

# Werner Vogd

## Von der Physik zur Metaphysik

Eine soziologische Rekonstruktion  
des Deutungsproblems der Quantentheorie

© Velbrück Wissenschaft, Weilerswist 2014

Die Quantentheorie ist mittlerweile gut hundert Jahre alt und mehr als zwei Dutzend Nobelpreisträger haben sich bisher an ihr abgearbeitet. Doch noch immer erscheint sie weit davon entfernt, zu einer einheitlichen Deutung oder Interpretation zu finden. Mit dem vorliegenden Buch wird eine soziologische Rekonstruktion der quantenphysikalischen Theoriebewegungen geleistet, mittels der sich verstehen lässt, welche theoretischen und empirischen Lagerungen zu diesem sonderbaren Befund geführt haben.

Im ersten Kapitel geht es darum, die Bezugsprobleme zu rekonstruieren, 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 Kopenhagener Interpretation. Der wunderliche Charakter der Quantentheorie wurde hier zum ersten Mal unter Physikern anerkannt, was jedoch die Kritik von namhaften Physikern, nicht zuletzt von Albert Einstein und Erwin Schrödinger, mit sich brachte.

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, dass alternative Deutungen zwar formulierbar sind, dies aber nur um den Preis von Weltkonzepten zu haben ist, die in Hinblick auf ihre Bizarrheit der Kopenhagener Deutung um nichts nachstehen.

Im dritten Kapitel stehen die Erfolge einer quantentheoretisch informierten Experimentalphysik im Vordergrund. Da die Quantentheorie selbst in ihren vermeintlich absurden Vorhersagen nicht widerlegt werden kann, beginnt sich die Physik langsam an die Quantentheorie zu gewöhnen. Man kann mit ihr in unterschiedlichsten Bereichen rechnen und arbeiten. Die Rückkehr zu einer Interpretation der Quantentheorie mit den Mitteln klassischer Konzepte wird damit aber zunehmend verbaut.

Dies führt im vierten Kapitel zu dem Befund, dass für die gegenwärtige Physik weniger die Quantenwelt, als die durch unsere Erfahrungen gegebene Alltagswelt das eigentlich Unerklärliche darstellt. Hierbei begegnen wir einer Reihe moderner Ansätze, die einerseits von der Universalität der Quantentheorie ausgehen, dabei aber andererseits Wege suchen, mittels der sich erklären lässt, warum stabile, klassisch erscheinende Welten auftreten können. Bei genauerem Hinsehen wird allerdings deutlich, dass auch diese Erklärungen nicht paradoxiefrei zu haben sind.

Das fünfte Kapitel bildet einen Exkurs zur String-Theorie, denn hier werden einige wissenschaftssoziologisch interessante Entwicklungen in Hinblick auf die Charakteristika und Dilemmata zeitgenössischer physikalischen Theoriebildung besonders deutlich.

Das sechste Kapitel stellt sich der Frage, inwieweit die Spitzenprobleme der Quantentheorie Ähnlichkeiten mit mystischen Reflexionsformen aufweisen. Insbesondere das Geheimnis der koordinierten Koproduktion – von bodenlos ineinander verschachtelten System-Umwelt-Referenzen – wird hier virulent.

Im abschließenden siebten 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. Dabei wird deutlich, 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 lässt sich darüber hinaus untersuchen, wie Anschauung, Experiment und Entwicklungen der Mathematik und physikalische Theoriebildung in produktive Wechselwirkung treten, um solch eine bizarre Theorieanlage, wie die der Quantentheorie hervorzubringen. Ihre Theorieform spottet jeglichen Versuchs einer anschaulichen Interpretation physikalischer Weltzusammenhänge. Mittlerweile mehr als hundert Jahre Erfahrung mit der Quantentheorie zeigen auf, was Theoriebildung heutzutage leisten kann, welcher Preis hierfür zu zahlen ist, aber auch, welche Einsichten auf diese Weise gewonnen werden können.

Nicht zuletzt lassen die Einsichten in ein solches Theorieprojekt auch für andere Wissenschaftsgebiete (man denke etwa an Soziologie und Psychologie) 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 auch hier zu erwarten sind.

