

III NORMALISIERUNG – QUANTENTHEORIE UND EXPERIMENTALPHYSIK

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

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

¹ v. Weizsäcker (1994, 511).

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

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

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

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

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

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

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

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

² Einstein (1922).

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

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

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

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

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

³ Vgl. Bell (1964).

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

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

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

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

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

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

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

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

⁶ Aspect (1982)

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

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

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

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

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

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

2 Die Quantenelektrodynamik: Diagrammatische Anschaulichkeit

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

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

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

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

Der Grundgedanke der QED besteht darin, dass Teilchen, seien es Elektronen oder Photonen, nicht nur einen Weg nehmen, um von einem Punkt *a* nach Punkt *b* zu gelangen, sondern verschiedene, möglicherweise gar unendlich viele Pfade *gleichzeitig* durchlaufen, um ein beobachtbares Ergebnis zu realisieren. Zugleich realisierte Wege treten dabei jedoch in eine Interferenzbeziehung ein, sodass sie sich in ihrer Konsequenz oftmals wieder auslöschen. Die QED folgt damit der Grundintuition der Schrödinger-Gleichung. Sie fasst das elektrodynamische Feld konsequent als einen unendlich dimensionierten Vektorraum auf (»Hilbertraum«), in dem eine Vielzahl von Phasenbeziehungen zur Geltung kommen und entsprechend mit berücksichtigt werden müssen. Allgemein werden Feynmans Arbeiten eher nicht als eine eigenständige Interpretation der Quantenmechanik aufgefasst, sondern als eine Weiterentwicklung derselben zu einer allgemeinen Quantenfeldtheorie, mittels der sich auch die in Feldern anzutreffenden Dynamiken quantentheoretisch untersuchen lassen. Dennoch lässt sich die QED durchaus auch als eine eigenständige Interpretation der Quantentheorie betrachten. Sie entwickelt mit den Feynman-Diagrammen eine eigene Darstellungsform, über die neue Anschauungsmöglichkeiten generiert werden, was dazu führt, der Wellenfunktion einen stärkeren Realitätscharakter zugestehen zu müssen.¹⁰ Es scheint, dass Feynmann durch seine Arbeit implizit eine Alternative zur Kopenhagener Deutung anbietet, ohne dies jedoch als Theoriekonflikt explizit zu machen. Allein dies lässt die Beschäftigung mit der QED lohnenswert erscheinen. Darüber hinaus zeigen sich in der QED neue Weisen der Kombination von Mathematik und physikalisch-konzeptioneller Anschauung. Feynman hat eine *diagrammatische Umsetzung*¹¹ der Quantentheorie erfunden, über die sich recht komplexe Beziehungen in einfacher Form als Vektorgrafiken darstellen und nachvollziehen lassen. Die Quantenelektrodynamik gewinnt hierdurch eine Anschaulichkeit, die mit der Matrizenmechanik und der ψ -Funktion zunächst verloren gegangen war.

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

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

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

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

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

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

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

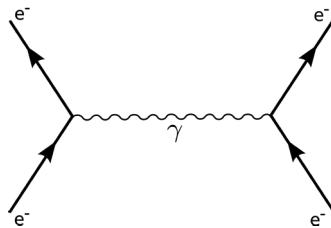


Abb. 13: Feynman Diagramm. Zwei Elektronen (e^-) stehen in Wechselwirkung, indem Photonen (γ) emittiert und absorbiert werden.¹³

¹² Feynman (2010, 101).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

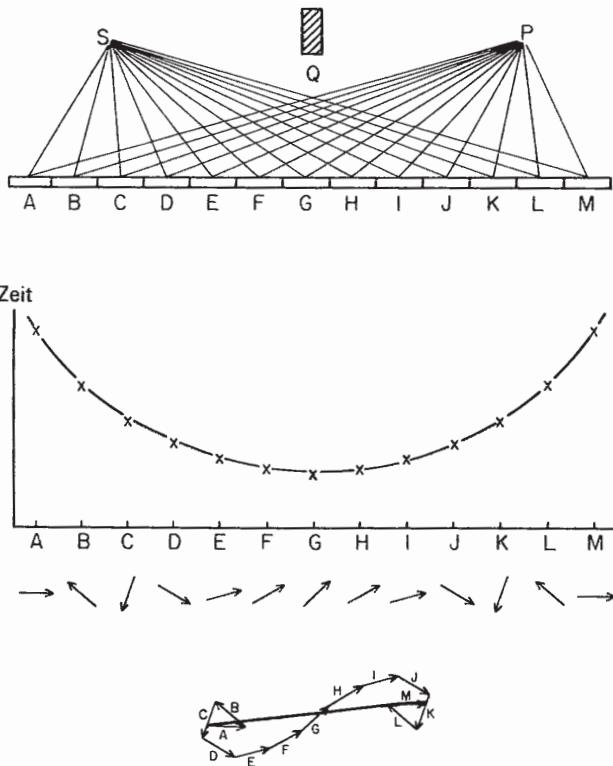


Abb. 14: Spiegelung eines Objekts. Darstellung oben: Spiegelung von S in den Segmenten des Spiegels und Reflektion zum Photosensor P. Darstellung Mitte: Zeitdauer der Wege von S zu P und die sich hieraus ergebende Phasenbeziehung. Darstellung unten: Addition der Vektoren und Bildung der Resultierenden.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

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

¹⁸ Darstellung entnommen aus Feynman (2010, 55).

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

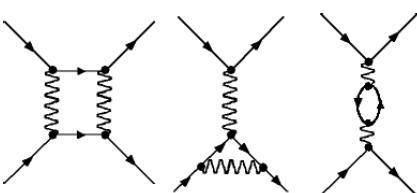
Wie wird nun die Beziehung zwischen Licht und Elektronen in der Quantenelektrodynamik verstanden? Wir erinnern uns, dass ein Elektron ein Photon emittieren oder absorbieren kann. Dies eröffnet die Möglichkeit, elektromagnetische Wirkungen wie Anziehung oder Abstoßung zu modellieren, ohne dass auf Kräfte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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Ein eindrucksvoller Erfolg der QED besteht in der Vorhersage des bereits erwähnten magnetischen Moments von Elektronen. Einfach gesagt, handelt es sich hier um die Frage, in welchem Maße ein Elektron mit einem Magnetfeld wechselwirkt. Wenn man jetzt einfach annehmen würde, dass ein geladenes Teilchen auf geradem Weg durch ein Magnetfeld läuft, errechnet sich ein Betrag, der dann üblicherweise auf den Wert >1< normiert wird. Empirisch ergibt sich jedoch eine kleine Abweichung von diesem Wert. Mit Feynman lässt sich diese Diskrepanz darüber erklären, dass ein Elektron in Wirklichkeit auch eine Vielzahl alternativer Wege zurücklegt, die dann in die Rechnung mit einzubeziehen sind. So könnte es beispielsweise zwischendurch ein Photon emittieren, um dieses ein wenig später wieder aufzunehmen. Mit Hilfe der Pfadintegration aller denkbaren Wege ist es gelungen, das theoretische Modell und die empirische Messung auf sieben Stellen hinter dem Komma miteinander abzugleichen.²² Experiment und Modell stimmen offensichtlich in

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

22 »[Das] magnetische Moment – stellt gewissermaßen die Antwort eines Elektrons auf ein äußeres Magnetfeld dar. Als Dirac die Regeln für die Berechnung dieser Zahl erarbeitete, benutzte er die Formel für $E(A \text{ nach } B)$ und erhielt eine recht einfache Antwort, die wir in unseren Einheiten als 1 setzen wollen. Das Diagramm für diesen ersten Näherungswert des magnetischen Moments eines Elektrons ist äußerst einfach – ein Elektron bewegt sich in der Raumzeit von einem Ort zu einem anderen und koppelt an ein Photon von einem Magneten [...]. Einige Jahre später

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Allem Anschein nach hängen von den kleinen Entfernungen zwischen den Koppelungspunkten *lediglich* die Werte n und j – *ohne hin nicht unmittelbar beobachtbare theoretische Zahlen* – ab. Alles andere dagegen, was beobachtet werden kann, scheint nicht davon betroffen zu sein. Das Spielchen, was wir auf der Suche nach n und j spielen, heißt im Fachausdruck ›Renormierung‹, ein reichlich hochtrabender Begriff für ein verücktes Verfahren! Ein solcher Hokuspokus hat uns daran gehindert, die mathematische Folgerichtigkeit der Theorie der Quantenelektrodynamik

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

²⁸ Luhmann (1998, 201).

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

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

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

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

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

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

³⁰ Vgl. Löwdin (1963).

wähnt, beruht eine Vielzahl elektronischer Bauteile auf diesem Quanteneffekt.³¹

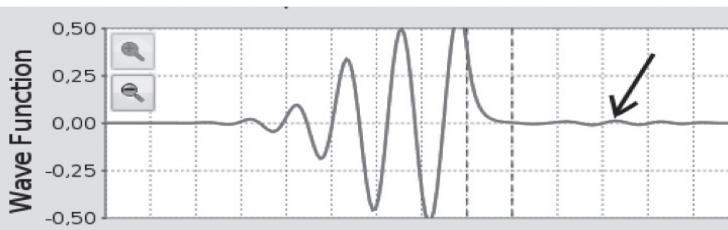


Abb. 16: Berechnung eines Tunneleffekts. Die Wellenfunktion läuft auf eine Barriere zu und wird innerhalb dieser erheblich gedämpft. Dennoch breitet sich ihr Wellenmuster – wenngleich stark abgeschwächt – außerhalb der Barriere fort.³²

Kommen wir zu einer anderen wichtigen Feldeigenschaft, die sich aus der Quantentheorie ableiten lässt. Wie bereits in Kapitel I angedeutet, folgt aus der Nicht-Vertauschbarkeit der Operatoren zwingend die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation. Hieraus ergibt sich die Konsequenz, dass es keinen wirklich leeren Raum geben kann, denn selbst im Vakuum sind nach der Theorie Quantenfluktuationen zu erwarten. In Hinblick auf die quantenmechanisch konjugierten elektrischen und magnetischen Felder ergibt sich zudem das Postulat, dass selbst ein strahlungs- und materiefreier Raum eine gewisse Grundenergie besitzen muss.

1948 entwickelte der Physiker Hendrik Casimir die Idee zu einem Experiment, mit dem die Vakuumenergie experimentell nachgewiesen werden kann. Die Grundidee ist folgende: Man bringt im Vakuum zwei parallel angeordnete leitende Platten nahe zueinander. Da man sich aufgrund der quantentheoretisch vorhergesagten Vakuumfluktuationen den Raum mit virtuellen Photonen angefüllt zu denken hat, ist zu vermuten, dass diese auch auf die Platten eine Wirkung ausüben. Photonen haben aber eine bestimmte Wellenlänge und entsprechend ist zu erwarten, dass es zwischen den Platten zu Interferenzen kommen wird. Zwischen den Platten können entsprechend nur Photonen mit einem Vielfachen einer durch den Abstand

³¹ Siehe zur Durchtunnelung von elektrischen Isolatoren Fischer und Giæver (1961).

³² Die Darstellung wurde der schönen Einführung in die Schrödinger-Gleichung von Martin Bäker entnommen. Download am 1.6.2011 unter <http://www.scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2010/11/die-schrodinger-gleichung-teil-vii-im-tunnel.php>.

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

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

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

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

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

³⁴ Siehe Aharonov/Bohm (1959; 1961).

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

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

Interferometer

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

Einige interessante Varianten von Weg-Information-Experimenten lassen sich mit Hilfe eines Interferometer durchführen. Hier trifft Licht aus einem Laser auf einen halbdurchlässigen Spiegel. Der Strahl wird gespalten. Beide Teilstrahlen werden jedoch mit Hilfe weiterer Spiegel wieder zusammengeführt und treffen abschließend auf einen zusätzlichen halbdurchlässigen Spiegel.

