

## VII FORMPROBLEME EINER UNIVERSALTHEORIE – SYSTEMTHEORETISCHE REFLEXIONEN

In den vorangehenden Kapiteln haben wir versucht, eine Rekonstruktion der Quantentheorie zu leisten, welche die Bezugsprobleme in den Vordergrund stellt, die durch die (Quanten-)Physik erzeugt wurden und dann zu Lösungen geführt haben, die wiederum neue Bezugsprobleme für die Physik hervorrufen. Auf diesem Wege konnte ein tieferes Verständnis der Theorieentscheidungen und -bewegungen der Quantentheorie und der hiermit aufgeworfenen Paradoxien gewonnen werden. Es wurde deutlich, dass die bis heute andauernde Auseinandersetzung um die angemessene Deutung der Quantentheorie nicht nur ein Oberflächenphänomen darstellt, sondern tief in Theorieformen selbst eingewoben ist. Die Geschichte der Auseinandersetzung um die richtige Deutung der Quantenphysik verweist auf eine paradoxe Theorieanlage, die zwar entfaltet, jedoch nicht aufgelöst werden kann. Das Dilemma scheint offenbar in die Form und Anlage dieser Theorie selbst eingewoben. Die Quantentheorie würde damit also in ihrem Kern eine Reflexionsform darstellen, der die Deutungsproblematik unentrinnbar eingeschrieben ist und zwar unabhängig von der gewählten Interpretation:

- Die Kopenhagener Interpretation sieht sich gezwungen, den Beobachter einzuführen, wenngleich er in dem quantentheoretischen Formalismus selbst nicht vorkommt. Mit v. Neumann bleibt hier nichts anderes übrig, als willkürliche Schnitte in die Welt zu legen, um auf diese Weise eine Beschreibung der Welt zu bekommen, mit der man in der (Forschungs-)Praxis etwas anfangen kann.
- Die Viele-Welten-Theorie steht in Verbindung mit der Dekohärenztheorie vor dem Problem, das Universum als geschlossenes System zu begreifen, aber gleichzeitig eine infinite Kaskade offener Umwelthorizonte voraussetzen zu müssen, um entsprechend dem order-from-noise-Prinzip eindeutige Formen emergieren zu lassen.
- Die informationstheoretischen Deutungsansätze stehen vor dem Dilemma, dass Information nur in einem Kontext Sinn macht, der dann wiederum als informiert zu betrachten ist.
- Im emergenztheoretischen Holismus erscheinen Relata als Ergebnis von Relationen. Grund und Begründung wechseln ihre Rollen. Mit Blick auf die nicht-räumlich zu verstehende quantenmechanische Verschränkung gelangen wir jetzt in eine Welt, in der sich Anfang und Ende, Ursache und Wirkung sowie Mikro- und Makroebene vollends in einen Strudel rekursiver Koproduktionen auflösen. Hiermit verschwindet jedoch auch die platonische

Hoffnung auf eine Weltformel, in der sich physikalische Theorie verlässlich einrichten könnte.

In der Einleitung haben wir vermutet, dass sich die Theorieentwicklung der Quantentheorie mit einem systemtheoretisch geschulten Blick leichter verstehen und aufschließen lässt, da hier bereits eine besondere Sensibilität für die Eigenarten von Theorieanlagen mit rekursiven Beobachtungsverhältnissen vorausgesetzt werden kann.

In diesem Kapitel ist deshalb ausführlicher auf die (soziologische) Systemtheorie einzugehen, da hier einige Ressourcen zu erwarten sind, die dazu beitragen können, die Paradoxien der Quantentheorie noch deutlicher zu verstehen. Von ihrer Anlage gesehen stellen sowohl die Quantentheorie als auch die soziologische Systemtheorie Globaltheorien mit Universalitätsanspruch dar. Solche Theorieentwürfe zeichnen sich dadurch aus, dass sie als Gegenstand in sich selber vorkommen.<sup>1</sup>

Die soziologische Systemtheorie stellt eine Universaltheorie dar, denn sie hat den Anspruch, soziale Semantiken und Beobachtungsverhältnisse zu rekonstruieren, hat dabei jedoch mitzubehandeln, dass sie als Theorie selbst eine sozial konditionierte Semantik, ein gesellschaftlich bedingtes Beobachtungsverhältnis darstellt. Die Quantentheorie muss spätestens seit ihrer mathematischen Ausarbeitung durch v. Neumann als eine Universaltheorie angesehen werden, da nun die Messprozeduren (einschließlich des Experimentators) ebenfalls quantentheoretisch beschrieben werden müssen.

1 Um mit Luhmann zu sprechen: »Theorien mit Universalitätsanspruch sind leicht daran zu erkennen, daß sie selbst als ihr eigener Gegenstand vorkommen (denn wenn sie das ausschließen wollten, würden sie auf Universalität verzichten müssen). Damit sind, und das gilt für alle ›global theories‹ (auch zum Beispiel für die Quantenphysik), bestimmte Sektionen der klassischen Wissenschaftstheorie außer Kraft gesetzt; so vor allem alles, was mit unabhängiger Bestätigung (confirmation) des Wahrheitsanspruchs der Theorie zu tun hat. [...] Theorien mit Universalitätsanspruch sind also selbstreferentielle Theorien. Sie lernen an ihren Gegenständen immer auch etwas über sich selbst. Universale Theorie betrachtet ihre Gegenstände und sich selbst als einen ihrer Gegenstände als selbstreferentielle Verhältnisse. Sie setzt keine unhinterfragten erkenntnistheoretischen Kriterien voraus, sondern setzt, wie neuerdings auch viele Philosophen und Naturwissenschaftler, auf eine naturalisierte Epistemologie. Das heißt wiederum: ihr eigenes Erkenntnisverfahren und ihr Annehmen oder Verwerfen von dafür geltenden Kriterien ist für sie etwas, was in ihrem eigenen Forschungsbereich, in einer Disziplin des Teilsystems der modernen Wissenschaft geschieht« (Luhmann 1993, 9 f.). Siehe zum »Design und Potential von Universaltheorien« auch die Arbeit von Gaiser (2002).

Wenngleich beide Theorieprojekte unterschiedliche Gegenstandsbereiche haben, erscheint eine Gegenüberstellung allein schon deshalb lohnenswert, weil hierdurch tiefere Einblicke in die Theoriearchitektur solcher Projekte gewonnen werden können. Zu denken ist hier etwa an die Konsequenzen aus der Einbeziehung des Beobachters und die Paradoxien, welche aufgrund zirkulärer Begründungsverhältnisse entstehen.

Theorien mit Universalitätsanspruch verstricken sich zwangsläufig in die Problematik, dass man die »Exowelt« nur aus der »Endoperspektive« heraus erkunden kann.<sup>2</sup> In der Forschungspraxis lässt sich mit den hieraus folgenden Rekursivitäten in einer pragmatischen Weise umgehen, nämlich indem man einen bestimmten, willkürlichen Schnitt in die Welt legt, um weiterarbeiten zu können. In anderen Forschungsfragen kann der Schnitt dann an einer anderen Stelle gesetzt werden. Das zu Messende und zu Bestimmende wird jetzt einfach anders kontextualisiert.

In Hinblick auf ihrer grundlagentheoretische Verortung stehen Universaltheorien aufgrund ihrer autologischen Verwobenheit mit der Praxis nicht mehr außerhalb des untersuchten Feldes, sondern sind selbst Teil von ihr. Sie stellen selbst ein epistemisches System dar und müssen als solches in der Einheit von Erkennen und Handeln vieles unscharf stellen, um wenigstens andere deutlich erkennen und fokussieren zu können. Universaltheorien führen zu der Konsequenz, dass jeder operative Vollzug der Forschungspraxis nolens volens neue blinde Flecke erzeugt. Sie erscheinen damit in der eigentümlichen Situation, dass gerade, wenn sie in ihren Beschreibungen sehr genau und exakt werden, damit auf der anderen Seite die hierdurch ausgeblendete Komplexität in die Beschreibung wieder eindringt.

Insbesondere die soziologische Systemtheorie verfügt über eine ausgearbeitete Reflexion der hiermit verbundenen wissenschafts- und erkenntnistheoretischen Konsequenzen. Für sie ist »reduzierte Komplexität« nicht »ausgeschlossene Komplexität, sondern aufgehobene Komplexität. Sie hält den Zugang zu anderen Kombinationen offen – vorausgesetzt, dass ihre Begriffsbestimmungen beachtet und theoriestellenadäquat ausgewechselt werden. Wenn freilich das Begriffsbestimmungsniveau aufgegeben würde, würde auch der Zugang zu anderen Möglichkeiten der Linienziehung im Nebel verschwinden und man hätte es wieder mit unbestimmter, unbearbeiteter Komplexität zu tun«.<sup>3</sup>

Die Quantentheorie begegnet an verschiedenen Stellen dem Begriff der Information und dem hiermit assoziierten Problem der Komplexitätsreduktion. Es scheint sogar, dass der Informationsbegriff eine

2 Rössler (1992).

3 Luhmann (1993, 12). Vgl. auch Vogd (2009).

wichtige, wenn nicht sogar die zentrale Rolle einnehmen muss, um die Eigenarten der Quantenphysik überhaupt verstehen zu können.<sup>4</sup> Allein schon deshalb ist die Begegnung der beiden Theorieanlagen hier vielversprechend. Darüber hinaus weisen die unterschiedlichen, theoriekonform durchführbaren Deutungen der Quantentheorie auf eine möglicherweise interessante Theoriedynamik hin, die vielleicht auch für die weitere Entwicklung der soziologischen Systemtheorie von Interesse sein könnte.

Möglicherweise könnte ein fundierter Vergleich der epistemischen und erkenntnistheoretischen Bedingungen der beiden Theorieanlagen gar die Entstehung einer allgemeinen Theorie erkennender Systeme anregen. Luhmann selbst vermutete, dass die »Konsolidierung der Physik als Quantenphysik« sowie die Entdeckung der »Unentscheidbarkeitstheoreme der Logik« hierbei möglicherweise einen wichtigen Beitrag leisten können.<sup>5</sup>

4 Siehe etwa Zeilinger (1999b; 2005), v. Weizsäcker (1994), Schrödinger (1935) und im Rahmen der »Konsistente-Geschichten-Interpretation« Gell-Mann (1994).

5 »Die Quantenphysik hat mit ihrer These der Indeterminiertheit der Materie und der nur probabilistischen Grundlagen aller Alltagssicherheiten Aufsehen erregt. Aber Physiker argumentieren nicht selten so, als ob mit Indeterminiertheit oder Unbestimmtheit eine Eigenschaft der Materie bezeichnet sei, und geben sich damit zufrieden. Da es aber Negativitäten (wie Indeterminiertheit) und Probabilitäten nur als Zustände eines Beobachters gibt, muß die Quantentheorie als Theorie des Beobachters integriert werden; und in der Tat ermöglichen ihre Gleichungen es nur, auf Grund von Beobachtungen andere Beobachtungen vorauszusagen. Nichts anderes ist der Inhalt ihrer physikalischen Gesetze. Sie beschreiben den Beobachter als physikalisches Phänomen. Die Grenzen der Bestimmbarkeit sind Bestandteile der physikalischen Gesetze selbst; es bedarf zu ihrer Ermittlung keiner zusätzlichen Annahmen« (Luhmann 1998, 505 f.). Für die Paradoxien einer Logik, die den Beobachter ernst nimmt, ergibt sich für Luhmann etwa folgender Anschluss: »Das Konzept der Beobachtung zweiter Ordnung ist mit den Gödel-Ergebnissen kompatibel, denn es löst das Unwahrscheinlichkeitsproblem durch eine Beobachtung von außen. Es antwortet außerdem auf das Problem der Zirkularität, indem es den Beobachter anweist, zu beobachten, wie andere Beobachter ihre Zirkel entfalten, und ihn dann zu dem autologischen Schluß zwingt, daß auch er Selbstreferenzprobleme durch Unterscheidungen auflösen muß. Die second order cybernetics weist einen Ausweg aus denjenigen Problemen der Erkenntnistheorie, die sich in der Diskussion unseres Jahrhunderts als Zentralprobleme epistemologischer Kontroversen herausgeschält hatten. Nur ist damit noch nicht entschieden, wie weit daraufhin die Erwartungen abgeschwächt werden müssen, die die Tradition mit den Reflexionstheorien des Wissenschaftssystems verknüpft hatte« (Luhmann 1998, 508).

## I Wichtige Stationen der Rekonstruktion

Wir beginnen im Folgenden zunächst mit einem Rückblick auf die bislang geleistete Rekonstruktion, um die wesentlichen Theoriefiguren der Quantentheorie und die hiermit einhergehenden Deutungsansätze für die weitere Diskussion präsent zu halten.

Am Anfang von Kapitel I stand das Problem der Strahlung schwarzer Körper, welches erst mit der Einführung des Planckschen Wirkungsquantums einer Klärung zugeführt werden konnte. Zwei inkommensurable mathematische Beziehungen, die jeweils einen Teilbereich der empirischen Verhältnisse beschreiben, wurden von Planck zunächst in einer mathematischen Interpolation zusammengeführt. Man hatte jetzt zwar eine richtige Beschreibung der empirischen Verhältnisse, jedoch noch keine physikalische Erklärung des gefundenen Zusammenhangs. Im Rekurs auf die Wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation der Entropie konnte Planck eine physikalische Deutung der mathematischen Formel liefern. Seine diesbezügliche Erklärung beruht auf der Anschauung, dass die Gesamtenergie sozusagen in diskrete Pakete aufgeteilt wird, die in unterschiedlich wahrscheinlichen Arrangements angeordnet werden können.

Einstein hat die Idee des Wirkungsquantums auf alle elektromagnetischen Wellen verallgemeinert. Empirisch zeigte sich dies sinnvoll, doch hierfür war das Dilemma des Welle-Teilchen-Dualismus als Preis hinzunehmen. Wie nicht zuletzt im Doppelspaltexperiment deutlich wird, begegnen wir dann zwei Beschreibungsebenen, die nicht ineinander überführt werden können. Die Teilchentheorie ist nicht mit den beobachteten Beugungs- und Interferenzphänomenen in Einklang zu bringen. Die Wellenbeschreibung kann nicht die gequantelten Verhältnisse beim Energietransfer erklären.

Darüber hinaus zeigt sich, dass sich Quantenprozesse nicht mehr als ortsabhängige Veränderungen der potenziellen und der kinetischen Energie beschreiben lassen. Sie können nicht mehr auf Basis von Bewegungsgleichungen mit einer entsprechenden Differenzialrechnung rekonstruiert werden. Hiermit ist aber entweder die Idee des Determinismus – und hiermit verbunden die starke Fassung des Kausalitätsgesetzes – oder ein anderer wichtiger Satz der klassischen Physik – etwa das Gesetz der Energieerhaltung – aufzugeben. Eine andere, nicht-klassische Beschreibungsweise wird jetzt nötig.

Der entscheidende Schritt zur Lösung des Problems der Quantisierung bestand darin, eine so abstrakte Beschreibung des Problems zu finden, dass man auf die Anschauung der Elektronenbahn verzichten kann. Dies gelang zum ersten Mal mit Heisenbergs Matrizenmechanik. Auf diesem Wege konnte man jetzt einen Teil der klassischen Physik hinter sich lassen, um doch zugleich in dem Sinne weiterma-

chen zu können, dass Mathematik und Experiment weiterhin in einer engen Wechselbeziehung stehen.

Der von Heisenberg entdeckte Formalismus führt über die Vertauschungsrelation auf die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation, nach der Ort und Impuls nicht beide genau bestimmt werden können. Dies führt zur Vorhersage einiger Besonderheiten von Quantensystemen: Sie haben eine schwächere Kausalität, eine schwächere Logik und es besteht geringere Austauschbarkeit in Verbänden, das heißt es bestehen weniger Freiheitsgrade als in einer klassischen Beschreibung des gleichen Sets von Variablen.

Die Quantentheorie beruht auf einer hoch abstrakten Mathematik, deren Modellierung zwar in Übereinstimmung mit den empirischen Befunden steht, die sich jedoch nicht so ohne Weiteres in eine physikalisch-konzeptionelle Anschauung übersetzen lässt. Wie schon bei Planck wird hiermit wieder das Bezugsproblem der physikalischen Deutung der Quantentheorie virulent.

Praktisch unmittelbar mit ihrer Entdeckung entstanden Versuche, der Quantenphysik wieder klassische Anschauungsformen zurückzugeben.

Schrödinger entwickelte seine Wellengleichung, um eine Modellierung der Quantentheorie zu generieren, die auch physikalisch-anschaulich Sinn ergibt. Die Grundintuition bestand darin, Materie als Wellen zu beschreiben. Die Hoffnung, die Wellenfunktion  $\psi$  im Sinne eines klassischen physikalischen Verständnisses als Potenzialwelle deuten zu können, ließ sich jedoch nicht halten. Die mit der Wellenfunktion angestrebte Anschaulichkeit war damit wieder ruiniert.

Born demgegenüber ging weiterhin von der Teilchennatur der Elektronen aus und interpretierte die mit der Wellenfunktion formulierte Beziehung als eine Wahrscheinlichkeitsdichte, die ausdrückt, mit welcher Häufigkeit bei wiederholtem Experiment ein Elektronenteilchen an einem bestimmten Ort zu erwarten ist. Das Verhalten der untersuchten Quantensysteme wäre damit durch klassisch beschreibbare Teilchenbewegungen determiniert zu sehen.

Doch auch hiermit war das Deutungsproblem der Quantenphysik nicht wirklich gelöst, denn das mit der Schrödinger-Gleichung gegebene Eigenwertproblem lässt sich nur lösen, wenn von einer wie auch immer zu verstehenden Ausbreitung der Wellenfunktion  $\psi$  ausgegangen wird, bei der unterschiedliche Wellen miteinander interferieren und deshalb nur bestimmte Werte als Eigenlösungen eingenommen werden können. Da aber in der Überlagerung unterschiedlicher Wellenmuster auch negative Wahrscheinlichkeitsamplituden vorkommen und entsprechend verrechnet werden, lässt sich die Interpretation des statistischen Kalküls nicht mit klassischen Mitteln bewältigen (in der klassischen Physik sind Wahrscheinlichkeiten Koeffizienten,

die zwischen 0 und 1 liegen können, also nur einen positiven Wert annehmen können, was einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 0 bis 100 % entspricht).