## 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 Aussagen genötigt wie:

»Quantenmechanische Materie besteht aus Wellen von nichts.«<sup>1</sup>

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

»Es ist unmöglich, anzugeben, was mit dem System zwischen der Anfangsbeobachtung und der nächsten Messung geschieht. Nur im dritten Schritt [der wiederholten Messung] kann wieder der Wechsel vom Möglichen zum Faktischen vollzogen werden.«<sup>3</sup>

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 – sie 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.<sup>4</sup>

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 deren Stelle sollte eine Sicht der Realität treten, die

---

<sup>1</sup> So etwa der Nobelpreisträger Robert B. Laughlin (2007, 93).

<sup>2</sup> Peter Mittelstaedt (2000, 67).

<sup>3</sup> Werner Heisenberg (2007, 70f.).

<sup>4</sup> 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).

sich auf Relationen bezieht, welchen keine intrinsischen Eigenschaften zugrunde liegen«.<sup>5</sup>

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:

1. 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.
2. Die bisherigen Versuche einer wissenssoziologischen Annäherung an die Quantentheorie leiden darunter, dass auf grobschlächtige Weise, gesamtgesellschaftliche Momente an eine komplexe und im hohen Grade durch innerwissenschaftliche Bezugsprobleme determinierte Theorieentwicklung herangetragen werden. Es ist an der Zeit, die hiermit entstandenen Fehleinschätzungen zu korrigieren.
3. 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 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.«<sup>6</sup>

Diesen Aussagen von Carl Friedrich von Weizsäcker ist aus verschiedenen Gründen zuzustimmen. Physikalisches Wissen gilt als überprüftes Wissen, denn

---

<sup>5</sup> 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 der Raum-Zeit als dasjenige betrachten, zwischen dem die Korrelationen bestehen« (Esfeld 2002, 212).

<sup>6</sup> Weizsäcker (2009).

»der harte Kern der Physik ist Experiment und Mathematik«. <sup>7</sup> 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 von den Dingen in der richtigen Weise 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 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 kosmologischen und teilweise auch ethischen Aussagen geschmückt sind. <sup>8</sup> Die spekulative Ausdeutung der Welt, einschließlich der anthropologischen Verortung des Menschen wird heutzutage eher noch Physikern <sup>9</sup> zugetraut als Philosophen und Soziologen.

Es ist zu vermuten, dass die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation oder Everetts Viele-Welten-Theorie mehr in die Metaphernwelt der Gegenwartsliteratur eindringt <sup>10</sup> als der Kantsche Imperativ. Die Bücher von Steven Hawking werden heute mehr gelesen, als die Werke aller Gegenwartsphilosophen zusammen genommen und es ist zu vermuten, dass derzeit mehr Menschen seine quantenmechanisch inspirierten Ideen vom *anfangslosen Universums* in Grundzügen nachvollziehen können, als die differenztheoretische Konzeption von Derridas Grammatologie oder Luhmanns Systemtheorie. <sup>11</sup> Selbst für die Religion erscheint der Dialog mit den Grenzgebieten der Physik heutzutage oftmals mehr an Transzendenz zu versprechen, als das Gespräch mit der analytischen Philosophie. <sup>12</sup>

Denkfiguren aus den Spezialdiskursen der Quantentheorie sind schon längst in den »Interdiskurs« der Gegenwartskultur eingedrungen. <sup>13</sup> 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 dabei eine Frage, die mit diesem Projekt nicht angegangen werden kann. Es wird hier aber zumindest deutlich, dass die Quantentheorie langsam in den semantischen Haushalt der Gesellschaft eindringt. In diesem Sinne ist auch für die Soziologie jetzt an der Tagesordnung, zu fragen, auf was sich die Gesellschaft hierbei einlässt.

---

<sup>7</sup> Weizsäcker (2009).

<sup>8</sup> Siehe etwa die Potsdamer Denkschrift von Dürr u. a. (2005).

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

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

<sup>11</sup> Hawking (1989; 2001), Derrida (1974), Luhmann (1993).

<sup>12</sup> Siehe hierzu etwa die Sitzungsprotokolle der Pontifical Akademie of the Sciences (z. Beispiel von 2003), für die evangelische Kirche Ewald (2006), oder von Seiten der Physik Dürr (1991; 2007).

<sup>13</sup> Insbesondere Jürgen Link hat für die empirische Diskursanalyse die Unterscheidung von Interdiskurs und Spezialdiskurs fruchtbar gemacht (vgl. Link/Diaz-Bone 2006).

