
Teil I

Die Philosophie der Quantenphysik

Einleitung

There was a time when newspapers said that only twelve men understood the theory of relativity. I do not believe there ever was such a time. . . . On the other hand, I think it is safe to say that no one understands quantum mechanics.

(Richard P. Feynman)

Das Schönste in der Welt ist das Geheimnisvolle.

(Albert Einstein)

Selten hat in der Geschichte der Naturwissenschaften eine neue Theorie einen so tiefen Eindruck hinterlassen und gleichzeitig dermaßen die Gemüter gespalten wie die Quantenphysik. Wer auch immer sich mit ihr befasst, und seien es die hellsten Geister und brillantesten Wissenschaftler, wird ein gewisses Gefühl der Befremdung nicht mehr los, das sich nicht überwinden lassen will und das andere Bereiche der Wissenschaft in dieser Form kaum zu bieten haben. Der mathematische Apparat der Quantenphysik und ihre Experimentaltechnik, die mit einer in allen anderen Zweigen der Wissenschaft unübertroffenen Präzision Messergebnisse vorherzusagen und zu überprüfen gestatten, stehen einer Vielzahl unterschiedlicher Interpretationsschulen und philosophischer Ansichten über ihre Bedeutung gegenüber.

In der Geschichte der modernen Wissenschaft gibt es nur eine gute Handvoll ähnlich revolutionärer Umbrüche: Dazu gehört sicherlich die kopernikanische Wende, die über Kepler und Galilei in der newtonschen Mechanik kulminierte, später die darwinsche Evolutionstheorie, dann die maxwellsche Elektrodynamik, die den Weg weiter zur einsteinschen Relativitätstheorie wies, und nicht zuletzt die freudsche Theorie des Unbewussten. Mit der Letzteren teilt die Quantenphysik

eine gewisse Unverständlichkeit, die allerdings umso schmerzhafter berührt, als sie doch die objektive Welt beschreiben soll und nicht die Gemütszustände so widersprüchlicher Lebewesen, wie wir es sind.

Und wenn jeder dieser wissenschaftlichen Umbrüche einen bedeutenden Einfluss auf das Welt- und Menschenbild seiner Zeit und auf die nachfolgenden Generationen hatte, so lässt sich bei der Quantenphysik angesichts ihrer umstrittenen Interpretationen vor allem konstatieren, dass sie den Menschen an die Grenzen seiner Vorstellungskraft führt und ihm die unheimliche Macht der Mathematik gegenüber seinem bescheidenen Anschauungsvermögen demonstriert. Rund ein Jahrhundert nach der Einführung des planckschen Wirkungsquantums und der Aufstellung der Quantenphysik sind die Fronten härter, die Vielzahl unterschiedlicher Interpretationen verwirrender und die Resignation bezüglich ihrer Interpretierbarkeit bei manch einem größer als je zuvor. Gleichzeitig erweist sich die Quantenphysik als Grundlage verschiedenster Forschungszweige und findet auch außerhalb ihres Ursprungs in der Atomphysik immer neue Anwendung und Bestätigung: in der Kernphysik, der Astroteilchenphysik, der Festkörperphysik, der Materialwissenschaft, der Laserforschung, der Biochemie, der Computer- und Informationstechnologie und auf vielen anderen Gebieten. Auf der Quantenphysik basierende Güter und Dienstleistungen machen nicht zuletzt seit Einführung des Internets einen großen Teil der globalen Wertschöpfung aus. Denn auch wenn die Quantenphysik sich um Prozesse im Mikrokosmos dreht, so haben diese doch Auswirkungen, die die Welt im Großen bestimmen. Im Rahmen der klassischen Nicht-Quantenphysik müssen die Eigenschaften des Lichts ebenso unerklärt und unerklärbar bleiben wie der Ferromagnetismus, der Transistor, die Supraleitung oder überhaupt das gesamte chemische Verhalten von Stoffen.

