), *Beiträge zur Grundlegung einer operationsfähigen Dialektik*, Bd. 1 (Hamburg 1976). Hamburg: Meiner.
- Günther, Gotthard (1978): *Idee und Grundriß einer nicht-Aristotelischen Logik: die Idee und ihre philosophischen Voraussetzungen*. Hamburg: Meiner.
- Günther, Gotthard (1980): *Martin Heidegger und die Weltgeschichte des Nichts*. S. 260-296 in: (Hrsg.), *Beiträge zur Grundlegung einer operationsfähigen Dialektik*. Band 3. Hamburg: Meiner.
- Hameroff, Stuart (1987): *Ultimate Computing: Biomolekular consciousness and nanotechnology*. North Holland: Elsevier.
- Harrison, Robert Pogue (2008): *Schrödinger über Geist und Materie*. S. 21-43 in: Hans Ulrich Gumbrecht/Robert Pogue Harrison/Michael R. Hendrickson/Robert B. Laughlin (Hrsg.), *Geist und Materie – Was ist Leben? Zur Aktualität von Erwin Schrödinger*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Hawking, Stephen (1989): *Eine kurze Geschichte der Zeit*. Rowohlt: Reinbek.
- Hawking, Stephen (2001): *Das Universum in der Nußschale*. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Heidegger, Martin (2006 [1926]): *Sein und Zeit*. Tübingen: Max Niemeyer.
- Heintz, Bettina (2000a): *Die Innenwelt der Mathematik. Zur Kultur und Praxis einer beweisenden Disziplin*. Wien, New York: Springer.
- Heintz, Bettina (2000b): »In der Mathematik ist ein Streit mit Sicherheit zu entscheiden«. *Perspektiven einer Soziologie der Mathematik*. *Zeitschrift für Soziologie* 29, 339-360.

- Heintz, Bettina (2004): Emergenz und Reduktion. Das Mikro-Makro-Problem in der Soziologie und der Philosophie des Geistes. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 56, 1-31.
- Heisenberg, Werner (2007): *Physik und Philosophie*. Stuttgart: Hirzel.
- Heisenberg, Werner (2010): *Der Teil und das Ganze*. München: Piper.
- Hendry, John (1994): Weimarer Kultur und Quantenkausalität. S. 201-230 in: Karl von Meyenn (Hrsg.), *Quantenmechanik und Weimarer Republik*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- Herzog, Thomas J./Kwiat, Paul G. /Weinfurter, Harald /Zeilinger, Anton (1995): Complementarity and the Quantum Eraser. *Physical Review Letters* 75, 3034-3037.
- Hilbert, David (1909 [1899]): *Grundlagen der Geometrie*. Leipzig: Teubner.
- Hofstadter, Douglas R. (1979): *Gödel, Escher, Bach: an eternal golden braid*. Hassocks: Harvester Press.
- Hund, Friedrich (1967): *Geschichte der Quantentheorie*. Mannheim: Bibliografisches Institut.
- Husserl, Edmund (1996 [1936]): *Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie*. Hamburg: Meiner.
- Husserl, Edmund (2000): *Vorlesungen zur Phänomenologie des inneren Zeitbewusstseins*. Herausgegeben von Martin Heidegger. Tübingen: Max Niemeyer.
- Jackendoff, Ray (1987): *Consciousness and the Computational Mind*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Jacques, Vincent/Wu, E/Grosshans, Frédéric /Treussart, François/Grangier, Philippe/Aspect, Alain/Roch, Jean-François (2007): Experimental Realization of Wheeler's Delayed-Choice Gedanken Experiment. *Science* 315, 966-968.
- Jahnke, Hans Niels (1990): Nach-Kantische Philosophie und Theoretisierung der Mathematik. S. 165-188 in: G. König (Hrsg.), *Konzepte des mathematisch Unendlichen im 19. Jahrhundert*. Göttinger: Vadenhoeck & Ruprecht.
- Jantsch, Erich (1982): *Die Selbstorganisation des Universums*. München: dtv.
- Joos, Erich (2002): Dekohärenz und der Übergang von der Quantenphysik zur klassischen Physik. S. 169-195 in: Jürgen Audretsch (Hrsg.), *Verschränkte Welt. Faszination der Quanten*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Joos, Erich/Zeh, H. Dieter (1984): The Emergence of Classical Properties Through Interaktion with the Environment. *Zeitschrift für Physik B: Condensed Matter* 59, 223-243.
- José Soler Gil, Francisco (2007): Die präsentistische Auffassung der Zeit im Kontext der Relativitätstheorien und der Quantenkosmologie von James Hartle und Stephen Hawking: Ein Vergleich. (Teil II) Präsentismus und Quantenkosmologie. *Philosophia Naturalis* 44, 144-180.

