



### 3 – Das neue Weltbild der Quantenphysik

1. Die spezielle (→ Zeit) wie die allgemeine (→ Gravitation) Relativitätstheorie A. Einsteins konnte in der Folgezeit hinsichtlich den Genauigkeit ihrer Voraussagen in beeindruckender Weise bewährt werden. Im Uhrenexperiment (1972) konnte die Relativität der Zeit (Zeitdilatation) nachgewiesen werden<sup>1</sup>. Uhren in einem Erdorbit von 300 km gehen dementsprechend schneller als Uhren auf der Erdoberfläche; die Daten der GPS-Satelliten müssen daher um einen bestimmten Zeitfaktor korrigiert werden. Daher gibt es keine absolute Gleichzeitigkeit, sondern „Gleichzeitigkeit“ nur in einem gemeinsamen, „ruhenden“ Bezugssystem. Die Rotverschiebung<sup>2</sup> des Lichtes von fernen Sternen und Galaxien wurde 1962 mit Hilfe des Mößbauer-Effektes nachgewiesen. Die Wirkung der Beugung des Lichtes aufgrund von Gravitation (→ Gravitations-Linsen<sup>3</sup>) wurde schon 1919 bei einer Sonnenfinsternis bestätigt.

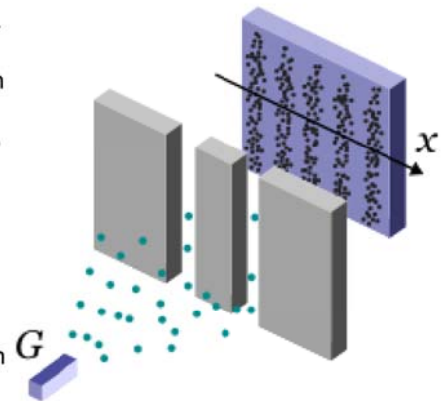
1) Befindet sich ein Beobachter im Zustand der gleichförmigen Bewegung bzw. ruht er in einem Inertialsystem, geht nach der speziellen Relativitätstheorie jede relativ zu ihm bewegte Uhr aus seiner Sicht langsamer. - Mit der gravitativen Zeitdilatation bezeichnet man den Effekt, dass eine Uhr, wie auch jeder andere Prozess, in einem Gravitationsfeld langsamer abläuft als außerhalb desselben. So läuft die Zeit auf der Erdoberfläche um etwa den Faktor  $7 \cdot 10^{-10}$  langsamer ab als im fernen, näherungsweise gravitationsfreien Weltraum. (W)

2) Die gravitative Rotverschiebung ist eine direkte Folge der gravitativen Zeitdilatation. Sie ist streng genommen kein Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie, sondern folgt bereits aus der speziellen Relativitätstheorie und dem Äquivalenzprinzip der allgemeinen Relativitätstheorie. Licht, das von einer Lichtquelle mit einer gegebenen Frequenz nach oben (also vom Gravitationszentrum weg) ausgestrahlt wird, wird dort mit einer geringeren Frequenz gemessen. Das bedeutet also insbesondere, dass bei einem Lichtsignal mit einer bestimmten Anzahl von Schwingungen der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn und dem Ende des Signals beim Empfänger größer ist als beim Sender. Dies wird durch die gravitative Zeitdilatation verständlich. (W)

3) Um eine Gravitationslinse im üblichen, also astronomischen Sinne zu erhalten, sind normalerweise die extrem intensiven Gravitationsfelder astronomischer Objekte, wie Schwarzer Löcher, Galaxien oder Galaxienhaufen nötig. Bei diesen ist es möglich, dass eine hinter der Gravitationslinse liegende Lichtquelle nicht nur verschoben erscheint, sondern dass der Beobachter mehrere Bilder sieht. Die erste solche „starke Gravitationslinse“ wurde 1979 entdeckt. Ein bekanntes Beispiel ist das 1985 entdeckte Einsteinkreuz im Sternbild Pegasus, eine vierfache Abbildung desselben Objekts. (W)