Der unhintergehbare Welle-Teilchen-Dualismus wirft ein Dilemma auf, das sich nicht mit den Hausmitteln der klassischen physikalischen Konzeptionen bewältigen lässt. Man verfügt mit der ausformulierten Quantentheorie zwar jetzt über einen brauchbaren mathematischen Formalismus, doch was all dies physikalisch-konzeptionell bedeuten soll, verschließt sich einer einfachen Deutung.

Bohr verneinte schließlich die Möglichkeit einer realistischen Interpretation der Quantenphysik und schlug stattdessen vor, mit dem Wellenbild und dem Teilchenbild zwei komplementäre, sich im Bereich der Quantenwelt gegenseitig ergänzende Beschreibungsweisen zu verwenden. Je nachdem, auf welche Weise man eine Messung vornimmt, erscheine dann jeweils ein anderer Aspekt. Quantenobjekt und Messvorrichtung seien entsprechend jeweils zusammen zu denken, woraus jedoch folgt, dass niemals ein vollständiges Bild eines Quantenobjekts erreicht werden könne, da niemals beide Beschreibungen gleichzeitig Sinn ergeben. Hieran anschließend gingen Bohr und Heisenberg in der Kopenhagener Interpretation in Hinblick auf die subatomaren Wirklichkeiten von einer nicht überschreitbaren epistemischen Grenze aus. Auch der ontologische Status der Quantenwelt bleibe hiermit undefiniert, denn man könne aufgrund der Erkenntnisstranken nicht wirklich wissen, mit was man es da zu tun habe, bzw. man könne nur wissen, dass die Beschreibungsweisen der klassischen Physik hier versagen.

Der Preis, der für das Komplementaritätsprinzip gezahlt werden muss, besteht in der weder physikalisch noch durch den mathematischen Formalismus gedeckten These vom Wellenkollaps. Aus dieser Perspektive bleibt jetzt nichts anderes übrig, als den Wellenkollaps zu ontologisieren (»wenngleich niemand jemals eine kollabierende Welle beobachtet hat«) und ein Tabu einzurichten, das es verbietet, weitere Fragen zu stellen (»prinzipiell lässt sich nicht mehr über Quantenzustände wissen«).

Mit v. Neumanns »Mathematischen Grundlagen der Quantentheorie« fand die Quantentheorie ihren formalen Abschluss. Sie wird jetzt definitiv als eine nicht-klassische Theorie rekonstruiert und erhält ihre Legitimation aufgrund der inneren mathematischen Konsistenz und aufgrund der Tatsache, dass sie die einzige derzeit bestehende Theorie darstellt, die in der Lage ist, die experimentellen Befunde angemessen zu beschreiben. Entsprechend v. Neumanns mathematischer Rekonstruktion der Quantenmechanik ist jetzt davon auszugehen, dass die Schrödinger-Gleichung auch für die klassische Welt gilt – und damit prinzipiell für das ganze Universum. Das Mess-

instrument, mit dessen Hilfe Quantenobjekte beobachtet werden, ist aus dieser Perspektive ebenfalls quantentheoretisch zu beschreiben.

Die Frage, welcher Teil des Prozesses den Schnitt in der Wellenfunktion auslöst, lässt sich damit jedoch aus prinzipiellen Gründen nicht mehr beantworten. v. Neumann löst das Problem des infiniten Regresses durch die Setzung eines willkürlichen Schnittes, demzufolge die Wellenfunktion kollabiert, ohne dabei angeben zu müssen, ob der gelegte Schnitt auch physikalisch einen Unterschied darstellt. Das Messproblem lässt sich dann entsprechend durch die Wahl eines jeweils definierten Bezugsrahmens in einer Weise bearbeiten, dass die Experimente im Sinne des Formalismus der Quantentheorie Sinn ergeben. Die Paradoxie des Welle-Teilchen-Dualismus bleibt zwar erhalten, wird aber umschifft, indem man einen mathematischen Formalismus hat, mit dem sich rechnen lässt und mit dessen Hilfe man in Referenz zu der im Experiment gewählten Basis einen Schnitt setzen kann, über den die undefinierte Grenze zwischen der klassischen Beobachtung eines bestimmten Messergebnisses und der quantenmechanischen Beschreibung unterbestimmter Verhältnisse wieder eingeholt werden kann.

Sowohl Einsteins Arbeit zum EPR-Gedankenexperiment als auch Schrödingers Katzenbeispiel verweisen auf die offenen Enden der Quantenphysik. Nicht zuletzt wird hier schon auf die ›System-im-System-Paradoxie‹ hingewiesen. Der Sachverhalt, der hier aufscheint, ist mehr als nur eine Spiegelung in der Spiegelung, denn mit dem Prinzip der Verschränkung bekommen wir es darüber hinaus mit nicht-lokalen Prozessen zu tun.

Mit der »Machtübernahme der Mathematik in der Quantentheorie« (v. Weizsäcker)<sup>6</sup> rücken die epistemischen und ontologischen Verunsicherungen, die mit der Quantentheorie einhergehen, zunächst in den Hintergrund. Man kann nun rechnen, ohne wirklich zu begreifen. Man kann jetzt mit der Quantentheorie arbeiten, ohne sie wirklich verstehen zu müssen.

Als Primärreferenz der Quantentheorie erscheinen jetzt die Formsprache der Mathematik und eine bizarre Empirie, die mit der mathematischen Beschreibung in Beziehung gesetzt werden kann.

Kapitel II beschäftigt sich mit der Suche nach Alternativen im Anschluss an die Kopenhagener Interpretation. Die mathematische Formulierung der Quantentheorie bleibt in diesen Deutungs- und Erklärungsversuchen unangetastet.<sup>7</sup> Es wird jedoch die physikalische Intuition der Kopenhagener Deutung in Frage gestellt, nach der die Messbeobachtung den Kollaps der Wellenfunktion bewirkt, um auf

<sup>6</sup> v. Weizsäcker (1994, 511).

<sup>7</sup> In der Bohmschen Mechanik wird sie allerdings um eine Gleichung erweitert.



diese Weise eine Welt von Tendenzen und Möglichkeiten in eine klassische Wirklichkeit definiter Zustände zu überführen.

Jede dieser Alternativen beruht auf einer jeweils spezifischen Ontologie, von der aus versucht wird, den Formalismus der Quantenphysik zu deuten. Gemeinsames Moment aller Ansätze ist der Anspruch, die mit der Kopenhagener Deutung inhärent gegebene Beobachterproblematik zu überwinden.

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

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

Die Bohmsche Mechanik wählt einen ontologischen Ausgangspunkt, demzufolge sowohl der Teilchen- als auch der Wellencharakter als »real« betrachtet werden, und entwickelt hieraus die Vorstellung einer durch die Schrödinger-Gleichung gesteuerten Führungswelle, auf der die Teilchen reiten. Die konsequente Durchführung dieser Idee führt zu einem holistischen Universum, in dem die Eigenschaften von Teilchen als hochgradig kontextualisiert, das heißt auf nicht-lokale Weise durch das Rest-Universum geprägt zu sehen sind.

Jede der drei vorgestellten Alternativen zeigt sich – insofern konsequent durchgeführt – als eine Entfaltung der Paradoxie einer nicht-klassischen Theorieanlage, die den wunderlichen Charakter der Quantentheorie mehr bestätigt denn beruhigend in klassische Gefilde überführt. Es zeigt sich, dass der Versuch, die Quantenphysik auf Basis festgezurrtter ontologischer Prämissen deuten zu wollen, nolens volens zu neuen Paradoxien führt.

Kapitel III handelt von den Ergebnissen und Erfolgen der quantentheoretisch inspirierten Experimentalphysik. Zunächst lässt sich feststellen, dass quantenphysikalische Zugänge in recht unterschiedlichen, heterogenen Forschungsfeldern erfolgreich angewendet werden und dass entsprechend mittlerweile unter Physikern kaum mehr ein

Zweifel besteht, dass die Quantentheorie eine physikalische Fundamentaltheorie darstellt.

Das mit der Quantentheorie aufscheinende Dilemma, dass man über einen mathematischen Formalismus verfügt, der sich anschaulich nur schwer deuten oder verstehen lässt, wird durch die Befunde der modernen Experimentalphysik nochmals pointiert. Die Experimente im Anschluss an das Bell-Theorem zeigen auf, dass Verschränkung und die nicht-lokale Kontextualität von Teilcheneigenschaften empirisch überprüfbare Sachverhalte darstellen.

Der Casimir- und der Aharonov-Bohm-Effekt zeigen auf, dass leerer Raum nicht leer von Wirkung ist und auch die delayed-choice- und quantum-eraser-Experimente lehren, dass Quanteneffekte nicht als Artefakte der Messinteraktion verstanden werden können. Die Herleitung der Quantenelektrodynamik und die Erklärung von Suprafluidität und Supraleitung als makroskopische Quantenphänomene ergeben nur Sinn, wenn man der Wellenfunktion einen gewissen Realitätscharakter zugesteht. Da auch die seltsamsten Implikationen der Quantenphysik bislang nicht am Realitätstest gescheitert sind, ist der Weg zu einer klassischen Erklärung dieser Phänomene weitgehend verbaut.

Innerhalb der Gemeinde der Physiker verändert sich nun die Perspektive. Mit Quantenphänomenen zu rechnen, gehört mittlerweile zu den Routinetätigkeiten eines Physikers. Das Bizarre ist für ihn jetzt normal. Das Vertraute erscheint jetzt erklärungswürdig. Als ungelöstes Problem der Quantenphysik erscheint vor allem die klassische Physik – und damit einhergehend: die scheinbar stabile und eindeutige Welt unserer Alltagserfahrung.

In Kapitel IV begegnen wir einer in jeder Hinsicht selbstbewusst gewordenen Quantenphysik. Sich ihres unbestreitbaren Status einer physikalischen Universaltheorie bewusst geworden, kann sich die Quantenphysik langsam von der Herrschaft der Mathematik lösen. Wie beispielsweise mit der Quantenfeldtheorie deutlich wird, ist es für die Legitimität ihrer Anwendung jetzt nicht mehr nur ausschlaggebend, ob eine konsistente und widerspruchsfreie mathematische Beweisführung vorliegt. Man lässt sich nun wieder vermehrt von physikalischen Konzepten und Anschauungen leiten. Auch in Fragen der Interpretation lautet die Devise jetzt weniger ›halte den Mund und rechne‹. In der (theoretischen) Physik wird auch wieder darüber nachgedacht, wie sich Quantentheorie und Welterfahrung zueinander in Beziehung setzen lassen.

Hiermit entstehen neue Varianten der Deutung und Interpretation. Allerdings beruhen diese physikalischen Konzepte jetzt kaum mehr auf klassischen Anschauungen, entsprechend denen physikalische Phänomene in eine unmittelbare Beziehung zu Beobachtungen und

Alltagserfahrungen gebracht werden können. Vielmehr entstehen jetzt innerhalb unterschiedlicher physikalischer Theorieansätze Modelle, die auf theorieimmanenten Veranschaulichungen beruhen, also in Hinblick auf ihre Evidenz nicht mehr unmittelbar an physikalische Welterfahrungen angekoppelt sind, sondern vor allem auf der konsistenten Durchführung theoretisch begründeter Konzepte beruhen. Die Primärreferenz ist jetzt nicht mehr die mathematisch beweisbare Form, sondern die physikalisch-theoretische Konzeption. Mathematik wird zwar weiterhin gebraucht, doch die Physik traut sich jetzt wieder zu, Rechenricks und Lücken im mathematischen Beweis in Kauf zu nehmen, insofern ihre Modelle erfolgreich funktionieren.

Verschiedene theoretische Anschauungen und Konzeptionen führen dabei zu unterschiedlichen Varianten der Deutung und Interpretation der Quantentheorie.

Die ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ führt die Grundintuition der Ensemble-Interpretation fort. Hier möchte man die Welt weiterhin als den klassischen physikalischen Gesetzen gehorchend behandeln. Da man aber nun anzuerkennen hat, dass die empirischen Verhältnisse im mikroskopischen Bereich als verschränkt – und damit nicht-lokalen Gesetzmäßigkeiten folgend – zu betrachten sind, führt man das Hilfskonstrukt eines zufallsbedingten, irreversiblen Kollapses der Wellenfunktion ein. Um zu einer weniger bizarren Physik zu gelangen, muss hier also auf eine Idee zurückgegriffen werden, die gleichsam jenseits der Physik liegt.

Demgegenüber stellen informationstheoretische Ansätze eine Radikalisierung der Kopenhagener Deutung dar. Die erkenntnistheoretische Pointe dieses Zugangs besteht darin, dass Information – all das (und nur das), was man wissen kann – als der eigentliche Stoff gesehen wird, aus dem die (Quanten-)Welt gewoben wird. Wenn Information begriffen wird als ein Unterschied, der einen Unterschied macht, begegnen wir hier einer Welt, die aus nichts anderem besteht als aus sich selbst formierenden Unterschieden. Ein solcher Informationsbegriff zeigt sich aber bei genauerem Hinsehen vollkommen sinnentleert. Das offene Problem einer abstrakten Informationstheorie bleibt die Frage, für wen oder was ein Unterschied einen Unterschied macht. Damit wird jedoch wieder das Problem des Beobachters virulent, denn ein Unterschied macht nur für einen Beobachter einen Unterschied. Eine beobachterunabhängige Definition dessen, was einen Unterschied macht, läuft ins Leere. Nolens volens muss also der Beobachter als Kontext einer informationstheoretischen Beschreibung wieder eingeführt werden. Um aber mit solch vertrackten Verhältnissen umgehen zu können, bräuchten wir eine komplexere Informationstheorie, die Information und Verstehen als einen mehrgliedrigen, sich selbst konditionierenden Prozess begreift.

Der Dekohärenz-Ansatz, ebenso die Konsistente-Geschichten-Interpretation, stellen Weiterentwicklungen des Pfades dar, den bereits Everett mit seiner Viele-Welten-Theorie eingeschlagen hat. Wir treffen hier auf eine kybernetische Konzeption des Beobachters. Dieser erscheint nun als ein IGUS (Information Gathering and Utilizing System), das aufgrund seiner eigenen Selektivität bestimmte Segmente aus der Wellenfunktion ausschneidet. Die phänomenalisierte Welt distinguierbarer klassischer Entitäten erscheint jetzt als eine relative Wirklichkeit eines bestimmten systemischen Zusammenhangs, der auf eine bestimmte Sorte von Unterschieden aus dem unbegrenzten Raum anderer möglicher Informationen abzielt. Die ultimative Realität des Universums würde demgegenüber ein unterschiedsloses und zeitloses Urgewebe darstellen, in dem immer schon alles da gewesen ist und das im Wesentlichen durch Gesetzmäßigkeiten bestimmt ist, wie sie durch die Schrödinger-Gleichung formuliert werden. Darüber hinaus hätten wir mit einer Vielzahl beobachter- und systemrelativer Realitäten zu rechnen, in denen IGUS Informationen generieren, an denen sie sich ausrichten und über die sie eine individuelle Geschichte in Raum und Zeit gewinnen können.

Ein weiterer, konzeptionell über die Standarddeutungen hinausreichender Deutungsansatz ergibt sich mit der Idee der Emergenz. Die in den 1970er-Jahren entwickelte Theorie der dynamischen Systeme wird jetzt für das Verständnis kollektiver Quantenphänomene fruchtbar gemacht, indem die grundlegende Bedeutung der Symmetriebrüche für die Selbstorganisation raumzeitlicher Strukturen herausgearbeitet wird.

Die emergenztheoretische Perspektive scheint auf den ersten Blick zu ähnlichen Konsequenzen zu führen wie die Konsistente-Geschichten-Theorie. Auch hier führt eine Kette von Symmetriebrüchen zu einer Individuierung von Systemen, die damit ihre eigene Geschichte bekommen. Darüber hinaus ist hier jedoch ein weiterer Preis zu zahlen. Eine solchermaßen informierte Physik hat auch von der platonischen Idee einer Weltformel Abschied zu nehmen, mit der sich das Universum beschreiben ließe. Auf allen Ebenen treffen wir jetzt auf lokal stabilisierte und temporär gültige Realitäten, die nicht einfach nur eine beobachterabhängige Illusion darstellen, sondern als emergente Qualitäten dynamischer Prozesse zu einer manifesten Realität geronnen sind. All dies geschieht zudem auf Basis von Quantenprozessen, die ihrer Natur nach miteinander in einer nicht-lokal beschreibbaren Weise verschränkt sind.

Der vergleichende Blick auf die zeitgenössischen Versuche zur konzeptionellen Interpretation des quantentheoretischen Formalismus führt zu der Vermutung, dass die konsequente Ausformulierung der

Quantenphysik in Dimensionen führt, die klassischerweise in den Bereich der Metaphysik gehören.

In Kapitel V wird am Beispiel der Stringtheorie nochmals besonders deutlich aufgezeigt, wie physikalische Theorien eine konzeptionell-anschauliche Autonomie gewinnen können, die es gestattet, sich überwiegend mit den eigenen selbstgenerierten Formen zu beschäftigen, um sich auf diese Weise auch von der engen Bindung an empirisch überprüfbare Sachlagen lösen zu können.

Kapitel VI pointiert die Formprobleme der Quantentheorie, indem verfolgt wird, wie ihre offenen Enden in Bereiche ausgedehnt werden, die mystischen Denkformen zuzurechnen sind. Wir treffen hier auf eine Gratwanderung an den Grenzgebieten zwischen Physik und Metaphysik, die mit einem solchen Theorieprojekt möglicherweise bereits inhärent angelegt sind.

## 2 Würdigung der Quantenphysik und ein Plädoyer gegen den Soziologismus

Es gibt wohl kaum eine wissenschaftliche Theorie, die dem Common Sense so sehr widerspricht wie die Quantentheorie. In diesem Sinne ist es an dieser Stelle zunächst angebracht, diese außerordentlichen Sonderleistungen der Physik etwas ausführlicher aus soziologischer Perspektive zu würdigen. Wir treffen hier auf eine historisch einmalige gesellschaftliche Lagerung, die zu einer Ausdifferenzierung eines autonomen Wissenschaftssystems geführt hat, das solch hochgetriebene Theorieformen gestattet. Wir begegnen darüber hinaus einer Binnendifferenzierung des Systems der ›harten‹ Wissenschaften in eine Experimentalphysik und eine theoretische Physik sowie darüber hinaus in eine ihrerseits autonome, d. h. von der physikalischen Theoriebildung unabhängig gewordene Mathematik. Nur durch diese Trias wurde eine Entwicklung möglich, in der im Spiel von Mathematik und Experiment Theorieformen ausprobiert werden konnten, die nicht nur jeder physikalischen Anschauung spotten, sondern gar bewusst auf die aus der klassischen Physik vertrauten Konzepte verzichten konnten. Erst indem in der Mathematik die abstrakte Form zu sich selber gefunden hatte, konnte jener mathematische Formenreichtum entstehen, aus dem heraus ein neuer Dialog mit der Natur möglich wurde.