- Josephson, Brian D. (1973): The Discovery of Tunneling Supercurrents. Nobel Lecture, December 12, 1973. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1973/josephson-lecture.pdf (download 14.3.2011).
- Kaehr, Rudolf (1993): Disseminatorik: Zur Logik der ›Second Order Cybernetics‹. Von den ›Laws of Form‹ zur Logik der Reflexionsform. S. 152-196 in: D. Baecker (Hrsg.), *Kalkül der Form*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Kant, Immanuel (1952 [1781]): *Kritik der reinen Vernunft*. Suhrkamp: Frankfurt/Main.
- Kapitza, P. (1938): Viscosity of liquid helium below the λ -point. *Nature* 141, 74.
- Kastl, Jörg Michael (1998): Die insgeheime Transzendenz der Autopoiesis. Zum Problem der Zeitlichkeit in Luhmanns Systemtheorie. *Zeitschrift für Soziologie* 27, 404-417.
- Kauffman, Lois H. (1978): Network Synthesis and Varela's Calculus. *International Journal of General Systems*. 4, 179-187.
- Ketterle, Wolfgang (2006): Bose-Einstein Condensation: Identity Crisis for Indistinguishable Particles. S. 159-182 in: James Evans/Alan S. Thorn-dike (Hrsg.), *Quantum Mechanics at the Crossroads. New Perspectives from History, Philosophy and Physics*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Kieserling, André (1999): *Kommunikation unter Anwesenden. Studien über Interaktionssysteme*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Klagenfurt, Kurt (2001): *Technologische Zivilisation und transklassische Logik. Eine Einführung in die Technikphilosophie* Gotthard Günthers. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Knorr-Cetina, Karin (1991): *Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Knorr-Cetina, Karin (2002): *Wissenskulturen. Ein Vergleich naturwissenschaftlicher Wissensformen*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Krause, Joachim/Lichtenstein, Claude (1999): *Your Private Sky. R. Buckminster Fuller. Design als Kunst einer Wissenschaft*. Zürich: Verlag Lars Müller.
- Krohn, Wolfgang/Küppers, Günter (1992): *Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Kuhn, S. Thomas (1978): *Blackbody Theory and the Quantum Discontinuity*. Oxford: Oxford University Press.
- Kuhn, S. Thomas (1988 [1977]): *Die Entstehung des Neuen*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Kwiat, Paul G./Weinfurter, Harald/Zeilinger, Anton (1997): Wechselwirkungsfreie Quantenmessung. *Spektrum der Wissenschaft* 1, 42-49.
- Laitmann, Michael (2007): *Quantum Kabbala. Neue Physik und kabbalistische Spiritualität*. Berlin: Ullstein.
- Lande, Alfred (1965): *New Foundations of quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Latour, Bruno (2000): *Die Hoffnung der Pandora*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.