2. Größere Schwierigkeiten bereitete die „Quantelung“ des Lichtes bzw. der elektromagnetischen Kräfte. Einerseits konnten konkrete „Licht-Quanten“ (Photonen) nachgewiesen werden (z.B. der photoelektrische Effekt, d.h. der Wechselwirkung von Photonen mit Materie, besonders Elektronen), andererseits zeigten eben diese Photonen an einem Doppelspalt \*) Beugungsmuster (Interferenzen), wie sie nur bei einer Welle im Kräftefeld vorkommen. Die Deutung dieses sog. „Doppelspalt-Experiments“ führte zum Welle-Teilchen-Dualismus, der mittels der Quantenmechanik erklärt werden konnte.

\*) Beim Doppelspaltexperiment lässt man kohärentes Licht durch eine Blende mit zwei schmalen, parallelen Schlitzen treten. Auf einem Beobachtungsschirm hinter der Blende zeigt sich dann – durch die Interferenz des Lichtes, welches die beiden Blendenöffnungen passiert – ein Interferenzmuster. Das Experiment kann nicht nur mit den „Wellen“ des Lichtes, sondern auch mit seinen und anderer Art „Teilchen“ (Elektronen, Neutronen, Atomen, Fulleren-Molekülen usw.) durchgeführt werden. Es zeigt sich auch in diesen Fällen ein Interferenzmuster wie bei der Durchführung mit Licht. Das bedeutet, dass auch klassische Teilchen unter bestimmten Bedingungen Welleneigenschaften zeigen – man spricht dann von „Materiewellen“. Mit dem Doppelspaltexperiment kann man so den Welle-Teilchen-Dualismus demonstrieren, der nur im Rahmen der Quantenmechanik erklärt werden kann. Dieses Experiment gilt als das wichtigste Experiment der Quantenmechanik, es ist ein herausragendes Beispiel dafür, wie die Quantenmechanik unsere Weltanschauung verändert. (W)



3. Die „Kopenhagener Deutung“ führte schließlich zum quantentheoretischen Standardmodell der Atomtheorie (heute: Teilchenphysik). Entscheidend für diese Interpretation des zunächst so verwirrenden experimentellen Befundes war der von Niels Bohr (1885 – 1962; Nobelpreis 1922) eingeführte Begriff der **Komplementarität**. Zusammen mit Max Born (1882 – 1970; Nobelpreis 1954) wurden die gefundenen Materiewellen als **Wahrscheinlichkeitswellen** interpretiert. Genau so konnten auch die Wellengleichungen Erwin Schrödingers (1887 – 1961; Nobelpreis 1933) verstanden werden. Die Schrödingersche Wellenfunktion (1927) beschreibt in der Quantenmechanik den Zustand eines Elementarteilchens, indem sie für das „Teilchen“ die Wahrscheinlichkeit bestimmt, an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit im Experiment aufgefunden zu werden („Wahrscheinlichkeitswelle“). Zu ein und derselben Zeit kann allerdings nur *entweder* der genaue Ort *oder* die exakte Geschwindigkeit (Impuls) bestimmt werden (Heisenbergsche **Unschärferelation**). Schließlich wurde deutlich, dass durch die Anordnung des Experiments bestimmt wurde, welcher quantenmechanische Zustand (Welle – Teilchen) überhaupt festgestellt werden kann. Die Materie schien sich nicht mehr nur relativistisch, sondern substantiell in Kraftfelder aufzulösen: Materie und Energie wurden als austauschbar und nahezu beliebig ineinander überführbar erkannt.