Die produktiven Entwicklungen der Quantentheorie nähren sich aus dem Spannungsfeld von Physik und Mathematik. Sie gehen weder in der platonischen Idee einer reinen, logisch deduzierbaren Formlehre auf noch in einem wie auch immer gearteten Positivismus,

der glaubt, die Regeln der Welt aus beobachtbaren Mustern ableiten zu können. Die technologischen Fortschritte der Experimentalphysik, die Entwicklungen der mathematischen Formsprache und die theoretische Physik sind in der Quantenphysik eine einzigartige Symbiose eingegangen, die in Folge zu einer recht befremdlichen physikalischen Theorie führt, die dazu zwingt, zentrale Annahmen der klassischen Physik aufzugeben. Es verwundert nicht, dass Physiker wie Einstein oder Schrödinger, die die Eigenheiten dieser Theorie besonders gut verstanden hatten, zeitlebens mit ihr haderten. Die Quantentheorie erscheint im neuen Jahrtausend zwar als eine universelle Theorieanlage, die bislang jedem Falsifikationsversuch trotzen konnte, dennoch verwehrt sie sich weiterhin einer eindeutigen physikalisch konzeptionellen Anschauung, wie die andauernde Auseinandersetzung um eine ihr angemessene Interpretation zeigt.

Die Frage nach der physikalischen Deutung ist weit mehr als nur ein Spiel der Sprache. Es geht hier vielmehr um Grundfragen der Ontologie und der Epistemologie, um das, was Wirklichkeit ist, um das, was erkannt werden kann, und um das, was das Erkennen mit der Wirklichkeit macht. Die Quantentheorie führt all diese Fragen einer experimentellen Reflexion zu – mit denkwürdigen Ergebnissen.<sup>8</sup>

Man kann hier nur davor warnen, all dies nur als soziale Konstruktion misszuverstehen. Natürlich ist auch das Wissen der Quantenphysik gemacht und hergestellt worden.<sup>9</sup> Naturwissenschaftliche Fakten sind Produkte, die in den Laboren fabriziert und als sprachlich-semantische Konstruktionen von den Medien (überwiegend in Form von Schrift und Bild) verbreitet werden. Doch davon auszugehen, dass es sich hier nur um soziale Konstruktionen handelt, ist ein soziologistischer Fehlschluss. Wenn ein Soziologe entdeckt, dass auch Naturwissenschaftler nichts anderes tun können, als innerhalb ihrer Sprache Typisierungen zu typisieren, dann gilt dieser Befund nur im Falle einer bestimmten Form der Beobachtung, nämlich mit Blick auf sprachliche bzw. schriftsprachliche Handlungen, die sich dann als Typisierung von sprachlichen Typisierungsprozessen beschreiben lassen.<sup>10</sup>

8 Selbst die Frage, ob die Wellenfunktion als ein ›reales physikalisches Objekt‹ betrachtet werden kann, wird jüngstens im Wechselspiel von theoretischer Reflexion und empirischem Design in den Bereich der empirisch überprüfbaren Fragestellungen überführt. Vgl. den in »Nature« diskutierten Beitrag von Pusey et al. (2011).

9 Die folgenden Abschnitte beruhen teilweise auf einer Ausarbeitung, die bereits in Vogd (2010) veröffentlicht wurden.

10 An dieser Stelle natürlich der Verweis auf Berger und Luckmann (2003).

Eine solche soziologische Beschreibung erzeugt gewissermaßen ihre eigene Ontologie, doch selbstredend stellen sich für die Physiker die Beobachtungsverhältnisse anders dar. Ihnen geht es um physikalische Realitäten und nicht um soziale Konstruktionen. Mit Blick auf die Referenz des Codes wahr/falsch geht es ihnen primär um die Beschreibung eines physikalischen Wirklichkeitsausschnitts, der methodologisch in einer Weise reduziert wurde, dass wissenschaftliche Aussagen möglich werden. Experimentalsysteme und ihre methodologischen Auswertungsapparaturen erlauben es den Wissenschaftlern, Wahrheiten zu erfahren. In ihrer Forschung werden ständig neue Beobachtungsmöglichkeiten ausgeflaggt, die jeweils eigene Fakten als sichtbares Datum erzeugen. Genau dies meint wohl auch Karin Knorr-Cetina, wenn sie von der »Fabrikation von Erkenntnis« spricht.<sup>11</sup> Natürlich wird hier Wissen hergestellt – wenn man so will »konstruiert«. Doch lassen sich diese Vorgänge nicht primär als soziale Konstruktion begreifen, sondern sind eher als besondere Formen der Beziehung zwischen Forschungsgegenstand, technischen Prozeduren und bewusstseinsvermittelter Wahrnehmung zu rekonstruieren. Auch die Natur und die Dinge treten hiermit in den Dialog mit ein, um das zu klären, was der Fall ist. Die Experimente der Quantenphysik stellen Fragen an die Natur und die physikalische Theoriebildung stellt eine Form dar, die Antworten zu reflektieren. In der Quantenphysik geht es – wie in jeder Naturwissenschaft – vor allem um einen »Dialog mit der Natur«.<sup>12</sup>

Dass darüber hinaus auch noch sozial gehandelt wird und die Ergebnisse dann auch in sprachlich typisierender Form kommuniziert werden, ist eine andere Sache – man denke allein an die Rolle der Fachpublikation für die Reproduktion, Qualitätssicherung und Fortschreibung der wissenschaftlichen Erkenntnisproduktion. Für die Wissenschaft als Ganzes ist Kommunikation zwar von zentraler Bedeutung – ohne Kommunikation gibt es kein Wissenschaftssystem –, doch dies darf nicht in einer Weise missverstanden werden, die naturwissenschaftlichen Formen der Beobachtung mit Kommunikation zu verwechseln. Wenn Naturwissenschaftler in einen »Dialog mit der Natur« treten, wissen sie selbst am besten, dass ihr Gegenstand nicht sinnförmig vorliegt, dass also der Dialogbegriff nur eine Me-

11 Knorr-Cetina (1991). Vgl. auch Fleck (1980), Latour und Woolgar (1985) sowie Rheinberger (2006). Siehe aus dem Umfeld der Science Studies mit Bezügen zur Quantenphysik Pickering (1984).

12 Die Dialogmetapher hat noch einen anderen Sinn. Sie verweist mit Blick auf das Eigenverhalten dynamischer Systeme auf die Tatsache, dass deren Strukturen nicht mehr deduktiv, sondern nur noch interaktiv hervorgebracht werden können. Vgl. Prigogine und Stengers (1990).

tapher für Beobachtungsverhältnisse darstellt, welche die von ihnen untersuchten Objekte zwar nicht zum Sprechen bringen, jedoch zu Manifestationen anregen, die dann mit den im Medium der Sprache formulierten Modellen in Beziehung gesetzt werden können.

Hochgetriebene Theorie, die sich in ihren Abstraktionen in hohem Maße von der lebensweltlichen Wirklichkeit löst, steht nicht im Widerspruch zur Möglichkeit von Welterkenntnis. Im Gegenteil, erst ein hinreichend elaboriertes und mit eigenen, intern konditionierten Konsistenzzwängen ausgestattetes Theoriegebilde stellt die Bedingung zur Möglichkeit von Reflexion und Erkenntnisgewinnung dar.

Wissenschaft wird erst dann dialogfähig, wenn sie autonom wird, also den eigenen Betrieb in Anbetracht überfordernder Weltkomplexität selbst konditionieren und programmieren kann, um auf diesem Wege eine gewisse Sensibilität für die Eigenarten der untersuchten Wirklichkeiten zu gewinnen. Erst eine hinreichend entwickelte theoretische Form bündelt wissenschaftliche Untersuchungen zu ertragreichen, aneinander anschließenden Projekten, zwischen denen über die Theorie eine funktionale Beziehung gestiftet werden kann. Auf diese Weise entsteht eine Limitationalität, derzufolge Einschränkungen, die sich aus einer Untersuchung oder einem Experiment ergeben, auch den Variationsbereich von anderen Untersuchungen einschränken, so dass nicht immer von vorne angefangen werden muss und man aus vergangenen Erfahrungen lernen kann.<sup>13</sup> Theoretische Geschlossenheit und empirische Sensibilität sind in diesem Sinne kein Gegensatz. Erst eine hinreichend laborierte Theorie gestattet einen Dialog mit der Natur, der Neues und Unerwartetes entdecken lässt. In diesem Sinne ist es dann auch wichtig zu begreifen, dass die theoretische Physik nicht in der Mathematik aufgeht, sondern einen eigenständigen konzeptionell-theoretischen Raum bewirtschaftet.

Moderne Wissenschaft – dies ist hier wichtig zu betonen – ist gerade deshalb erfolgreich, weil sie Institutionen geschaffen hat, die eine theoretische Selbstbezüglichkeit gestatten, über die sich radikal in Distanz zu den Realitätsannahmen des Common Sense gehen lässt. Die hochgetriebenen Theoriekonstrukte der Quantenphysik – dies wurde in den vorhergehenden Kapiteln deutlich – profitieren von der institutionellen Trennung von Mathematik und Physik. Erst indem auch ein Teil der physikalischen Tradition eingeklammert und probenhalber durch die virtuelle Formenwelt der Mathematik ersetzt werden kann, entsteht die notwendige Mannigfaltigkeit, aus der heraus solch ein unwahrscheinliches Gebilde wie die Quantentheorie entstehen kann. Ohne imaginäre Zahlen ist das Rechnen mit dem Irrealen – wie sonst sollte man ›Wellen von nichts‹ bezeichnen, in denen negative Wahrscheinlichkeiten verrechnet werden? – nicht möglich.

13 Vgl. Luhmann (1998, 396 ff.).



Ohne den unendlich dimensionalen Hilbertraum lässt sich eine Welt, die durch nichtlokale Beziehungen konfiguriert wird, nicht abbilden.

Was für die Mathematik gilt, trifft auch für die theoretische Physik zu. Die hohe innerphysikalische Prominenz phantastischer und grotesker Weltkonzepte – man denke hier etwa an die Viele-Welten-Theorie, derzufolge jeder einzelne Mensch in unzähligen Kopien alternativer Geschichten vorkommt, oder ein Blockuniversum, in dem Vergangenheit und Zukunft gleichzeitig existieren – zeigen sich jetzt als theorieimmanente Konsequenzen quantenphysikalischer Theoriebildung. Ein Forschungsprogramm, das die durch die Theorie selbst generierten Konsistenzzwänge weiterverfolgt, hat Erfolg. Selbst gewagte Formbildungsprozesse funktionieren.

Erstaunlicherweise erweist sich die Quantentheorie in unterschiedlichsten Feldern der Physik als brauchbar – sei es in der Elektrodynamik, der Hochenergiephysik, der Optik, der Akustik, der Kosmologie oder den emergenten kollektiven Phänomenen, die im Bereich tiefer Temperaturen anzutreffen sind. Dies ist umso erstaunlicher, als ihr Kern, wie er durch die Schrödinger-Gleichung formuliert ist, die Nicht-Vertauschbarkeit von Operatoren und damit Verschränkung impliziert. Die Freiheitsgrade eines Quantensystems sind geringer als die eines klassisch beschreibbaren Systems mit gleicher Anzahl von Observablen. Insofern aber die Quantenphysik als die eigentliche physikalische Grundlagentheorie akzeptiert wird, heißt dies auch, dass die Unbestimmtheit von Weltzuständen akzeptiert werden muss, denn aufgrund beschränkter Freiheitsgrade können Quantensysteme niemals vollständig bestimmt sein.

Da aber die Quantentheorie offensichtlich in allen ihren empirischen Anwendungsbereichen funktioniert, gilt das Primat, dass unsere Welt in Wirklichkeit mindestens so bizarr ist wie die Quantentheorie (denn ansonsten würde Letztere an ihr scheitern). Im Dialog mit der Natur ist die Quantentheorie als ein sich selbst konditionierendes Theoriegebilde hinreichend resonanzfähig geworden, um auf allen Ebenen der Physik, Chemie und künftig wohl auch in der Biologie<sup>14</sup> Fragen an die Welt zu stellen, die und deren Antworten dem gesunden Menschenverstand spotten.

Die Quantenphysik ist und bleibt eine harte Naturwissenschaft. Die mit ihr aufscheinende Beobachterthematik hat weder etwas gemein mit den wissenssoziologischen Diskursen zum Relativismusproblem<sup>15</sup> noch mit der Erfahrung eines Ethnologen, dass ein Forscher irgendwie auch das untersuchte Feld mit beeinflusst. Die

<sup>14</sup> Wie Collini et al. (2010) zeigen, scheint beispielsweise auch der Prozess des Licht-Erntens in der Photosynthese durch Quantenprozesse formatiert.

<sup>15</sup> Vgl. Meja/Stehr (1982).

Quantenphysik liefert vielmehr exakte Beschreibungen der von ihr untersuchten Wirklichkeiten, muss dabei aber feststellen, dass ihre Objekte keine Essenz in sich haben, also nicht aus jenen letzten Teilchen bestehen, aus denen man zuvor alles zusammengesetzt gedacht hatte. Beobachterabhängigkeit meint hier einfach nur den Befund, dass eine exakte physikalische Beschreibung jetzt immer auch den Kontext der Beobachtung mitführen muss, da es ohne Kontext das zu untersuchende Phänomen nicht gibt.

Was der Beobachter ist, kann die Quantenphysik jedoch nicht sagen.

### 3 Die Interpretationsprobleme der Quantentheorie im Lichte systemtheoretischer Reflexion

Die Geschichte der Quantentheorie ist zugleich die Geschichte des Dilemmas ihrer Deutung. Dies wird mit der hier vorgelegten Rekonstruktion überdeutlich. Auf der einen Seite finden wir mit der Schrödinger-Gleichung einen überzeugenden mathematischen Formalismus vor, der auf eine Experimentalphysik trifft, welche selbst die bizarrsten Vorhersagen der Quantentheorie zu bestätigen scheint. Auf der anderen Seite ist die Quantentheorie, wenngleich mehr als hundert Jahre alt, weit davon entfernt, zu einer einheitlichen physikalisch-konzeptionellen Deutung zu finden.

Die folgenden Ausführungen gehen von der These aus, dass dieses Dilemma – eine erfolgreiche Theorie, doch das Scheitern ihrer Interpretation – in der Theorieanlage selbst liegt. Der systemtheoretisch geschulte Blick lässt vermuten, dass die Quantentheorie in ihrem Kern nicht von Gegenständen handelt, die der positiv-sprachlichen Sphäre des Seins zugerechnet werden können. Vielmehr spricht alles dafür, dass sie es mit jenen aus der Systemtheorie bereits bekannten ›Unjekten‹ zu tun bekommt,<sup>16</sup> welche mit Günther nur negativ-sprachlich als Reflexionsbeziehungen konzeptionalisiert werden können. Die Quantentheorie würde damit nolens volens den Raum der klassischen zweiwertigen Logik überschreiten müssen. Um mit ihr nicht nur rechnen, sondern sie auch verstehen zu können, wäre damit eine transklassische Reflexionslogik im Sinne von Gotthard Günther notwendig, die es gestattet, mit polykontexturalen Verhältnissen umzugehen, die jetzt unterschiedliche logische Räume aufspannen,<sup>17</sup>

<sup>16</sup> Siehe zum Begriff und Konzept des ›Unjekts‹ Fuchs (2001).

<sup>17</sup> Günther (1963; 1978). Siehe zu einer Einführung in Günthers Konzeption der Polykontexturalität Ort (2007), Kaehr (1993) und Klagenfurt (2001).

welche dann systematisch miteinander in Beziehung gesetzt werden können.

Im einfachsten Fall wird hier neben der Subjekt-Objekt-Dichotomie der klassischen Identitätslogik ein zweiter Ort der Reflexion in Betracht gezogen. Hiermit ergeben sich zwei Beobachter als zwei getrennte systemische Zusammenhänge, was eine Reihe von Konsequenzen mit sich bringt. Mit Günther finden wir nun eine ›Es-, Ich-, Du-Struktur‹ vor, wobei ›Ich‹ und ›Du‹ jetzt zwei unterschiedliche Systeme darstellen. Wir treffen damit auf zwei ›Beobachter‹, die sich jeweils in Hinblick auf Autonomie (Eigenlogik der Systeme → Ego und Alter Ego) und Heteronomie (Sach- und Umweltdeterminiertheit → ›Es‹) wechselseitig reflektieren können. Die Positionierung über drei Orte ergibt also unterschiedliche Reflexionsmöglichkeiten. Das Es-Ich-Verhältnis lässt sich weiterhin im Sinne der klassischen Identitätslogik als eine Spiegelung von Sein beschreiben, entsprechend der ein Beobachter dem Sein nichts hinzufügt, sondern dieses einfach nur erkennt. Beim Ich-Du-Verhältnis stellt sich die Sachlage jedoch anders dar.<sup>18</sup> Das ›Du‹ erscheint im reziproken Austauschverhältnis nun als ein anderes ›Ich‹ und damit als ein anderer systemischer Zusammenhang, der jetzt selbst eine Subjekt-Objekt-Relation – und dadurch eine eigenständige, zweite klassische Kontextur – ausbildet. Diese erscheint jetzt als ein weiterer ›Beobachter‹, der je nach Standortabhängigkeit und der sich hieraus ergebenden Reflexionsperspektive etwas anderes beobachten lässt.

Die Reflexion des einen systemischen Zusammenhangs durch den jeweils anderen fügt der Welt etwas hinzu, was durch die Spiegelung von Sein im Subjekt nicht gedeckt ist. Der Beobachter im jeweils anderen System ist nicht per se gegeben, sondern muss gewissermaßen ›erfunden‹, also durch Zurechnung konstruiert werden.