- Latour, Bruno (2007): Eine neue Soziologie für eine neue Gesellschaft. Einführung in die Akteur-Netzwerk-Theorie. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Latour, Bruno/Woolgar, Steve (1986): Laboratory life. The construction of scientific facts. Princeton - New Jersey: Princeton University Press.
- Laughlin, Robert B. (2007): Abschied von der Weltformel. Die Neuerfindung der Physik. München: Piper.
- Laughlin, Robert B. (2008): Schrödingers Problem. Oder: was bei der Erfindung der Quantenmechanik nicht logisch zuende gedacht wurde. S. 44-56 in: Hans Ulrich Gumbrecht/Robert Pogue Harrison/Michael R. Hendrickson/Robert B. Laughlin (Hrsg.), Geist und Materie – Was ist Leben? Zur Aktualität von Erwin Schrödinger. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Laughlin, Robert B./Pines, David (1999): The Theory of Everything. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 97, 28-31.
- Lévy-Leblond, Jean Marc (2011): Von der Materie. Berlin: Merve.
- Link, Jürgen/Diaz-Bone, Rainer (2006): Operative Anschlüsse: Zur Entstehung der Foucaultschen Diskursanalyse in der Bundesrepublik. Forum Qualitative Sozialforschung, 7 (3).
- Lloyd, Seth/Ng, Jack Y. (2005): Ist das Weltall ein Computer? Alle Objekte gleichen Rechenmaschinen – selbst schwarze Löcher. Spektrum der Wissenschaft. Januar, 32-43.
- Lommel, Pim van (2011): Endloses Bewusstsein. Düsseldorf: Patmos.
- London, Fritz (1938): The-phenomenon of liquid helium and the Bose-Einstein degeneracy. Nature 141, 643-644.
- London, Fritz (1950/1954): Superfluids. Band 1. Makroskopische Theorie der Superleitfähigkeit (1950); Band 2. Makroskopische Theorie der Superfluidität Helium (1954). New York [u.a.]: Wiley.
- Löwdin, Per-Olov (1963): Proton Tunneling in DNA and its Biological Implications. Reviews of Modern Physics 35, 724-732.
- Luhmann, Niklas (1993): Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Luhmann, Niklas (1998): Die Wissenschaft der Gesellschaft. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Luhmann, Niklas (2000a): Die Religion der Gesellschaft. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Luhmann, Niklas (2000b): Organisation und Entscheidung. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Marquard, Odo (1974): Inkompetenzkompensationskompetenz. Philosophisches Jahrbuch 81, 341-349.
- Maturana, Humberto R. (1985): Biologie der Kognition. S. 32-80 in: Humberto R. Maturana (Hrsg.), Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit. Braunschweig: Vieweg.
- Mayntz, Renate (2006): Einladung zum Schattenboxen. Die Soziologie und die moderne Biologie. MPIfG Discussion Paper 06/7. Köln: Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung.