Jede Theorie beruht auf einer bestimmten Epistemologie. Die Quantentheorie wird üblicherweise als eine nicht-klassische Theorie betrachtet. Was bedeutet es aber generell für das Verständnis von Theorien, wenn nicht-klassische Konzeptionen in einer harten Wissenschaft, wie der Physik salonfähig werden?

### *Ein Desiderat der Wissenssoziologie*

Prinzipiell ist der Wandel der Wissenskonfigurationen in den harten Naturwissenschaften ein vielversprechender Gegenstand der *Wissens- und der Wissenschaftssoziologie*. Mit Thomas Kuhn treffen wir im Falle der Quantentheorie offensichtlich auf einen Paradigmenwechsel,<sup>14</sup> 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 ihrerseits wiederum ein Fülle empirischer Untersuchungen inspiriert, die dann wiederum die Entwicklung, Ausdeutung und Veranschaulichung der Theorie voranbringen.<sup>15</sup>

Die *Wissenssoziologie* hat bislang noch keinen besonders glücklichen Umgang mit der Quantentheorie gefunden. Prägend bleiben hier bislang vor allem die Arbeiten von Paul Forman zur Beziehung der in der Weimarer Republik vorherrschenden ideologischen Formationen und den Sprachfiguren der Quantentheorie. Forman kommt dabei zu dem Schluss, dass die Neuformulierung der Quantentheorie als eine Anpassungsleistung der Physiker an die Kausalitäts- und Theoriefeindlichkeit der Weimarer Republik zu verstehen sei, als eine Übernahme der hiermit verbundenen mystischen, antirationalistischen und individualistischen Motive.<sup>16</sup>

In soziologistischer Verkürzung werden dabei leider vollkommen die inneren Zwänge einer Physik ausgeblendet, die vor allem aufgrund ihrer empirischen Befunde in eine Krise gekommen sind. Das eigentliche Bezugsproblem der damaligen Physiker, nämlich dass die bisherigen klassischen Anschauungen nicht mehr tragen, um die Ergebnisse erklären zu können, wird hier 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.<sup>17</sup> Eine ideologische Kausalität wird suggeriert.

Auch James Cushing, der ebenfalls gerne in wissenssoziologischen Diskursen aufgegriffen wird, neigt viel zu stark dazu, die wissenschaftsinternen Auseinan-

---

<sup>14</sup> Kuhn (1988 [1977]).

<sup>15</sup> Siehe zum Beginn der Quantentheorie insbesondere Kuhn (1978).

<sup>16</sup> 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: Adaption by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment« und eine kritische Diskussion der Arbeiten findet sich in v. Meyenn (1994).

<sup>17</sup> Siehe zu einer fundierten Kritik an den Forman Thesen aus wissenschaftsgeschichtlicher Perspektive Hendry (1994).

dersetzungen im Zuge der Kopenhagener Deutung, politisch zu interpretieren.<sup>18</sup> 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.«<sup>19</sup>

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

### *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 sie stellt die klassische monokontexturale Logik in Frage und 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 – wenn nicht der – physikalischen Universaltheorie in Hinblick auf ihre Anschaulichkeit und physikalische Bedeutung mehr Fragen als Antworten aufwirft, sollte Wissenschaftler 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 hierbei zu beobachten, wie sie den Common Sense überwindet, um sich stattdessen auf scheinbar bizarre Weltbeschreibungen einzulassen, kann auch Psychologen oder Sozial- oder Wirtschaftswissenschaftler inspirieren, sich sowohl Verrücktheit wie auch die theoretischen Konsequenzen zuzutrauen, welche die Untersuchungsgegenstände von ihnen abverlangen.

---

<sup>18</sup> Cushing (1994).

<sup>19</sup> Luhmann (1998, 592).