Das Subjekt erscheint jetzt selbst synonym mit dem unbeobachtbaren Beobachterstatus, der erst – und nur – durch Reflexion zugeschrieben werden kann, aber selbst in der Welt nicht zu beobachten ist. Die Zuschreibung selbst macht den Unterschied, denn sobald als Reflexion vollzogen, tritt sie unweigerlich in das Verhältnis, das die Systeme zueinander haben, mit ein. Die durch die Reflexion entstandene Beziehung ändert die Systeme. Eine entsprechende Reflexion fügt der Welt etwas Neues hinzu. Es wird etwas in die Welt hineinbeobachtet, was diese verändert. Systeme, insofern hinreichend

<sup>18</sup> Um hier mit Ort zu sprechen: »[Kein] ›Ich‹ reflektiert ein ›Du‹ einfach nur als ein Objekt. Wie ich bereits angedeutet habe, gesteht es dem ›Du‹ autologisch Subjektivität zu, obwohl das ›Du‹ dem ›Ich‹ so fremd bleibt, wie jedes andere Objekt. Da die Reflexion des ›Du‹ also kein einfaches ›Sein‹ reflektiert, sondern ›Reflexion‹, kann sie diese nur als ›leeren Akt‹ reflektieren, das heißt als Wille oder als Handlung« (Ort 2007, 145).

reflexionsfähig, reagieren auf Systeme – und verändern damit ihre Dynamik –, indem sie andere Systeme hinsichtlich ihres Status definieren müssen.

In einer polykontexturalen Welt steht eine Vielfalt von Systemen zueinander in einer heterarchischen Beziehung<sup>19</sup> und bildet jetzt ein komplexes Arrangement aus Einzelsystemen, die sowohl autonom als auch heteronom beschrieben werden können und sich wechselseitig sowohl als Funktion ihrer selbst als auch als Funktion ihrer wechselseitigen Beziehung reflektieren und konstituieren.

Notwendig wird eine komplexe, polykontexturale Beschreibung immer dann, wenn wir es mit rekursiven, sich auf sich selbst verweisenden Prozessen zu tun haben. Das Paradebeispiel hierzu ist natürlich der ›Beobachter‹ selbst. Jede Theorie des Beobachters verstrickt sich in Widersprüche, sobald sie diesen positiv, das heißt seinslogisch, zu begreifen sucht. Denn entweder verschwindet der Beobachter mit seiner Objektivierung aus dem Feld der Analyse und erscheint dann bestenfalls als ein mysteriöses Epiphänomen, das es eigentlich nicht geben kann, oder man ist geneigt, es als ein inneres Seelenwesen zu verdinglichen, was dann jedoch erhebliche epistemologische Probleme mit sich bringt, also auch nicht dazu beiträgt, das Problem zu erhellen. Mit Günthers Konzeption einer polykontexturalen Logik ergibt sich demgegenüber die Möglichkeit, den Beobachter deontisch als eine Reflexionsinstanz zu betrachten, die gleichsam aus dem Negativen, aus dem Nicht-Sein ordnend in Reflexionsprozesse eingreift. Die aus dem Alltagserleben bekannten Subjekt-Objekt-Relationen erscheinen jetzt als Eigenwerte der Reflexion, die einhergehend mit einem Reflexionsprozess temporär ausfallen.<sup>20</sup> Positiv-sprachlich

19 »Ein System ist dann heterarchisch, wenn mindestens zwei verschiedene Subsysteme auf zwei verschiedene Weisen miteinander verbunden sind« (Klagenfurt 2001, 139).

20 Hieraus ergibt sich mit Günther auch die Unterscheidung zwischen Positivsprache und Negativsprache: »Wenn in der Heideggerschen Philosophie vom Nichts die Rede ist, dann kann gemäß der klassischen Negation, die streng symmetrisch sich gegenüber der Positivität verhält und vermittels ihres Aussagebereichs ein isomorphes System zusammen mit der Assertivität bildet, nur von einem Nichts die Rede sein, das in sich das total verneinte Sein – und nichts weiter! – trägt. [...] D. h., wenn die Sprache des Seins verstummt, dann kommt aus dem Nichts auch nur noch Schweigen. Sie müssen sich beide der gleichen metaphysischen Sprachgestalt bedienen, die auch in der Verneinung noch vom Sein redet, und das ist eben die Positivsprache. Im Nichts ruht, klassisch gedacht, keine höhere Verneinungskraft, als sie durch die Wahrheit des Seins geliefert wird. [...] Die Weltgeschichte selber, die Willen und Denken umfasst, ist universal-thematisch die Weltgeschichte des Nichts. Die Freiheit des

gesehen erscheint der Beobachter jetzt als ein Artefakt, dem Entscheidungen zugerechnet werden müssen, da aufgrund einer komplexen Systemik die Verhältnisse nicht vollkommen bestimmt sind und deshalb nichts anderes übrig bleibt, als den Zufall in Struktur umzuwandeln. Um hier mit Baecker zu sprechen: »Zufall« heißt einerseits Unsicherheit und andererseits Material für abweichende Elemente und Operationen. »Entscheidung« heißt Angewiesenheit auf ein auf den Moment angewiesenes, durch nichts vorwegzunehmendes, schließlich dem (internen) Beobachter zuzuweisendes Ereignis.«<sup>21</sup>

Die polykontexturale Logik führt – und dies ist hier der entscheidende Punkt – auch zu einer weiteren Bedeutung des Begriffs vom Nichts. Während in der klassischen Logik das Nichts nur als eine absolute Verneinung des Seins begriffen werden kann, geht das Negative aus einer reflexionslogischen Perspektive mit Freiheitsgraden einher, die das Sein mit Potenzialität durchziehen und Neues ermöglichen, da jetzt Entscheidungen und Weichenstellungen erzwungen werden, die nicht allein durch das Sein gedeckt sind. Systeme erscheinen damit gleichsam als Kontingenzmaschinen, die auf Gedeih und Verderb ihren selbst generierten Zufälligkeiten ausgeliefert sind. Systeme stellen Reflexionsbeziehungen dar, die gleichzeitig Wissen und Nicht-Wissen generieren und deshalb nicht umhinkommen, in

Willens entspringt aus dem Nichts und niemals aus dem Sein, weil letzteres ja »gewesene Freiheit«, also Verlust der Entscheidung ist, wie wir weiter oben bemerkt haben.

Vom Denken her gesehen ist der transzendente Ort aller Handlung immer der Freiraum des Nichts. Daraus ergibt sich für die Negativsprache, deren Grundidee wir hier in knappen Andeutungen eingeführt haben, die folgende Einsicht: Dieselbe ist keine Sprache, die in dem uns vertrauten Sinn Erkenntnisse vermittelt, die sich auf ein vorgegebenes Sein beziehen. Sie ist vielmehr ein allgemeiner Codex für Handlungsvollzüge. Wenn wir die Gleichungen  $p = N1.2.1.2.1.2$  (.) oder  $p = N2.12.1.2.1$   $p$  ermitteln, so handelt es sich nicht um Sachgehalte per se, die festgestellt werden und die uns sagen, was » $p$ « eigentlich ist, sondern um eine Aufforderung, durch einen Wahlakt zu entscheiden, durch welche Negationsfolge  $p$  als eine mit sich selbst identische Objektivität festgestellt werden soll. Die beiden Negationsfolgen sind einander völlig ebenbürtig, und es gibt keinen theoretischen Grund, die eine der anderen vorzuziehen. In beiden Gleichungen handelt es sich um eine in sich selbst zurücklaufende Negationsrelation, also um einen Kreis, der wie alle Kreise in doppeltem Drehsinn durchlaufen werden kann, und es gibt keine theoretische Instanz im ganzen Universum, die uns mitteilen könnte, welcher Drehsinn dem anderen vorgezogen werden sollte« (Günther 1980, zitiert nach der Onlineversion, verfügbar unter [http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg\\_bibliographie.htm](http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg_bibliographie.htm)).

21 Baecker (2007).

jedem Schritt ihres Prozessierens eine neue Balance zu erfinden, was als bestimmt und was als unbestimmt zu gelten hat. Sie müssen eine Beziehung zu anderen Systemen knüpfen, ohne jedoch über hinreichend Informationen verfügen zu können, welche eine eindeutige Berechnung und Determination dieser Beziehungen erlauben.

Systeme dürfen aus dieser Perspektive also nicht mit Monaden verwechselt werden, die ein wie auch immer geartetes Ding an sich darstellen. Sie reproduzieren sich vielmehr als Reflexionsverhältnis in Koproduktion mit einer Welt, die Unordnung und andere Systeme enthält.<sup>22</sup> Auf diese Weise kann sich die Erklärung emergenter Prozesse auch vom Substanzbegriff lösen, denn wenn Systeme auf

22. Insofern man mit Günther die Entstehung von Leben mit der Bildung von Systemen gleichsetzt, entsteht Leben nicht aus einer Welt von Unordnung, wie Schrödinger in seiner berühmten Abhandlung »Was ist Leben« angenommen hatte (Schrödinger 1946). Vielmehr kann Leben entsprechend v. Foersters ›order-from-noise‹-Prinzip erst in einem (logischen) Raum entstehen, der zugleich Ordnung und Unordnung enthält: »The noise is something which is capable of instigating a process that absorbs lower forms of order and thereby converts a corresponding degree of disorder into a system of higher order. In other words: it is a synthesis of the order-from-order and the order-from-disorder ideas. Having discarded Schrödinger's simple order-from-order concept we obtain now two basic principles: Schrödinger: order-from-disorder von Foerster: order-from-(order-plus-disorder)

In both cases the logical equivalent of disorder is a distribution of logical terms. But what is distributed is different. Schrödinger's principle refers to the distribution of individual values; von Foerster's concept refers to the distribution of value-systems. In the first case the internal structure of the logical system which suffers the distribution is changed: a theory of formal certainties is transformed into a theory of probabilities. In the second case nothing of this sort happens: The distribution does not concern the elements which constitute a given system but the system itself as an inviolate entity

This gives us two entirely different meanings of distribution and consequently of disorder. von Foerster's distinction of disorder and noise is a profound one and opens up much deeper perspectives than his unassuming demonstration with the magnetized cubes suggests at first sight. Of course everything depends now on the question whether we will be able to define a logical operator that would represent a distribution not of values but of closed value-systems. It will not be necessary to discuss value-distribution« (Günther 1976, zitiert nach der Onlineversion, verfügbar unter [http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg\\_bibliographie.htm](http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg_bibliographie.htm)).

Reflexionsbeziehungen basieren, dann sind sie weder Subjekt noch Objekt:

»Das System als Differenz ist definitionsgemäß kein ›Ding‹, kein Raum, keine Hülle, kein Be-Inhalter. Es ist, wenn man so will, ein transklassisches ›Unjekt‹, über das sich mit herkömmlichen Erkenntnismöglichkeiten kaum reden lässt. Im Duktus der negativen Theologie ist es wie Gott, von dem man nichts aussagen kann, ohne ihn einzuschränken, ohne seine Andersheit zu verkennen. Und hier ist es ein ›Ununterschiedenes‹, das (paradox) nur als Unterschiedenes unterschieden (ideiert) werden kann – hängend an der Konstruktion eines Beobachters, der Unterscheidung und Bezeichnung handhabt, aber selbst (genommen als System) hinter seinen Operationen verschwindet und nur so etwas wie die Spur basaler Selbstreferenz hinterlässt – als irgendwie Situiert-sein in einer Zusammengehörigkeit, die wiederum nicht ›Ding‹ ist, sondern die Reproduktion von Differenz. [...] Das Problem zeigt sich auch, wenn man nach der Form des Systems fragt. Die beobachtungsleitende Unterscheidung ist System/Umwelt, die bekannte Formel:  $\text{System} = \text{System/Umwelt}$ , wobei das Zeichen Barre als Symbol der Einheit der Differenz fungiert. Anders ausgedrückt: Die Einheit der Unterscheidung ist: Differenz, das in der Unterscheidung Ausgeschlossene ersichtlich: das System als Einheit«. <sup>23</sup>

Insofern man den systemtheoretischen Beobachter nicht in einer Weise essentialisiert, in der man Systeme fälschlicherweise als transzendente Subjekte begreift, <sup>24</sup> und stattdessen mit Günther ihre Koproduktion auf Basis polykontexturaler Reflexionsverhältnisse mitdenkt, stellt die systemtheoretische Reflexion ein hilfreiches Instrument dar, um die Eigenarten der quantentheoretischen Theoriebewegungen mit einer hohen analytischen Schärfe nachzuzeichnen. <sup>25</sup>

Die Systemtheorie pointiert die Tatsache der Koproduktion und lässt deutlich werden, dass außerhalb von Systemen immer schon mehr ist als einfach nur Unordnung. Hierdurch wird einer autistischen Rezeption des Systembegriffs, die zum Bild selbstgenügsamer

<sup>23</sup> Fuchs/Hoegl (2011).

<sup>24</sup> Siehe in diesem Sinne etwa die Kritik von Kastl (1998) an Luhmanns Autopoiesis-Konzept.

<sup>25</sup> Um es mit Baecker zu pointieren »Der Systembegriff« ist »kein Begriff der Lösung aller Probleme, sondern ein Begriff der Bestimmung und Schärfung aller Probleme, mit denen es Beobachter im Umgang mit der Komplexität selbstorganisierender Prozesse aktuell zu tun haben« (Baecker 2007, 12).

Monaden führt, eine Absage erteilt. Letztlich lässt sich die Systemtheorie nur angemessen verstehen, wenn sie in eine Kommunikationstheorie eingebettet wird, da erst die (wechselseitige) Reflexion des Anderen den Ausgangspunkt für die deontische Bewegung bildet, aus der dann Systeme und Beobachter emergieren können.<sup>26</sup> Aus diesem Grunde versteht eine solchermaßen verstandene Systemtheorie ihre zentrale Aufgabe in der Entfaltung der Paradoxie des Beobachters.

Zugleich ergibt sich hiermit ein systemisches Verständnis emergenter Phänomene.<sup>27</sup> Das Konzept der Emergenz lässt sich jetzt so verstehen, dass im Prozess einer Reflexion Ordnungsparameter entstehen, die nicht (allein) durch das Sein der konstituierenden Elemente gedeckt sind. Hiermit entstehen (neue) Strukturen, die selbst wieder als Elemente für weitere Reflexionsprozesse – und damit weiterer Emergenz – fungieren können. Wir begegnen hier komplexen Prozessen ineinander verschachtelter Reflexionsverhältnisse, in denen nicht von vornherein festgelegt ist, was in welchem Kontext als Element erscheint. Die Bestimmung von dem, was Element und was Kontext ist, geschieht systemrelativ, also jeweils in Bezug auf den Auswahlbereich, den ein systemischer Zusammenhang für seine eigene Reproduktion wählt.

26 In diesem Sinne ließe sich dann Baeckers (1999) »Form und Formen der Kommunikation« auch als ein kommunikationstheoretischer Umbau des Formkalküls von Spencer-Brown verstehen, der dann aus guten Gründen nur noch wenig mit diesem gemein haben kann.

27 In Erklärungen, welche sich unter dem Stichwort der »Emergenz« zusammenfassen lassen, werden die zu erklärenden Phänomenbereiche in einer modalen, nicht mehr jedoch in einer kausalen Beziehung zueinander gesehen. Die theoretische Leerstelle der Ermöglichungsbeziehung fungiert hier gleichsam als ein semantischer Operator, der anzeigt, dass es weitergeht. Der Trick besteht hier sozusagen darin, an der strengen kausalen Schließung der Denkformen festzuhalten. Zugleich hält man sich dennoch eine Möglichkeit offen, deren Grenzen zu unterlaufen, ohne dabei jedoch sagen zu müssen, wie dies genau geschieht. Entsprechend könnte man sagen: Der Begriff Emergenz steht hier sozusagen als Metapher für die Notwendigkeit einer Brücke zwischen den Gegenstandsbereichen, ohne dabei die Trennung zwischen den kausalen Denkformen unterschiedlicher Monokontexturen wirklich aufgeben zu können. Emergenz erklärt gewissermaßen dort, wo nicht erklärt werden kann. Die Idee der Emergenz reflektiert sozusagen das Eingeständnis der Wissenschaft, dass man mit den eigenen Bordmitteln – also auf Basis der bislang getroffenen Unterscheidungen – nicht weiterkommt. Unweigerlich stoßen wir hier an die Grenze der modernen Unterscheidung einer (klassischen) Wissenschaft und einer Metaphysik, die sich aus transklassischen Reflexionsbeziehungen ergibt und entsprechend eine Negativsprache benötigt.



Hieraus folgt mit Luhmann die Einsicht, dass »Systeme höherer (emergenter) Ordnung von geringerer Komplexität sein können als Systeme niedriger Ordnung, da sie Einheit und Zahl der Elemente, aus denen sie bestehen, selbst bestimmen, also in ihrer Eigenkomplexität unabhängig sind von ihrem Realitätsunterbau. [...] Emergenz ist demnach nicht einfach Akkumulation von Komplexität, sondern Unterbrechung und Neubeginn des Aufbaus von Komplexität«. <sup>28</sup> Hieraus ergibt sich dann die wichtige Konsequenz, dass Systeme ein höheres reflexives Potential haben können als das Ganze, in das sie eingebettet zu denken sind. <sup>29</sup>

<sup>28</sup> Luhmann (1993, 43 f.).

<sup>29</sup> Um es mit Günther auszudrücken: »On the other hand, when we speak of individual centers of self-reflection in the world and call them subjects we obviously do not refer to retroverted self-reflection. Such individual centers have, as we know very well, a genuine environment (which the Universe has not!) and what they reflect is this very environment. It stands to reason that these systems of self-reflection with centers of their own could not behave as they do unless they are capable of ›drawing a line‹ between themselves and their environment. We repeat that this is something the Universe as a totality cannot do. It leads to the surprising conclusion that parts of the Universe have a higher reflective power than the whole of it, as has been recognized for a long time. In Hegel's logic the phenomenon of reflection is subdivided into three parts: He defines them as:

a) retroverted reflection (Reflexion-in-sich) b) transverted reflection (Reflexion-in-Anderes) c) retroverted reflection of retroversion and transversion (Reflexion-in-sich der Reflexion-in-sich und Anderes).

Section (a) represents the physical system of the external world described by its specific reflective properties. But (b) and (c) signify the additional capacities of reflection which sub-systems of the Universe must possess if they are to be called subjects.