Auch wenn es also auf den ersten Blick verwunderlich erscheinen mag, die notorisch unanschauliche Quantenphysik in eine erkenntnistheoretische Diskussion über Evolution und psychische Phänomene miteinzubeziehen, so sollte doch bedacht sein, dass die Quantenphysik nicht nur eines der großen physikalischen Theoriegebäude ist und einen wesentlichen Paradigmenwechsel im Realitätsverständnis der modernen Physik bewirkt hat. Sie ist auch schlicht *die* Fundamentaltheorie der Materie; und die von ihr beschriebenen Atome und Moleküle bilden die Arbeitsgrundlage der heutigen Chemie und Biologie. Eine Klärung der hiermit zusammenhängenden Fragen ist somit auch für eine philosophische Einschätzung chemischer und biologischer Erkenntnisse von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Diese Inbezugsetzung liegt auf der Hand, seit es Rosalind Franklin, Francis Crick und James Watson gelungen war, die Struktur der genetischen Informationsträger als Doppelhelix von lediglich vier Nukleinbasen aufzudecken, wodurch sie nicht zuletzt die Molekularbiologie begründeten. Unter anderem hierdurch wurde die Quantenphysik für die Biologie zu einem untersetzlichen Arbeitsgerät. Denn sie ermöglicht es, quantenchemische Potentiale, Reaktionsraten, Molekülfaltungen, Proteinstrukturen, spektrale Absorption, Photosynthese und dergleichen mehr zu beschreiben und zu verstehen. Moderne Chemie, Biologie und Pharmazie sind ohne Quantenphysik nicht mehr denkbar; und damit stellt sich natürlich auch

die Frage, inwieweit die herkömmlichen, der naturwissenschaftlichen Forschung zugrundeliegenden Prinzipien hier noch einen tragfähigen Rahmen zum Verständnis bieten können.

Die moderne Quantenphysik ist ein Theoriegebäude, das im Wesentlichen aus zwei Teilen besteht. Einerseits ist dies die *Quantenmechanik*. Diese mathematisch zwar anspruchsvolle, aber nicht übermäßig komplexe Theorie entstand zur Beschreibung von Zuständen in Atomen und Molekülen. Schon bald erwies sie sich als ungeheuer brauchbar, um die Eigenschaften sowohl der unbelebten wie der belebten Materie im Mikroskopischen erstaunlich präzise zu beschreiben. Sie konnte dies aber nur, indem sie einige der Prinzipien der Naturbeschreibung, wie sie zur Grundlage der klassischen Physik gehörten, über Bord warf und damit eine bis heute andauernde erkenntnistheoretische Diskussion auslöste. Im subatomaren Bereich oder bei hohen Energien gelangt aber auch die Quantenmechanik an ihre Grenzen, so dass die Physiker die Quantenmechanik um die sogenannten *Quantenfeldtheorien* erweitern mussten. Diese liefern für fast alle heute bekannten elementaren Phänomene erschöpfende Erklärungen – selbst unter extremsten Bedingungen wie etwa bei Präzisionsexperimenten im Teilchenbeschleuniger oder bei Kollisionen unglaublich energiereicher Teilchen der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre. Die Quantenfeldtheorien sind mathematisch und begrifflich zwar noch deutlich komplexer als die Quantenmechanik, gehorchen aber erkenntnistheoretisch gesehen denselben Prinzipien. Wir werden uns im Folgenden deshalb zunächst der Quantenmechanik zuwenden und erst im späteren Verlauf auf die Quantenfeldtheorie zu sprechen kommen.

