

EINLEITUNG

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

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

Quantenphysiker sehen sich demgegenüber jedoch zu Sätzen genötigt wie:

»Quantenmechanische Materie besteht aus Wellen von nichts.«¹

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

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

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

² Peter Mittelstaedt (2000, 67).

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

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

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

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

³ Werner Heisenberg (2007, 70 f.).

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

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

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

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

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

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

Physikalische Denkformen stehen im Zentrum der neuzeitlichen Kultur

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

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

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

6 Weizsäcker (2009).

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

Demgegenüber scheuen sich große Physiker in der Regel nicht, auch zu metaphysischen und weltanschaulichen Fragen Stellung zu beziehen und die unter strengen methodologischen und mathematischen Bedingungen gewonnenen Erkenntnisse als ›große Erzählungen‹ auszubauen, die mit einer Vielzahl von kosmovationären und teilweise auch ethischen Aussagen geschmückt sind.⁸ Die spekulative Ausdeutung der Welt, einschließlich der anthropologischen Verortung des Menschen, wird heutzutage eher Physikern⁹ zugetraut als Philosophen und Soziologen.

Es ist zu vermuten, dass die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation oder Everett's Viele-Welten-Theorie mehr in die Metaphernwelt der Gegenwartsliteratur¹⁰ oder die Bilderwelten moderner Kunst¹¹ eindringen als etwa der Kantsche Imperativ oder die Leibnizsche Monadenlehre. Die Bücher von Steven Hawking werden heute häufiger gelesen als die Werke aller Gegenwartsphilosophen zusammengekommen, und es ist zu vermuten, dass derzeit mehr Menschen seine quantenmechanisch inspirierten Ideen vom *anfangslosen Universum* in Grundzügen nachvollziehen können als die differenztheoretische Konzeption von Derridas Grammatologie oder Luhmanns Systemtheorie.¹² Selbst für die Religion scheint der Dialog mit den Grenzgebieten der Physik heutzutage eher Transzendenz zu versprechen als das Gespräch mit der Philosophie.¹³

Denkfiguren aus den Spezialdiskursen der Quantentheorie sind schon längst in den ›Interdiskurs‹ der Gegenwartskultur eingedrun-

⁷ Weizsäcker (2009).

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

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

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

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

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

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

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

Ein Desiderat der Wissenssoziologie

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

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

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

¹⁵ Kuhn (1988 [1977]).

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

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

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

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

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

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

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

¹⁹ Cushing (1994).

²⁰ Luhmann (1998, 592).

Von der Quantentheorie lernen?

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

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

I Rekonstruktion der Quantentheorie auf Basis der inneren Problembezüge

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

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

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

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

Experimentalsysteme und >epistemische Dinge<

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

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

²¹ Siehe Hugh Everett (1957).

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

²³ Luhmann (1998, 370ff.).

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

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

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

²⁵ Rheinberger (2006).

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

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

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

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

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

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

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

²⁸ Rheinberger (2006, 25).

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

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

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

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

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

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

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

30 Fuchs (2009).

31 Stefan Baumberger (2009, 56).

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

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

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

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

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

voraussetzungslos *qua* Substanz, sondern werden erst durch die Beobachtungsoperationen konstituiert (vgl. Fuchs 2004, 11).

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

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

Rekonstruktion auf einem mittleren Abstraktionsniveau

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

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

33 Ludwik Fleck (1980).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bevorzugtes Quellenmaterial: Dokumente physikalischen Denkens

Als Quellenmaterial der hier angestrebten Rekonstruktion eignen sich vor allem Textdokumente, die von den Physikern erstellt worden sind, welche die Entwicklung der Quantentheorie maßgeblich mit vorangetrieben haben. Neben den teilweise für den Laien nur noch schwer nachvollziehbaren Originalarbeiten haben viele Forscher immer auch versucht, die zentralen Argumentationslinien ihrer Arbeiten dem gebildeten Laienpublikum zu vermitteln. Entsprechend sind eine Vielzahl intermediärer Schriften, etwa in Form von Vortragssammlungen und populärwissenschaftlichen Monografien entstanden, die an ein Massenpublikum gerichtet sind. Wir gehen davon aus, dass die in diesen Schriften entwickelten Denkfiguren homolog sind zu dem, was die Autoren auch in ihrer sonstigen Arbeit tun. Wir nehmen an, dass sie uns damit etwas sagen wollen, was sie auch sonst als Physiker zu sagen hätten. Entgegen dem von Soziologen vorschnell geäußerten Manipulationsverdacht, dass mit diesen Veröffentlichungen auch wissenschaftspolitische Motive verbunden sind, gehen wir davon aus, dass hier in der Regel ein ernsthaftes Bemühen stattfindet darzustellen, um was es ihnen in ihrer Arbeit eigentlich geht. Gerade deshalb erscheint uns dieses Material – in Verbindung mit dem kritischen Abgleich der dem Laien nur schwer verständlichen physikalischen Originalarbeiten und flankiert durch allgemeine wissenschaftshistorische Arbeiten –³⁹ als ein guter Ausgangspunkt für die angestrebte Rekonstruktion.

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

³⁹ Siehe etwa Hund (1967).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

⁴³ Luhmann (1998).

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

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

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

⁴⁴ Popper (2007).

⁴⁵ Vgl. Hofstadter (1979).

⁴⁶ Luhmann (1998, 499).

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

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

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

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

⁴⁸ Putnam (1991).

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

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

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

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

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

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

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

⁵² Luhmann (1998, 27).

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

Wissenschaft und Zeit

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

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

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

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

⁵⁵ Schrödinger (1935).

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

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

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

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

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

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

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

Wissenschaft und Wahrheit

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

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

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

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

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

⁵⁹ Luhmann (1998, 173).

⁶⁰ Ebd. 201.

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

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

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

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

61 Ebd. 362 ff.

62 Ebd. 370.

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

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

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

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

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

⁶⁵ Luhmann (1998, 403).

⁶⁶ Luhmann (1998, 403 f.).

⁶⁷ Dies bedeutet, dass es keine ›Logik der Forschung‹ (Popper) geben kann.

Jede vorstellbare Letztbegründung methodologischer Zugänge verfängt sich auch hier im Zirkulären, d. h. wir begegnen »grundlosen Gründen«, die nur durch das Begründen begründet werden können (Luhmann 1998, 391).

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

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

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

2 Die Rolle der Mathematik

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

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

69 Luhmann (1998, 373).

70 Luhmann (1998, 75).

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

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

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

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

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

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

⁷³ Heintz (2000a; 2000b).

⁷⁴ Heintz (2000b).

ten Ausdifferenzierung der Mathematik als einer Spezialwissenschaft verdankt.

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

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

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

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

⁷⁵ Heintz (2000b, 348 f.).

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

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

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

77 Heintz (2000b, 350).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Erfindung der imaginären Zahlen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

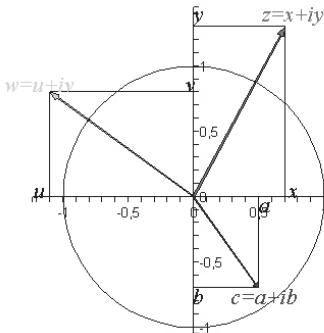


Abb. 1: Imaginäre Zahlen⁸⁰

3 Weiterer Verlauf dieser Studie

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

⁸⁰ Quelle: M. Erné, Download am 1.10.2012 unter: http://www.iag.uni-hannover.de/~greite/ingo607/dateien/maple/bilder/MI_2_6.gif

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