This shows that the early philosophic theory of reflection is still ahead of the present logical state of cybernetics. We talk about self-organizing systems and their environments; but Hegel's distinction between (a), (b) and (c) shows that this is not enough. A self-reflective system which shows genuine traits of subjective behavior must be capable of distinguishing between two types of environment and be able to react accordingly. First it must reflect an ›outside‹ environment which lies beyond its own adiabatic shell and second it must be capable of treating (b) as an environment to (c). [...] If there was no such environment, i.e., if they were locked in their initial position no structure could originate. But it is equally obvious that a second environment is required as place of origin of the ›noise‹. In our example the three orders (a), (b) and (c) are rather haphazardly thrown together. They do not represent a fully organized system of reflection – although there is reflection of a very artful kind –

*Entfaltung der Paradoxie des Dualismus*

Im Prinzip lässt sich schon das Bohrsche Komplementaritätsprinzip als eine polykontexturale Beschreibung der vertrackten Verhältnisse im Doppelspaltexperiment lesen. Von einem logischen Ort aus gesehen gilt die Wellenbeschreibung, von einem anderen Standpunkt die Teilchenbeschreibung. Beide Beschreibungen sind weder aufeinander logisch reduzierbar noch kann ihre Unvereinbarkeit als eine Falsifikation der jeweils anderen Perspektive verstanden werden. Sie sind vielmehr komplementär zueinander zu sehen und stehen für unterschiedliche logische Räume, die im Sinne des Ganzen zusammenzudenken sind. Die Bezugsprobleme der Quantentheorie erzwingen hier Kausalitäts- und Bedingungsbeziehungen standortabhängig zu reflektieren. Das für die zweiwertige Logik geltende Gesetz des ausgeschlossenen Dritten ist hier im Sinne einer mehrwertigen Reflexionsperspektive zu überschreiten, in der dann gilt: »sowohl als auch«.<sup>30</sup>

Aus der reflexionslogischen Perspektive stellen Quantensysteme keine Objekte dar und entsprechend lässt sich die Beobachterproblematik der Quantenphysik als ein Artefakt einer monokontexturalen Beschreibung verstehen, die komplexe Beobachtungsverhältnisse als Subjekt-Objekt-Beziehungen zu fassen versucht. Die Auseinandersetzung um die richtige Interpretation der Quantentheorie ließe sich hiermit als eine Entfaltung der Paradoxie des Beobachters vor

but the arrangement gives at least an approximate idea of what is meant when we say that a system showing subjective traits of behavior must have an inner and an outer environment. And it must have the inherent ability to distinguish between the two.

This leads us back to transjunction and to our interpretation of transjunctive values as operations of rejection. We stated that if a system is rejected the value which acts as rejector places itself outside of it. By doing so, it establishes a boundary or a logically closed surface for the rejected system. In other words: it makes a distinction between the system and something else, i.e., an environment« (Günther 1976, zitiert nach der Onlineversion, verfügbar unter [http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg\\_bibliographie.htm](http://www.vordenker.de/ggphilosophy/gg_bibliographie.htm)).

- 30 Es verwundert in diesem Sinne dann auch nicht, dass Quantenphysiker schon früh dazu neigen, das Willensproblem unter einer polykontexturalen Perspektive zu reflektieren: »Von außen betrachtet ist der Wille kausal determiniert, von innen betrachtet ist der Wille frei. Mit der Festlegung dieses Sachverhaltes erledigt sich das Problem der Willensfreiheit. Es ist nur dadurch entstanden, dass man nicht darauf geachtet hat, den Standpunkt der Betrachtung ausdrücklich festzulegen und einzuhalten«. Max Planck, 1946 (hier zitiert nach Watzlawick 1978).

dem Hintergrund einer positiv-sprachlichen Beschreibung, die der Subjekt-Objekt-Dichotomie nicht entkommen kann, reformulieren.

Versuchen wir diesen Gedanken im Folgenden etwas ausführlicher vor dem Hintergrund der bislang geleisteten Rekonstruktion zu entfalten. Auf diese Weise lässt sich die Abarbeitung an der Interpretation der Quantentheorie als eine systematische Entfaltung der Paradoxie des Beobachters verstehen.

Eine solche Reformulierung lässt sich gut mit René Descartes beginnen, denn Descartes steht für den Durchbruch des modernen Wissenschaftsverständnisses, das auf kausale Erklärungen setzt und teleologischen Erklärungen eine Absage erteilt. Die Welt und ihre Gegenstände werden nun nicht mehr auf ein verborgenes (göttliches) Ziel hin ausgerichtet gesehen. Vielmehr sind die Dinge innerhalb der Objektwelt jetzt mechanisch, das heißt als Resultat einfacher physikalischer Kräfte und Wirkungen zu verstehen. Die Wissenschaft kommt nun als erklärende Wissenschaft zu sich selbst, um sich von jetzt an gegenüber allen anderen Erklärungsansprüchen abzusetzen – vor allem gegenüber der Metaphysik. Folgerichtig spielen in Descartes' Philosophie auch physiologische Denkmodelle eine wichtige Rolle. Der menschliche Körper mit seinem Gehirn wird entsprechend als eine Gliedermaschine betrachtet, die gleich einem Roboter funktioniert.

Wir finden in Descartes einen Beobachter vor, der nichts anderes tut, als zwischen innen und außen zu unterscheiden, um genau durch diese Operation sich selbst als Beobachter hervorzubringen. Die Unterscheidung von Selbst- und Fremdreferenz konstituiert den Beobachter und sobald dieser unterschieden ist, kann zwischen innen und außen, Subjekt und Objekt unterschieden werden. Das Entscheidende an dieser Perspektive ist nun, dass das Erkennen keine andere Wahl mehr hat, als durch Bezeichnen eine Unterscheidung zu treffen, um dann zwischen den beiden Grenzen der Unterscheidung hin- und herzapendeln, also entweder die Innenseite oder die Außenseite zu bezeichnen, sich also entweder selbstreferenziell als Subjekt zu konstituieren oder fremdreferenziell eine Außenwelt zu behaupten.

Formtheoretisch gesprochen begegnen wir hier der Figur des re-entry, die eine Oszillator-Funktion, nämlich das Pendeln zwischen den Referenzen ›innen‹ und ›außen‹ als paradoxe Figur hervorbringt.<sup>31</sup>

31 Immer wenn eine Beobachtung sich selbst zum Gegenstand macht, wird auf operativer Ebene die Bewegung des Hineinnehmens der Unterscheidung in sich selbst vollzogen. Dieser Vorgang wird von Spencer-Brown (2005) als re-entry bezeichnet. Die mit der Unterscheidung zwischen etwas und dem unmarked space gezogene Grenze wird gleichsam immer wieder untertunnelt und so für die Konstitution eines Eigenwerts genutzt,

Mit der Sprache wird die Subjekt-Prädikat-Objekt-Relation dann sowohl grammatisch als auch semantisch institutionalisiert, sodass auch hier kein Entkommen aus dem Prozess des Unterscheidens mehr möglich ist. Gleiches gilt für das Bewusstsein. Als ein sich selbst reflektierender Prozess verfängt es sich zwangsläufig in jenem infiniten Regress, entsprechend dem sich jeder Beobachter, der Wahrnehmung beobachtet, durch diese Operation zugleich als ein inneres Seelenwesen hervorzubringen scheint, welches dann selbst wiederum mit

der nun gleichsam als Artefakt dieses Prozesses ausflaggt. Die Figur ist paradox, denn wie kann etwas identisch mit sich selbst sein, was doch erst als Produkt seiner selbst entsteht? Entparadoxiert wird dieser Prozess bei Spencer-Brown durch den Verbrauch von Zeit, nämlich indem der Beobachtungsprozess nur dadurch einen sinnvollen Bezug zur Welt herstellen kann, indem er ständig zwischen Selbst- und Fremdreferenz hin- und heroszilliert. Ein Verharren in einer Position oder Stelle würde die Form gleichsam erstarren lassen und die Bedingungen ihrer eigenen Konstitution – das Werden bzw. den Prozess ihrer sich wiederholenden Genese – unterminieren. Der Prozess würde damit zum Ende kommen und hiermit würden auch die mit dem Beobachtungsprozess entstehenden Gestaltungen verschwinden.

Der Verweis auf den Formkalkül ist in diesem Zusammenhang mehr als eine Gedankenspielerlei, denn er kann hier helfen, ein Verständnis von der dichotomen Dynamik von Beobachtungsprozessen zu gewinnen. Formtheoretisch erscheinen Subjekt und Objekt – bzw. systemtheoretisch gesprochen: Selbst- und Fremdreferenz – als die paradoxe Form der Einheit einer Differenz. Wenn man jedoch eine Beobachtung unter dem Blickwinkel ihrer eigenen Prozessualität betrachtet, nämlich als ein kontinuierliches Geschehen, das als Produkt seines Operierens Muster und Identitäten in einer Kette aufeinanderfolgender Ereignisse ausflaggen lässt, verschwindet die Paradoxie. Um hier wieder mit Fuchs und Hoegl zu sprechen: »Durch den Formalismus der ›Laws of Form‹ betrachtet, erscheinen Paradoxien als unendlich in sich selbst wieder eintretende Unterscheidungen, mithin als Gleichungen, die sich nicht in einen der beiden möglichen Zustände markiert oder nicht-markiert auflösen lassen. [...] Wenn wir auch in einer unendlichen Gleichung nicht mehr wissen können, wo wir uns in der Form befinden, wir also nicht die arithmetischen Schritte zurück gehen können, so ist es gleichwohl möglich, algebraische Schritte abzuzählen, das heißt Muster zu finden, die als Einspiegelungen des gesamten Ausdrucks gedeutet werden können. Die Schrift der Form ermöglicht somit ein Rechnen mit der ›Selbstähnlichkeit‹ [...] unendlicher Ausdrücke, mit der musterhaften Ähnlichkeit von isolierbaren Sequenzen mit dem gesamten, unendlichen Arrangement, vergleichbar mit dem Grundton einer schwingenden Membran oder Eigenwerten von rekursiven Variationen« (Fuchs/Hoegl 2011, 194).

einem Sensorium ausgestattet zu denken ist – denn ansonsten ließe sich ja nicht beobachten, wie beobachtet wird, dass beobachtet wird.

Mit der Thematik der Selbstbeobachtung begegnen wir unweigerlich den Paradoxien des Wiedereintritts der Form in die Form. Immer wenn ein Beobachtungsprozess sich selbst zum Gegenstand nimmt, wird auf der operativen Ebene die Bewegung des Hineinnehmens der Unterscheidung in sich selbst vollzogen. Inhärent in die Operation des Unterscheidens eingelassen, entstehen nun der materialistische Determinismus und der das Geistige betonende Solipsismus als zwei denkbare Versionen von Welt. Ersterer geht als vermeintlich realistische Position davon aus, dass die ganze Welt gleich einem Uhrwerk im Prinzip eine riesige Maschine sei. Ein äußerer Beobachter, Gott oder der Laplacesche Dämon, könne in Kenntnis der Naturgesetze den Ablauf der Welt für alle Zeiten berechnen. Ein fühlendes, wahrnehmendes Ich oder Subjekt kommt in diesem Weltbild nicht vor. Als Gegenpol erscheint dann der subjektive Idealismus, demzufolge das Subjekt gleichsam die ganze Welt erträumt. Die vermeintliche Außenwelt existiert hier nur in unserer Phantasie. Ludwig Wittgenstein kam nach konsequenter philosophischer Überlegung bekanntlich zu dem Ergebnis, dass streng genommen der Solipsismus mit dem Realismus zusammenfallen müsse, da das metaphysische Subjekt nicht als ein Teil, sondern als eine Grenze der Welt aufzufassen sei, die durch eine Unterscheidungsoperation konstituiert wird.<sup>32</sup>

32 »5.631 Das denkende, vorstellende, Subjekt gibt es nicht. Wenn ich ein Buch schriebe ›Die Welt, wie ich sie vorfand‹, so wäre darin auch über meinen Leib zu berichten und zu sagen, welche Glieder meinem Willen unterstehen und welche nicht, etc., dies ist nämlich eine Methode, das Subjekt zu isolieren, oder vielmehr zu zeigen, daß es in einem wichtigen Sinne kein Subjekt gibt: Von ihm allein nämlich könnte in diesem Buch *nicht* die Rede sein. –

5.632 Das Subjekt gehört nicht zur Welt, sondern es ist eine Grenze der Welt.

5.633 Wo *in* der Welt ist ein metaphysisches Subjekt zu merken? Du sagst, es verhält sich hier ganz wie mit Auge und Gesichtsfeld. Aber das Auge siehst Du wirklich nicht. Und nichts am *Gesichtsfeld* läßt darauf schließen, daß es von einem Auge gesehen wird. [...]

5.64 Hier sieht man, daß der Solipsismus, streng durchgeführt, mit dem reinen Realismus zusammenfällt. Das Ich des Solipsismus schrumpft zum ausdehnungslosen Punkt zusammen, und es bleibt die ihm koordinierte Realität.

5.641 Es gibt also wirklich einen Sinn, in welchem in der Philosophie nichtpsychologisch vom Ich die Rede sein kann. Das Ich tritt in die Philosophie dadurch ein, daß ›die Welt meine Welt ist‹.

Das philosophische Ich ist nicht der Mensch, nicht der menschliche Kör-

Wir begegnen hier den Paradoxien eines Monismus, der Geist und Natur als Einheit unterscheiden will, dies aber nur realisieren kann, indem er eine Praxis vollzieht, die Subjekt und Objekt als Dualität hervorbringt.

Schauen wir nun etwas ausführlicher auf die Eigenarten von Descartes' Lösung. Bekanntlich postuliert er eine Trennung von Geist bzw. einer Seele und den deterministisch ablaufenden materiellen Prozessen. Die Gesetze der Letzteren lassen sich prinzipiell durch wissenschaftliche Methoden erkunden. Die Seele selbst stehe jedoch außerhalb dieser Prozesse. Die Erforschung der seelischen Dynamik gehört entsprechend nicht mehr in die Sphäre der Physik, sondern wird der Theologie oder Metaphysik überantwortet. Dieser Dualismus erschafft eine Reihe von epistemologischen Problemen – etwa die Frage, wie ein unabhängiges Seelenwesen mit der materiellen Welt wechselwirken kann, ohne die Gesetze der Physik (z. B. den Energieerhaltungssatz) zu verletzen. Auch lässt sich mit Blick auf die Erklärungskraft des Dualismus mit Wittgenstein feststellen, dass die »Annahme« einer unabhängigen Seele gar nicht das leistet, »was man immer mit ihr erreichen wollte«.<sup>33</sup> Philosophisch ergibt Descartes' Antwort nur eine Scheinlösung. Aus soziologischer Perspektive ist hier jedoch feststellen, dass sich durch diesen Trick die Subjekt-Objekt-Paradoxie so weit besänftigen lässt, dass man ungestört mit der Praxis von Wissenschaft beginnen kann. Man braucht sich nicht unnötig mit den Schwierigkeiten des Beobachters herumzuschlagen und entledigt sich nebenbei auch der lästigen Problemen der Metaphysik.

Die Paradoxie der Subjekt-Objekt-Dichotomie wird beruhigt (jedoch nicht aufgehoben), indem man einen Monismus postuliert, sich diesem jedoch jetzt mit der eigenen Forschungspraxis aus der Perspektive eines erkenntnistheoretischen Dualismus nähert und gleichzeitig die hiermit verbundenen erkenntnistheoretischen Probleme ignoriert.

Dieser ›Trick‹ funktioniert hervorragend in Forschungsfeldern, die mit »Theorien mittlerer Reichweite« bearbeitet werden können,<sup>34</sup> also in allen Bereichen, die raum-zeitlich begrenzte Zusammenhänge beschreiben und die zudem nicht allzu sehr durch nicht-lineare Wechselwirkungen formatiert werden.

per, oder die menschliche Seele, von der die Psychologie handelt, sondern das metaphysische Subjekt, die Grenze – nicht ein Teil – der Welt« (Wittgenstein 1990).

33 Wittgenstein (1990, 6.4312).

34 Engl. Theories of Middle Range. Siehe für die Soziologie Merton (1968 [1948]).

Die Quantentheorie stellt jedoch eine Theorie mit Universalitätsanspruch dar und entsprechend kann hier – wie auch in den Kognitionswissenschaften und der Systemtheorie – der Trick nicht mehr funktionieren, den forschungspraktisch notwendigen Dualismus dadurch zu reifizieren, dass man ihn in Hinblick auf die eigene Forschungspraxis negiert.<sup>35</sup>

Insofern die Quantentheorie sich nicht als eine Systemtheorie begreift, die davon ausgeht, dass sich die hiermit verbundenen Probleme positiv-sprachlich nicht lösen lassen, bleibt nichts anders übrig, als das Dilemma der Interpretation solch komplexer Verhältnisse in Form einer Kette von Paradoxien zu entfalten.

In jedem Schritt der Paradoxieentfaltung werden zunächst bestimmte Ontologien ausgeflaggt, also Seinsverhältnisse positiv-sprachlich im Sinne der Subjekt-Objekt-Dichotomie postuliert, um dann jedoch in einem nachfolgenden Schritt feststellen zu müssen, dass das Postulierte durch die Theorie nicht gedeckt ist. Die Interpretation der hiermit aufgespannten Theorieranlage kommt damit in eine Bewegung, die epistemisch wie auch ontologisch zwischen einer subjektivistischen, objektivistischen oder dualistischen Perspektive oszilliert.

Im Common Sense unserer Alltagsepistemologie gilt für viele Quantenexperimente der offensichtliche (weil sinnlich erlebbare) Befund, dass die Realität eine andere ist, wenn man hinschaut, als wenn man sie nicht beobachtet. Dies verleitet zu der Auffassung, dass ein Beobachter oder gar ein Subjekt die Wirklichkeit erschaffe. Im Hinblick auf die Verortung innerhalb der Dualität befinden wir uns nun auf dem Subjekt-Pol. Eine ernsthafte physikalische Betrachtung kommt jetzt aber zu dem Schluss, dass sich der Beobachter nicht identifizieren lässt. Eine Messung an einem Quantenexperiment führt auch dann zu einem Ergebnis, wenn keiner hinschaut (spätestens die Ergebnisse aus der Dekohärenz-Forschung lassen dies deutlich werden). Außerdem führt das Postulat eines Beobachters zu dem Problem des infiniten Regresses (was ist die Rolle weiterer Beobachter, welche die Beobachtung beobachten?).