Worin also besteht die geheimnisvolle Vorhersagekraft der Quantenphysik; und was macht ihre Interpretation so schwierig? Zur Klärung dieser Fragen werden wir ihre Struktur und Prinzipien eingehend zu analysieren haben. Dabei soll der Schwerpunkt bei der Vorstellung der Grundlagen stärker auf inhaltlicher und konzeptioneller Klarheit als auf formaler Vollständigkeit liegen; denn zu Letzterer gibt es viele interessante Bücher und Aufsätze, auf die an geeigneter Stelle verwiesen ist. Beim Herausarbeiten der erkenntnistheoretischen Prinzipien der Quantenmechanik jedoch ist es erforderlich, mit höchster begrifflicher Schärfe vorzugehen, denn diese werden für den Fortlauf der Diskussion im zweiten und dritten Teil dieser Abhandlung noch eine entscheidende Rolle spielen. Durch diesen Ansatz und den Verzicht auf mathematisches Formelwerk soll auch für den Nicht-Fachmann eine gute Lesbarkeit gewährleistet sein, um die philosophisch interessanten Aspekte der modernen Physik nicht hinter allzu dichten mathematischen Nebelschwaden zu verbergen – wodurch allerdings keine Vollständigkeit in der Darstellung beansprucht werden kann. Die gute Lesbarkeit werden wir stattdessen durch eine ausführliche Diskussion illustrierender Beispiele und erhellender Gedankenexperimente anstreben.

Die Betrachtungsweise entspricht folglich eher einer Expedition durch die interpretativ wichtigsten Gebiete der modernen Quantenphysik, die den formalen mathematischen Apparat zwar berücksichtigt, ihn aber nicht explizit nachvollzieht und nur seine Ergebnisse zitiert. Auf diesem Wege lassen sich auch einige der

überraschenden und faszinierenden Phänomene der Quantenfeldtheorien streifen. Diese sind als heutige Theorien der Elementarteilchen und der grundlegenden Naturkräfte die Speerspitze quantenphysikalischer Grundlagenforschung. Damit stellen sie neben der Relativitätstheorie sozusagen die Krone im Theoriengebäude der modernen Physik dar. Sie können außerdem zu einem tieferen Einblick in diejenigen Eigenheiten der Quantenwelt beitragen, die auf dem Stand der normalen Quantenmechanik unerklärt bleiben müssen. Eine saubere formale Darlegung dieser mathematisch und konzeptionell äußerst anspruchsvollen Theorien erfordert allerdings Jahre konzentrierten Studiums; wobei ihre Interpretation zusätzlich zu den üblichen immensen konzeptionellen Schwierigkeiten der Quantenphysik noch dadurch erschwert wird, dass die – vorsichtig formuliert – oftmals außerordentlich pragmatische Verwendung der Mathematik durch die Physiker so manchem Mathematiker gewisse Kopfschmerzen bereitet; und das, obwohl die Mathematik hier viele wichtige Anregungen der Physik zu verdanken hat. Der Grund, warum wir einige wichtige Eigenschaften dieser Theorien vorstellen wollen, besteht aber nicht allein in der Illustration der Eigentümlichkeiten der Mikrowelt. Hauptsächlich ist deren Vorstellung durch die Tatsache motiviert, dass es trotz der genannten Schwierigkeiten durchaus möglich ist, einige unerwartete und interessante philosophische Kriterien aus diesen Theorien zu extrahieren, die sich trotz ihrer vordergründigen Unzugänglichkeit als einleuchtende Interpretationshilfen für die Diskussion im dritten Teil erweisen werden.

Man kann sich nun sehr wohl die Frage stellen, ob eine solche Analyse der modernen Naturwissenschaft überhaupt wichtig oder sinnvoll ist. Schließlich arbeiten viele Forscher sehr effektiv, ohne sich allzu sehr den Kopf über solche Fragen zu zerbrechen. Sie nutzen eine Art Minimalinterpretation ihrer jeweiligen Wissenschaft, die ihnen die nötigen Mittel an die Hand gibt, um alle wichtigen Forschungsvorhaben zu erledigen.¹ Bei einer solchen Minimalinterpretation handelt es sich jedoch um eine unreflektierte Sichtweise, die auf tiefer gehende Fragen verzichtet. Größeren wissenschaftlichen Neuerungen – und insbesondere der Relativitätstheorie und der Quantenphysik! – ging jedoch meistens ein kritisches Nachdenken über die begrifflichen und methodischen Grundlagen einer Disziplin voraus. Und die Tatsache, dass sich viele Wissenschaftler und Philosophen über Interpretationsfragen teilweise ihr Leben lang Gedanken machen, liegt vielleicht auch darin begründet, dass man mit solch einer Minimalinterpretation jeden Anspruch auf weltbildliche Bedeutsamkeit aufgibt, wie sie immer schon eine wichtige Motivation der Grundlagenforschung gewesen ist. Meist bedeutet, keine Philosophie zu haben, eine schlechte Philosophie zu haben – oder die mehr oder minder brauchbare Philosophie eines anderen unhinterfragt übernommen zu haben. Hingegen vermag die Reflexion über solche Zusammenhänge manch tiefe Einsichten zu bescheren; und sei es so kurz und prägnant auf den Punkt gebracht,