- Meja, Volker/Stehr, Nico (1982): Der Streit um die Wissenssoziologie. Die Entwicklung der deutschen Wissenssoziologie. Erster und zweiter Band. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Merton, Robert K. (1968 [1948]): On Sociological Theories of the Middle Range. S. 39-72 in: R. K. Merton (Hrsg.), *Social Theorie and Social Structure*. New York: The Free Press.
- Meyenn, Karl von (Hrsg.) (1994): *Quantenmechanik und Weimarer Republik*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- Mittelstaedt, Peter (2000): Universell und inkonsistent? Quantenmechanik am Ende des 20. Jahrhunderts. *Physikalische Blätter* 56, 65-68.
- Mohrhoff, Ulrich (1999a): Objektivität, retrocausation, and the experiment of Englert, Scully and Walter. *American Journal of Physics* 67, 330-335.
- Mohrhoff, Ulrich (1999b): The Physics of Interactionism. *Journal of Consciousness Studies* 6, 165-184.
- Mohrhoff, Ulrich (2000): What quantum mechanics is trying to tell us. *American Journal of Physics* 68, 728-745.
- Mohrhoff, Ulrich (2002): Why the Laws of Physics are Just So. *Foundations of Physics* 32, 1313-1324.
- Mostepanenko, Vladimir M./Trunov, Nikolaj N. (1997): *The Casimir effect and its applications*. Oxford: Clarendon Press.
- Nassehi, Armin (2003): *Geschlossenheit und Offenheit: Studien zur Theorie der modernen Gesellschaft*. Suhrkamp: Frankfurt/Main.
- Neumann, John v. (1981 [1932]): *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer.
- Norris, Christopher (1999): *Quantum Theory and the Flight from Realism. Philosophical Responses to Quantum Mechanics*. London, New York: Routledge.
- Ort, Nina (2007): *Reflexionslogische Semiotik. Zu einer nicht-klassischen und reflexionslogisch erweiterten Semiotik im Ausgang von Gotthard Günther und Charles. S. Peirce*. Weilerswist: Velbrück.
- Papon, Pierre/Meijer, Paul H. E. /Leblond, Jacques (2006): *The Physics of Phase Transitions: Concepts and Applications*. Berlin: Springer.
- Parkinson, Gavin (2008): *Surrealism, Art and Modern Science. Relativity, Quantum Mechanics. Epistemology*. New Haven, London: Yale University Press.
- Passon, Oliver (2010): *Bohmsche Mechanik. Eine elementare Einführung in die deterministische Interpretation der Quantenmechanik*. Frankfurt/Main: Harry Deutsch.
- Penrose, Roger (1998): *Das Große, das Kleine und der menschliche Geist*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Pickering, Andrew (1984): *Constructing Quarks. A Sociological History of Particle Physics*. London: University of Chicago Press.
- Plaga, Rainer (1997): Proposal for an experimental test of the many-worlds interpretation of quantum mechanics. *Foundations of Physics* 27, 559-577.

- Planck, Max (1958): *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*. Band 1-3. Braunschweig: Vieweg.
- Popper, K. R. (1994): *Ausgangspunkte. Meine intellektuelle Entwicklung*. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Popper, Karl R. (1967): *Quantum Mechanics without "The Observer"*. S. 7-44 in: Mario Bunge (Hrsg.), *Quantum Theorie and Reality*. New York: Springer.
- Popper, Karl R. (1972): *Die Logik der Sozialwissenschaften*. S. 103-124 in: Theodor Willhelm Adorno (Hrsg.), *Der Positivismusstreit in der deutschen Soziologie*. Darmstadt: Luchterhand.
- Popper, Karl R. (1993): *Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf*. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Popper, Karl R. (1995): *Eine Welt der Propensitäten*. Tübingen: Mohr Siebeck.
- Popper, Karl R. (2007): *Logik der Forschung*. Tübingen: Akademie Verlag.
- Prigogine, Ilya (1979): *Vom Sein zum Werden*. München Zürich: Piper.
- Prigogine, Ilya/Nicolis, Gregoire (1989): *Exploring Complexity. An Introduction*. New York: Freeman.
- Prigogine, Ilya/Stengers, Isabelle (1990): *Dialog mit der Natur*. München Zürich: Piper.
- Pusey, Matthew F./Barret, Jonathan/Rudolph, Terry (2011): *The quantum state cannot be interpreted statistically*. Elektronische Ressource. Download unter: arXiv:1111.3328v1 [quant-ph]
- Putnam, Hilary (1991): *Realismus*. S. 65-86 in: H. J. Sandkühler/D. Pätzold (Hrsg.), *Die Wirklichkeit der Wissenschaft: Probleme des Realismus*. Hamburg: Meiner.
- Rheinberger, Hans-Jörg (2006): *Experimentalsysteme und epistemische Dinge*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Ridgeon, Lloyd V. J. (1998): *Aziz Nasafi*. Richmond: Curzon.
- Rorty, Richard (1993): *Physikalismus ohne Reduktionismus*. S. 48-71 in: Richard Rorty (Hrsg.), *Physikalismus ohne Reduktionismus. Vier philosophische Essays*. Stuttgart: Reclam.
- Rössler, Otto E. (1992): *Endophysik. Die Welt des inneren Beobachters*. Berlin: Merve.
- Rustemeyer, Dirk (2006): *Oszillationen. Kultursemiotische Perspektiven*. Würzburg: Königshausen & Neumann.
- Rustemeyer, Dirk (2009): *Diagramme. Dissonante Resonanzen: Kunstsemiotik als Kulturtheorie*. Weilerswist: Velbrück.
- Schimmel, Annemarie (1995): *Mystische Dimensionen des Islam*. München: Diederichs.
- Schlosshauer, Maximilian (2005): *Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics*. Elektronische Ressource: arXiv:quant-ph/0312059v4 28 Jun 2005 1-41.
- Scholem, Gershon (1973): *Zur Kabbala und ihrer Symbolik*. Suhrkamp: Frankfurt/Main.
- Schrödinger, Ewin (1946): *Was ist Leben? Die lebende Zelle mit den Augen eines Physikers betrachtet*. Bern: Francke.