Mit der Ensemble-Interpretation von Born, insbesondere dann aber auch in der Version von Popper, befinden wir uns nun innerhalb der epistemisch-ontologischen Oszillation auf dem Objekt-Pol. Die

35 Um das Dilemma mit Schrödinger von der anderen Seite, nämlich der des gescheiterten Monismus auszudrücken: »Der Grund dafür, daß unser fühlendes, wahrnehmendes und denkendes Ich in unserem naturwissenschaftlichen Weltbild nirgends auftritt, kann leicht in fünf Worten ausgedrückt werden: Es ist selbst dieses Weltbild. Es ist mit dem Ganzen identisch und kann deshalb nicht als Teil darin enthalten sein« (Schrödinger 1959, 40).

eigentliche Ursache der experimentellen Befunde wird hier in streuenden Teilchen gesehen. Entsprechend einer realistischen Position sollen diese unabhängig davon existieren, ob sie beobachtet werden oder nicht. Die Paradoxien der Quantentheorie werden hiermit zunächst als ein Artefakt von fälschlicherweise subjektiv interpretierten objektiven Wahrscheinlichkeiten verstanden. Diese Perspektive ist jedoch nicht mit dem Phänomen der Interferenz von Wahrscheinlichkeitswellen auf Basis der Schrödinger-Gleichung in Einklang zu bringen, denn diese beruht auf der Verrechnung negativer Wahrscheinlichkeiten aus einem imaginären Raum.

In einer weiteren Bewegung lässt sich die Annahme einer unabhängigen Realität dadurch retten, dass man die Theorie für unvollständig erklärt. Dies war Einsteins Intention, als er mit dem EPR-Gedankenexperiment darauf hingewiesen hat, wie absurd die Annahme verschränkter Teilchen sei, die über eine nicht-lokale Wechselwirkung als miteinander verbunden zu denken sind.

Da aber Verschränkung unmittelbar aus der Theorie folgt und sich später im Experiment auch als eine physikalische Realität gezeigt hat, liegt es nahe, einen Mittelweg zu versuchen. In diesem Sinne ist jetzt die Bewegung der Kopenhagener Interpretation nachvollziehbar, die sich zugleich auf den Subjekt- wie auch den Objekt-Pol bezieht, um damit dem Beobachtungsprozess eine konstitutive Rolle zuzugestehen. Wir erinnern uns daran, dass der entscheidende Durchbruch der Quantentheorie darin bestand, auf die ex-ante-Annahme von Teilchenbahnen zu verzichten und nur dem, was beobachtet und messbar ist, einen Realitätsstatus zuzugestehen.

Schauen wir uns mit Heisenberg die Eigenarten dieser Positionierung nochmals etwas genauer an:

»Die Wahrscheinlichkeitsfunktion vereinigt objektive und subjektive Elemente. Sie enthält Aussagen über Wahrscheinlichkeiten oder besser Tendenzen (Potentia in der aristotelischen Philosophie), und diese Aussagen sind völlig objektiv, sie hängen nicht von irgendeinem Beobachter ab. Außerdem enthält sie Aussagen über unsere Kenntnis des Systems, die natürlich subjektiv sein müssen, insofern sie ja für verschiedene Beobachter verschieden sein müssen. [...] Die Beobachtung selbst ändert die Wahrscheinlichkeitsfunktion unstetig. Sie wählt von allen möglichen Vorgängen den aus, der tatsächlich stattgefunden hat. Da sich durch die Beobachtung unsere Kenntnis des Systems unstetig geändert hat, hat sich auch ihre mathematische Darstellung unstetig geändert, und wir sprechen daher von einem ›Quantensprung‹. Wenn man aus dem alten Spruch ›Natura non facit saltus‹ eine Kritik der Quantentheorie ableiten wollte, so können wir antworten, daß



sich unsere Kenntnis doch sicher plötzlich ändern kann und daß eben diese Tatsache, die unstetige Änderung unserer Erkenntnis, den Gebrauch des Begriffs ›Quantensprung‹ rechtfertigt. Der Übergang vom Möglichen und Faktischen findet also während des Beobachtungsaktes statt. Wenn wir beschreiben wollen, was in einem Atomvorgang geschieht, müssen wir davon ausgehen, dass das Wort ›geschieht‹ sich nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation zwischen zwei Beobachtungen. Es bezeichnet dabei den physikalischen, nicht den psychischen Akt der Beobachtung, und wir können sagen, daß der Übergang vom Möglichen zum Faktischen stattfindet, sobald die Wechselwirkung des Gegenstandes mit der Meßanordnung und damit mit der übrigen Welt ins Spiel gekommen ist«. <sup>36</sup>

Die Paradoxie wird hier in einem ontologischen und epistemischen »gerrymandering« entfaltet. <sup>37</sup> Im Spannungsfeld von ›Wahrscheinlichkeit‹ und ›Wissen‹ taucht hier ein Beobachter auf, der die Wellenfunktion zum Kollaps bringt und damit sprunghaft zu ›Erkenntnis‹ führt. Dann wird jedoch zurückgerudert und betont, dass der Beobachtungsprozess physischer und nicht psychischer Natur sei. Der Subjekt-Pol wird damit zugleich reifiziert wie zurückgewiesen. Mit Blick auf die empirischen Sachverhalte ergibt dieser ontologische Schleuderkurs durchaus einen Sinn, denn die quantenphysikalische Wirklichkeit scheint sich genau so merkwürdig zu verhalten, wie von Heisenberg beschrieben. Dies mag zunächst paradox anmuten, doch mit Bohr lässt sich die Paradoxie ruhigstellen, indem man als Schutzschild eine epistemische Erkenntnisranke postuliert, die besagt, dass man einfach nicht mehr wissen könne.

Ein gewichtiges Problem bleibt jedoch bestehen: Wellenfunktionen kollabieren nicht. Ihr Zusammenbruch durch Beobachtung ist nicht durch die Schrödinger-Gleichung oder einen anderen quantentheoretischen Formalismus gedeckt. Es bleibt jetzt nichts anderes übrig, als mit v. Neumann die Sache pragmatisch anzugehen und in einer physikalischen Beschreibung, die keine Stelle für einen Schnitt vorsieht, einen willkürlichen Schnitt zu setzen.

Man kann sich dem Objekt-Pol jetzt von einer anderen Seite nähern, indem man die mit der  $\psi$ -Funktion implizierten Wellen als eine objektive physikalische Realität ansieht (so de Broglie und der frühe Schrödinger). Doch die Hoffnung, die Wellenfunktion  $\psi$  ›klassisch‹ als Potenzialwelle deuten zu können, lässt sich ebenfalls nicht halten. Da  $\psi$  in jedem Term der Schrödinger-Gleichung auftaucht, lässt sich

<sup>36</sup> Heisenberg (2007, 78 ff.).

<sup>37</sup> Woolgar (1985).

$\psi$  nicht in einer Weise isolieren, dass seine Bedeutung in einfacher Weise verständlich wird, etwa indem ihm eine konkrete physikalische Dimension wie Masse, Ladung, Impuls, Energie etc. zugewiesen werden könnte. Man findet mit  $\psi$  jetzt bestenfalls ›Wellen von nichts‹ vor, was jedoch den Versuch einer realistischen Interpretation wieder ruiniert.

Eine weitere Variante, die Paradoxie der Subjekt-Objekt-Dichotomie zu entfallen, besteht darin, die beiden Pole zu einem extremen Dualismus auseinanderzuziehen, um dann den Subjekt-Pol einfach zu ignorieren. Genau dies geschieht in der Everett'schen Viele-Welten-Interpretation. In den Paralleluniversen der universell geltenden Schrödinger-Gleichung erscheint das Subjekt jetzt nur noch als ein merkwürdiges Artefakt, das der Illusion unterliegt, in nur einer Welt zu leben. Selbstredend ist der physikalische Mechanismus, der zu dieser Täuschung führt, durch die Schrödinger-Gleichung nicht gedeckt, man muss ihn also dem Subjekt zurechnen – aber was ist dann das Subjekt?

Ein weiterer Trick, um den Paradoxien der Quantentheorie zu entgehen, besteht darin, ihren bizarren Charakter auf der einen Ebene anzuerkennen, um auf einer anderen Ebene ihren Geltungsbereich zu bestreiten. Dies geschieht mit der in Kreisen der analytischen Philosophie beliebten Spontaner-Kollaps-Theorie. Man erkennt nun zwar an, dass im subatomaren Bereich nicht-klassische Verhältnisse bestehen, in denen Verschränkung und nicht-lokale Beziehungen vorkommen. Hier herrscht dann das quantenphysikalische Primat, dass sich im Sinne einer Holobewegung die Relata aus den Relationen ergeben und nicht umgekehrt. Gleichzeitig wird jedoch postuliert, dass Wellenfunktionen spontan kollabieren, um hierdurch eine verlässliche Welt zu erhalten, die den objektiven Gesetzen der klassischen Physik gehorcht. Allerdings existiert (bislang) keine einzige physikalische Theorie, die den Mechanismus des spontanen Kollapses erklären könnte. Ex nihilo wird also auch hier ein erklärendes Prinzip zur Geltung gebracht, das streng genommen nichts erklärt. Entweder glaubt man an den Trick oder nicht.

Eine interessantere Entfaltung der Subjekt-Objekt-Dichotomie lässt sich demgegenüber in der Bohmschen Mechanik feststellen. Hier wird sowohl den bewegten Teilchen als auch der Wellenfunktion ein ontologischer Status zugewiesen, demzufolge beide als beobachterunabhängig ›real‹ anzusehen sind. Darüber hinaus kann auf das Hilfskonstrukt ›Wellenkollaps‹ verzichtet werden. Dies führt allerdings zum Modell eines holistischen Universums, in dem einfach alles miteinander über nicht-lokale Beziehungen verbunden ist. Mit der Einsicht, dass man die ›Exowelt‹ nur aus der ›Endoperspektive‹

heraus erkunden kann,<sup>38</sup> führt diese Perspektive zwar zur Hoffnung einer ›impliziten Ordnung‹, die dann jedoch aus prinzipiellen Gründen einer gegenständlichen Erkenntnis verwehrt bleiben muss.

Da aber nun all diese prominenten Deutungsversuche der Quantentheorie das Beobachterproblem umkreisen, ohne es wirklich lösen zu können, lässt sich mit Bateson vermuten, dass die Frage ihrer Interpretation oder Deutung einfach falsch gestellt ist.<sup>39</sup> Unter diesem Blickwinkel erscheint die Tatsache, dass es recht unterschiedliche Lösungsansätze gibt, die alle eine gewisse Plausibilität haben, aber dennoch den gordischen Knoten nicht durchschlagen können, als der eigentlich interessante Befund.

Gehen wir im Folgenden deshalb ausführlicher der Vermutung nach, dass die Quantentheorie in dieser Hinsicht in hohem Maße mit der Systemtheorie verwandt ist. Hierfür spricht schon allein der empirische Erfolg des Dekohärenz-Ansatzes. Dieser gewinnt seine Erklärungskraft dadurch, dass er Quantensysteme als offene Systeme betrachtet. Auf diesem Wege kann das Messproblem – und mit ihm die Annahme willkürlicher Beobachterschnitte – umgangen werden, denn nun erscheint das Rauschen der Umwelt als das Medium, auf dessen Basis sich Quantensysteme als klassische Phänomene manifestieren können. Dies führt zu einer System-Umwelt-Theorie, die individuelle Subsysteme annehmen muss, dann aber zuzugestehen hat, dass sich das Ganze nicht als Summe seiner Teile auffassen lässt.

Wir begegnen hier der Einsicht, dass erst die Ignoranz zwischen den Subsystemen die Bedingung der Möglichkeit von Systemdifferenzierung darstellt. Der Dekohärenz-Ansatz benötigt jedoch eine fortschreitende Sukzession weiterer System/Umwelt-Grenzen, die dann jeweils auf der untergeordneten Ebene die System/Umwelt-

38 Die Begriffe »Exo-« und »Endowelt« wurden von Otto Rössler (1992) geprägt, der seinerseits eine klassische Interpretation der Quantentheorie vorlegt, entsprechend der die Paradoxien der Quantentheorie nur dadurch entstünden, dass wir die Welt eben nur von innen her, also stochastisch und durch die Schnittstellen der Beobachtung verzerrt, untersuchen können.

39 Was Bateson in Hinblick auf das Problem des Bewusstseins in »Geist und Natur. Eine notwendige Einheit« erkannt hat, würde demnach auch für das Beobachterproblem der Quantentheorie gelten: »Es muß einen Grund geben, weshalb diese Fragen niemals beantwortet sind. Ich meine, wir könnten das als ersten Schlüssel zur Antwort verwenden – die historische Tatsache, daß es so viele Menschen versucht haben und keinen Erfolg hatten. Die Antwort muss irgendwo verborgen sein. Es muß so sein: Allein schon das Stellen dieser Frage schickt uns immer auf eine falsche Spur, die den Fragesteller auf Abwege führt. Ein Ablenkungsmanöver« (Bateson 1987, 259 f.).

Grenze bestimmen lassen. Hierdurch wird allerdings das Universum als Ganzes problematisch. Entweder fasst man es als ein geschlossenes System auf – dann kann es allerdings keine klassischen Welten hervorbringen – oder es ist in unendlichen Rekursionen holistisch in sich selbst eingefaltet, um auf diese Weise ständig neue System/Umwelt-Verhältnisse zeitigen zu können.

Innerhalb der Systemtheorie wird diese Beziehung durch den Formkalkül von Spencer-Brown symbolisiert. Die Setzung einer Grenze zwischen System und Umwelt führt zur Unterscheidung einer markierten Innenseite, die jedoch die unmarkierte Außenseite voraussetzt, aus der die Grenze in Koproduktion zwischen innen und außen entsteht. Das re-entry repräsentiert jenes dynamische Untertunneln, das die hiermit erscheinende Form dadurch reproduziert, dass sie einer ständigen dynamischen Veränderung ausgesetzt wird.

Wir treffen hier auf jene ›System-im-System-Paradoxie‹, die bereits Schrödinger in seinem berühmten Aufsatz mit dem Katzenbeispiel formuliert hat. Hier wird deutlich, dass man sich die damit offenbarende Systemik nicht als ein Seinsverhältnis, sondern als ein Reflexionsverhältnis im Sinne von Günther vorzustellen hat. Gegenüber der klassischen führt die quantentheoretische Beschreibung zu einer beschränkten Anzahl von Freiheitsgraden und damit auch zu einer beschränkten Möglichkeit des Wissens. Dies bringt aber die Konsequenz mit sich, dass zwei miteinander verschränkte Systeme weniger Freiheitsgrade besitzen, als nötig wäre für die Definition der beiden systeminternen Relationen und der Beziehungsrelationen innerhalb der beiden Systeme. Systeme werden durch Interaktion (die mit Verschränkungen einhergeht) unberechenbar, was jedoch entsprechend dem order-from-noise-Prinzip die Bildung und Stabilisierung weiterer Systeme nährt, ja geradezu die Voraussetzung für ihre Entstehung darstellt.

Schauen wir nochmals auf Schrödingers Argumentation in dem berühmten Aufsatz mit dem Katzenbeispiel, da hier das Dilemma einer in dieser Weise informierten systemtheoretischen Reflexion deutlich wird:

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

unbefriedigt lässt – obwohl der Gesamtkatalog maximal ist, das heißt obwohl die  $\psi$ -Funktion des Gesamtsystems bekannt ist.«<sup>40</sup>

»Von der Form, in der man die  $\psi$ -Funktion zuletzt gekannt, zu der neuen, in der sie wieder auftritt, führt kein stetiger Weg – er führte eben durch die Vernichtung. Kontrastiert man die zwei Formen, so erscheint die Sache als ein Sprung. In Wahrheit liegt ein wichtiges Geschehen dazwischen, nämlich die Einwirkung der zwei Körper aufeinander, während welcher das Objekt keinen privaten Erwartungskatalog besaß und auch keinen Anspruch darauf hatte, weil es nicht selbstständig war.«<sup>41</sup>

»Die Verschränkung ist nicht zeitbeständig. Sie bleibt zwar dauernd eine eindeutige Verschränkung aller Variablen, aber die Zuordnung wechselt.«<sup>42</sup>

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

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

Die Quantentheorie postuliert beschränkte Freiheitsgrade, beschränkte Möglichkeiten des Wissens. Systeme sind über ihre Zwischenbeziehungen miteinander verschränkt, wobei jedoch aufgrund der begrenzten Freiheitsgrade diese Beziehungen wiederum als kontingent zu sehen sind. Diese Kontingenz wiederum ist die Bedingung der Möglichkeit, dass überhaupt Systeme in Form separierbarer erscheinender Einheiten identifiziert werden können – nämlich als ein bestimmter Systemzusammenhang, der als eine ausgeflaggte konkrete Beobachtung eben so und nicht als ein anders bestimmter (gemessener oder beobachteter) Zusammenhang erscheint. Der System-im-System-Zusammenhang der verschränkten  $\psi$ -Funktion erscheint

<sup>40</sup> Schrödinger (1935, 826).

<sup>41</sup> Ebd., 828.

<sup>42</sup> Ebd., 847.

nun als ein dynamisches Feld, das in seinen Möglichkeitshorizonten Trennung und Individuierung sowie Verschränkung in vielfältigen Kombinationen realisieren kann.

Systeme können nur ein begrenztes Maß an Wissen haben. Interagierende Systeme verwenden einen Teil ihres Wissens, um ihre Relationen zu definieren. Aufgrund des begrenzten Gesamtwissens geht die Verschränkung zweier Systeme zugleich mit einer Vernichtung von Wissen innerhalb der beteiligten Systeme einher. Die Interaktion von Systemen geht somit unweigerlich mit der Entstehung von Kontingenz einher, die wiederum zu neuem Systemaufbau, zu einer neuen Zuordnung der Variablen genutzt werden kann.

Wir begegnen hier einer Reflexionsbeziehung, die durch die Vernichtung von Bestimmung, also durch das Negative genährt wird. Deshalb brauchen wir hier auch keinen Beobachter (im Sinne von: da ist jemand, der beobachtet), der die Wellenfunktion kollabieren lässt. Stattdessen begegnen wir einem sukzessiven Prozessgeschehen, das qua Interaktion permanent neue Kontingenzen entstehen lässt, die einer Bestimmung überführt werden müssen.