Schauen wir uns das Arrangement an, so wird deutlich, dass die Lichtstrahlen unterschiedliche Wege nehmen, aber am letzten Spiegel wieder vereint werden, um hier dann allerdings nochmals gespalten und auf zwei Detektoren verteilt zu werden. Aufgrund von Phasenverschiebungen bei einer Spiegelung laufen die Wellen nicht unbedingt synchron. Entsprechend können bei bestimmten Konstellationen destruktive Interferenzen auftreten, d. h. die Wellen löschen sich wechselseitig aus, wenn sie phasenverkehrt zusammentreffen. Mit ein wenig Geschick lässt sich das Interferometer so justieren, dass an einem der Detektoren alles Licht und an anderen kein Licht mehr festgestellt werden kann. Wenn jetzt jedoch mit einem Messgerät

³⁵ Ein erster Überblick in die derzeit möglichen Experimente findet sich in Greene (2008, 100 ff.) oder Zeilinger (2005).

innerhalb der Anordnung zusätzlich noch detektiert wird, ob ein bestimmter Weg eingenommen wurde, so lässt sich die Interferenz nicht mehr feststellen. Der letzte halbdurchlässige Spiegel teilt wieder die Lichtmenge und entsprechend können wieder an beiden Detektoren Signale gemessen werden. Das Gleiche ist der Fall, wenn man einen der beiden Lichtwege verstellt.

Auch hier verschwindet die Interferenz. Selbst wenn man die Lichtquelle soweit herunterfährt, dass einzelne Photonen gemessen werden können, ändert dies nichts an den zuvor beschriebenen Resultaten. Wie im Doppelspaltexperiment scheint das Licht gleichzeitig beide Wege zu nehmen, es sei denn, es wird irgendwo gemessen. Nun ergibt sich keine Interferenz mehr.

Das Mach-Zehnder-Interferometer eröffnet die Option der wechselwirkungsfreien Messung, ob ein Objekt in einem der Strahlgänge versteckt ist oder nicht. Wenn ein Lichtquant den unverstellten Pfad wählt und zugleich die Interferenz ausbleibt, so lässt sich eine Aussage über ein Objekt im Strahlgang treffen, ohne dass dieses auch nur einem Lichtquant ausgesetzt worden ist.³⁷

Bemerkenswert ist der Befund, dass erst mit dem zweiten, am Ausgang platzierten halbdurchlässigen Spiegel das Auftreten von Interferenzen ermöglicht wird, diese dann jedoch durch die Bestimmung des Weges wieder ausgelöscht werden können. Es scheint so, als ob durch den Einbau des letzten Spiegels eine neue Mehrdeutigkeit entsteht, also gleichsam durch den Versuchsaufbau neues *Nicht-Wissen* erzeugt wird.³⁸ Wissen und Nicht-Wissen scheinen hier in

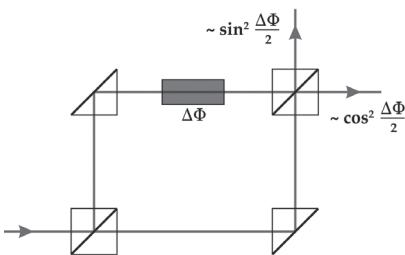


Abb. 17: Mach-Zehnder Interferometer³⁶

³⁶ Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c9/Mach-Zehnder_interferometer.svg/350px-Mach-Zehnder_interferometer.svg.png (download 15.7.2012).

³⁷ Siehe Kwiat, Weinfurter und Zeilinger (1997).

³⁸ »Wheeler hat das so ausgedrückt: »... das Photon ... nimmt nur einen Weg, aber es nimmt beide Wege, es nimmt beide Wege, aber es nimmt nur einen Weg. Was für ein Unsinn! Wie offenkundig ist es, dass die Quantentheorie widersprüchlich ist!« Nach Niels Bohr ist sie jedoch gar nicht widersprüchlich. Es ist eben der gesamte experimentelle Aufbau, den wir bei der Analyse der Eigenschaften eines Systems heranziehen müssen, und der experimentelle Aufbau ist eben qualitativ verschieden, je nachdem, ob der letzte halbreflektierende Spiegel eingesetzt wird oder nicht. Wird

einem wechselseitigen konstitutiven Zusammenhang zu stehen, aus dem dann bestimmte Konstellationen von Beobachtbarem und Erwartbarem entstehen.

Delayed-Choice-Experimente

Der zweistufige Aufbau des Interferometers führte Archibald Wheeler zu einem Gedankenexperiment, mit dem die Zeitverhältnisse in Bezug auf die Generierung von potenziellem Wissen untersucht werden können. Er entwickelte hieraus die Idee der *delayed-choice*-Experimente. Da das Licht Zeit benötigt, um den Strahlengang des Versuchsaufbaus zu durchlaufen, kann man jetzt ein Experiment ersinnen, in dem erst, nachdem ein Photon den ersten Halbspiegel durchquert hat, entschieden wird, ob man den zweiten Halbspiegel am Ausgang einsetzt. Prinzipiell lassen sich mit Wheeler gar Experimente kosmologischen Ausmaßes ersinnen.³⁹ So könnte beispielsweise das Licht von sehr hellen lichtintensiven Sternen (Quasaren) betrachtet werden, welches durch Gravitationszentren in zwei Wege gespalten wurde, so dass man am Himmel jetzt ein Doppelbild sieht. Durch Spiegelanordnungen könnte man diese beiden Strahlen wieder in Form eines Interferometers zusammenführen und schauen, in welcher Weise Weginformation und Interferenz miteinander in Beziehung stehen.

Nach der klassischen Teilchenauffassung wäre die Entscheidung, welcher Weg genommen worden ist, bereits Lichtjahre vor der vom Experimentator gewählten Messentscheidung getroffen worden. Mittlerweile sind eine Reihe von *delayed-choice*-Experimenten durchgeführt worden, die der Grundidee von Wheelers Gedankenexperiment folgen.⁴⁰ Bislang führen alle zu dem Befund, dass erst die Messentscheidung den Charakter des Experiments determiniert. Im Sinne der Kopenhagener Interpretation würde dies bedeuten, dass die Bahn der Photonen vor der Messung *nicht* existiert (und zwar selbst dann, wenn das Photon Jahre vorher entstanden sein mag).

er eingesetzt, haben wir offenbar keine Information über den Weg, den das Teilchen genommen hat. Das Interessante an der Quantenphysik ist eben gerade, dass dieses Nicht-Wissen zu etwas qualitativ Neuem führt, nämlich zur Interferenz beider Möglichkeiten. Man sollte also korrekt erweise nicht behaupten, das Teilchen habe beide Wege genommen, sondern: Wir wissen nicht – und niemand kann das wissen –, welchen Weg das Teilchen in diesem Fall genommen hat« (Zeilinger 2005, 201 f.).

³⁹ Siehe Wheeler (1978).

⁴⁰ Siehe etwa Jacques et al. (2007).

Erhebung und Auslöschung der Weginformation

Eine weitere aufschlussreiche Variante des Doppelspaltexperiments besteht in einer Anordnung, mittels der die Weginformation zunächst erhoben wird, dann aber in einem zweiten Schritt die gewonnene Information wieder zerstört wird. Das zunächst gewonnene Datum wird gleichsam ausradiert, bevor es genutzt werden kann, weshalb man diese Art von Versuchsaufbau auch als *Quantum Eraser* bezeichnet.

Ein solches Experiment lässt sich beispielsweise verwirklichen, indem man zunächst einen Polarisationsfilter in beide Wege stellt – sobald die Polarisation eines Quantenteilchens bestimmt ist, ist auch deren Weg bestimmt und damit verschwindet das Interferenzmuster. Vor den Schirm kann man nun einen weiteren Polarisationsfilter anbringen. Wenn dieser um einen Winkel von 45° zu den am Spalt angebrachten Filtern gedreht ist, wird die hiermit ermittelbare Information wieder aufgehoben, denn aufgrund des querstehenden Polarisators würde jetzt für beide Polarisationsrichtungen jeweils die eine Hälfte der Quantenteilchen die eine und die andere Hälfte die jeweils entgegengesetzte Drehrichtung einnehmen. Die Ungewissheit über den Status der Quantenteilchen ist damit wiederhergestellt und bemerkenswerterweise liefert das Experiment in dieser Anordnung wieder das Interferenzmuster.⁴¹ Man kann diese Experimente variieren, etwa indem nur zu einem gewissen Grad die Weginformation erhoben wird. Je nach Bestimmungsgrad verwischt dann die Interferenz in einem kontinuierlichen Übergang zwischen einem scharfen Streifenmuster und jenem Streubild, das sich bei hundert Prozent sicherer Weginformation ergeben würde.

Welle-Teilchen-Dualismus von Molekülen

Eine weitere für unseren Zusammenhang aufschlussreiche Klasse von Experimenten besteht darin, das Doppelspaltexperiment auf größere Objekte, etwa auf Atome oder gar Moleküle auszuweiten. Wenn man bereit ist, de Broglie zu folgen und auch Materie Welleneigenschaften zuspricht,⁴² dann müssten prinzipiell auch Moleküle Interferenzeigenschaften zeigen können. Mittlerweile ist das Doppelspaltexperiment mit Fullerenen durchgeführt worden.⁴³

⁴¹ Siehe etwa die Quantum-Eraser-Experimente, die von der Gruppe um Anton Zeilinger durchgeführt worden sind (Herzog, et al. 1995). Vgl. auch Walborn et al. (2002).

⁴² de Broglie (1927).

⁴³ Siehe Arndt et al. (1999).

Dies sind kugelförmige Kohlenstoffmoleküle mit einer hohen Symmetrie, deren Atome wie auf der Oberfläche eines Fußballes angeordnet sind. Im Falle des C_{60} besteht ein solches Molekül aus zwanzig Sechsecken und zwölf Fünfecken.⁴⁴ In der Arbeitsgruppe von Zeilinger konnten auch bei diesen großen Molekülen die für Quantenobjekte typischen Interferenzen nachgewiesen werden. Dabei wurde folgender Versuchsaufbau verwirklicht:

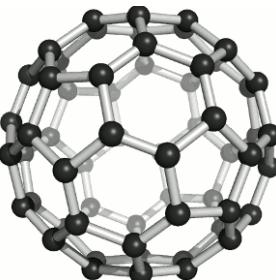


Abb. 18: C_{60} -Fulleren⁴⁵

»Im Experiment kommen diese Fußballmoleküle aus einem Ofen, der sich auf einer Temperatur von etwa 650 Grad Celsius befindet. Bei dieser hohen Temperatur verdampfen diese Moleküle und verlassen den Ofen durch eine kleine Öffnung. Nach etwa einem Meter Flugstrecke treffen die Moleküle zwar nicht auf einen Doppelspalt, dafür aber auf ein Vielspaltsystem, ein Gitter. Nach einem weiteren Meter werden diese Moleküle registriert, und was [...] dann auf dem Computerbildschirm [zu sehen ist], ist nichts anderes als die Verteilung der Fußballmoleküle in der Beobachtungsebene. Dies entspricht den hellen und dunklen Streifen im Doppelspaltexperiment, aber diesmal nicht aus Licht, sondern aus massiven Teilchen. Das heißt, es gibt in der Beobachtungsebene einen Meter hinter dem feinen Gitter im Idealfall Stellen, auf die keine Fußballmoleküle treffen, wie auch andere Stellen, auf die sehr viele treffen. Genauso wie beim Doppelspalt ist dieses Ergebnis auch beim Gitter durch Quanteninterferenz zu erklären. Jedem einzelnen Fullerene-Molekül ist eine Welle zuzuordnen, die durch zwei oder mehr benachbarte Öffnungen des Gitters hindurchtritt. An manchen Stellen der Beobachtungsebene löschen sich diese Wellen gegenseitig aus, dort können also keine Fußballmoleküle mehr hin, an anderen Stellen verstärken sie sich gegenseitig«.⁴⁶

⁴⁴ Die Fullerene haben ihren Namen in Gedenken an den Erfinder und Architekten Buckminster Fuller, der in seinen Arbeiten selbsttragende Strukturen entwickelt hat, die den Fußballmolekülen ähneln (vgl. Krausse/Lichtenstein 1999).

⁴⁵ Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Buckminsterfullerene_animated.gif (download 15.7.2012).

⁴⁶ Zeilinger (2005, 102 f.).