- Schrödinger, Erwin (1926): Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen. *Annalen der Physik* 79, 734-756.
- Schrödinger, Erwin (1935): Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften* 23, 807-812, 823-828, 844-849.
- Schrödinger, Erwin (1959): *Geist und Materie*. Zürich: Diogenes.
- Shafiee, Afshin/Jafar-Aghdamib, Maryam /Golshanic, Mehdi (2006): A critique of Mohrhoff's interpretation of quantum mechanics. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*. 37, 316-329.
- Simonyi, Károly (2004): *Kulturgeschichte der Physik. Von den Anfängen bis heute*. Frankfurt/Main: Harri Deutsch.
- Smolin, Lee (2004): *Quanten der Raumzeit. Spektrum der Wissenschaft Dossier*, 54-63.
- Smolin, Lee (2009): *Die Zukunft der Physik*. DVA.
- Spencer-Brown, George (2005): *Gesetze der Form*. Lübeck: Bohmeier.
- Spengler, Oswald (2007 [1923]): *Der Untergang des Abendlandes*. Düsseldorf: Albatros.
- Stapp, Henry (2002): The basis problem in many-world theories. *The Canadian Journal of Physics* 80, 1043-1052.
- Stapp, Henry (2007): Quantum Approaches to Consciousness. S. 881-908 in: Philip David Zelazo/Morris Moscovitch/Evan Thompson (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Consciousness*. New York: Cambridge University Press.
- Stöltzner, Michael (1999): Über zwei Formen des Realismus in der Quantentheorie. *Journal for General Philosophy of Science* 30, 289-316.
- Susskind, Leonard (1994): *The World as a Hologram*. Elektronische Resource: arXiv:hep-th/9409089v2
- Takens, Floris/Broer, Henk (2011): *Dynamical systems and chaos*. New York: Springer.
- Tegmark, Max (1996): Does the universe in fact contain almost no information. *Foundations of Physics, Letters* 9, 25-41.
- Tegmark, Max (1997): The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words? *Fortschritte der Physik* 46, 855-862.
- Tegmark, Max (2004): Parallel Universes. S. 459-492 in: John D. Barrow/ Paul C.W. Davies/Charles .L. Harper (Hrsg.), *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology and Complexity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tegmark, Max/Wheeler, John Archibald (2001): 100 Jahre Quantentheorie. *Spektrum der Wissenschaft* 2001/4, 68-76.
- The Pontifical Academy of Sciences (2003): *The Cultural Values of Science*. Plenary Sessions 8-11 November 2002.
- Thorndike, Alan S. (2006): What Are Consistent Histories? S. 149-157 in: James Evans/Alan S. Thorndike (Hrsg.), *Quantum Mechanics at the Crossroads. New Perspectives from History, Philosophy and Physics*. Berlin Heidelberg: Springer.