Unvermeidbar kommt hiermit auch eine informationstheoretische Perspektive mit ins Spiel. Elementare Quantensysteme bestehen aus einem Dual von einem bestimmten und einem unbestimmten Wert, wobei der merkwürdige Zusammenhang besteht, dass erst die Bestimmung des einen den anderen unbestimmt erscheinen lässt. Das Verhältnis von Wissen und Nicht-Wissen ist hiermit durch das Quantensystem konditioniert und stellt damit eine übergreifende Eigenschaft desselben dar. In einem elementaren Quantensystem kann also nur ein Wert bestimmt sein, während der andere unbestimmt bleiben muss, da das System eben nur ein Bit an Information tragen kann. Um es nochmals zu wiederholen: dennoch besteht zwischen beiden Werten ein Zusammenhang, denn erst die Bestimmung des einen lässt den anderen unbestimmt erscheinen. Anders als bei Zufallsprozessen, die klassisch beschrieben werden können, treffen wir hier auf eine Koproduktion von Bestimmtheit und Unbestimmtheit.<sup>43</sup> Das eine

43 »Physikalisch bedeutet dies, dass sich das Quantensystem mit der Wahrscheinlichkeit  $a_0/2$  im Zustand  $= 0$  befindet (den Wert  $>0<$  besitzt) und mit der Wahrscheinlichkeit  $a_1/2$  im Zustand  $1$  (Wert  $>1<$ ). Der Wert des Bits selbst ist damit quantenmechanisch ungewiss, eine Beobachtung wird einen der beiden Werte mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit liefern. Ist aber mit dieser Ungewissheit nicht auch ein Verlust an Information verbunden?

In der Quantenmechanik ist hier strikt zwischen Superposition und dem klassischen Gemisch zweier Möglichkeiten zu unterscheiden. Wenn wir zum Beispiel an einem Ensemble von Photonen mit gleicher Wahrscheinlichkeit horizontale und vertikale Polarisationsdetektieren, so kann es

ist nicht ohne das andere zu haben. Das Verhältnis von Wissen und Nicht-Wissen ist hiermit konditioniert, ist also seinerseits bestimmt, denn es ergibt sich als eine verbundene – man könnte ebenso gut sagen holistische – Eigenschaft des übergreifenden Quantensystems.<sup>44</sup>

Aus dieser Perspektive ergibt sich wiederum eine Denkbewegung, welche den Informationsbegriff ontologisiert und dies mit einer Reihe von Experimenten begründen kann, die implizieren, dass wirklich nur etwas in der Welt da ist, wenn man dies prinzipiell wissen kann.<sup>45</sup> Mit Zeilinger heißt es entsprechend:

»Information ist der Urstoff im Universum.«<sup>46</sup>

»Naturgesetze dürfen keinen Unterschied machen zwischen Wirklichkeit und Information.«<sup>47</sup>

Hierdurch erscheint jedoch auf der anderen, der ausgeblendeten Seite, die Frage der Kontextualisierung von Information, also wo und wodurch der Unterschied gemacht wird. Da ein klassisches Medium hierfür selbstredend nicht in Frage kommt, bleiben nur die mit der Schrödinger-Gleichung formulierten ›Wellen von nichts‹ übrig. Da aber ein radikalisierte Informationsbegriff dem Diktum der Kopenhagener Deutung folgt, dass keine Aussagen darüber gemacht werden dürfen, was zwischen den Messungen geschieht, hat es hier

sich dabei um ein inkohärentes Gemisch ohne irgendeinen Informationsgehalt gehandelt haben. Es könnte aber auch eine kohärente Superposition gewesen sein, zum Beispiel:  $(H + V / \sqrt{2} = 45^\circ)$ , das heißt, ein  $45^\circ$  Grad linear polarisiertes Ensemble mit eindeutig definierter Information. Wie wir später sehen, bildet diese Gleichzeitigkeit von Ungewissheit und definierter Information den Grundstein für die Sicherheit der Quantenkryptographie.

Die Möglichkeit der Superposition führt, zusammen mit den daraus folgenden Interferenzphänomenen, zu all den Paradoxa und Interpretationsproblemen der Quantenmechanik« (Weinfurter 2002, 122 f.).

44 »That state does not contain any information about the individuals; all information is contained in joint properties. In fact, now there cannot be any information carried by the individuals because the two bits of information are exhausted by defining that maximally entangled state, and no further possibility exists also to encode information in individuals« (Zeilinger 1999a, 639).

45 Siehe etwa die Delayed-Choice-, die Quantum-Eraser-, die Interferometer- oder die Interferenzexperimente mit größeren Molekülen (ausführlich in Kap. III.4).

46 Zeilinger (2005, 216 f.).

47 Ebd.

auch keinen Sinn mehr, von einer wellenförmigen Quantenmaterie auszugehen, die das Medium darstellt, auf dessen Basis all dies geschieht. Die Argumentation schließt sich hiermit hermetisch ab. Es wird die Paradoxie verdeckt, dass eigentlich in platonischer Manier eine Gleichsetzung von Theorie und Realität vorausgesetzt wird (ohne die mit der Schrödinger-Gleichung postulierten Interferenztërme gibt es keine Verschränkung), was jedoch auf anderer Ebene wieder bestritten werden muss (was zwischen den Messungen geschieht, gibt es nicht).

Auch die Substanzialisierung der Information zu dem Stoff, aus dem die Quantenwelt besteht, bringt nicht jene systemische Gegenbewegung zum Verschwinden, welche den Versuch, die nackte Information zu ontologisieren, zugleich wieder suspendiert.

Raffinierter entfaltet v. Weizsäcker die Subjekt-Objekt-Dichotomie. Auch er erkennt die wichtige Rolle des Informationsbegriffs an, negiert dabei jedoch nicht die Beziehung zwischen Medium und Form. Information erscheint bei ihm jetzt weder als Materie noch als Bewusstsein – sie ist hier also weder dem Objekt- noch dem Subjekt-Pol zuzurechnen. Information erscheint bei ihm vielmehr als die Konstruktion von Gestalt – als Form, die dann die Materie einnehmen und die dann vom Bewusstsein gewusst werden kann. Um mit Günther zu sprechen, als Reflexionsbeziehung ist sie nur negativ-sprachlich zu fassen. Die Beziehung von Sein und Information wird hier jedoch noch nicht als ein systemisches Inklusionsverhältnis begriffen, sondern erscheint in eine hierarchisch gegliederte Dualität ausgelagert. Der philosophisch gebildete v. Weizsäcker begreift sehr wohl, dass der Rückgriff auf einen empirischen Beobachter keinen lauterer Ausweg darstellen kann – denn dieser lässt sich in der Beschreibung nicht finden (den Beobachter als Ding oder Seinsform gibt es hier nicht). Um das Dilemma zu beruhigen, greift er jedoch auf Kants Zaubertrick zurück, ein transzendentes Subjekt zu postulieren, das nun die Bedingung der Möglichkeit darstellt, eine dualistische Erfahrung in einer monistischen Welt zu beschreiben. Wir begegnen hier einer sehr subtilen Form des Dualismus, die an der Grenze einer konstruktivistischen Epistemologie gebaut ist, die vollkommen im Grundlosen gegründet ist. Von Weizsäcker entfaltet die Paradoxie der Quantentheorie auf höchstem Niveau, wohl wissend, dass die »Frage, wie der Beobachter sich selbst beschreiben könnte«, dennoch »offen« bleiben muss.<sup>48</sup>

Die letzte Möglichkeit, sich der Beobachterproblematik zu stellen (oder müsste man nicht sagen: zu entziehen) besteht darin, die Paradoxie anzuerkennen und damit auf eine Hierarchie von Begrün-

48 v. Weizsäcker (1994, 531).



dungsverhältnissen – und damit auch auf eine ontologische Bestimmung – zu verzichten. ›Emergenz‹ wird jetzt zum Schlüsselbegriff. Die Vorstellung hierarchischer Kausalitätsketten wird jetzt aufgegeben zugunsten heterarchischer Ordnungsbeziehungen. Hier wachsen nicht nur bottom up aus Elementen Systeme auf. Umgekehrt können jetzt systemische Dynamiken top down jene Phänomene emergieren lassen, die man ›individuierend‹ als Elemente bezeichnen kann. Hiermit lösen sich praktisch alle Beziehungen auf in bodenlose Welten polykontextural verschachtelter Verhältnisse. »Jeder Ort der Begründung wird in diesem Fundierungsspiel Grund und Begründetes zugleich. Orte sind untereinander weder gleich noch verschieden; sie sind in ihrer Vielheit voneinander geschieden. Die Ortschaft der Orte ist bar jeglicher Bestimmbarkeit«. <sup>49</sup> Naturkonstanten und Naturgesetze – vielleicht sogar die Gravitationskraft – erscheinen jetzt selbst als emergente Phänomene von Ordnungsrelationen, die sich wiederum auf andere Ordnungsrelationen beziehen. Diese Reflexionsverhältnisse nähren sich aus jenen Symmetriebrüchen, die sich aus den immerfort perpetuierenden Relationierungen von Wissen und Nicht-Wissen ergeben.

All dies bleibt unvorstellbar und spottet jeglicher Anschauung, denn all diese Prozesse verlaufen verschränkt und nicht-lokal ab.

Unsere Konzepte von Welt spielen immer in der Anschauung eines dreidimensionalen Raumes, in dem lokale Wechselwirkungen zum Ausdruck kommen. Selbst beim Begriff des Systems und der hieraus abgeleiteten System-Umwelt-Grenze schwingt immer noch eine Behälter-Metapher mit. Unjekte sind nicht vorstellbar, ebenso wenig wie die quantenmechanischen ›Wellen von nichts‹, welche jene Reflexionsbeziehungen hervorbringen, die entsprechend den Einsichten der Quantentheorie unsere Welt gestalten.

Eine solchermaßen informierte Quantentheorie weiß um die Tatsache, dass ein solchermaßen informierter Systembegriff nicht mehr erlaubt, von Beobachtern, Subjekten, Objekten und anderen Dingen zu sprechen. Sie weiß, dass man hier – insofern man nur genau genug hinschaut – auf Leere stoßen würde.

Aus der Systemtheorie folgt, dass wir als informationsverarbeitende Systeme selbst die Welt nur aufgrund jener Selektivität anschneiden können, die sich aus unserer spezifischen Kombination von Wissen und Nicht-Wissen ergibt. Der blinde Fleck bleibt für jedes beobachtende System – und damit auch für das System der Wissenschaft – unhintergebar.

In diesem Sinne wäre dann auch die Einsicht der Konsistente-Geschichten-Theorie konsequent, dass jeder von uns – auch der Quan-

49 Kaehr (1993, 170 f.).

tenphysiker – in einen anderen Realitätsbereich eingesponnen ist und sich die unterschiedlichen Sphären nur teilweise überlappen. Jeder dieser Realitätsbereiche geht dann zwangsläufig mit dem Ausflaggen von Objekten (und Subjekten) einher. Es wird jeweils etwas gesehen, gedacht, reflektiert. Da man es im Fall von Quantensystemen jedoch mit Unjekten zu tun bekommt, besteht vielleicht der einzig gangbare Weg, sich Quantensystemen anzunähern, darin, den verschiedenen Geschichten zu folgen, in denen diese vorkommen; wohl wissend, dass man bei keiner Geschichte stehen bleiben darf. Die Geschichte von der Geschichte der Interpretation der Quantentheorie könnte uns dann zumindest eine Ahnung vermitteln, was Systeme im Allgemeinen und Quantensysteme im Besonderen ausmacht: Sie sind keine Objekte. Man kann allerdings positiv-sprachlich nicht anders, als objektivierend von ihnen zu sprechen.

Es ist wohl kein Zufall, dass gerade der mit der Idee der Emergenz vertraute Laughlin zu der Feststellung gelangt, dass quantenmechanische Materie aus »Wellen von nichts« bestehe.<sup>50</sup> Seinslogisch ist dieser Satz absurd, denn wie kann etwas zugleich sein und nicht sein. Erst reflexionslogisch in eine polykontexturale Betrachtungsweise eingebettet ergibt dieser Satz Sinn. Die Komplexität führt jetzt zu einer Reflexion, die nicht (allein) durch das Sein gedeckt ist. Der Ausdruck ›Wellen von nichts‹ kann aus dieser Perspektive also als eine Reflexion gelesen werden, die aus dem Nichts, dem Bedingungslosen informiert, in die Sphäre des Seins interveniert, um hier einen wirklichen Unterschied zu machen. Wenngleich die Bedeutung einen entscheidenden Unterscheid macht, ist sie ihrer Natur nach *essenzenlos*.

Sobald man Systeme begriffen hat, hat man sie nicht verstanden. Es bleibt also nichts anderes übrig, als das Denken in Bewegung zu halten, um den komplexen Gegenstand auf intelligente Weise von verschiedenen Seiten umkreisen zu können.

Die Quantentheorie stellt eines der anspruchsvollsten und erfolgreichsten Theorieprojekte der Menschheitsgeschichte dar. Sie ist eine, wenn nicht die Universaltheorie der Physik. Die Geschichte ihrer Deutung und die Auseinandersetzung um ihre Interpretation berührt jedoch weitaus mehr als nur das Feld der theoretischen Physik. Eine solche Theorieranlage zerstört darüber hinaus ontologische Gewissheiten. Sie stellt den Beobachter in Frage und sie lässt uns ahnen, was zu erwarten ist, wenn wir uns in anderen Feldern mit komplexen Phänomenen beschäftigen, die mit der Beobachterproblematik infiziert sind.

Zusammenfassend: Die Quantentheorie kann uns zeigen, was Theorie heutzutage leisten kann und dass Theorie unter den gegebene-

<sup>50</sup> Laughlin (2007, 93).

nen Reflexionsverhältnissen nur in der Pluralität ihrer Interpretation und Deutung zu haben ist.

Hiervon könnten sich dann auch andere Wissenschaftsfelder, man denke etwa an die Wirtschaftswissenschaften, die Psychologie und auch die Politik- und Sozialwissenschaften inspirieren lassen, mehr Komplexität in ihrer Theoriebildung zu wagen. Anstelle weiterhin trivialen Modellbildungsprozessen im Sinne einer Pseudo-Naturwissenschaft zu folgen, könnte auch hier vermehrt versucht werden, Sprachen zu finden, über die sich heterogene Kausalitäten in multiplen Kontexten, die nur bei Beobachtung als konkrete Daten ausfallen, beschreiben lassen.

Während die Quantentheorie mit sich überlagernden Wahrscheinlichkeitswellen, der Gleichzeitigkeit unterschiedlicher Potenziale sowie deren kontingenter Bestimmung in Beobachtungsprozessen rechnen kann, um diese dann bei Bedarf auch noch informationstheoretisch zu fassen,<sup>51</sup> trauen sich die Human- und Gesellschaftswissenschaften kaum ernsthaft mehr an jene Probleme heran, die für die Organisation unseres Alltags von wirklicher Relevanz sind. Von der Quantentheorie lernen, hieße hier, sich endlich der Komplexität der Wirklichkeit zu stellen.

### *Abschied von einer Welt ohne Sinn*

Der Begegnung zwischen Quantenphysik und soziologischer Systemtheorie kann helfen, mit re-entranten Verhältnissen vertraut zu werden. Eine solche Begegnung kann dazu beitragen, »Welten ohne Grund zu bauen, und darin heimisch zu sein.«<sup>52</sup> Im Spiegel der jeweils anderen Disziplin kann deutlich werden, dass jeder Versuch, die Beobachtungsverhältnisse im Sinne eindeutiger Subjekt/Objekt-Verhältnisse zu bestimmen, zum Scheitern verurteilt ist und man deshalb besser beraten ist, auf eine deontische Epistemologie umzustellen.

Kann die Quantentheorie aber auch etwas von einer systemtheoretisch informierten Soziologie lernen, das über die Einsichten der allgemeinen Systemtheorie hinausgeht? Wir vermuten ja.<sup>53</sup> Das Be-

51 Siehe etwa Zeilinger (2005).

52 Varela et al. (1992b, 325).

53 In diesem Sinne auch Peter Fuchs: »Was kann die Quantenphysik von der Allgemeinen Theorie der Sinnsysteme lernen? – Vor allem dies, wäre die Antwort darauf, daß sie sich im Blick auf ihre Sinnförmigkeit ein hohes Maß an Selbstreferenz gönnen können müßte, mehr Komplexität also im Einbezug des Umstandes, daß es sich auch bei ihr um ein soziales wie psychisch konditioniertes Sinnprozessieren handelt, das niemals an eine nicht-sinnförmige Welt anstoßen kann. Die hierzulande wenig

sondere der soziologischen Systemtheorie ist ihre Erfahrung mit dem Sinnbegriff, denn soziale Systeme sind Sinnsysteme. Sie ist dabei in der Lage, den Sinnbegriff gegenstandsbezogen von verschiedenen Seiten her zu entfalten, je nachdem, ob man vom Bewusstseinsprozess, der systeminternen Komplexitätsverarbeitung oder von der Kommunikation und den hier getroffenen Anschlüssen her denkt. Von der ersten Sphäre her betrachtet erscheint das »Phänomen Sinn« in »der Form eines Überschusses von Verweisungen auf weitere Möglichkeiten des Erlebens und Handelns«. <sup>54</sup> Von der Sphäre der Kommunikation her gesehen erscheint Sinn komplexitätstheoretisch fundiert als ein Selektionszusammenhang, in dem aus einem begrenzten Arsenal von Möglichkeiten einzelne Optionen ausgewählt werden. Beide Sphären abstrahierend lässt sich Sinn als eine fortschreitende, sich selbst prozessierende Sukzession der Aktualisierung der »modaltheoretischen Unterscheidung von Wirklichkeit (Aktualität) und Möglichkeit (Potenzialität) bestimmen, und zwar als Begriff für die Einheit genau dieser Unterscheidung«. <sup>55</sup> Auch der Sinnbegriff bekommt hiermit eine differenztheoretische Fassung. Er erscheint jetzt als ein selbstreferenzieller Reproduktionszusammenhang, als »ein Prozessieren nach Maßgabe von Differenzen, und zwar von Differenzen, die als solche nicht vorgegeben sind, sondern ihre operative Verwendbarkeit (und erst recht natürlich: ihre begriffliche Formulierbarkeit) allein aus der Sinnhaftigkeit selbst gewinnen. Die Selbstbeweglichkeit des Sinngeschehens ist Autopoiesis par excellence«. <sup>56</sup>

Die Homologien eines in dieser Form explizierten Sinnbegriffs mit den Reflexionsverhältnissen, zu denen die Quantentheorie die Physiker zwingt, sind überdeutlich. Um mit Hans-Peter Dürr zu rekapitulieren: »Die Wirklichkeit der neuen Physik ist Potenzialität, eine Welt der Kann-Möglichkeiten, sich auf verschiedene Art materiell, energetisch zu verkörpern«. Die zweiwertige Logik der Beschreibung der klassischen Welt erscheint dann nur als ein Sonderfall einer anderen, die Welt umfassender beschreibenden Logik,

gepflegte Philosophie der Physik könnte dann, wenn sie die Allgemeine Theorie der Sinnsysteme berücksichtigt, zur Reflexionsinstanz der Physik avancieren, die die quantentheoretischen (und relativitätstheoretischen) Unterscheidungen »gegenbeobachtet« oder besser: »zweitbeobachtet«. Dies alles heißt auch, daß die Intention auf eine physikalische Weltformel ohne Referenz auf die Unvermeidbarkeit von sinnförmigen Beobachtungsoperationen, ohne Rekurs auf jene doppelte Verschränkung, kaum zu jener »Einheitlichkeit« gelangen kann, die mit ihr erträumt wird« (Fuchs 2009, 10).