## 1 Rekonstruktion der Quantentheorie auf Basis der inneren Problembezüge

Für die Quantentheorie fehlt hiermit 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 dann Lösungen nahe legen, die dann wiederum neue Bezugsprobleme für die Physik hervorrufen. Erst auf diesem Wege kann ein Verständnis der Theorieentscheidungen und -bewegungen gewonnen werden. Auf diese Weise kann es schließlich auch gelingen, die bis heute andauernden Auseinandersetzungen um die angemessene Deutung der Quantentheorie, als immanente Folgeprobleme der Theorieentwicklung, gleichsam als Konsequenz der *Theorieform* zu rekonstruieren. Anders als die Wissenschaftsgeschichte, die das Augenmerk vor allem auf Denkkollektive sowie biografische und historische Kontingenzen legt, aber auch anders als die üblichen in den Lehrbüchern anzutreffenden Selbstbeschreibungen der Physik, können durch eine solchermaßen informierte soziologische Analyse die Probleme der *Form* (quanten-)physikalischer Theoriebildung in den Blick genommen werden.

Die hohe innerphysikalische Prominenz bizarrer Weltkonzepte – man denke hier etwa an die Viele-Welten-Theorie,<sup>20</sup> entsprechend der jeder einzelne Mensch in unzähligen Kopien in alternativen Geschichten vorkommt, oder ein Blockuniversum, indem Vergangenheit und Zukunft gleichzeitig existieren<sup>21</sup> – erscheinen aus dieser Perspektive vor allem als Suche nach schlüssigen Antwortmöglichkeit 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 hier 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 in den »zahllosen kombinatorischen Möglichkeiten nach Ergebnissen« und Beziehungen suchen lässt, von denen sich dann einige halten lassen und andere eben nicht. Dies reicht aber noch nicht aus, um Wissenschaft zu ertragsreichen, aneinander anschließenden Projekten zu bündeln.<sup>22</sup>

---

<sup>20</sup> Siehe Hugh Everett (1957).

<sup>21</sup> So dann bei Steven Hawking. Siehe zur Diskussion etwa José Soler Gil (2007).

<sup>22</sup> Luhmann (1998, 37off.).



## 2 Die Rolle der Mathematik

Mit Hilfe 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.«<sup>23</sup> Die Mathematik stellt aus dieser Perspektive vor allem eine Formsprache dar, die so angelegt ist, dass sie vollkommen auf die Referenz auf äußere Objekte verzichten kann. Ihre Gesetze folgen ausschließlich aus ihren inneren Axiomen. Damit ist ihre Form vollkommen bestimmt. Gerade dies lässt sie hochgradig anschlussfähig werden für alle außermathematischen Verwendungen (in der Physik, der Wirtschaft, den Sozialwissenschaften etc.), in 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 beruhender Gesetzmäßigkeit. Entweder stimmen die Daten mit dem im Modell aufgestellten Kriterien überein – oder eben nicht.

Mathematik beweist jedoch keinen physikalischen Zusammenhang. Wie beispielsweise in der Auseinandersetzung um die Interpretation der Quantentheorie deutlich wird, kann es geschehen, dass unterschiedliche physikalische Auffassungen zwar mathematisch modellierbar sind, aber zugleich (bislang) noch keine Daten vorliegen bzw. erzeugt werden können, die entscheiden lassen, welches Modell zu verwerfen ist. Beispielsweise wird sowohl in der Bohmschen Mechanik,<sup>24</sup> die von einer nichtlokal determinierten »Führungswelle« ausgeht, als auch in der »spontaner Kollaps Theorie«<sup>25</sup> 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.<sup>26</sup>

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.<sup>27</sup> Ausgangspunkt ihrer Untersuchung war das Dilemma, der Mathematik entweder einen epistemischen Sonderstatus zuzugestehen – sie repräsentiert dann per se die Logik oder das reine Denken – oder sie für sozial konstruiert zu 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 Zei-

---

<sup>23</sup> Luhmann (1998, 75).

<sup>24</sup> Vgl. Passon (2010) sowie ausführlicher in Kap. II.2

<sup>25</sup> Siehe Ghirardi et al. (1986) sowie ausführlicher in Kap. IV.1

<sup>26</sup> Vgl. Passon (2010).