- Toth, Imre (1987): *Wissenschaft und Wissenschaftler im postmodernen Zeitalter. Wahrheit, Wert, Freiheit in Kunst und Mathematik*. S. 85-153 in: H. Bungert (Hrsg.), *Wie sieht und erfährt der Mensch seine Welt?* Regensburg: Universität Regensburg.
- Tugendhat, Ernst (2006): *Egozentrik und Mystik. Eine anthropologische Studie*. München: Beck.
- Tugendhat, Ernst (2007): *Anthropologie statt Metaphysik*. München: Beck.
- Varela, F./Coutinho, A./Dupire, B./Vaz, N. (1988): *Cognitive networks: Immune, neural, and otherwise*. S. 359-375 in: A. Perelson (Hrsg.), *Theoretical Immunology*. New Jersey: Addison-Wesley.
- Varela, Francisco J./Thompson, Evan/Rosch, Eleanor (1992): *Der Mittlere Weg der Erkenntnis: Die Beziehung von Ich und Welt in der Kognitionswissenschaft – Der Brückenschlag zwischen Wissenschaftlicher Literatur und menschlicher Erfahrung*. Bern München Wien: Scherz.
- Vogd, Werner (2009): *Systemtheorie und Methode? Zum komplexen Verhältnis von Theoriearbeit und Empirie in der Organisationsforschung*. *Soziale Systeme* 15, 97-136.
- Vogd, Werner (2010): *Gehirn und Gesellschaft*. Weilerswist: Velbrück.
- Walborn, S.P./Terra Cunha, M.O. /Pádua, S. /Monken, H.C. (2002): *Double-slit quantum eraser*. *Physical Review A* 65, 033818-1-033818-6.
- Watzlawick, Paul (1978): *Wie wirklich ist die Wirklichkeit? Wahn, Täuschung und Verstehen*. München Zürich: Piper.
- Weinfurter, Harald (2002): *Quanteninformation*. S. 119-140 in: Jürgen Audretsch (Hrsg.), *Verschränkte Welt. Faszination der Quanten*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von (1971): *Die Einheit der Natur*. Studien. München: Hanser.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von (1980): *Der Garten des Menschlichen. Beiträge zur Geschichte der Antropologie*. Frankfurt/Main: Fischer.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von (1992): *Zeit und Wissen*. München: Hanser.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von (1994): *Der Aufbau der Physik*. München: DTV.
- Weizsäcker, Carl Friedrich von (2009): *Die Philosophie eines Physikers*. Vortrag an der Universität Bamberg im Jahr 1992. Bamberg.
- Wheeler, John Archibald (1978): *The 'Past' and the 'Delayed-Choice Double-Slit Experiment'*. S. 9-48 in: A.R. Marlow (Hrsg.), *Mathematical Foundations of Quantum Theory*. New York u.a.: Academic Press.
- Wigner, Eugen Paul (1962): *Remarks on the Mind-Body Question*. S. 284-302 in: Irving John Good (Hrsg.), *The Scientist Speculates. An Antology of Partly-Baked Ideas*. New York: Basic Books.
- Wittgenstein, Ludwig (1990): *Tractatus logico philosophicus; Philosophische Untersuchungen*. Leipzig: Reclam.
- Woolgar, Steve/Pawluch, Dorothy (1985): *Ontological Gerryandering: The Anatomy of Social Problems Explanations*. *Social Problems* 32, 214-227.

- Zeh, H. Dieter (1999): Ist M-Theorie Physik? Eine Polemik anlässlich der Potsdam-Konferenz 1999 -- per e-mail an eine Reihe von Kollegen gesandt). Download 23.5.2011 unter: <http://www.zeh-hd.de>.
- Zeh, H. Dieter (2010): Wozu braucht man »Viele Welten« in der Quantentheorie? – Versuch einer Darstellung auf für interessierte Nicht-Physiker. Download 23.5.2011 unter: <http://www.zeh-hd.de>.
- Zeh, H. Dieter (2011): Dekohärenz und andere Quantenmißverständnisse. Download 23.5.2011 unter: <http://www.zeh-hd.de>.
- Zeilinger, Anton (1999): A Foundational Principle for Quantum Mechanics. *Foundations of Physics* 29, 631-642.
- Zeilinger, Anton (2005): Einsteins Schleier. Die neue Welt der Quantenphysik. München: Goldmann.
- Zhang, Shou-Cheng (2004): To see a world in a grain of sand. S. 667-690 in: John D. Barrow/Paul C.W. Davies/Charles L. Harper (Hrsg.), *Science and Ultimate Reality. Quantum Theory, Cosmology and Complexity*.