Gemäß der Kopenhagener Interpretation ist der Wahrscheinlichkeitscharakter quantentheoretischer Vorhersagen nicht Ausdruck der Unvollkommenheit der Theorie, sondern des prinzipiell indeterministischen Charakters von quantenphysikalischen Naturvorgängen. Ferner wird in dieser Interpretation darauf verzichtet, den Objekten des quantentheoretischen Formalismus, also vor allem der Wellenfunktion, eine Realität in unmittelbarem Sinne zuzusprechen. Stattdessen werden die Objekte des Formalismus lediglich als Mittel zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeiten von Messergebnissen interpretiert, die als die einzigen Elemente der Realität angesehen werden. Die Quantentheorie und diese Deutungen sind damit von erheblicher Relevanz für das naturwissenschaftliche Weltbild und dessen Naturbegriff.

Klassische Begriffe werden in ihrer üblichen Bedeutung auch in der Quantenwelt benutzt. Sie erhalten hier allerdings Vorschriften über ihre Anwendbarkeit. Diese Vorschriften umfassen die Definitionsgrenzen von Ort und Impuls, unterhalb derer die Begriffe Ort und Impuls keinen Sinn mehr ergeben, also undefiniert sind. Die klassische Physik ist dadurch ausgezeichnet, dass gleichzeitig eine exakte raumzeitliche Darstellung und die volle Einhaltung des physikalischen Kausalitätsprinzips als gegeben gedacht sind. Die exakte raumzeitliche Darstellung ermöglicht die genaue Ortsangabe eines Objekts zu genau bestimmten Zeiten. Das physikalische Kausalprinzip ermöglicht bei Kenntnis des Anfangszustandes eines physikalischen Systems und Kenntnis der wirkenden Entwicklungsgesetze die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs zukünftiger Systemzustände. Klassische Begriffe sind nun unverzichtbar, da auch quantenphysikalische Messungen ein Messinstrument erfordern, das in klassischen Zeit- und Raumbegriffen beschrieben werden muss und das dem Kausalprinzip genügt.

In Bereichen, in denen die so genannte Wirkung in Größenordnung des Planckschen Wirkungsquantums  $h$ , liegt, kommt es zu Quanteneffekten. Quanteneffekte kommen aufgrund von unkontrollierbaren Wechselwirkungen zwischen Objekt und Messgerät zu Stande. Komplementarität bedeutet nun, dass Raumzeitdarstellung und Kausalitätsforderung nicht beide gleichzeitig erfüllt sein können. Ansonsten würde sich folgender Widerspruch ergeben: Eine Eigenschaft eines Teilchens sei bestimmt. Dann muss nach der Quantenmechanik die Beeinflussung durch ein Messgerät fehlen, also muss eine Messung fehlen, und damit geht der Sinn der Bestimmtheit verloren. (W)

4. Heute hat sich die elektronische Technik zahlreiche quantenmechanischen Effekte zu eigen gemacht, so im Rastertunnel-Mikroskop (Tunnel-Effekt) und medizinisch in der Magnet-Resonanz-Tomographie MRT und im Kernspin-Tomographen (Spin). Die Herstellungsverfahren der Computer-Prozessoren und überhaupt der IC's nutzt quantenmechanische Effekte. Die Teilchenphysik (→ CERN) hat mit der Entdeckung von in der Quantenphysik vorausgesagter Teilchen große Erfolge (Suche nach dem → Higgs-Teilchen), auch die Konstruktion eines Quantencomputers, der die Leistungsfähigkeit aller bisherigen Rechner bei weitem in den Schatten stellen würde, rückt allmählich in größere Nähe. Eben so wenig lassen sich die Relativitäts- und Quantentheorie aus der modernen Astronomie und Kosmologie weg denken (→ Stephen Hawking). Zu einer noch stärkeren Verallgemeinerung der Quantentheorie führt die Frage, ab welcher Größenordnung quantenmechanische Effekte feststellbar sind. Inzwischen ist man bei Molekülen und noch größeren Einheiten (Fullerenen) angelangt (→ Dekohärenz).