Damit das Interferenzbild entsteht, muss der Versuch im Vakuum durchgeführt werden, denn in einer Gasatmosphäre bekommt man nur Teilchenverteilungen ohne Interferenzbilder. Die Luftmoleküle scheinen durch ihre Interaktion mit den Fullererenen diese gleichsam zu ›messen‹ und auf diese Weise in individuierbare Teilchen zu überführen. Demgegenüber scheinen sich die Fullerene ohne Messung als eine Welle zu verhalten, die das Gitter an verschiedenen Stellen durchquert und entsprechend auf dem Schirm ein Interferenzmuster erzeugt. Bemerkenswert an diesem Versuch ist, dass die Fullerenvolke mit einer Temperatur von 650° Celsius selbst infrarotes Licht aussendet. Aufgrund des langwülligen Charakters lässt sich dieses jedoch nicht zur Bestimmung der Weginformation nutzen. Man kann jetzt aber die Fullerene weiter bis auf 3000° C aufheizen, so dass eine kurzwellige Strahlung entsteht, die potenziell genutzt werden könnte, um den Ort einzelner Fullerennmoleküle zu bestimmen.⁴⁷ Bemerkenswerterweise verschwindet mit zunehmender Aufheizung auch das Interferenzbild. Es besteht hier also ein starker Zusammenhang zwischen der Möglichkeit von Wechselwirkungen, die auf ein lokalisiertes Teilchen schließen lassen, und dem Auftreten von destruktiven Interferenzen, die sich anschaulich aus dem Wellenbild ergeben würden. Wohlgemerkt: Die Bestimmung des Ortes der Fullerene durch das von ihnen ausgesendete kurzwellige Licht muss nicht real durchgeführt werden, damit die Interferenz verschwindet. Wie auch schon bei der Interaktion mit den Luftmolekülen reicht allein, dass der Nachweis einer stattgefundenen Interaktion prinzipiell möglich ist.

Die hier vorgestellten neueren Variationen zum Doppelspaltexperiment zeigen auf, dass sich sehr wohl sinnvolle physikalische Fragen stellen lassen, die über die Standardinterpretation der Kopenhagener Deutung hinausweisen. So wird deutlich, dass eine ›Messung‹ bereits durch Luftmoleküle oder die Wechselwirkung entsprechend kurzwelliger elektromagnetischer Wellen veranlasst werden kann. Man braucht also nicht mehr auf eine Metaphysik des Beobachters zurückzugreifen, wonach ein Messakt subjektphilosophisch zu deuten ist. Als Minimalbedingung einer quantenphysikalischen ›Beobachtung‹ scheint jetzt eine physikalische Konstellation auszureichen, in der eine wie auch immer geartete Interaktion einen Unterschied machen kann.

Die *delayed-choice-* und die *quantum-eraser*-Experimente zeigen jedoch, dass das Mysterium der Quantentheorie damit nicht aufgehoben ist. Das Dilemma des Welle-Teilchen-Dualismus bleibt bestehen und die Option, die Quantenphysik aufgrund klassischer

47 Siehe Zeilinger (2005, 103 f.).

Beschreibungsweisen verstehen zu können, rückt hiermit in weite Ferne. Wie kann man sich einen Messvorgang noch als eine unumkehrbare Beeinflussung des zu messenden Objekts vorstellen, wenn die anschließende Löschung der Weginformation das vermeintlich ausgelöschte Wellenmuster wiederherstellt? Wie hat man sich einen Welle-Teilchen-Dualismus vorzustellen, demzufolge scheinbar die Entscheidung über den gewählten Weg vom Ende und nicht vom Anfang her zu denken ist?

Exkurs: Aktuelle Auseinandersetzung um die Interpretation der Doppelspaltexperimente

Im Zusammenhang der vorangehend geschilderten Experimente lohnt es sich, etwas näher auf Ulrich Mohrhoffs Variante der Interpretation von quantentheoretischen Prozessen einzugehen.⁴⁸ Der Grundgedanke seiner Interpretation lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Grundsätzlich wird eine realistische Perspektive eingenommen. Die Objekte unserer Alltagswelt, die den Gesetzen der klassischen Physik folgen, sind ebenso als ›real‹ zu betrachten wie der unbestimmte Charakter der Quantensysteme in der Mikrowelt. Anders als in Poppers Ensemble-Interpretation, werden die den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit folgenden Verwirklichungstendenzen (Propensitäten) jedoch nicht als kollektive Eigenschaften streuender Teilchengruppen verstanden. Vielmehr werden *einzelne* Quantenobjekte jetzt als ›objektiv‹ unbestimmt betrachtet. Entsprechend treten nach Morhoff auf der Quantenebene all die theoretisch ableitbaren Merkwürdigkeiten (einschließlich rückwärtslaufender Kausalbeziehungen!⁴⁹) als Folge ihrer inhärenten Unbestimmtheit ›wirklich‹ auf.

Im Sinne einer ›interaktionistischen‹ Perspektive ließen sich Quantenteilchen jedoch durch makroskopische Objekte bestimmen, da die Interaktion mit einer Messapparatur zu einem eindeutigen Ergebnis führe. Die Qualitäten mikrophysikalischer Objekte wären damit nicht als intrinsische Eigenschaften von Quantensystemen anzusehen, sondern würden von außen, also *extrinsisch* durch die Begegnung mit Makroobjekten bestimmt. Die aus der Alltagswelt bekannten Objekte übernehmen also die funktionale Rolle, welche in einer nicht-realistischen Interpretation der Beobachter einnimmt. Makroobjekte werden gleichsam als selbstindizierend betrachtet, während ein Quantenobjekt zu seiner Bestimmung eine Fremdindizierung durch ein Makroobjekt benötigen würde. Da Quantenobjekte auch

48 Siehe etwa Mohrhoff (1999a; 1999b; 2000; 2002).

49 Siehe Mohrhoff (1999a).

in Hinblick auf Ort und Zeit unbestimmt sind, könnte jetzt auch ihre raumzeitliche Verortung als durch Makroobjekte bestimmt gesehen werden. Sobald eine diesbezügliche Indizierung stattgefunden hat, würden wir also jene irreversiblen Kausalbeziehungen vorfinden, die uns aus der klassischen Welt vertraut sind, wo Raum, Zeit und Kausalität offensichtlich eindeutig bestimmt sind.⁵⁰

Mit Morhoff begegnen wir einem interessanten Derivat der Kopenhagener Interpretation, in der die funktionale Stelle des Beobachters durch (selbst-)indizierende Eigenschaften von Makroobjekten ersetzt wird. Ungeachtet der epistemischen Attraktion eines solchen, gewissermaßen umgedrehten Reduktionismus, stellt sich jedoch bei genauer Betrachtung heraus, dass hiermit das Beobachterproblem nicht wirklich gelöst ist.

Wie bereits bei v. Neumann bleibt die Frage offen, wie seinerseits das klassische Objekt, welches zur Bestimmung des Quantenobjektes benötigt wird, von seiner Umwelt abgegrenzt werden kann. Die Frage, ob zu einem Messgerät auch das Gebäude des Versuchsräum, die Atmosphäre, der Versuchsleiter (und warum nicht gleich das ganze Universum) dazugehört, lässt sich nicht beantworten.⁵¹ Wir

⁵⁰ »The macroscopic positions are assumed to be intrinsic, self-indicating and real, while the properties of the microscopic world are contingent and extrinsic, depending on what happens in the macro-world. Mohrhoff's interpretation emphasizes the objective fuzziness of all quantum phenomena, assigning objective probabilities to the possible outcomes of unperformed measurements. He extends this non-valuedness and fuzziness to the concepts of space and time and introduces a new understanding of spatiotemporal events, the character of physical reality and the meaning of objective probability« (Shafiee/Jafar-Aghdamib/Golshanic 2006, 316).

⁵¹ »If indication is equivalent to measurement, one wonders how by invoking this notion, one can solve the anomalies of quantum world. As a matter of fact, one could declare that an indication without an observer has no meaning in the quantum domain, even if the classical objects are considered to be self-indicating. For without an observer, it cannot be verified if any property is really indicated for quantum systems. If there is a macroscopic object somewhere, then, we are always confronted with the question of how can one be assured of whether a measuring apparatus performs a measurement or not? For example, in Schrödinger's cat experiment, one cannot distinguish that the cat is dead or alive (and consequently, one cannot identify whether the spin direction of the corresponding electron, e.g., is up or down), when the cat is not observed and there is no perception of what was being measured (or indicated) therein. Mohrhoff's interpretation does not rule out the role of observer. Otherwise, the question arises as to whether the measuring instrument can provide the ground for indicating a micro-object without an observer turning on the apparatus, performing the measurement and analyzing the data.«

gelangen entweder mit Bohm zu einem so umfassenden relationalen Holismus, dass es kaum mehr Sinn sinnvoll ist, von einem Makro-objekt zu sprechen (denn das Objekt wäre dann letztendlich nichts anderes als die Wellenfunktion des gesamten Universums), oder wir hätten jetzt wiederum von einer relativen Bestimmung auszugehen, die jedoch einen willkürlichen Schnitt in der Welt durch einen Beobachter voraussetzt.

Ein weiteres Problem liegt in der Frage des Anfangs. In Hinblick auf die kosmologische Evolution ist ja anzunehmen, dass makroskopische Objekte nicht schon immer vorhanden waren, sondern ihrerseits erst aus einer ›Quantensuppe‹ heraus entstanden sind. Mit Mohrhoffs Theorie würde es uns jetzt aber nicht gelingen, zu einem anfangslosen Zirkel der Selbstbestimmung zu gelangen. Da Quantenzustände aus dieser Perspektive nicht aus sich heraus zu einer weitgehenden Bestimmung fähig sind, sondern hierzu bereits in Raum und Zeit lokalisierte Objekte benötigen, gibt es keinen Anfang.⁵²

So attraktiv es auch erscheinen mag, einen *bottom-up*-Reduktionsismus durch ein eineindeutiges *top-down*-Kausalschema zu ersetzen, die Paradoxien der Quantentheorie verschwinden hiermit nicht.

Insbesondere Bohr hatte postuliert, dass mit der Quantentheorie eine epistemische Grenze erreicht sei, nach der es keinen Sinn mehr ergebe, nach Erklärungen zu suchen, die außerhalb der komplementär zu verstehenden Wellen- und Teilchenbeschreibung liegen.

Die hier vorgestellten Experimente haben erneut die Büchse der Pandora geöffnet. Sie offenbaren zwar neue und überraschende Einsichten in das Verhalten von Quantenobjekten. Wie man diese denkwürdigen Ergebnisse im Kontext einer ebenso denkwürdigen Theorie zu verstehen hat, bleibt jedoch alles andere als eindeutig.

One should also note that we need to have a definite quantitative definition for the spatial distribution of a classical object. One cannot define qualitatively the border between a sharp distribution and a non-sharp distribution because there is a possibility that we may not be able to distinguish these two notions in some given regions. One has to have a quantitative criterion for defining the sharpness of a spatial distribution and how one can distinguish a sharp distribution from a non-sharp one« (Shafiee/Jafar-Aghdamib/Golshanic 2006, 327).

⁵² »The existence of classical world, with objects having sharp spatial distribution, requires certain conditions which have not been there all the time. For example, what kind of reality could one ascribe to fundamental particles in the early universe, when there was no indication? Apparently, Mohrhoff takes it for granted that the classical world has always been there and that it will exist in the future« (Shafiee/Jafar-Aghdamib/Golshanic 2006, 327).

Der Experimentalphysiker Zeilinger schlägt etwa eine Radikalisierung der Kopenhagener Deutung vor und empfiehlt, das Wellen- und das Teilchenbild ganz *aufzugeben*, um stattdessen die Quantenprozesse primär auf Basis eines abstrakt gefassten Informationsbegriffs zu rekonstruieren, der diese Vorstellungen nicht mehr braucht (siehe hierzu ausführlich Kapitel IV. 3).

Demgegenüber sprechen sich Englert, Scully und Walther aufgrund der oben vorgestellten Experimente dafür aus, das Komplementaritätsprinzip zu radikalisieren, also Wellen- und Teilcheneigenschaften von Quantenmaterie *gleichzeitig* als real zu betrachten. Man hätte dann die Unbestimmtheitsrelation und das hieraus entstehende Verhältnis von Wissen und Nicht-Wissen als abgeleitete Phänomene zu begreifen.⁵³ In den Quantenobjekten würden sich dann klassische und nicht-klassische Eigenschaften in einer interessanten Weise miteinander verzahnen. Während in einer ungestörten Wahrscheinlichkeitswelle auch *rückwärtslaufende* Kausalitäten auftreten können, würde die Interaktion zwischen Quantenobjekten zu einem Symmetriebruch führen, der Ursache und Wirkung irreversibel aneinanderkettet.⁵⁴ Dies würde dann auch erklären, warum Quantenzustände solange erzeugt und wieder vernichtet werden können (Reversibilität), bis sie auf einen Beobachtungsprozess treffen, der das Geschehen zu einem irreversiblen Ereignis macht.