¹Für die Quantenmechanik lautet eine solche Minimalinterpretation: „Shut up and calculate!“ Dieses Zitat wird meist dem Quantentheoretiker Richard Feynman zugeschrieben.

wie es der Biologe John Haldane einst ausdrückte: „Nature is not only odder than we think, but odder than we can think.“

Zunächst aber wollen wir einen Überblick über die Kapitel in diesem ersten Teil geben. Die in dieser Abhandlung gewählte Darstellung entspricht teils aus didaktischen, teils aus konzeptionellen Gründen ungefähr der historischen Entwicklung der Debatte. Der Gedankengang beginnt mit der klassischen Physik, deren Prinzipien einen besonderen Einfluss auf das abendländische Denken genommen haben und in größtenteils unbewusster und scheinbar selbstverständlicher Weise dessen Wissenschafts- und Realitätsverständnis bestimmen. Aus diesem Grund benötigen wir eine exakte Analyse ihrer Prinzipien und Implikationen. Die Darstellung beginnt mit der klassischen Mechanik und den ihr zugrundeliegenden Prinzipien der Kontinuität, des Determinismus und der Objektivierbarkeit. Anhand eines kurzen Exkurses zum Leib-Seele-Problem werden wir dem Einfluss mechanistischer Denkweisen auf philosophische Grundlagenfragen nachgehen. Dann besprechen wir die Elektrodynamik und die Spezielle Relativitätstheorie und das zu ihnen gehörende Lokalitätsprinzip. Hierauf folgt die Thermodynamik, deren zentraler Begriff, die Entropie, in der klassischen Physik dadurch heraussticht, dass er sich nicht mehr streng objektiv darstellen lässt, sondern den (mangelhaften) Kenntnisstand des Beobachters zu seiner Definition benötigt. Hier lassen sich gewisse Parallelen zu möglichen Interpretationen der quantenmechanischen Wellenfunktion ziehen. Die Darstellung der klassischen Physik schließt mit einer Betrachtung zur Allgemeinen Relativitätstheorie und zu den offenen Problemen der heutigen Physik.

Sodann wenden wir uns der Quantenmechanik zu. Das Ziel des ersten Teils dieser Abhandlung besteht darin herauszuarbeiten, inwieweit die aus der klassischen Physik bekannten Prinzipien der Naturbeschreibung und der ihnen naheliegenden Ontologie bei der Beschreibung der Phänomene des Mikrokosmos noch Bestand haben können. Es wird sich herausstellen, dass keinesfalls alle klassischen Prinzipien weiterhin anwendbar sind, sondern lediglich bestimmte Kombinationen von ihnen, welche in den verschiedenen Interpretationen der Quantenmechanik realisiert sind.