# Texte zur Kopenhagener Deutung

aus: Werner Heisenberg, Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik, 1969, <sup>11</sup>1989

## Der Begriff „Verstehen“ in der modernen Physik (1922)

[51 / 55]

Bohr begann das Gespräch, indem er auf die Diskussionen vom Vormittag zurückkam: »Sie haben heute früh einige Bedenken gegen die Arbeit von Kramers geäußert. Ich muß gleich sagen, Ihre Zweifel sind mir durchaus verständlich; und ich glaube, ich sollte Ihnen etwas ausführlicher erklären, wie ich zu diesen ganzen Problemen stehe. Ich bin im Grund nämlich viel mehr einig mit Ihnen, als Sie denken, und ich weiß sehr wohl, wie vorsichtig man bei allen Behauptungen über die Struktur /

der Atome sein muß. Vielleicht darf ich zuerst etwas über die Geschichte dieser Theorie erzählen. Der Ausgangspunkt war ja nicht der Gedanke, daß das Atom ein Planetensystem im Kleinen sei und daß man hier die Gesetze der Astronomie anwenden könnte. So wörtlich habe ich das alles nie genommen. Sondern für mich war der Ausgangspunkt die Stabilität der Materie, die ja vom Standpunkt der bisherigen Physik aus ein reines Wunder ist.

Ich meine mit dem Wort Stabilität, daß immer wieder die gleichen Stoffe mit den gleichen Eigenschaften auftreten, daß die gleichen Kristalle gebildet werden, die gleichen chemischen Verbindungen entstehen usw. Das muß doch bedeuten, daß auch nach vielen Veränderungen, die durch äußere Wirkungen zustande kommen mögen, ein Eisenatom schließlich wieder ein Eisenatom mit genau den gleichen Eigenschaften ist. Das ist nach der klassischen Mechanik unbegreiflich, besonders dann, wenn ein Atom Ähnlichkeit mit einem Planetensystem hat. In der Natur gibt es also eine Tendenz, bestimmte Formen zu bilden - ich meine das Wort »Formen« jetzt im allgemeinsten Sinne - und diese Formen, auch wenn sie gestört oder zerstört worden sind, immer wieder neu entstehen zu lassen. Man könnte in diesem Zusammenhang sogar an die Biologie denken; denn die Stabilität der lebendigen Organismen, die Bildung kompliziertester Formen, die doch nur jeweils als Ganzheit existenzfähig sind, ist ein Phänomen ähnlicher Art. Aber in der Biologie handelt es sich um ganz komplizierte, zeitlich veränderliche Strukturen, von denen wir jetzt nicht reden wollen. Ich möchte hier nur von den einfachen Formen sprechen, denen wir schon in Physik und Chemie begegnen. Die Existenz einheitlicher Stoffe, das Vorhandensein der festen Körper, alles das beruht auf dieser Stabilität der Atome; ebenso die Tatsache, daß wir zum Beispiel von einer Leuchtröhre, die mit einem bestimmten Gas gefüllt ist, auch immer wieder Licht der gleichen Farbe, ein leuchtendes Spektrum mit genau den gleichen Spektrallinien bekommen. Das alles ist ja keineswegs selbstverständlich, sondern es scheint im Gegenteil unverständlich, wenn man den Grundsatz der Newtonschen Physik, die strenge kausale Determiniertheit des Geschehens, annimmt, wenn der jetzige Zustand jeweils durch den unmittelbar vorhergehenden und nur durch ihn eindeutig bestimmt sein soll. Dieser Widerspruch hat mich sehr früh beunruhigt.