Die innerphysikalische Auseinandersetzung um die Interpretation der neuen Doppelpaltexperimente lässt zum einen deutlich werden, dass die Frage der Deutung der Quantentheorie zunehmend aus dem Bereich metaphysischer Spekulation in die Sphäre einer hypothesen-testenden Experimentalphysik überführt wird. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass damit die Frage der Interpretation keineswegs in Richtung von mehr Eindeutigkeit überführt werden kann. Im Gegenteil, je nach gewähltem theoretischen Ausgangspunkt lassen sich die divergierenden Interpretationsansätze weiter entfalten. Die Fortschritte in der empirischen Forschung führen in eine Diversifizierung anstelle einer Vereinheitlichung der theoretischen Diskurse.

Auch dies spricht wieder für den bereits geäußerten Befund, dass physikalische Theorien heutzutage immer weniger die Realität abbilden, sondern primär autonome konzeptionelle und begriffliche Gebilde darstellen, die in Hinblick auf ihre theoretischen Möglichkeiten erforscht und aus denen dann auch empirisch überprüfbare Hypothesen abgeleitet werden können. Erst in Distanz zur beobachtbaren Wirklichkeit können die Potenziale eines theoretischen Ansatzes ausgelotet werden. Die Quantentheorie steht damit für den endgültigen Bruch zwischen einer dem Common Sense verpflicht-

⁵³ Englert, Scully und Walther (1995).

⁵⁴ So dann auch Mohrhoff (1999a).

teten Anschauung von Realität und der physikalisch-theoretischen Konzeptionalisierung von Wirklichkeit. Als Folgelast hat die Physik wohl auch in Zukunft hinzunehmen, dass sie theoretisch nicht mehr zu einer Einheit finden kann, dass also unterschiedliche theoretische Zugänge parallel entwickelt und ausdifferenziert werden, um physikalische Sachverhalte erklären und deuten zu können.

5 Makroskopische Quantenphänomene: Emergente, kollektive Ordnungen

Auf den folgenden Seiten soll mit der Suprafluidität, der Supraleitung und den Quantenhalleffekten auf eine Gruppe interessanter empirischer Phänomene eingegangen werden, die in besonderer Weise die Verzahnung von Theorie, Experimentalphysik und Theorieentwicklung innerhalb der Quantenphysik deutlich machen. Hier zeigt sich, wie von einem spezifischen empirischen Forschungsfeld aus Erkenntnisse generiert werden, die dann wiederum auf das Verständnis der Quantentheorie rückwirken, indem neue Wege aufgezeigt werden, wie Phänomene quantenmechanisch konzeptionalisiert und interpretiert werden können. Als Ausgangsproblem erscheinen zunächst seltsame und unerklärliche empirische Phänomene, die in Rückgriff auf quantentheoretische Überlegungen möglicherweise einer Klärung zugeführt werden können, dann aber die Quantentheorie herausfordern, ihre Denkweisen unter dem Blickwinkel emergenztheoretischer Konzepte zu reflektieren. Die spezielle Anwendung der Quantenmechanik auf diese Phänomene wirft also neue Bezugsprobleme auf, die zu einer eigenständigen Theoriebildung im Sinne einer in sich konsistenten physikalischen Anschauung führen.

Kollektive Quantenphänomene sind von Einstein auf Grundlage einer Arbeit des indischen Physikers Bose schon im Jahr 1925 aufgrund von theoretischen Überlegungen vorhergesagt worden. Seine Argumentation schließt an die Planckschen Studien zur Schwarzkörperstrahlung an, die zur Entdeckung der Quantelung von Strahlungsenergien geführt hatte. Planck hat dabei auf Boltzmanns wahrscheinlichkeitstheoretische Interpretation der Entropie zurückgegriffen, die das Verhalten von Gasen beschreibt. Hierbei werden all die Varianten ausgezählt, über die ein Makrozustand realisiert werden kann. Auf Basis der sich hieraus ergebenden Statistik konnte Planck zeigen, dass die Strahlungsformel, in die das Plancksche Wirkungsquantum eingefügt werden musste, auch physikalisch-konzeptionell sinnvoll ist (siehe ausführlich Kapitel I).

Da die Planckschen Arbeiten sowieso schon auf eine nähere Verbindung im Verhalten von Strahlung und Gasen hinweisen, lag es für Einstein nahe, die sich hieraus ergebenden Beziehungen näher zu erkunden und zu schauen, ob sie sich in eine vollständige Analogie von Quantengas und Molekülgas überführen lassen.⁵⁵

Die Grundidee ist dabei folgende: Man erweitert die Planckschen Arbeiten auf Materiewellen, die sich durch die von de Broglie gefundene Beziehung beschreiben lassen. Für unsere Zwecke reicht es zu verstehen, dass die Wellenlänge von der Temperatur abhängt. Kälte geht mit langsameren Atom- oder Molekülbewegungen und entsprechend längeren Wellenlängen einher. Heißere Verhältnisse führen demgegenüber zu kürzeren Wellenlängen mit entsprechend höheren Frequenzen und Energien. Bei sehr kalten Temperaturen werden die Wellenlängen so groß, dass ein Wellenzug die räumliche Anordnung mehrerer Atome übergreifen kann. Die Wellen der einzelnen Atome beginnen sich entsprechend in einer Weise zu überlagern, dass sie örtlich nicht mehr einzelnen Teilchen zugeordnet werden können. Einstein postulierte nun mit Blick auf die Analogie von Quanten- und Atombeschreibung, dass unterhalb einer kritischen Temperatur ein Phasenübergang stattfinden müsse. Die Teilchen würden hier gleichsam ihre Identität verlieren und zu einem Kondensat zusammenfinden, das durch eine übergreifende Wellenbeziehung charakterisiert werden müsse.⁵⁶

⁵⁵ Hierzu Einstein im Original: »In einer neulich in diesen Berichten [Quelle 1924] erschienenen Abhandlung wurde unter Anwendung einer von Hrn. D. Bose zur Ableitung der Planckschen Strahlungsformel erdachten Methode eine Theorie der ‚Entartung‘ idealer Gase angegeben. Das Interesse dieser Theorie liegt darin, daß sie auf die Hypothese einer weitgehenden Verwandtschaft zwischen Strahlung und Gas gegründet ist. Nach dieser Theorie weicht das entartete Gas von dem Gas der mechanischen Statistik in analoger Weise ab, wie die Strahlung gemäß dem Planckschen Gesetze von der Strahlung gemäß dem Wienschen Gesetze. Wenn die Bosesche Ableitung der Planckschen Strahlungsformel ernst genommen wird, so wird man auch an dieser Theorie des idealen Gases nicht vorbeigehen dürfen; denn wenn es gerechtfertigt ist, die Strahlung als Quantengas aufzufassen, so muß die Analogie zwischen Quantengas und Molekülgas eine vollständige sein« (Einstein 1925).

⁵⁶ Quantenteilchen, wie Elektronen in einem Atom oder Molekül, verlieren entsprechend der Quantentheorie per se ihre Identität, da sie nicht räumlich lokalisiert zu denken sind. Sie sind damit auch nicht im Sinne von Ordinalzahlenzählbar, wie Lévy-Leblond herausstellt. »Man kann die Anzahl der Elektronen zählen, aber nicht dadurch, dass man sie voneinander unterscheiden könnte, was zur Folge hat, dass der Begriff der Anzahl für Quantenobjekte sehr viel schwieriger zu handhaben ist

Wie bereits gesagt, sind die Überlegungen, welche zur Vorhersage des *Bose-Einstein-Kondensats* führen, statistische.⁵⁷ Jenseits einer kritischen Temperaturgrenze, wird der Übergang von einer in eine andere Phase mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartbar. Der vorhergesagte Effekt beruht darauf, dass das Verhalten eines Partikels von dem Verhalten anderer Partikel abhängig ist. Dies impliziert, dass die kollektiven Eigenschaften umso wahrscheinlicher werden, je mehr Partikel in das System involviert sind. Mikroskopisches Verhalten erscheint damit als emergentes Produkt makroskopischer Ordnungszustände.

als für gewöhnliche Objekte. Im Rahmen des klassischen Begriffs der Anzahl, der dazu dient, die Äpfel, die Scheuerlappen, die Servietten, überhaupt alle gewöhnlichen Gegenstände zu zählen, unterscheidet man zwei Aspekte, den kardinalen und den ordinalen Aspekt der Zahl. Der Kardinalzahlaspekt ist derjenige der Quantität der Menge insgesamt: Zum Beispiel kann ich die Anzahl der Zuckerstücke dadurch bestimmen, dass ich sie in ihrer Gesamtheit wiege und durch die Masse eines einzelnen Zuckerstücks teile. Der Ordinalzahlaspekt besteht in der Möglichkeit, eine Ordnung unter ihnen zu installieren und sie, etwa durch Etablierung einer Anordnung (im Anschauungsraum), zu einem ersten Zuckerstück, zu einem zweiten, dritten, vierten, fünften Zuckerstück zu machen; am Ende dieser Abzählung wird man dann sagen können, dass es fünf davon gibt. Hinsichtlich der lokalisierbaren Gegenstände ist es, so sind wir es gewohnt, immer möglich, sie in eine Reihenfolge zu bringen, und auf diese Weise geht der Ordinalzahlaspekt Hand in Hand mit dem Kardinalzahlaspekt. Die Quantenobjekte dagegen verlieren die Ordinalität, bewahren aber die Kardinalität. Man kann sagen: Es gibt acht Elektronen im Sauerstoffatom, aber man kann sie nicht in eine Reihenfolge bringen – das erste, das zweite, das dritte, etc.« (Lévy-Leblond 2011, 45 f.). In der Quantentheorie taucht gewissermaßen das Phänomen eines absoluten, die räumliche Getrenntheit übergreifenden Identisch-Seins auf: »Dagegen hat das absolute Identisch-Sein der Quantonen einer bestimmten Art entscheidende Konsequenzen. Es liegt einem gänzlich neuen, eigenständigen Kollektivverhalten zugrunde. Der Zustand eines Ensembles von Quantonen kann, im Gegensatz zum Fall klassischer Teilchen, nicht durch den Rückgriff auf eine Liste individueller Zustände beschrieben werden, die jeweils einem der Mitglieder des Ensembles zugeschrieben werden können« (Lévy-Leblond 2011, 47).

⁵⁷ An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass unterschiedliche Teilchenarten in Hinblick auf ihre Neigung in gleichen oder unterschiedlichen Energieniveaus vorzukommen, zu unterschiedlichen Statistiken führen. Die hier vorgestellten Überlegungen führen zur Bose-Einstein-Statistik, die sich auf die Gruppe der Bosonen bezieht. Eine gut verständliche Einführung in die Thematik gibt Ketterle (2006).

Suprafluidität

Knapp 15 Jahre nach Einsteins Studie konnte 1938 bei Helium, das auf eine Temperatur von $2,17^{\circ}$ Kelvin gekühlt wurde, ein Phasenübergang entdeckt werden, der mit neuen und außerordentlich bemerkenswerten Eigenschaften einhergeht.⁵⁸ Fritz London wiederum, der von Einsteins diesbezüglichen Arbeiten wusste, griff die Idee der Kondensation zum Quantengas auf und entwickelte hieraus eine Theorie der Suprafluidität und Supraleitung. Beide Phänomene ließen sich auf diesem Weg erfolgreich als kollektive Quantenphänomene beschreiben.⁵⁹

Suprafluides Helium hat praktisch keine Viskosität und dringt reibungsfrei durch engste Kapillaren und kann zudem von alleine an Gefäßwänden hochkriechen. Es hat eine Wärmeleitfähigkeit, welche die eines Metalls wie Kupfer um mehr als das tausendfache übertrifft. Die auf einer Seite eines Gefäßes mit suprafluidem Helium eingestrahlte Wärme wird praktisch sofort auf der andern Seite wieder abgestrahlt. Der Wärmetransport verläuft nicht wie in normalen Flüssigkeiten über Diffusion (d. h. über den Austausch der Energie über Teilchenstöße), sondern über wellenförmige Temperaturpulse, weshalb man hier auch vom *zweiten Schall* spricht.