Kapitel 2 gibt deshalb zunächst eine Einführung in die Grundlagen der Quantenmechanik. Hierzu gehören insbesondere die berühmte Schrödinger-Gleichung und die aus dem mathematischen Formalismus ableitbaren und philosophisch bedeutsamen Unschärferelationen, deren Konsequenzen wir eingehend beleuchten.²

²Die gesamte Quantenmechanik, die sich mit Hilfe der Schrödinger-Gleichung beschreiben lässt, ist nicht relativistisch invariant; d. h. sie gehorcht nicht den Erfordernissen der einsteinschen Relativitätstheorie und kann deshalb nur als Grenzfall für kleine Geschwindigkeiten gegenüber der Lichtgeschwindigkeit angesehen werden. Die Diskussion um die Grundlagen der Quantenmechanik wird aber trotzdem auf dieser Grundlage geführt, weil die relativistischen Verallgemeinerungen der Quantenmechanik außer einem mathematisch noch sehr viel komplizierteren Apparat kaum grundsätzlich neue interpretative Probleme aufwerfen. Da einige Interpretationen der Quantenmechanik dennoch Schwierigkeiten mit relativistischen Verallgemeinerungen haben und diese Verallgemeinerungen zu bedeutenden Erkenntnisgewinnen im Naturverständnis der modernen Physik beigetragen haben, werden wir auf diese Punkte in den Kap. 5 und 6 zu sprechen kommen.

Zu den wichtigsten Erkenntnissen der Quantenphysik zählt auch die Unteilbarkeit der Wellenfunktion, die eine Abkehr von den klassischen Prinzipien der Naturbeschreibung unausweichlich macht.

Die hier vorgestellte Standarddarstellung der Quantenmechanik ist das Arbeitsinstrument aller Quantenphysiker und -chemiker. Sie beinhaltet einen Bezug auf die Rolle der Messung und impliziert damit einen Beobachter, was eine streng objektive Deutung im Sinne der klassischen Physik unmöglich macht. Zwar gibt es in der klassischen Physik einen ebensolchen Bezug, nämlich bei der Entropie, aber dieser bezieht sich nur auf die pragmatische Unmöglichkeit, eine ungeheure Vielzahl von Variablen zu messen und die aus ihnen folgenden Gleichungen zu lösen. Man hat dort gewissermaßen aus der Not eine Tugend gemacht – und das nur beschränkte Wissen eines Beobachters über ein System mit unglaublich vielen Teilchen als Maß für die Unordnung eines Systems eingeführt. Im Bereich der Quantenmechanik sieht das anders aus, denn hier lässt es die Standardformulierung auch für elementar einfache Anordnungen – wie etwa die Ortsbestimmung eines einzelnen, freien Elektrons – nicht zu, auf den Begriff der Beobachtung zu verzichten. Dies hat einschneidende Auswirkungen auf unser Realitätsverständnis einer unabhängigen Mikrowelt und ist deshalb auch der Punkt, an dem die verschiedenen Interpretationen divergieren. Einige Interpreten schlagen eine Änderung des Formalismus vor, andere eine Umdeutung unserer Begriffe von Realität. Wir werden im Einzelnen auf diese Punkte eingehen, nachdem wir uns mit der Standardinterpretation und den gegen sie vorgebrachten Einwänden auseinandergesetzt haben.

Diese Standardinterpretation, auch *Kopenhagener Deutung* oder *Kopenhagener Interpretation* genannt, erörtern wir in Kap. 3. Sie ist zusammen mit der Entwicklung des Formalismus gewachsen und somit die historisch älteste Deutung der Quantenphysik. Sie berücksichtigt die Rolle der Beobachtung oder des Messprozesses explizit und entsagt mithin einem mikroskopischen Realismus. Gleichzeitig versteht sie, was oftmals missverstanden wird, keineswegs die ganze Welt als mentale Erscheinung, sondern räumt dem Makrokosmos und den diesen Makrokosmos beschreibenden klassisch-physikalischen Begriffen eine konzeptionelle und epistemologische Vorrangstellung ein. Zentral im Verständnis der Mikrowelt ist für die Kopenhagener Deutung der Begriff der Komplementarität, da dieser den begrenzten Anwendbarkeitsbereich unserer makroskopischen Vorstellungen feststellt.

