

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 neuen Diskussionen der Physiker das Schrödinger-Bild immer mehr an Strahlkraft. Als eigentlich erklärungswürdig 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 Everettischen 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 Hunderttausendstelsekunde 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 Abschließungen, derzu folge 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 lokalisierte und bestimmmbare 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 erklärmungsbedürftig. 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 reizzuhalten, 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 Schwankungerscheinungen) 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 Quantenkoausalität 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 direkten 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 hüet 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 cartesischen 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.«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. Anderseits 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 reeller Zeitkoordinate, 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 transzendentale Subjekt an: darauf, daß ein Subjekt etwas wahrnimmt, tut und weiß, und vielleicht mehrere Subjekte gemeinsam. Aber der so ›objektivierende‹ 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 zuzugestehen 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 transzendentalem 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 unstetige Änderung der Wahrscheinlichkeitsfunktion findet allerdings statt durch den Akt der Registrierung; denn hier handelt es sich um die unstetige Änderung unserer Kenntnis im Moment der Registrierung, die durch die unstetige 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 radikalisieren, 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 and 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 Paars, 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 vor gestellt 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 operationalen, 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 »0« besitzt) und mit der Wahrscheinlichkeit $|a_1|^2$ im Zustand $|1\rangle$ (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 Polarisationen 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 *nolens 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 Luftschnüren 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 Ausspurung 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 röhrt 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 Gemischten 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).

Anderseits 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 einer der autonomen Komponenten schon beim ersten irreversiblen Dekohärenzvorgang stattgefunden hätte.

Dekohärenz beschreibt also einen *scheinbaren* Kollaps in quasiklassische 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 *nolens volens* 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 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 Zeilingers *>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 Erkenntnisschranke 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 universelles 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 ›Spin_{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 ›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. Krausse/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 Wirklichkeitssicht 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 contingentes 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 einem 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 Informationssammlungs- 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!

Bestünde 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 herausschneiden. 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 HS , corresponding to the system S , and HE 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 Gesetzlichkeiten 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 diffrac-

Die emergenztheoretische Deutung der Quantentheorie radikaliert 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 ebensobettet 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 contingent, 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

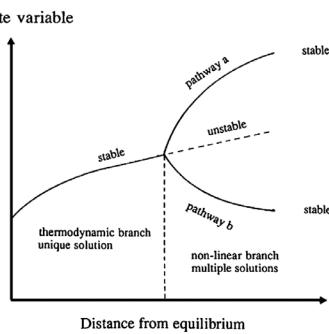


Abb. 19: Symmetriebrüche⁸²

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-

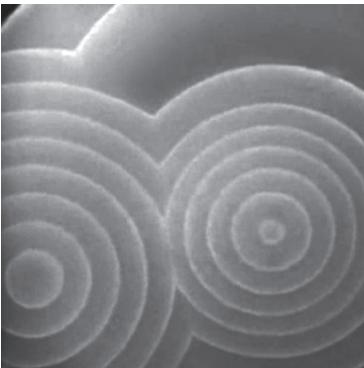


Abb. 20: Hier die spontane Entstehung von Ordnungsmustern in der Belousov-Zabotinsky Reaktion⁸⁵

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 Verwirrtheit 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).

Newton's 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 Weltfahrung. 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, Josephon 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, das Schall eine kollektive Bewegung elastischer Materie ist, Licht dagegen angeblich nicht. [...] Erwärmst 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. Kühlst man das Vakuum von sehr hohen Temperaturen ab, so stellt man sich vor, dass es schrittweise Ereignissen mit der Bezeichnung Vereinigungübertragung 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 könnte 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 Selbstverständnis 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 Gesetzlichkeiten unserer Welt auf kontingenaten Verzweigungen innerhalb einer sukzessiven Folge von Symmetriebreüchen 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, H_2O . 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 verschrankt 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 Everett'schen 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 einem 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 distinguierter phänomenalisierte 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 unterschiedloses 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 IGUSse 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 Grundgesetzmäßigkeiten 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 Symmetrieverlusten 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 Symmetrieverluste 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 ‚Spontane 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.