All diese Eigenschaften lassen sich nicht mit den Mitteln der klassischen Physik erklären. In der Thermodynamik wird Wärme bekanntlich mittels der Bewegungsenergie individueller Teilchen beschrieben. Eine Temperatur ist dann nichts anderes als der Mittelwert aller vorfindbaren Teilchenbewegungen. Viskosität erscheint als Konsequenz von Reibungsprozessen, in denen gerichtete Bewegungen von Teilchengruppen durch Teilchenstöße in diffuse Wärmeprozesse umgewandelt werden. Die Wärmekapazität ergibt sich aus den Freiheitsgraden eines Teilchenensembles, also aus den Möglichkeiten, Energie auf unterschiedliche Bewegungsrichtungen individuierter Teilchen zu verteilen. Die Wärmeleitfähigkeit entspricht dem Transport von Energie über Teilchenstöße.

Die *Entropie* erscheint hiermit als das Maß, welches die *Menge an Information* angibt, die benötigt wird, um einen Aggregatzustand zu beschreiben. Sie hängt von den Freiheitsgraden ab, in dem sich die Teilchen in einem Gas in unterschiedlichen Richtungen bewegen können. Wärmeleitfähigkeit, Viskosität und Entropie stehen hiermit in enger Beziehung zueinander. Damit wird aber auch deutlich, dass sich mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht erklären lässt,

⁵⁸ Siehe Kapitza (1938) und Allen/Misener (1938).

⁵⁹ Siehe London (1938) und London (1950/1954).

warum Helium im suprafluiden Zustand praktisch keine Viskosität, eine unendliche Wärmeleitfähigkeit und keine Entropie aufweist.

Der quantentheoretisch abgeleitete Phasenübergang zum Bose-Einstein-Kondensat eröffnet demgegenüber eine einfache, wenngleich eigenartige Erklärung. Im suprafluiden Zustand haben die Atome keine Individualität mehr, denn sie verschmelzen zu einer einzigen Quantenwelle. Hiermit einhergehend verschwinden auch die Eigenschaften, die individuelle Atome besitzen können. Ohne individuierbare Teilchen gibt es aber auch keine Freiheitsgrade mehr, um Wärme in verschiedene Raumrichtungen transportieren oder speichern zu können. Ohne diese Freiheitsgrade besteht kein Aggregat mehr, das Entropie beinhalten kann bzw. über das informationstheoretische Überlegungen hinsichtlich wahrscheinlicher Zustandskombinationen erstellt werden können. Im Kondensat besteht nur noch *ein* Quantenzustand.

Wenn Suprafluidität auf Quantengasen beruht, müssten sich bei geeigneter Versuchsanordnung auch Interferenzphänomene zeigen lassen. In den 1990er-Jahren konnte dies experimentell demonstriert werden, indem zwei Bose-Einstein-Kondensate zur Überlappung gebracht wurden. Im Einklang mit der quantenmechanischen Beschreibung zeigte sich hier in der Tat, dass destruktive Interferenzen auftreten können, dass also eine Kombination von Materie und Materie zu keiner Materie führen kann.⁶⁰ Die Quantenphysik liefert auch hier eine erfolgreiche Erklärung für ein bizarres empirisches Phänomen, was wiederum die Experimentalphysik herausfordert, auf Grundlage der Vorhersagen der Theorie weitere, abgeleitete Quantenphänomene zu suchen und zu bestätigen.

Supraleitung

Gehen wir mit der Supraleitung kurz auf ein anderes kollektives Quantenphänomen ein. Auch hier tritt bei einer kritischen Temperatur ein Phasenübergang ein, der jedoch in diesem Falle die elektromagnetischen Eigenschaften des Materials radikal transformiert. Im Supraleiter fällt der elektrische Widerstand auf den Wert Null und gleichzeitig werden die von außen angelegten Magnetfelder aus dem Leiter herausgedrängt. Technisch lässt sich die Supraleitung etwa für die Erzeugung sehr starker Magnetfelder nutzen. Man speist dann in eine supraleitende Spule einen starken Strom ein, schließt den Kreis und nun kann der Strom widerstandslos im Kreis rotieren.

60 »*Those areas of destructive interference show that matter combined with matter can result in no matter!*« (Ketterle 2006). Siehe zum Versuch vor allem Andrews et al. (1997).

Auch die Supraleitung kann durch ein den ganzen Leiter übergreifendes Bose-Einstein-Kondensat erklärt werden, wobei sich jedoch die Erklärung, warum Elektronen in eine einheitliche Wellenfunktion übergehen, nicht so leicht erschließt. Aufgrund des Ausschließungsprinzips von Pauli unterliegen Elektronen – anders als flüssiges Helium – nicht der Einstein-Bose-Statistik. Aus quantenmechanischen Gründen können zwei Elektronen nicht den gleichen Raum einnehmen.

Bardeen, Cooper und Schrieffer gelang 1957 jedoch eine überzeugende quantentheoretische Erklärung, die darauf beruht, dass Elektronen im Kontext bestimmter Wechselbeziehungen zu den umgebenden Atomen sogenannte Cooper-Paare bilden können, die dann wiederum einer Statistik folgen, die zu einer Bose-Einstein-Kondensation führen kann.⁶¹ Für diese Arbeit bekamen sie den Nobelpreis.

Einfach gesagt beruht ihre Erklärung auf der Idee, dass zwei Elektronen miteinander zu einem Paar gekoppelt werden können, wenn sie aufgrund der Schwingungen der sie umgebenden Atomgitter kontinuierlich (virtuelle) Photonen austauschen. Diese Paare bilden nun eine Einheit, die in der Summe den Spin Null trägt, was wiederum gestattet, dass diese Paare sich in das Kollektiv einer übergreifenden Wellenfunktion einreihen können. Die Theorie mutet auf den ersten Blick ziemlich verrückt an, da nun gleich zwei unterschiedliche Mechanismen kollektiver Wirkungen miteinander gekoppelt werden müssen. Zunächst emergieren aus den Atomen des Leitungsgitters und den noch vollständig individuierten Elektronen Cooper-Paare. Die Cooper-Paare führen dann in einem zweiten Schritt der Kollektivierung zur Emergenz eines Quantengases, welches als eine einzige Elektronenwelle agiert und somit die Eigenschaften der Supraleitung erklärt.

Empirisch findet diese Theorie ihre Bestätigung in dem Befund, dass die Temperatur, an der der Phasenübergang zum Einstein-Bose-Kondensat eintritt, in linearer Weise von der Isotopenmasse der Gitteratome des Leiters abhängt. Die Schwingungsenergie des Gitters steht hiermit genau im Einklang mit der zur Erzeugung eines Cooper-Paares notwendigen Strahlungsenergie. Alles Weitere funktioniert dann entsprechend dem Prinzip der Aufsummierung wahrscheinlicher Wege. Wenn Cooper-Paare wahrscheinlich werden, wird auch die Integration in ein übergreifendes Elektronenkondensat wahrscheinlich, was dann wiederum die Stabilisierung der Cooper-Paare wahrscheinlicher werden lässt.

In Hinblick auf die physikalisch-konzeptionelle Grundlage beggnen wir auch hier einem Phasenübergang, der nur als ein makroskopisches emergentes Phänomen verstanden werden kann. Der

⁶¹ Siehe Barden, Cooper und Schrieffer (1957).

kollektive Zustand versklavt die weniger bestimmten mikroskopischen Zustände und lässt dadurch den kollektivierten Systemzustand wahrscheinlich werden. In Begriffen der Theorie dissipativer Strukturen würden wir hier von einem ›Attraktor‹ sprechen, den die Systemdynamik im Phasenübergang anläuft.⁶²

Die Theorie der Cooper-Paare führt zur Vorhersage weiterer experimentalphysikalisch nachweisbarer Effekte. So erfolgt beispielsweise das Durchtunneln von Leiterbarrieren eines Supraleiters immer mit zwei Elektronen gleichzeitig.⁶³

Die Entwicklung neuer theoretisch konzeptioneller Verständnisweisen steht auch hier in engem Zusammenhang mit der Umsetzung ins empirische Experiment. Nur auf solchem Wege lassen sich solchermaßen hochgetriebene Fortentwicklungen der Quantenphysik plausibilisieren und innerhalb der Wissenschaftsgemeinschaft als Common Sense und Status quo physikalischer Theoriebildung etablieren.

Quanten-Hall-Effekt

Abschließend möchten wir mit dem Quanten-Hall-Effekt, für dessen Entdeckung Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis bekam, ein weiteres kollektives und emergentes Quantenphänomen vorstellen. Worin besteht dieser Effekt?

Bringt man Materialflächen, durch die ein Strom fließt, in ein Magnetfeld, so entsteht senkrecht zur Richtung des Stromflusses eine weitere Spannung, die kontinuierlich mit der Stärke des Magnetfeldes ansteigt. Nimmt man als Platte jetzt Halbleiter mit einer sehr dünnen Leitungsoberfläche und kühlt diese auf Temperaturen um wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt ab, so steigt die Spannung nicht mehr linear mit der Magnetfeldstärke, sondern stufenweise in Form einer Treppe. Die quantentheoretische Erklärung dieses Phänomens geht auch hier von einem Einstein-Bose-Kondensat aus, das diesmal jedoch nicht räumlich ausgebrettet ist, sondern sich als zweidimensionales, also flächiges Elektronengas realisiert. Aus der Kombination der Interferenzeffekte, die sich im Magnetfeld aus kreisförmigen Elektronenströmen ergeben, und der Supraleitung an der Oberfläche des Leiters kann das Stufenmuster quantenphysikalisch erklärt werden.

Erstaunlicherweise zeigt sich jetzt, dass das Verhältnis der Stufen nicht vom Material oder der Form der Probe beeinflusst wird. Ebenso

62 Siehe zur Theorie dissipativer Strukturen Prigogine (1979).

63 Brian Josephson hat für Entdeckung und Vorhersage dieses Effektes 1973 den Nobelpreis bekommen (siehe Josephson 1973).

macht es nichts aus, wenn die Probe durch schlechte Löstellen oder auf andere Weise verunreinigt ist. Es reicht allein, wenn die Probe eine gewisse Größe hat. Ist dies der Fall, werden die Stufen in einem genau definierten Verhältnis reproduziert, das durch die Klitzing-Konstante gegeben ist. Interessanterweise stimmt diese Konstante genau mit dem Quotienten aus dem Planckschen Wirkungsquantum und dem Quadrat der Elementarladung überein (h/e^2).⁶⁴

Dieser Befund ist insofern bemerkenswert, als er den Gedanken nahelegt, dass sich möglicherweise die Naturkonstanten selbst als makroskopisch kontextualisierte Phänomene verstehen lassen. Laughlin, der später den Nobelpreis für die Entdeckung und Erklärung des fraktionalen Quantenhalleffekts bekommen hat, bemerkt hierzu:

»Gewöhnlich sehen wir diese Ladung als Baustein der Natur, der keinen kollektiven Kontext benötigt, um einen Sinn zu ergeben.