Das Wunder von der Stabilität der Materie wäre vielleicht /

noch länger unbeachtet geblieben, wenn es nicht in den vergangenen Jahrzehnten durch einige wichtige Erfahrungen anderer Art neu beleuchtet worden wäre. Planck hat, wie Sie wissen, gefunden, daß die Energie eines atomaren Systems sich un stetig ändert; daß es bei der Ausstrahlung von Energie durch ein solches System sozusagen Haltestellen mit bestimmten Energien gibt, die ich später stationäre Zustände genannt habe. Dann hat Rutherford seine Versuche über die Struktur der Atome angestellt, die für die spätere Entwicklung so entscheidend waren. Dort in Manchester, in Rutherfords Laboratorium, habe ich diese ganze Problematik kennengelernt. Ich war damals fast so jung wie Sie jetzt, und ich habe unendlich viel mit Rutherford über solche Fragen gesprochen. Schließlich sind in dieser Zeit die Leuchterscheinungen genauer untersucht worden, man hat die für die verschiedenen chemischen Elemente charakteristischen Spektrallinien ausgemessen, und die vielfältigen chemischen Erfahrungen enthalten natürlich auch eine Fülle von Auskünften über das Verhalten der Atome. Durch diese ganze Entwicklung, die ich damals unmittelbar miterlebt habe, ist eine Frage gestellt worden, der man in unserer Zeit nicht mehr

ausweichen konnte; nämlich die Frage, wie das alles zusammenhängt. Die Theorie, die ich versucht habe, sollte also auch nichts anderes tun, als diesen Zusammenhang herstellen.

Nun ist das aber eigentlich eine ganz hoffnungslose Aufgabe; eine Aufgabe ganz anderer Art, als wir sie sonst in der Wissenschaft vorfinden. Denn in der bisherigen Physik oder in jeder anderen Naturwissenschaft konnte man, wenn man ein neues Phänomen erklären wollte, unter Benützung der vorhandenen Begriffe und Methoden versuchen, das neue Phänomen auf die schon bekannten Erscheinungen oder Gesetze zurückzuführen. In der Atomphysik aber wissen wir ja schon, daß die bisherigen Begriffe dazu sicher nicht ausreichen. Wegen der Stabilität der Materie kann die Newtonsche Physik im Inneren des Atoms nicht richtig sein, sie kann bestenfalls gelegentlich einen Anhaltspunkt geben. Und daher wird es auch keine anschauliche Beschreibung der Struktur des Atoms geben können, da eine solche - eben weil sie anschaulich sein sollte - sich der Begriffe der klassischen Physik bedienen müßte, die aber das Geschehen nicht mehr ergreifen. Sie verstehen, daß man mit einer solchen Theorie eigentlich etwas ganz Unmögliches versucht. Denn wir sollen etwas über die Struktur des Atoms aussagen, aber wir besitzen keine Sprache, mit der wir uns verständlich machen /

könnten. Wir sind also gewissermaßen in der Lage eines Seefahrers, der in ein fernes Land verschlagen ist, in dem nicht nur die Lebensbedingungen ganz andere sind, als er sie aus seiner Heimat kennt, sondern in dem auch die Sprache der dort lebenden Menschen ihm völlig fremd ist. Er ist auf Verständigung angewiesen, aber er besitzt keinerlei Mittel zur Verständigung. In einer solchen Lage kann eine Theorie überhaupt nicht »erklären« in dem Sinn, wie das sonst in der Wissenschaft üblich ist. Es handelt sich darum, Zusammenhänge aufzuzeigen und sich behutsam voranzutasten. So sind auch die Rechnungen von Kramers gemeint, und vielleicht habe ich mich heute vormittag nicht vorsichtig genug ausgedrückt. Aber mehr wird einstweilen überhaupt nicht möglich sein.«

Aus diesen Äußerungen Bohrs spürte ich unmittelbar, wie sehr alle die Zweifel und Einwände, die wir in München besprochen hatten, auch ihm geläufig waren. Um sicher zu sein, daß ich ihn richtig verstanden hatte, fragte ich zurück: »Was bedeuten aber dann die Bilder von den Atomen, die Sie in den letzten Tagen in Ihren Vorlesungen gezeigt und besprochen haben und für die Sie auch Gründe angegeben haben? Wie sind die gemeint?«