<sup>27</sup> Heintz (2000a; 2000b).

chensprache, 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«.<sup>28</sup> Die hiermit entscheidbare Wahrheit – und dies ist ein wichtiger Punkt – bleibt jedoch eine *kommunikative Wahrheit*, die sich der historisch bedingten 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.«<sup>29</sup>

Verschiedene Zugängen und mathematische Praxen bestanden nebeneinander fort. Der ›Beweis‹ spielte damals nur eine geringe Rolle. Inkonsistenzen zwischen den unterschiedlichen ausgeübten Argumentationsweisen stellten insofern kein Problem dar, als dass in den praxisnahen Anwendungen der Mathematik eher die Plausibilität der Argumentation im Vordergrund stand als 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,<sup>30</sup> 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 Mathematik und die Forderung nach größerer ›Strenge‹ sind in diesem Zusammenhang zu sehen. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts wurde der ›naive abstractionism‹ (Gray 1992) der früheren Mathematik überwunden und durch Objekte ersetzt, die ausschließlich mathematikintern definiert sind. Diese ›Arbeit an den Begriffen‹ war auch deshalb dringlich geworden, weil die Ma-

---

<sup>28</sup> Heintz (2000b).

<sup>29</sup> Heintz (2000b, 348f.).

<sup>30</sup> Siehe zu den Besonderheiten von auf Interaktion beruhenden Systemen Kieserling (1999).

thematiker 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.«<sup>31</sup>

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

Die Konsolidierung der Mathematik als eine Disziplin des ›formalen Beweissens‹ 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 darüber hinausgehenden Weltbezug mehr garantieren kann.

Gerade aufgrund ihrer weltfernen Selbstbezüglichkeit generiert die Mathematik einen nahezu unerschöpflichen Formenreichtum. Dieser wiederum eröffnet der sich ebenfalls immer mehr ausdifferenzierende Experimentalphysik eine Vielzahl

---

<sup>31</sup> Heintz (2000b, 350).

neuer Perspektiven zur Modellbildung. Mathematik und Physik können auf diese Weise in eine gemeinsame 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 bizarre 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 mit Hilfe einer auf diese Weise hochgetriebene 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.<sup>32</sup>

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.<sup>33</sup>

---

<sup>32</sup> 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).

<sup>33</sup> »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 rekursi-

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

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

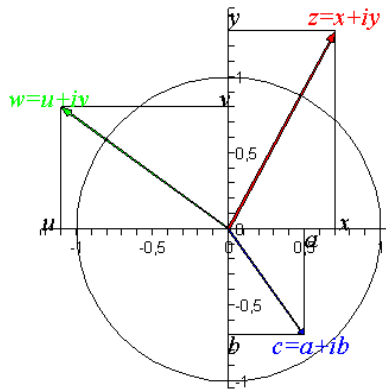
An sich ist schon die Multiplikation mit -1 ein Vorgang, der ein gewisses mathematisches Abstraktionsvermögen verlangt und der ebenso die Einführung der Null und die Erweiterung der *natürlichen Zahlen N* auf die Menge der *ganzen Zahlen Z* voraussetzt. Anschaulich kann man sie sich anhand eines Zahlenstrangs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

Insofern man Mathematik als eine abstrakte Formalwissenschaft begreift, kann man sich aber auch andere Varianten vorstellen, wie die Multiplikation von negativen Zahlen vonstatten gehen könnte. So kann man die Multiplikation mit -1 auch als *Drehung* um  $180^\circ$  Grad um den Achsenpunkt 0 verstehen bzw. entsprechend *definieren*. Multipliziert man zweimal mit -1 vollzieht man jetzt eine Kreisbewegung um  $360^\circ$  Grad und kommt dann ebenso wieder bei der ursprünglichen Zahl an. Die Drehung führt jedoch gegenüber der ursprünglichen Achse eine zusätzliche Dimension ein, denn man braucht 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  $90^\circ$  Grad drehen. Dreht man zweimal um  $90^\circ$  Grad, erhält man  $180^\circ$  Grad. Bei vier bzw. acht oder zwölf Vierteldrehungen kommt man jeweils wieder am Ausgangspunkt an. Da eine Drehung um  $180^\circ$  Grad der Multiplikation mit -1 entspricht, kann man sich jetzt auch ein Produkt vorstellen, dass zwei multiplikative Teilschritte mit einer Drehung von jeweils  $90^\circ$  Grad beinhaltet. Da das Teilergebnis einer Vierteldrehung in die hinzuerfundene neue Achse zeigt, beinhaltet es zusätzlich zu dem Betrag der reellen Zahl noch den Betrag der zusätzlichen Achse – den Imaginärteil *i*. Zwei Imaginärteile *i* miteinander multipliziert ergeben entsprechend dieser Definition dann -1. Indem also eine *zusätzliche Dimension* und mit ihr die *imaginären Zahlen* eingeführt werden, lassen sich beispielsweise auch Wurzeln aus negativen Zahlen ziehen (etwa aus  $\sqrt{-1}$ , denn  $i^2$  ergibt -1).