64 »Nachdem von Klitzing die universelle Gültigkeit nachgewiesen hatte, bemerkte er rasch, dass das Quantum des so definierten Hall-Widerstands eine Kombination aus physikalischen Naturkonstanten war – der unteilbaren elektrischen Elementarladung e , der Planck-Konstante h und der Lichtgeschwindigkeit c –, von denen wir glauben, dass sie alle Bausteine des Universums sind. Diese Tatsache schließt offensichtlich auch ein, dass man die Bausteine mit atemberaubender Geschwindigkeit messen kann, ohne mit ihnen selbst umgehen zu müssen. Für die meisten Physiker ist das zutiefst bedeutsam und zutiefst anstößig. Die Nachdenklicheren unter ihnen können es einfach nicht glauben, solange sie die Zahlen nicht studiert haben, und selbst dann argwöhnen sie, dass das nicht stimmt. Doch das kommt nie vor. Es gibt Experimente in Hülle und Fülle und sie sind konsistent und schwer angreifbar. Zudem scheint die Genauigkeit der Messung von Klitzings unbegrenzt weiter zuzunehmen, wenn man die Temperatur weiter absenkt und die Probe größer macht. Deshalb ist sie zur anerkannten Definition für diese spezielle Kombination von Naturkonstanten geworden. [...] Wie wir alle wussten, waren von Klitzings Proben nicht perfekt, weshalb wir davon ausgingen, dass wir sie variieren sollten. In Prozessor-Halbleitern treten immer Variable auf, die man nicht kontrollieren kann, etwa strukturelle Defekte im Kristallgitter, zufallsbedingte eingebaute Fremdatome, amorphe Oxide an der Oberfläche, angefranste Ränder, die bei der optischen Lithografie zurückbleiben, Metallstückchen, die beim Befestigen von Drähten mit klobigen Lötkolben über die Oberfläche verteilt werden und so weiter. [...] Tatsächlich ist der Quantenhalleffekt ein großartiges Beispiel, wie Perfektion aus Unvollkommenheit hervorgeht. [...] Die extreme Genauigkeit des Von-Klitzing-Effekts lässt dessen kollektive Natur unbestreitbar werden, und darin liegt seine besondere Bedeutung« (Laughlin 2007, 120 f.).

Selbstverständlich wird diese Vorstellung durch die einschlägigen Experimente widerlegt. Diese zeigen, dass die Elektronenladung *nur* in einem kollektiven Kontext Sinn ergibt – und dieser Kontext kann entweder durch das leere Vakuum des Raums bereit gestellt werden, das die Ladung in der selben Weise modifiziert, wie die atomaren Wellenlängen oder durch irgendwelche Materie, die den Effekten des Vakuums zuvorkommt. Überdies erfordert die Fähigkeit der Materie, vorrangig in Erscheinung zu treten, dass die hier wirkenden Organisationsprinzipien die gleichen sind, die auch im Vakuum am Werk sind, weil die Effekte sonst ein Wunder wären.

Wie sich herausstellt ist das Rätsel der Elektronenladung kein einmaliger Fall. Alle fundamentalen Konstanten setzen den Kontext einer Umgebung voraus, um einen Sinn zu ergeben. In der Praxis gibt es in der Physik keine Unterscheidung zwischen reduktionistischen und emergenten Größen. Sie ist lediglich eine künstliche Erfindung und ähnelt eher unserer Gewohnheit, unbelebten Objekten manchmal ein Geschlecht zuzuweisen«.⁶⁵

Die hier vorgestellten kollektiven, bei niedrigen Temperaturen beobachtbaren Quantenphänomene eröffnen *emergenztheoretische* Perspektiven. Sie weisen auf Phasenübergänge hin, die durch makroskopische Ordnungsrelationen bestimmt werden und in denen weniger das Ganze durch die Teile, sondern vielmehr die Teile (immer) auch durch das Ganze bestimmt zu sehen sind. Wir treffen auf sich selbst stabilisierende Wahrscheinlichkeiten. *Selbstähnlichkeit* und *fraktale Geometrie* werden hiermit zu Theoriefiguren, die sowohl für die Erklärung von Phasenübergängen in klassischen als auch quantenmechanischen Phänomenen von wichtiger Bedeutung sind.⁶⁶ Mikro- und Makrophänomene zeigen sich hier in komplexen Konstitutionsverhältnissen, in denen Grund und Begründetes zirkulär miteinander verschachtelt werden.

Die Untersuchung makroskopischer Quantenphänomene stellt ein empirisch außerordentlich fruchtbare Forschungsfeld dar, in dem sich Theorieentwicklung und Experimentalphysik in engen Zyklen verzahnen.

Die von Bose und Einstein postulierte Krise der Individualität der Teilchen im Quantengas wird mit den hier vorgestellten Experimenten innerhalb des wissenschaftlichen Diskurses in wissenschaftliche Wahrheiten überführt, die von verschiedenen Seiten flankiert werden

65 Laughlin (2007, 41).

66 Vgl. Papon et al. (2006).

und an die unterschiedlichen Teilgebiete der Physik und Ingenieurwissenschaften anschließen können.

Versuchen wir hier wiederum das Verhältnis von physikalisch konzeptioneller Anschauung, Mathematik und Experimentalphysik zu reflektieren: Einsteins und Boses Überlegungen aus dem Jahr 1925 hatten zunächst den Status von Randbemerkungen zu theoretischen Problemen der damals noch nicht etablierten Quantenphysik und fanden entsprechend nur marginale Beachtung. Erst das empirische Phänomen der Suprafluidität führt zu Suchbewegungen, welche solch randsändigen Theorieoptionen attraktiv erscheinen ließen. Indem aber jetzt die Idee einer Statistik kollektiver Quantenphänomene auf einen empirischen Gegenstand trifft, der hiermit erfolgreich konzeptionalisiert und beschrieben werden kann, können jetzt auch riskantere Theoriekonstruktionen ausprobiert werden, die Individualisierung und Kollektivierung von Quantenobjekten in ein wechselseitiges Fundierungsverhältnis setzen. Diese Bewegung erlaubt es schließlich, die Quantentheorie aus Perspektive der Emergenz zu denken. Wenngleich Emergenz zunächst ein Konzept der klassischen Physik darstellt, mit dem Phasenübergänge erklärt werden können, lässt sich diese Theorieoption mit quantentheoretischen Elementen rekombinieren. Dies führt wiederum im Falle der Supraleitung zu einer noch gewagteren Theoriekonstruktion, die auf zwei ineinander verschachtelten, sich wechselseitig stabilisierenden emergenten Prozessen beruht.

Die Theorie, dass zwei individualisierte Objekte ein Paar bilden, das einen Teil der Objekteigenschaften aufhebt, was dann eine vollständige Kollektivierung zu einem übergreifenden Quantenzustand erlaubt, ist auf den ersten Blick so bizarr, dass sie kaum eine Chance hätte, wenn nicht auf diesem Wege empirische Befunde erklärt und weitere empirisch überprüfbare Thesen generiert werden könnten. Wir treffen hier auf eine zunächst hoch unwahrscheinliche Rekombination zweier Theoriesprachen aus jeweils verschiedenen Teilgebieten der Physik (Emergenz- und Quantentheorie), die auf jeweils unterschiedlichen physikalischen Anschauungen beruhen. Der empirische Erfolg der auf diese Weise gewonnenen Theorie, sobald hinreichend stabilisiert und damit autonom geworden, legt es jedoch nahe, nun alle quantenphysikalischen Phänomene emergenztheoretisch zu betrachten. Hiermit entsteht innerhalb der Quantentheorie ein weiteres Paradigma, mit dem dann auch das Deutungsproblem der Quantentheorie in einem anderen Lichte erscheint (siehe ausführlich Kap IV.6). Die Idee der Emergenz wird jetzt zu einer eigenständigen konzeptionellen Anschauung, um die eigenartigen Phänomene der Quantenwelt verstehen zu können.

Homolog zur Anschauungstechnik der Feynman-Diagramme gewinnt die theoretische Physik hier eine weitere Rahmentheorie, welche die konzeptionelle Selbstdentifikation von Theoriebildungen anleitet und Raum bietet, sich mit den hierdurch ergebenden theoretischen und experimentalphysikalischen Möglichkeiten zu neuen Formbildungen anregen zu lassen.

Auch hier lässt sich wieder ein deutlicher Bruch zum Theorieverständnis der klassischen Physik feststellen. Während dort physikalisch-konzeptionelle Anschauung und empirische Phänomene noch in unmittelbarem Bezug zueinander stehen, löst sich die theoretische Anschauung auch hier vom beobachtbaren Gegenstand ab. Ein fallender Apfel, der den Gesetzen der Newtonschen Physik folgt, lässt sich beobachten. *Cooper-Paare*, die sich in eine übergreifende Wellenfunktion auflösen, sind niemals gesehen worden. Sie beruhen auf einer theoretischen Anschauung, die sich nur deshalb plausibilisieren lässt, weil ihre theoretischen Modellierungen mit empirisch beobachtbaren Phänomenen in Einklang gebracht werden können. Wir treffen auch hier auf Hochabstraktionen physikalischer Theoriebildung, die gerade deshalb erfolgreich sein können, weil sie sich von der Außenwelt ablösen und innere Formmöglichkeiten ausprobieren, um auf diesem Wege zu einer Rekombination von Theorieelementen zu gelangen, welche sich an die empirischen Befunde anschmiegen können.

6 Normalisierung einer Theorie, die nicht mehr mit dem Common Sense vereinbar ist

Die Entwicklung der Quantenphysik führte zunächst über die Abstraktionen einer autonom gewordenen Mathematik. Der damit verbundene Verlust an Anschaulichkeit wird jetzt jedoch innerhalb der Physik durch neue Formen theoretischer Anschauung kompensiert, mit denen sich nun erneut wieder physikalisch erklären lässt, wenngleich die Begriffe ›Erklären‹ und ›Theorie‹ jetzt etwas anderes meinen. In der klassischen Physik waren Teilchen noch Teilchen und Wellen noch Wellen. Der epistemische und der ontologische Charakter der grundlegenden Elemente der Theoriebildung standen noch im Einklang mit dem Common Sense unserer Welterfahrung. Entsprechend fallen hier Erklären und Begreifen noch zusammen. Nachdem sich die Quantentheorie mit Heisenbergs Matrizenmechanik zunächst radikal von den klassischen Konzepten gelöst hat, tauchen in ihrer Theoriebildung erneut vermehrt physikalisch-konzeptionelle Anschauungen auf, welche die Suchbewegungen der theoretischen

Physik anleiten. Hierbei handelt es sich jetzt aber überwiegend um theoretische Konstrukte, die sich nicht mehr an irgendeine phänomenologisierbare Erfahrung anbinden lassen – und dies auch nicht mehr nötig haben. Wir treffen nun vielmehr auf einen gemeinsamen Tanz unterschiedlicher theoretischer und experimentalphysikalischer Projekte, in der manchmal das Experiment die Theorie führt und manchmal die Empirie neue Spielarten der Kombination theoretischer Anschauung herausfordert.

Die Quantentheorie erweist sich für die Experimentalphysik als ein außerordentlich erfolgreiches Paradigma, das vielfältige Forschungsvorhaben entwickeln und strukturieren lässt. Sei es in der Physik der elektronischen und elektrotechnischen Bauteile, der physikalischen Chemie, der Astronomie, der Tieftemperaturphysik, der Optik oder der Elementarteilchenphysik – der Status der Quantenmechanik als einer physikalischen Fundamentaltheorie ist mittlerweile unumstritten.⁶⁷ Wie Peter Mittelstaedt feststellt, ist die überwiegende Mehrzahl der Physiker mittlerweile bereit, die bizarren Konsequenzen dieser Theorieanlage hinzunehmen und als Normalität anzuerkennen:

»Anders als in den ersten Jahrzehnten der neuen Theorie geht es nicht mehr darum, die Schrecken der Quantenphänomene zu banen. Unbestimmtheiten, Tunneleffekte, Nichtlokalität und Teleportation gehören vielmehr zum Alltag des Quantenphysikers. Die Aufgeregtheiten, die man auch heute noch über solche Effekte in der populärwissenschaftlichen Literatur und in der Presse findet, sind nichts als Nachhutgefichte.«⁶⁸

Schon die kurze Zusammenschau der hier vorgestellten Forschungsbeispiele zeigt auf, dass die quantentheoretisch inspirierte Experi-

⁶⁷ Lévy-Leblond weist darauf hin, dass allerdings die Alltagstechniken, in denen Quantenwissen zur Anwendung kommt, in der Regel genauso unanschaulich sind wie die Theorie: »Wenn ich versuche, dem Elektron eine wohl definierte Position zuzuschreiben, indem ich es zwinge, sich an einem präzise bestimmten Punkt aufzuhalten, verliere ich mit einem Schlag alle Information hinsichtlich seiner Geschwindigkeit, und umgekehrt. Dabei handelt es sich nicht um ›Unschärfen‹ oder ›Ungewissheiten‹. Man kann diesen Ausdruck der ›Unschärfe‹ nur verwenden, wenn man an der Vorstellung festhält, dass das Elektron an einem präzise bestimmten Ort sei, ohne selbst zu wissen, wo, und eine präzise bestimmte Geschwindigkeit besitze, die man nur nicht kenne. Das aber hieße, es sich weiterhin als ein klassisches Teilchen vorzustellen; in diesem Sinne ist der Ausdruck ›Unschärfe‹ ein Relikt klassischer Konzeptionen, von denen die eigentliche Quantentheorie sich trennt« (Lévy-Leblond 2011, 57).