Video- und Audioquellen

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

Weizsäcker, Carl Friedrich von (2009): Die Philosophie eines Physikers. Vortrag an der Universität Bamberg im Jahr 1992. Bamberg. Südwestrundfunk (SWR). Vertrieb: Quartino.

PERSONENREGISTER

- Aharonov 129, 166, 168, 312
Albert 99
Allen 182
an der Heiden 6
Anderson 159, 245
Andrews 183
Arndt 64, 172
Ashby 280
Aspect 33, 149
Ausari 254
Aziz 286
- Baecker 6, 323, 325, 326
Bäker 73, 167
Ballentine 123, 124
Bardeen 184, 247
Barret 141
Bateson 212, 337
Bauberger 21, 238, 242
Baeyer, v. 259
Beck 283
Bell 24, 33, 127, 147f., 150, 312
Bohm 23f., 118, 124ff., 134, 137,
145, 148, 166, 168, 296ff.,
310ff.
Bohr 22, 33, 67, 78f., 94, 99, 279,
298, 309, 348
Boltzmann 56, 57
Born 67, 70, 76, 79, 119, 333
Bose 179ff., 188
Boyer 168
Broer 66
Broglie, de 59, 121, 125, 172
Bub 219, 223
- Camejo 25
Capra 283
- Casimir 166ff., 312
Collini 198, 319
Conze 286
Cooper 184, 247
Crick 288
Cushing 16, 110, 112, 150
- Davidson 350
Dawid 275ff.
Deby 59
Derrida 14
Deutsch 137, 140
DeWitt 201f.
Dirac 162
Dorato 27, 206
Duane 120
Dürr 14
Duwell 223
- Ebd 66
Eccles 283
Eckhart 286
Einstein 22f., 33, 58, 59, 64ff., 79,
97ff., 113, 124, 127, 146, 179,
180, 181, 183, 188, 253, 310
Emter 14
Engels 130
Englert 178
Esfeld 12f., 27, 149, 192, 206
Esposito 139
Everett 18, 118, 131ff., 140, 145,
201, 235
Ewald 283
- Feynman 23ff., 33, 151ff., 196
Fischer 70f., 111, 129, 162, 167,
217, 284

- Flasch 286
 Fleck 19, 23, 280, 317
 Foerster, v. 239, 324, 352
 Forman 16, 67, 288
 Forstner 130
 Frohlich 277
 Fuchs 6ff., 21, 195, 279, 284, 286,
 289, 301f., 320, 325, 330, 345,
 348
 Fuller 173

 Gaiser 304
 Galchen 99

 Gell-Mann 33, 111, 160, 235ff.,
 266, 306
 Ghirardi 205
 Giaever 167
 Gödel 91
 Golshanic 176
 Gray 41
 Greene 149, 169, 202, 265ff.
 Griffiths 234
 Grush 284
 Gumbrecht 113, 290
 Günther 82, 320, 322, 323, 324,
 327, 328

 Hameroff 283
 Harrison 292
 Hartle 235
 Hawking 14, 18, 131
 Heintz 39, 40, 41, 256
 Heisenberg 12, 49, 67ff., 74, 80ff.,
 89, 112, 189, 216, 284, 292,
 308f., 334f., 348
 Hendry 16
 Herzog 172
 Hilbert 41, 225
 Hoegl 325, 330
 Hofstadter 29, 91
 Hund 26
 Huserl 32, 288
 Jackendoff 133
 Jacques 171

 Jafar-Aghdamib 176
 Jantsch 256
 Joos 134, 140, 224, 226ff.
 Jordan 70
 Josephson 185