54 Luhmann (1993, 93).

55 Luhmann (2000a, 18 f.).

56 Luhmann (1993, 101).

denn »in der Quantenwelt herrscht die mehrwertige Logik, also nicht nur Ja und Nein, sondern auch Sowohl/Als-auch, ein Dazwischen. Eben das Nicht-Greifbare, das Unentschiedene. Daran müssen wir uns gewöhnen.«<sup>57</sup>

Der analytisch strenge und sowohl reflexionslogisch als auch komplexitätstheoretisch begründete Sinnbegriff der soziologischen Systemtheorie könnte es der Physik leichter machen, sich von der platonischen Idee einer reinen Theorie zu lösen. Sinn geht niemals in reine Formen auf, wenn man hierunter ein widerspruchsfreies und eindeutig bestimmbares Gebilde versteht. Der derzeitige Stand der Quantentheorie lässt kaum einen Zweifel daran möglich, dass das, was die Welt zusammenhält, auf Kontingenz gebaut ist und gerade deshalb empirisch Reinheit im Sinne einer Einheit von Form und Reflexion nicht zu finden ist. Die reflexionslogische Einsicht führt zu der Konsequenz, dass die Welt nicht identisch mit sich selber sein kann, weil aus dem Nichts ständig jene Reflexion erwächst, die einen Unterschied macht.

Aus dieser Perspektive liegen Tegmark und Wheeler richtig mit ihrer Vermutung, dass eine allumfassende Theorie keine Begriffe mehr enthalten könne, denn sie dürfte keinen Sinn mehr enthalten. Eine solche Theorie würde alles determinieren, da sie alles richtig beschriebe, aber zugleich würde hiermit die Lebendigkeit des Universums eliminiert.<sup>58</sup>

Die reale Welt ist anders. Innerhalb dieser Welt existieren systemische Verhältnisse, die Unbestimmtheit generieren, weil sie auf Nicht-Wissen gegründet sind. Gleichsam aus der Unwissenheit heraus entstehen Beobachter (um hier den Common-Sense-Begriff für re-entrante systemische Verhältnisse zu benennen) und sie verschwinden zugleich, wenn man sich ihnen positiv-sprachlich nähert, da jede Beobachtung das Beobachtete auflöst und in eine neue Beobachtung überführt. Genau dies meint Luhmann, wenn er das ›Sinngeschehen‹ als ›Autopoiesis par excellence‹ bezeichnet. Sinn selbst ist der kontinuierliche Vollzug von Kontingenz, die sukzessive Realisierung von

57 Dürr (2007).

58 Hier nochmals das Zitat: »Eine allumfassende Theorie müsste vermutlich gar keine Begriffe enthalten. Andernfalls würde man sehr wahrscheinlich eine Erklärung für ihre Begriffe in Form einer noch fundamentalen Theorie suchen – und so immer weiter in unendlichem Regress. Mit anderen Worten, die Theorie müsste rein mathematisch sein, ohne erklärende Postulate. Vielmehr sollte ein unendlich intelligenter Mathematiker fähig sein, die gesamte Hierarchie der Theorien allein aus diesen ultimativen Gleichungen herzuleiten, indem er die von ihnen beschriebenen Eigenschaften des Universums herleitet – und die Eigenschaften seiner Bewohner und ihre Wahrnehmungen der Welt« (Tegmark/Wheeler 2001).

Möglichkeit, die wiederum neue Möglichkeiten emergieren lässt. Die Quantentheorie lehrt uns, wie absurd – wie wirklichkeitsfremd – es ist, Welt sinnfrei erkennen oder beschreiben zu wollen.

Insofern Quantenphysiker bereit sind, dies anzuerkennen, folgt als zweiter Schritt die Einsicht, dass ihre Gegenstände unweigerlich in eine doppelten Sinninklusion verwickelt sind.<sup>59</sup> Zum einen kann jetzt physikalische Realität nur noch als kontext- und beobachtungsabhängige Entfaltung von Kontingenz (was anderes ist Sinn?) verstanden werden. Zum anderen findet jede Beschreibung dieser Prozesse innerhalb der Sprache im Medium Sinn statt, das – durch Kontingenz getrieben – Mehrdeutigkeiten und Unbestimmtheiten mitführen muss.

In diesem Sinne würden Niels Bohr und Werner Heisenberg mit der in der Kopenhagener Deutung formulierten Intuition richtig liegen, dass Quantensysteme durch die Alltagssprache niemals erreicht werden können. Nur wäre der Grund hierfür kein epistemischer, sondern ein ontologischer. Nicht weil wir die Welt nicht erkennen können, sondern weil die Welt in ihrem Inneren mit Sinn durchzogen ist, begegnen wir den Paradoxien einer Quantenphysik, die nur deshalb so erfolgreich sein kann, weil die Welt mindestens genauso bizarr ist wie eine komplexe Theorie, die an ihr nicht scheitert.

### *Weltbezug durch Weltverlust*

Die soziologische Rekonstruktion der Theorieentwicklung der Quantenphysik hat aufgezeigt, wie Anschauung, Experiment und mathematische Entwicklungen im Zuge der Ausdifferenzierung einer wissenschaftlichen Disziplin in ein konstruktives Spannungsverhältnis treten können. Dies führte schließlich zu einer Theorie, die jeglichem Common Sense spottet, die sich aber offensichtlich im Einklang mit der Welt befindet, die sie beschreibt. Gerade der soziologische Blick lässt ahnen, wie unwahrscheinlich die Entstehung, Entwicklung und

59 Peter Fuchs spricht hier von ›doppelter Verschränkung‹: »Aber das bedeutet, daß die Quantenphysik es mit einer doppelten Verschränkung zu tun hat. Sie geht davon aus, daß Messung und Gemessenes im Mikrokosmos nicht unabhängig voneinander stattfinden. Es findet sich für sie kein archimedischer locus observationis mehr, von dem aus Beobachtung ›rein‹ zu halten wäre. Da jedoch die Quantenphysik so wenig wie irgendwelche Sinnsysteme über den Saum von Sinn hinauskommen kann, also ein sinnförmiges Unternehmen ist, fallen ihre Beobachtungen einer zweiten Verschränkung anheim: der von Sinn und Welt oder Sinn und Sein. Beobachtung ist nie und nirgends ein Gegenüber der beobachteten Welt« (Fuchs 2009, 10).

Stabilisierung einer solchen Theorieanlage ist. Wissenschaft setzt voraus, dass man Konzepte und Anschauungen entwickelt, die in Konflikt mit Tradition und Alltagskonzepten stehen, und dass man diese Konzepte kommunikativ hinreichend stabilisieren kann. Dies setzt die Abtrennung und operationale Schließung einer kommunikativen Sphäre der Wissenschaft voraus, von der aus – nun ungestört von den Problemen und Deutungsansprüchen des Alltags – Formen etabliert werden können. Wissenschaft muss also in die Lage kommen, ihre Konzepte in Hinblick auf ihre innere theoretische Konsistenz hin zu bewerten und muss deshalb davor geschützt werden, durch unnötigen Weltbezug belastet zu werden. Dies setzt – wiederum historisch gesehen ein recht unwahrscheinlicher Vorgang – die Institutionalisierung eines Wissenschaftssystems voraus, das sich in immer neue Subdisziplinen ausdifferenziert, in denen, entlastet von unmittelbaren Verwertungszwängen, spielerisch neue Formen ausprobiert werden können.

Das Paradebeispiel hierfür ist die Mathematik. Ihre Formen beziehen sich nur noch auf sich selber. Die hiermit verbundenen Referenzen zirkulieren in Medien eines Kommunikationssystems ›Mathematik‹, das sich vor allem mit Hilfe der Schriftlichkeit und der hierdurch möglichen Standardisierung der Formsprache die innere Konsistenz geben kann, die notwendig ist, um mathematische Anschauungen und Konzepte so weit stabilisieren zu können, so dass sie von anderen wissenschaftlichen Disziplinen als Hilfsmittel zur Modellierung ungewöhnlicher und gewagter Konzepte genutzt werden können. Erst auf diese Weise können unwahrscheinliche, vom Common Sense abweichende Theorien entstehen, die sich dann gegebenenfalls empirisch überprüfen lassen.

In diesem Sinne lässt sich mit Fuchs die Unterscheidung empirisch/mathematisch als die Leitdifferenz der klassischen Physik ansehen. Mathematische Formalisierung und Experimentalphysik treten hier in ein produktives Wechselverhältnis, in dem die mathematische Umsetzung der theoretischen Intuition das Experiment treibt und die hieraus gewonnenen empirischen Daten Anlass zu neuen, gewagteren theoretischen Modellierungen geben.

Mit der Entwicklung der Quantentheorie kommt aber noch eine weitere Unterscheidung mit ins Spiel, da nicht mehr vorausgesetzt werden kann, dass die mathematische Modellierung mit den gängigen physikalischen Konzepten und Vorstellungen übereinstimmt. Die nicht-klassische Physik kommt jetzt in die Lage, mathematische Modelle auszuprobieren und in ein Experimentaldesign zu überführen, die (noch) nicht auf einer physikalischen Anschauung beruhen, und umgekehrt, unterschiedliche physikalische Konzeptionen in Hinblick auf eigene innere Konsistenzansprüche zu entwickeln.

Damit erfährt aber jetzt auch die physikalische Theorie – wie schon zuvor die Mathematik – einen Verlust an Weltbezug. Physikalische Anschauungen brauchen nun nicht mehr mit den Common-Sense-Anschauungen der Welt übereinzustimmen, um die Entwicklung von Experimentalphysik und theoretischer Physik voranzutreiben. Im Gegenteil: Es können jetzt physikalische Konzepte ausprobiert werden, die radikal im Gegensatz zu den mit unserer Alltagserfahrung verbundenen Denkmodellen stehen.

Die Aufspaltung von mathematischen und physikalischen Anschauungen (auch die Mathematik beruht letztendlich auf Anschauung – und sei es nur die eines Graphen mit bestimmten topologischen Eigenschaften) führt zu einer Vervielfältigung der Möglichkeiten, physikalische Theorien zu bauen. Man kann jetzt primär von einer mathematischen Idee oder von einer physikalischen Anschauung her beginnen – erscheinen diese zunächst auch noch so bizarr –, um ein Theorieprojekt zu entfalten.

Sowohl die Arbeit der Physiker als auch die der Mathematiker ist dabei eine, die im Medium von Texten, das heißt in Form wechselseitiger Lektüre stattfindet. Die Texte der Mathematik und der Physik unterscheiden sich voneinander. Erstere präsentieren mehr Gleichzeitigkeit und strukturelle Bezüge, denn ihr Primärmedium ist die mathematische Formel, welche komplexe Beziehungen darstellt und in ihrem Aufeinander-Bezogensein zeigt.

Die Arbeit der Physiker wird demgegenüber in mehr sprachförmigen Texten reflektiert und aufeinander bezogen. Formeln haben zwar auch einen wichtigen und unverzichtbaren Status, sind aber eingebettet in umfangreichere Texte. Sprachlich formulierte Propositionen beziehen sich hier auf sprachlich formulierte Propositionen. Wie der Sozialwissenschaftler oder Philosoph liest auch der Physiker Theorie, um Theorie zu variieren. Darüber hinaus treten die Texte (Sätze, Begriffe und Sprache) in ein Verhältnis zur Mathematik (Gleichung und Zahl)<sup>60</sup> und zu Experimentalsystemen (Verzahnung technischer Konditionierungen mit dem Zufall). Theoriearbeit ist und bleibt aber innerhalb der Physik – anders als in der Mathematik – primär begrifflich semantische Arbeit. Es geht hier also um die Verschiebung und Neukonfiguration von Bedeutung. Physikalische Theoriearbeit erscheint damit immer auch als eine weltanschauliche Tätigkeit, und die von ihr verwendeten Vorstellungen sind dabei mehr als nur Metaphern.<sup>61</sup>

60 Siehe zu den Medienverhältnissen von Begriff und Zahl auch Rustemeyer (2006; 2009).

61 Oder um hier mit Rorty dem Weg Davidsons zu folgen, Metaphern sind gar keine Metaphern: »Denn dadurch, daß ihnen eine buchstäbliche Bedeutung beigelegt wird, wodurch sie dann zu ›vergilbten‹ Metaphern



Die Theoriearbeit gewinnt hierdurch erhebliche Freiheitsgrade, da sie gewissermaßen sowohl in Mathematik als auch in Hinblick auf physikalische Anschauung auf verschiedene Theoriebausätze und Medienschemata zurückgreifen kann. Ihre Leitdifferenz beruht jetzt auf der Trias empirisch/mathematisch/physikalisch-theoretisch, was dann jedoch in eine transklassische Physik mündet, die sich immer mehr in unterschiedliche Theorieanlagen und Deutungsoptionen diversifiziert. Unweigerlich geht diese jedoch mit dem Weltverlust von physikalischen Theorien einher (von nun an nur noch im Plural zu denken), da sich diese jetzt letztlich nur noch in ihre eigenen Formzwänge einspinnen können, um von dort aus einen Weltbezug zu konstruieren. Dies führt zwar einerseits zu immer gewagteren Theorien, die dann mit Blick auf die Koproduktion mit der Experimentalphysik auf immer seltsamere physikalische Phänomene treffen. Andererseits stellt sich aber jetzt in der Physik vermehrt die Frage, ob sich mit solch hochgetriebenen Theorieprojekten – siehe das Beispiel der Stringtheorie – Weiterkenntnis überhaupt noch vorantreiben lässt.

Der Vorwurf, dass die Suche nach der Weltformel letztlich nur zu Glasperlenspielen führt, die keine praktische Relevanz besitzen, ist unter den genannten wissenschaftssoziologischen Bedingungen nicht mehr so leicht von der Hand zu weisen. Damit wird aber auch in der Physik wie auch in der Gesellschaft beobachtbar, dass physikalische Theorien Konstruktionen der kommunikativen Sphäre des Wissenschaftssystems darstellen.

»Die ›hard sciences‹ sind erfolgreich, weil sie sich mit den ›soft problems‹ beschäftigen; die ›soft sciences‹ haben zu kämpfen, denn

werden, vergrößern sie den logischen Raum. Daher ist die Metapher ein wesentliches Instrument im Prozeß des Umwebens unserer Überzeugungen und Wünsche. Ohne sie gäbe es so etwas wie eine wissenschaftliche Revolution oder einen kulturellen Umbruch gar nicht, sondern nur den Vorgang der Veränderung der Wahrheitswerte von Aussagen, die in einem Vokabular formuliert werden, das nie wechselt. Davidsons Deutung des Metaphernbegriffs steht im Einklang mit der von Mary Hesse gegebenen Kennzeichnung der Theorie als einer metaphorischen Neubeschreibung des Explanandum-Bereichs. Nicht nur in der Kunst, sondern auch auf den Gebieten der Wissenschaft, der Moral und der Politik fühlen wir uns manchmal gedrängt, einen Satz zu äußern, der aufschlussreich und fruchtbar zu sein scheint, obwohl er auf den ersten Blick falsch wirkt. Solche Sätze sind am Anfang ihrer Laufbahn ›bloße Metaphern‹. Manche Metaphern sind jedoch insofern ›erfolgreich‹, als wir sie so unwiderstehlich finden, daß wir versuchen, ihnen zu einem Platz unter den Überzeugungen und damit zur Anwartschaft auf buchstäbliche Wahrheit zu verhelfen (Rorty 1993, 68).

sie haben es mit den ›hard problems‹ zu tun«. <sup>62</sup> Das v. Foerstersche Theorem gilt nicht mehr für die theoretische Physik. Auch sie begegnet jetzt den harten erkenntnis- und wissenschaftstheoretischen Problemen einer hochgradig ausdifferenzierten Wissenschaft, die Weltbezug nur deshalb herstellen kann, weil ihre Theorieformen sich weitgehend von den beobachtbaren Phänomenen der Welt gelöst haben.

Unweigerlich wird damit auch die Physik mit Sinnproblemen konfrontiert, die nicht mehr einfach durch den Verweis auf die Empirie oder Logik gelöst werden können. Dass die Quantentheorie ihr Deutungsproblem nach mehr als hundert Jahren erfolgreicher Anwendung nicht gelöst hat, zeigt auf, dass wir es auch hier mit der schwierigen Herausforderung der *soft science* zu tun bekommen, nämlich mit Sinn und damit mit Kontingenz und Vieldeutigkeit.

Heutzutage machen sich also auch in der Physik die großen Erzählungen verdächtig. Die transklassische Physik ist gleichsam auf »Welten ohne Grund« <sup>63</sup> gebaut und enttäuscht damit die Hoffnung, sich der Sinnfragen durch die Physik oder Mathematik entledigen zu können. Homolog zu den Hochformen mystischer Reflexion kann uns die Auseinandersetzung um die Deutung der Quantenphysik allerdings eine Ahnung vermitteln, was das Geheimnis der konditionierten Koproduktion von System und Umwelt – Reflexion und Welt – für uns bedeuten kann, und uns möglicherweise dabei helfen, in Welten ohne Grund heimisch zu werden.

62 v. Foerster (1993, 161).

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