⁶⁸ Mittelstaedt (2000, 67).

mentalphysik in recht heterogene Forschungsfelder aufgefächert ist. Die emergenztheoretisch begründeten Untersuchungen zu den Phasenübergängen in der Supraleitung haben kaum etwas mit den Fragen gemein, welche ein unter *delayed-choice*-Bedingungen durchgeführtes Doppelspaltexperiment beantworten soll. Beide haben wiederum wenig mit den Problemstellungen zu tun, an denen sich die Quantenfeldtheorie abarbeitet. Die einzige gemeinsame Klammer der unterschiedlichen Forschungsprojekte bleibt die mit der Schrödinger-Gleichung gegebene Wellenbeziehung, derzufolge ›Wellen von nichts‹ eine physikalische Bedeutung bekommen.

Der Aharonov-Bohm- oder der Casimir-Effekt sprechen dafür, dass Quantenfelder selbst dann wirken, wenn keine klassischen Kraft-Materie-Konstellationen vorhanden sind, die eine Wirkung vermitteln könnten.

In Feynmans Quantenelektrodynamik stimmen gerade deshalb die Daten aus Experiment und theoretischer Vorhersage in solcher Genauigkeit miteinander überein, weil die kollektive Beschreibung ›alle Wege‹ zu jenem Interferenzmuster führt, das Phänomene ausflaggt, die uns als Teilchen mit konkreten Eigenschaften erscheinen.

Wenn die Auslöschung der Weg-Information im Doppelspaltexperiment die Interferenz wiederherstellt, ist es nicht mehr sinnvoll, davon zu sprechen, dass ein individuierbares Teilchen diesen oder jenen Weg genommen hat. Teilchen- oder Welleneigenschaften sind jetzt nur noch als kontextualisierte Eigenschaften eines experimentellen Gesamtarrangements sinnvoll beschreibbar.

In der Bose-Einstein-Statistik können die Eigenschaften und das Verhalten eines Partikels nicht mehr ohne Referenz auf die Eigenschaften und das Verhalten von anderen Partikeln verstanden werden. In Quantengasen kann die Individualität von Teilchen gar vollkommen verschwinden, sodass es naheliegt, im Sinne einer *top-down*-Kausalität Teilchen generell als abgeleitetes Phänomen makroskopischer Ordnungssysteme aufzufassen.

Die experimentelle Bestätigung des Bell-Theorems führt zur Einsicht, dass die Quantenmechanik nicht zugleich eine *lokale* und eine *reale* Theorie darstellen kann, man also entweder hinzunehmen hat, dass erst die Beobachtung das zu beobachtende Phänomen mitkonstituiert oder aber die beobachteten Quantenphänomene in einer nicht-lokalen Beziehung in das Versuchsarrangement eingebettet sind. Entsprechend sind sie nur noch holistisch oder relational verstehbar. Die einzelnen Teile eines Quantensystems haben dann aber mit Esfeld gesprochen keine »intrinsischen Eigenschaften« mehr, sondern nur noch »relationale Eigenschaften, die in einer Korrelation zwischen

einem Quantensystem und einer Messapparatur bestehen«.⁶⁹ Eine solche Perspektive führt aber dann unweigerlich zu einer Metaphysik der Relationen,⁷⁰ einer Welt, in der *Relationen* den Urgrund darstellen, während die *Relata* als essenz- und substanzlos zu betrachten sind.⁷¹

Wenngleich die hier vorgestellten Experimente die Vorhersagen der Quantentheorie zum Alltag der Experimentalphysik werden lassen, ist damit jedoch keineswegs die Frage ihrer Interpretation gelöst. Im Gegenteil, ihre Paradoxien erscheinen in einem noch deutlicheren Licht. Was uns die vorgestellten Versuche lehren, ist vor allem, dass die Quantentheorie auf (fast) allen Gebieten der Physik erfolgreich in experimentalphysikalische Fragestellungen übersetzt werden kann und dass sich die Quantenmechanik (nahezu) überall

69 Esfeld (2002, 200).

70 »Wenn wir also einmal zu der negativen ontologischen Behauptung berichtigt sind, dass es keine intrinsische Natur jenseits der manifesten Beziehungen gibt, dann können wir auch eine Ontologie in positiven Begriffen formulieren, nämlich eine Ontologie von Relationen« (Esfeld 2002, 212).

71 »If physics tells us only about the way in which the things at the basic level of the world are related to each other, two different metaphysical positions remain open:

(1) One can continue to hold on to a metaphysics of intrinsic properties of the systems at the basic level of the world, but concede that we cannot gain any knowledge of these properties insofar as they are intrinsic.

(2) One can give up a metaphysics of intrinsic properties in favour of a metaphysics of relations according to which the relations in which they stand are all there is to the things at the basic level. The first one is the position that Jackson—somewhat reluctantly—endorses. As already mentioned in the introduction, the main argument for this position is that (a) relations require relata, that is, things which stand in the relations, and that (b) these things have to be something in themselves, that is, must have intrinsic properties over and above the relations in which they stand. Jackson makes use of this argument when he dismisses the view «that the nature of everything is relational cum causal, which makes a mystery of what it is that stands in the causal relations» (p. 24). However, as has been made clear in this paper, a metaphysics of relations has to reject merely the second part of this argument: one can maintain that (a) relations require relata, that is, things which stand in the relations, but that (not b) these things do not have any intrinsic properties over and above the relational properties, which can in principle be captured by physics. In this case, there is nothing paradoxical about a metaphysics of relations. In other words, there is no *a priori* argument that excludes a—moderate—metaphysics of relations« (Esfeld 2004, 613 f.).

als physikalische Grundlagentheorie bewährt hat. (Eine Ausnahme bilden Fragestellungen, die von der allgemeinen Relativitätstheorie berührt werden.)

Jenseits des Erfolges der Quantenphysik bleibt jedoch die Frage offen, wie die Beziehung zwischen der Quantenwelt und unserer mit den Mitteln der klassischen Physik gut beschreibbaren Alltagswelt konzeptualisiert und verstanden werden kann. Mit Mittelstaedt steht also nicht mehr die Quantenphysik zur Disposition, sondern unsere vertraute Realität:

»Das gewachsene Verständnis der Quantentheorie hat vielmehr zu der Einsicht geführt, dass Quantenphysik einfacher und von weniger vorphysikalischen Voraussetzungen abhängig ist als die klassische Physik. Sie ist deshalb auch allgemeiner und gilt nicht nur in der mikroskopischen Physik, sondern auch in der makroskopischen Welt und in der Kosmologie. Es geht daher – und das ist die oben angedeutete Problemverschiebung – heute nicht mehr darum, Quantenphänomene aus der Sicht der klassischen Physik verständlich zu machen. Das ungelöste, heutige Problem ist vielmehr die klassische Physik selbst. Wie ist es möglich, dass es so etwas wie die uns vertraute, heile Welt der klassischen Physik überhaupt gibt? Auf diese Frage konnte eine überzeugende und befriedigende Antwort bislang nicht gefunden werden. – Wenn nicht ein völlig neues, aus heutiger Sicht überraschendes Erklärungsmodell für die klassische Welt gefunden wird, dann deutet sich eine, zumindest ontologisch sehr unschöne Lösung an: Die Welt der klassischen Physik könnte eine in allen praktischen Fällen bewährte, aber nur näherungsweise richtige Idealisierung, d. h. letztlich eine Illusion sein.«⁷²

Das ungelöste Problem der Quantenphysik bleibt die klassische Physik selbst. Die mit der Kopenhagener Deutung zunächst geleistete Beruhigung ihrer inhärenten Paradoxien lässt sich auch unter Physikern immer weniger plausibilisieren. Tegmark stellte 1997 in einer informellen Umfrage unter achtundvierzig Physikern fest, dass nur noch dreizehn Kollegen die Kopenhagener Deutung favorisieren.⁷³ Acht bekennen sich zur ›Viele-Welten-Interpretation‹, dazu vier weitere zu

⁷² Mittelstaedt (2000, 68).

⁷³ »Although the poll was highly informal and unscientific (several people voted more than once, many abstained, etc), it nonetheless indicated a rather striking shift in opinion compared to the old days when the Copenhagen interpretation reigned supreme« (Tegmark 1997).

der ähnlich gelagerten ›konsistenten Geschichten‹-Interpretation,⁷⁴ vier zur Bohmschen Mechanik, und einer zur ›spontanen Kollaps-Theorie‹.⁷⁵ Achtzehn Kollegen bleiben unentschieden oder vermuten, dass keine der vorgeschlagenen Interpretationen zutreffe.⁷⁶ 1999, zwei Jahre später, führte Tegmark im Zusammenhang einer Tagung über Quantencomputer eine weitere Umfrage unter Kollegen durch. Hier bekannten sich nur noch 10 Prozent zum Kollaps der Wellenfunktion, während ein Drittel Varianten der Viele-Welten-Interpretation für eine angemessene Interpretation der Quantentheorie hielten. Die Mehrheit der anwesenden Physiker wollte sich nicht mehr auf eine bestimmte Interpretationsweise festlegen lassen:

»Aber das Meinungsbild ist undeutlich: Von den Befragten wollten sich die meisten, nämlich fünfzig Forscher, für keine der angebotenen Antworten entscheiden. Ein Grund für diese große Anzahl mag der grassierende terminologische Wirrwarr sein. Nicht selten sagen zwei Physiker beispielsweise, sie seien für die Kopenhagener Deutung, und stellen dann fest, dass sie nicht dasselbe darunter verstehen.

Trotzdem macht die Umfrage deutlich, dass es an der Zeit ist, die Lehrbücher der Quantenmechanik zu aktualisieren. Obzwar diese Bücher in einem der ersten Kapitel unweigerlich den nicht-unitären Kollaps als fundamentales Postulat anführen, zeigt die Umfrage, dass heute viele Physiker – zumindest auf dem brandneuen Gebiet der Quantencomputer – dieses Postulat nicht mehr ernst nehmen. Der Begriff Kollaps wird zweifellos seinen Nutzen als Rechenrezept behalten, aber ein warnender Kommentar, der verdeutlicht, dass es sich dabei wahrscheinlich nicht um einen fundamentalen Vorgang handelt, der die Schrödinger-Gleichung verletzt, könnte klugen Studenten stundenlanges Grübeln ersparen.«⁷⁷

Auch wenn man zugesteht, dass Tegmarks Umfragen keineswegs repräsentativ sind und sich aus Perspektive anderer disziplinärer Fachgruppen die Verhältnisse anders darstellen können, wird hier deutlich, dass es unter modernen Physikern alles andere als klar ist, wie man den Quantenformalismus auf einer tieferen Ebene zu verstehen habe.

⁷⁴ Siehe zur ›konsistente Geschichten-Interpretation‹ Kapitel IV.5.

⁷⁵ Siehe zur ›Spontaner-Kollaps-Theorie‹ Kapitel IV.1.

⁷⁶ Tegmark (1997).

⁷⁷ Tegmark (2001).

Schauen wir uns mit Blick auf das vergangene Kapitel das Verhältnis von Anschauung, Mathematik und physikalisch konzeptionellem Verständnis etwas genauer an:

Zunächst ist festzustellen, dass man in der Experimentalphysik mit der Quantentheorie erfolgreich rechnen kann. Man kann Experimente planen, Hypothesen entwickeln, die Daten in Beziehung zu den theoretisch zu erwartenden Ergebnissen setzen. Das Alltagsgeschäft des Experimentalphysikers ist nichtmittelbar davon abhängig, welcher Interpretation man anhängt. Im Einzelfall mögen zwar auch Interesse oder auch Zweifel an bestimmten Deutungen den Anlass für ein bestimmtes Experimentaldesign geben (so wie im Bell-Experiment) oder umgekehrt bestimmte Versuchsergebnisse wieder die Deutungsfrage aufwerfen, doch bleibt die Physik selbst durch die Form »empirisch/mathematisch« hinreichend determiniert.⁷⁸

Dies erklärt auch, warum viele Quantenphysiker in Hinblick auf Interpretations- und Deutungsfragen eine agnostische Haltung einnehmen. Man braucht sich nicht mit der Bedeutung quantenphysikalischer Konzepte zu beschäftigen, um mit der Schrödinger-Gleichung rechnen zu können. Die Physik kann gleichsam *verstehen ohne zu verstehen*.