Gegen die Kopenhagener Deutung wurde zunächst eine ganze Reihe unterschiedlicher Argumente ins Feld geführt, bevor verschiedene Alternativinterpretationen entwickelt wurden. Die berühmtesten dieser Argumente werden wir in Kap. 4 diskutieren. Zu ihnen gehören die Paradoxa von Schrödingers Katze und von Wigners Freund sowie das sogenannte EPR-Paradoxon.³ Diese Paradoxa illustrieren paradigmatisch sowohl die kontraintuitiven Gesichtspunkte im neuen Realitätsverständnis als auch mögliche Missverständnisse der Kopenhagener Deutung. Wir werden auch die neueren Entwicklungen zu den einzelnen Paradoxa ansprechen,

³Dieses Paradoxon ist nach seinen Urhebern Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen benannt, siehe Einstein et al. (1935).

die ein tieferes Verständnis dieser Punkte ermöglichen. Insbesondere gilt dies für das EPR-Paradoxon, das auf dem Phänomen der Verschränkung basiert und das grundlegende theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten angestoßen hat, an denen bis heute weltweit intensiv gearbeitet wird. Diese Studien besitzen nicht nur einen zentralen Einfluss auf sämtliche Interpretationsansätze der Quantenmechanik, sondern auch großes Potential für technologische Innovationen.

Die wichtigsten der im Einzelnen sehr unterschiedlichen alternativen Interpretationen der Quantenmechanik werden wir in Kap. 5 behandeln und das von ihnen implizierte Weltbild mit der Kopenhagener Deutung und dem Realitätsbegriff der klassischen Physik kontrastieren. Zu diesen Alternativinterpretationen gehören sowohl die Vielwelten-Interpretation als auch die Bohmsche Führungswellentheorie sowie einige andere, unbekanntere Interpretationen. Sämtliche Interpretationen müssen sich den strengen Bedingungen und Vorgaben der Natur fügen, die ihren Spielraum in unterschiedlichster Richtung einschränken. Die Verpflichtung auf eine bestimmte Ontologie etwa bedingt bereits den Verzicht auf bestimmte Eigenschaften des Realitätsverständnisses. Wir werden diese sowohl unter erkenntnistheoretischen wie logischen Gesichtspunkten reizvollen Aspekte eingehend diskutieren; auch wenn eine ausführliche formale Analyse jeder der genannten Interpretationen im hier gesteckten Rahmen nicht möglich ist.

In Kap. 6 greifen wir dann die erkenntnistheoretisch wichtigsten Aspekte der relativistischen Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie auf. Hierzu gehören unter anderem die Verallgemeinerung der Schrödinger-Gleichung, die Dirac-Gleichung, und die aus ihr folgenden Besonderheiten für den Spin, also den Eigendrehimpuls der Teilchen. Dies beinhaltet auch die Begründung des sogenannten Pauli-Prinzips durch das fundamentale Spin-Statistik-Theorem, das sich aus nur wenigen extrem allgemeinen Voraussetzungen herleiten lässt. Dieses Prinzip erklärt den Aufbau des Periodensystems der Elemente und die Stabilität aller Materie. Außerdem erörtern wir die Phänomene der Teilchenerzeugung und -vernichtung und die besondere Rolle von Symmetrien und Erhaltungssätzen hierbei. Die Behandlung der relativistischen Quantenphysik endet mit einer Betrachtung ihrer interpretativen Probleme und des von ihr implizierten Weltbildes, dessen abstrakter Charakter noch über die herkömmliche Quantenmechanik hinausgeht.

Zum Abschluss des ersten Teils fassen wir in Kap. 7 die bisher erzielten Ergebnisse zusammen und stellen einen Vergleich der verschiedenen Interpretationen an. Für den Fortgang des Gedankenganges ist insbesondere von Interesse, inwieweit die klassischen Realitätsbegriffe noch Geltung beanspruchen können. Dies wird bei den Reflexionen über die evolutionäre Entstandenheit des menschlichen Erkenntnisvermögens im zweiten und dritten Teil dann eine entscheidende Rolle spielen.