---

ven 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, 311f.).



### Imaginäre Zahlen<sup>34</sup>

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 auf recht einfache Weise periodische Vorgänge, etwa Sinusschwingungen, darstellen.

Imaginäre Zahlen sind dabei genauso real oder unreal wie jede andere Zahl auch. Eine Zahl ist per se eine Abstraktion, die von der Welt als phänomenologisches ›Sosein‹ abstrahiert, und Verschiedenes als gleich – nämlich als zählbar – setzt. Hieraus kann die Mathematik dann weitere Abstraktionen entfalten, etwa Addition, Multiplikation, Division, Potenzen etc., um aus den sich hieraus ergebenden logischen Zwängen neue Zahlen postulieren zu können, etwa die *gebrochene* Zahlen aus der Menge der *reellen Zahlen*  $R$  oder eben die *imaginären Zahlen*  $I$ . Wie bereits beschrieben: Reine Mathematik hat *per se* keinen Weltbezug. Sie gründet zwar sehr wohl in Anschauungen – etwa in den Symmetrien geometrischer Figuren –, entfaltet diese jedoch explizit ohne Referenz auf eine Außenwelt. Gerade aufgrund ihrer ›Irrealität‹, ›Imaginationalität‹ oder man könnte gar sagen ›Fiktionalität‹ ist sie in der Lage, einen großen Reichtum konsistenter Formen zu erzeugen, aus dem dann andere Wissenschaften schöpfen können, um die von ihnen entdeckten Beziehungen zu formalisieren.

### 3 Weiterer Verlauf dieser Studie

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

<sup>34</sup> Quelle: [http://www.iag.uni-hannover.de/~greite/ing0607/dateien/maple/bilder/MI\\_2\\_6\\_6.gif](http://www.iag.uni-hannover.de/~greite/ing0607/dateien/maple/bilder/MI_2_6_6.gif)

Im ersten Kapitel wird es darum gehen, die Bezugsprobleme nachzuvollziehen, die schließlich zu Entwicklung einer physikalischen Theorie geführt hat, 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 bizarre 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 ihren bizarren Charakter der Kopenhagener Deutung um nichts nachstehen.

Im dritten Kapitel stehen die Erfolge einer quantentheoretischen Experimentalphysik im Vordergrund. Da die Quantentheorie selbst in ihren vermeintlich absurden Vorhersagen nicht widerlegt werden kann, beginnt sich die Physik langsam an die Quantentheorie zu gewöhnen. Man kann mit ihr in den verschiedensten Bereichen erfolgreich arbeiten. Der 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 unser Erfahrungen gegebene Alltagswelt das Unerklärliche bildet. Wir begegnen hier einer Reihe von modernen Ansätzen, die einerseits von der Universalität der Quantentheorie ausgehen, andererseits aber Wege suchen, die erklären können, warum stabile klassisch erscheinende Welten auftreten. Es wird allerdings auch verständlich, dass solche Erklärungen nicht paradoxiefrei zu haben sind.

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

Das sechste Kapitel stellt sich der Frage, inwieweit die Spitzenprobleme in der Interpretation der Quantentheorie Bezüge zu Reflexionsformen der Mystik aufweisen. Das Geheimnis der koordinierten Koproduktion – der bodenlos ineinander verschachtelten System-Umwelt-Referenzen – wird hier virulent.

Im abschließenden Kapitel wird die Entwicklung der quantenphysikalischen Deutungsproblematik rekapituliert und unter dem Blickwinkel der Folgeprobleme einer Universaltheorie behandelt, die nicht umhin kommt, 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 umhin kommt, Verweise zu einer metaphysischen Reflexion mitzuführen.

Am Beispiel der Entstehung und Entwicklung der Quantentheorie können wir untersuchen, wie *Anschauung*, *Experiment* und *Entwicklungen der Mathematik* und *physikalische Theoriebildung* zueinander in produktive Wechselwirkung treten, um so eine solch bizarre Theorie, wie die Quantentheorie hervorzubringen. Diese The-

orieanlage 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.