Die Quantentheorie konnte sich in vielfältigen physikalischen Kontexten bewähren, wenngleich ihre Grundanlage jeglicher Anschauung zu spotten scheint. Heisenberg entwickelte seine Matrizenmechanik deshalb als eine mathematische Hochabstraktion, die explizit mit der Anschauung von Teilchenbahnen brach. Ebenso zeigte sich schnell, dass die Wellenfunktion der Schrödinger-Gleichung sich einer physikalisch konzeptionellen Anschauung verwehrt. So sehr Wahrscheinlichkeitswellen innerhalb des mathematischen Formalismus Sinn ergeben, was hiermit physikalisch anschaulich verbunden werden kann, bleibt opak.

Das Bohrsche Komplementaritätsprinzip, das in der Kopenhagener Deutung zum Ausdruck kommt, kann in diesem Zusammenhang als ein Versuch gesehen werden, einen gewissen Grad an Anschaulichkeit wiederherzustellen. Welle und Teilchen erschienen jetzt als zwei vertraute klassische Beschreibungsweisen, die zwar unvereinbar scheinen, aber beide notwendig sind, um die Quantenwelt angemessen verstehen zu können. Gleichzeitig wurde hiermit jedoch eine epistemische Grenze postuliert – und damit ein Weiterfragen blockiert.

⁷⁸ Peter Fuchs (2009) sieht hierin gar die allgemeine Form der Physik. Wir plädieren für eine dreigliedrige Form der Physik, da wir die konzeptionelle Anschauung als eine dritte relevante Determinante auffassen, welche die Theorieentwicklung konditioniert.

In die Quantentheorie war von Anfang an eine konstitutionelle Ambivalenz eingelassen, die darin besteht, auf der einen Ebene eine physikalische Anschauung zu postulieren – hierfür steht der Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus –, auf der anderen Seite jedoch nur einen mathematischen Formalismus zu haben, der sehr gut funktioniert, jedoch einer tieferen physikalisch konzeptionellen Vorstellung entbehrt.

In den hier vorgestellten Zweigen der Experimentalphysik wird diese Ambivalenz nicht nur mitgeführt, sondern es wird nach Hinweisen für deren Auflösung gesucht.

Bell hat sein Theorem gerade deshalb entwickelt, weil er mit Bohm vermutet hat, dass die Verschränkung, die Nicht-Lokalität und damit auch die Kontextualität der Teilcheneigenschaften die faszinierendste Konsequenz der Quantentheorie darstellt.

Die neuen Experimente zum Doppelspaltexperiment, insbesondere die *delayed-choice*-und die *quantum-eraser*-Versuche, lehren, dass Quanteneffekte *nicht* als Artefakte der Messinteraktion verstanden und konzeptionalisiert werden können und damit die Wege einer klassischen Erklärung dieser Phänomene weitgehend verbaut sind. Der Casimir- und der Aharonov-Bohm-Effekt zeigen auf, dass leerer Raum nicht leer von Wirkung ist, also auch die grotesksten Implikationen der Quantenphysik nicht am Realitätstest scheitern.

Feynmans diagrammatischer Zugang zur Quantenelektrodynamik beginnt mit dem Teilchenbild. Aber auch wenn die Wellenfunktion hier zunächst nur für die Wahrscheinlichkeit einer Wegoption steht, bekommt das mit ihr aufgespannte Feld gleichsam einen realeren Charakter als jene Teilchen, die in den Diagrammen einen konkreten Weg eingeschlagen. Genau genommen sind jetzt vielmehr die Teilchen als *virtuell* zu betrachten, denn im Falle destruktiver Interferenzen zeigt sich, dass sie keine Essenz an sich besitzen. Demgegenüber zeigt sich die Wellenfunktion als uneingeschränkt gültig, denn die mit ihr aufgespannten Interferenzmuster generieren vorhersagbare Wirklichkeiten.

Um in unserem Bild zu bleiben, Feynman gelingt es in subtiler Weise die konstitutive Rolle der ‚Wellen von Nichts‘ zugleich zu veranschaulichen wie auch zu verdecken. Seine Diagramme gehen von einem Teilchenbild aus, um dieses durch die in die Vektordarstellung inhärent eingelagerte Phasenbeziehung zugleich wieder zu unterlaufen. Dieses Vorgehen ist hochgradig pragmatisch, denn es erlaubt die phantastischen Konsequenzen der Quantentheorie auf anschauliche Weise zu modellieren, ohne dabei weiter über Interpretationsfragen nachdenken zu müssen. Es gestattet, eine bizarre Welttheorie in überprüfbarer Beziehungen von theoretischer Vorhersage und physikalischem Experiment zu überführen, hat aber dafür den

Preis zu zahlen, auf eine stringente und beweisbare mathematische Konzeptionalisierung verzichten zu müssen.

Die erfolgreiche Konzeptionalisierung von Suprafluidität und Supraleitung als makroskopische Quantenphänomene ergibt nur Sinn, wenn man davon ausgeht, dass die Bausteine der Materie *wirklich* Wellen »sind«. Nichts anderes hatte Einstein mit der Bose-Einstein-Statistik im Sinn. Die quantenmechanische Erklärung der Supraleitung zeigt uns jedoch zugleich, dass damit die Vorstellung individuierbarer Teilchen keineswegs hinfällig ist. Wir begegnen hier verschachtelten Transformationsverhältnissen, in denen Elektronen als individuierte Teilchen in Interaktion mit ihrer Umgebung ihre Individualität verlieren, indem sie sich zu Cooper-Paaren zusammenschließen, die sich zu einer übergreifenden Welle integrieren.

Innerhalb dieses Erklärungsmodells bilden Wellen- und Teilcheneigenschaften eine subtile Kontextur, aus welcher sich die beobachtbaren Eigenschaften entfalten. Das Bild eines individuierbaren Elektrons, das einen bestimmten Weg verfolgt, ist hier keineswegs hinfällig, sondern ebenso wichtiger Bestandteil der Erklärung, wie die makroskopischen Wellen, in welcher sich die Individualitäten unter bestimmten Voraussetzungen auflösen können. Auch in diesem Forschungsfeld ist die Anwendung der Quantentheorie nur deshalb erfolgreich, weil mit ihr zugleich anschaulich wie auch abstrakt gearbeitet wird. Einerseits wird sie zum Taktgeber physikalisch konzeptioneller Entwicklungen, indem man ausprobieren kann, in welchen sinnhaften Arrangements man Teilchen- und Welleneigenschaften kombinieren kann. Auf der anderen Ebene bleibt sie eine mathematische Hochabstraktion, denn weiterhin verschließt sich der epistemische und ontologische Status der ψ -Funktion einer übergreifenden Interpretation oder Deutung.

Die Quantentheorie hat heute zweifellos den Status einer, wenn nicht *der* fundamentalen physikalischen Grundlagentheorie. Die Praxis der Quantenphysik hat damit zu einer stillschweigenden Ontologisierung der Quantenkonzepte geführt. Für viele Physiker erscheint die Quantenwelt heute realer als die klassische Welt.

Diese Verschiebung ist aus wissenssoziologischer Perspektive hoch interessant, denn sie geschieht gewissermaßen durch Gewöhnung und nicht durch Verstehen. Man gewöhnt sich daran, dass auch leerer Raum eine Wirkung haben kann, dass »Wellen von Nichts« die Emergenz von Teilchenqualitäten modulieren können und dass sich mit Hilfe des Konzepts der Durchtunnelung von Barrieren elektronische Bauteile erfinden lassen.

Dass Quantenmaterie den Physikern heutzutage als »real« erscheint, ist ein kommunikatives Phänomen. Quantenmaterie und Quantenobjekte lassen sich erfolgreich in den »Dialog mit der Natur«

einbinden. Quantensysteme sind zu einer der zentralen Kommunikablen der modernen Physik geworden.⁷⁹ Die Quantentheorie liefert damit weitaus mehr als Rechenformeln, mit denen sich Beziehungen in subatomaren Verhältnissen erfolgreich beschreiben lassen. Sie wird im wörtlichen Sinne zu einer *theoria*, zu einer Anschauung der Wirklichkeit,⁸⁰ und entsprechend organisiert die Quantentheorie heutzutage in umfassender Weise Beobachtungsperspektiven naturwissenschaftlicher Forschung.⁸¹

Gerade weil die Quantentheorie mittlerweile innerhalb der Physik unumstritten institutionalisiert ist, kann sie sich wieder vermehrt den Paradoxien ihrer Anlage und Interpretation stellen. In den 1930er-Jahren war man als Physiker gut beraten zu rechnen und zu experimentieren, anstatt das mit der Kopenhagener Deutung gesetzte Tabu zu hinterfragen.

Die hierin gesetzte epistemische Grenze ist heutzutage nicht mehr notwendig, denn der theoretische Status der Quantenphysik steht heute außer Frage. Experimentalphysik und Theorieentwicklung sind in sich soweit gefestigt, dass Problemstellungen jeweils methodologisch-experimentell in einer Weise angegangen werden können, ohne dass gleich alle Implikationen der Theorie bekannt sein müssen (Experimentalphysiker können in ihrer Arbeit ‚agnostisch‘ agieren). Umgekehrt sind auch die theoretischen Diskurse durch Stellenbesetzungen und die Institutionalisierung entsprechender Fachdiskurse in einer Weise ausdifferenziert, dass beispielsweise Vertreter der *Stringtheorie* an der Weiterentwicklung und Ausdifferenzierung ihrer Perspektive arbeiten können, ohne dabei allzu sehr durch empirische

79 An dieser Stelle der notwendige Hinweis auf die Arbeiten der Aktor-Network-Theorie, in denen deutlich wurde, wie wissenschaftliche Objekte durch Kommunikation erzeugt und vergesellschaftet werden. Wie Geister und Götter werden dann auch Quanten, Elektronen oder eben auch ‚Wellen von Nichts‘ dadurch real, dass sie in das Netzwerk der Kommunikation eingefügt werden und hierdurch ihre Wirkung entfalten (Latour 2000; Latour 2007).

80 Griechisch θεωρία: Anschauung, Beobachtung, Einsicht; wörtlich ‚Schau des Göttlichen‘ (theos).

81 Ihre Anwendungsbereiche strahlen vermehrt auch in die Lebenswissenschaften aus. Jüngst konnte gezeigt werden, dass Quantenphänomene eine Rolle innerhalb der Photosynthese spielen (Collini et al. 2010). Es gibt eine Reihe von Spekulationen zum Einfluss von Quantenprozessen auf Kognition und Bewusstsein. Bislang kann hier jedoch noch keine theoretisch konsistente Erklärung gewonnen werden. Die bisher angestellten Überlegungen müssen auch innerhalb der Physik als riskante Spekulationen gelten (siehe etwa Penrose 1998; Stapp 2007).

Umsetzungsansprüche behindert zu werden (siehe hierzu ausführlich Kapitel V).

Die gegenwärtige Physik kann und braucht sich nicht mehr positivistisch auf die Form *empirisch/mathematisch* zurückzuziehen, sondern kann in Rückkehr auf ihre produktiven Wurzeln Anschauung und Interpretation wieder als wesentliche Bestandteile ihrer Praxis begreifen. Es besteht für sie kein Grund mehr, die »Machtübernahme der Mathematik in der Quantentheorie« länger hinzunehmen.⁸² Der Verlust an Anschaulichkeit, der mit der Entwicklung der Quantentheorie einhergeht, hat zu einer neuen Bedeutung physikalischer Theoriebildung geführt. Physikalische Theorien greifen jetzt vermehrt auf eigene, sozusagen selbst- bzw. theoriegenerierte Anschauungen zurück. Die Trias von Experiment, Mathematik und physikalisch-an-schaulicher Konzeptionalisierung wird somit auf ein neues, zugleich abstrakteres wie auch konkreteres Niveau gehoben.

Dies aufgreifend gelangen wir im nächsten Kapitel zu einigen neu-eren Ansätzen zur Interpretation und Deutung der Quantentheorie.

82 Weizsäcker (1994, 511).