»Diese Bilder«, antwortete Bohr, »sind ja aus Erfahrungen erschlossen, oder, wenn Sie wollen, erraten, nicht aus irgendwelchen theoretischen Berechnungen gewonnen. Ich hoffe, daß diese Bilder die Struktur der Atome so gut beschreiben, aber eben auch nur so gut beschreiben, wie dies in der anschaulichen Sprache der klassischen Physik möglich ist. Wir müssen uns klar darüber sein, daß die Sprache hier nur ähnlich gebraucht werden kann wie in der Dichtung, in der es ja auch nicht darum geht, Sachverhalte präzise darzustellen, sondern darum, Bilder im Bewußtsein des Hörers zu erzeugen und gedankliche Verbindungen herzustellen.«

»Aber wie sollen dann eigentlich Fortschritte erzielt werden? Schließlich soll die Physik doch eine exakte Wissenschaft sein.«

»Wir müssen erwarten«, meinte Bohr, »daß die Paradoxien der Quantentheorie, die unverständlichen Züge, die mit der Stabilität der Materie zusammenhängen, mit jeder neuen Erfahrung in ein immer schärferes Licht treten. Wenn dies geschieht, so kann man hoffen, daß sich im Laufe der Zeit neue Begriffe bilden, mit denen wir auch diese unanschaulichen Vorgänge im Atom irgendwie ergreifen können. Aber davon sind wir noch weit entfernt.«

Bohrs Gedankengänge verbanden sich für mich mit der von /

Robert [Heisenbergs Bruder] auf unserer Wanderung am Starnberger See vertretenen Ansicht, daß die Atome keine Dinge seien. Denn obwohl Bohr so viele Einzelheiten von der inneren Struktur der chemischen Atome zu erkennen glaubte, waren die Elektronen, aus denen ihre Atomhüllen bestanden, offenbar keine Dinge mehr; jedenfalls keine Dinge im Sinne der früheren Physik, die man ohne Vorbehalte mit Begriffen wie Ort, Geschwindigkeit, Energie, Ausdehnung beschreiben könnte. Ich fragte Bohr daher: »Wenn die innere Struktur der Atome einer anschaulichen Beschreibung so wenig zugänglich ist, wie Sie sagen, wenn wir eigentlich keine Sprache besitzen, mit der wir über diese Struktur reden könnten, wer-

den wir dann die Atome überhaupt jemals verstehen?« Bohr zögerte einen Moment und sagte dann: »Doch. Aber wir werden dabei gleichzeitig erst lernen, was das Wort »verstehen« bedeutet.«

## Die Quantenmechanik (Helgoland) und ein Gespräch mit Einstein, 1925

[79 / 87]

... es gelang mir, besonders Einsteins Interesse zu wecken. ... eröffnete er das Gespräch sofort mit einer Frage, die auf die philosophischen Voraussetzungen meiner Versuche zielte: »Was Sie uns da erzählt haben, klingt ja sehr ungewöhnlich. Sie nehmen an, daß es Elektronen im Atom gibt, und darin werden Sie sicher recht haben. Aber die Bahnen der Elektronen im Atom, die wollen Sie ganz abschaffen, obwohl man doch die Bahnen der Elektronen in einer Nebelkammer unmittelbar sehen kann. Können Sie mir die Gründe für diese merkwürdigen Annahmen etwas genauer erklären.«

»Die Bahnen der Elektronen im Atom kann man nicht beobachten«, habe ich wohl erwidert, »aber aus der Strahlung, die von einem Atom bei einem Entladungsvorgang ausgesandt wird, kann man doch unmittelbar auf die Schwingungsfrequenzen und die zugehörigen Amplituden der Elektronen im Atom schließen. Die Kenntnis der Gesamtheit der Schwingungszahlen und der Amplituden ist doch auch in der bisherigen Physik so etwas wie ein Ersatz für die Kenntnis der Elektronenbahnen. Da es aber doch vernünftig ist, in eine Theorie nur die Größen aufzunehmen, die beobachtet werden können, schien es mir naturgemäß, nur diese Gesamtheiten, sozusagen als Repräsentanten der Elektronenbahnen, einzuführen.«