 Kaehr 320, 343
 Kant 14, 215
 Kapitza 182
 Kargl 61
 Kastl 325
 Kauffman 256
 Ketterle 181, 183
 Kiefer 228
 Kieserling 40
 Klagenfurt 320, 322
 Knorr-Cetina 21, 29, 317
 Krause 173
 Krishnamurti 128, 130
 Krohn 256
 Kuhn 13, 15
 Küppers 256
 Kwiat 170

 Laitmann 283
 Landé 120f.
 Latour 28, 29, 198, 317
 Laughlin 11, 33, 78, 87ff., 110,
 152, 186f., 203, 244, 245, 247,
 249, 250ff., 274, 344
 Leibniz 14
 Lévy-Leblond 83, 180f., 190, 255
 Lichtenstein 173
 Link 15
 Lloyd 137
 Lommel 283
 London 182
 Löwdin 166
 Luhmann 14, 16, 18, 28ff., 35ff.,
 43, 105f., 139, 165, 256, 279ff.,
 285ff., 304ff., 318, 325, 327

 Marquard 208
 Maturana 256
 Maxwell 86

- Mayntz 277f.
 McMullin 150
 Meja 319
 Merton 332
 Meyenn, v. 16
 Misener 182
 Mittelstaedt 11f., 92ff., 190, 193,
 211, 233
 Mohrhoff 122, 175ff.
 Mostepanenko 168

 Nassehi 71
 Neumann 50, 91ff., 115, 125,
 131, 145, 176, 206, 223, 293,
 309
 Newton 66, 189
 Nicolis 246
 Norris 204

 Oppenheimer 277
 Ort 320f.

 Papon 187
 Parkinson 14
 Passon 39, 77, 125f., 229
 Pawluch 28, 81
 Penrose 198, 283
 Pickering 21, 276, 317
 Pines 245
 Plaga 137
 Planck 50ff., 105, 179f., 308, 328
 Podolsky 33, 97, 127
 Pontifical Academy 14
 Popper 19, 29f., 77, 118ff., 175,
 206
 Prigogine 74, 84, 85, 88, 89, 185,
 246, 247, 317
 Putnam 30

 Quine 30

 Rayleigh-Jeans 53
 Rheinberger 19f., 28, 280, 317
 Rimini 205
 Rorty 350f.

 Rosen 33, 97, 127
 Rössler 108, 285, 305, 337
 Rustemeyer 152, 350

 Schimmel 286
 Schlosshauer 206, 228, 231
 Scholem 286
 Schriefer 184, 248
 Schrödinger 32, 33, 50, 71ff., 87,
 100ff., 121, 132, 201, 288ff.,
 300, 306, 308, 310, 324, 333,
 338f.
 Scully 178
 Shafiee 122, 176, 177
 Simonyi 25, 54, 57, 71, 75, 87
 Smith Churchland 284
 Smolin 254, 273f., 278
 Soler Gil 18, 133
 Sommerfeld 67
 Spencer Brown 329, 338
 Spengler 287
 Stapp 141, 198
 Steane 219
 Stehr 319
 Stengers 74
 Stöltzner 27, 206
 Strengers 85, 317
 Susskind 271

 Takens 66, 246
 Tegmark 116, 133, 136ff., 194,
 226, 228
 Thorndike 235
 Trunov 168
 Tugendhat 284, 301

 Vafa 272
 Varela 256, 345, 352
 Veneziano 265

 Walborn 172
 Walther 178
 Watson 288
 Weber 205
 Weinfurter 170, 219, 221

PERSONENREGISTER

- Weizsäcker, v. 13f., 24, 49, 55, 75,
79, 86, 95, 97, 112f., 145, 199,
209ff., 258, 292, 294, 295, 296,
301, 306, 310, 342
- Wheeler 116, 171, 201, 217, 226,
228
- Wiener 76
- Wien-Planck 54
- Wigner 215
- Witten 271f.
- Wittgenstein 286, 331f.
- Woolgar 28f., 81, 317, 335
- Zeh 132, 134ff., 140, 224ff., 264
- Zeilinger 64, 169, 170, 173f., 217,
218ff., 306, 341, 345