»Aber Sie glauben doch nicht im Ernst«, entgegnete Einstein, »daß man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann.« /

»Ich dachte«, fragte ich erstaunt, »daß gerade Sie diesen Gedanken zur Grundlage Ihrer Relativitätstheorie gemacht hätten? Sie hatten doch betont, daß man nicht von absoluter Zeit reden dürfe, da man diese absolute Zeit nicht beobachten kann. Nur die Angaben der Uhren, sei es im bewegten oder im ruhenden Bezugssystem, sind für die Bestimmung der Zeit maßgebend.«

»Vielleicht habe ich diese Art von Philosophie benützt«, antwortete Einstein, »aber sie ist trotzdem Unsinn. Oder ich kann vorsichtiger sagen, es mag heuristisch von Wert sein, sich daran zu erinnern, was man wirklich beobachtet. Aber vom prinzipiellen Standpunkt aus ist es ganz falsch, eine Theorie nur auf beobachtbare Größen gründen zu wollen. Denn es ist ja in Wirklichkeit genau umgekehrt. Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann. Sehen Sie, die Beobachtung ist ja im allgemeinen ein sehr komplizierter Prozeß. Der Vorgang, der beobachtet werden soll, ruft irgendwelche Geschehnisse in unserem Meßapparat hervor. Als Folge davon laufen dann in diesem Apparat weitere Vorgänge ab, die schließlich auf Umwegen den sinnlichen Eindruck und die Fixierung des Ergebnisses in unserem Bewußtsein bewirken. Auf diesem ganzen langen Weg vom Vorgang bis zur Fixierung in unserem Bewußtsein müssen wir wissen, wie die Natur funktioniert, müssen wir die Naturgesetze wenigstens praktisch kennen, wenn wir behaupten wollen, daß wir etwas beobachtet haben. Nur die Theorie, das heißt die Kenntnis der Naturgesetze, erlaubt uns also, aus dem sinnlichen Eindruck auf den zugrunde liegenden Vorgang zu schließen. Wenn man behauptet, daß man etwas beobachten kann, so müßte man also eigentlich genauer so sagen: Obwohl wir uns anschicken, neue Naturgesetze zu formulieren, die nicht mit den bisherigen übereinstimmen, vermuten wir doch, daß die bisherigen Naturgesetze auf dem Weg vom zu beobachtenden Vorgang bis zu unserem Bewußtsein so genau funktionieren, daß wir uns auf sie verlassen und daher von Beobachtungen reden dürfen. In der Relativitätstheorie wird zum Beispiel vorausgesetzt, daß auch im bewegten Bezugssystem die Lichtstrahlen, die von der Uhr zum Auge des Beobachters gehen, hinreichend genau so funktionieren, wie man das auch früher erwartet hätte. Und Sie nehmen mit Ihrer Theorie offenbar an, daß der ganze Mechanismus der Lichtstrahlung vom schwingenden Atom bis zum Spektralapparat oder bis zum Auge genauso funktioniert, wie man das immer schon vorausgesetzt hat, nämlich im wesentlichen nach den Gesetzen von Maxwell. Wenn das nicht mehr /

der Fall wäre, so könnten Sie die Größen, die Sie als beobachtbar bezeichnen, gar nicht mehr beobachten. Ihre Behauptung, daß Sie nur beobachtbare Größen einführen, ist also in Wirklichkeit eine Vermutung über eine Eigenschaft der Theorie, um deren Formulierung Sie sich bemühen. Sie vermuten, daß Ihre Theorie die bisherige Beschreibung der Strahlungsvorgänge in den Punkten, auf die es Ihnen hier ankommt, unangetastet läßt. Damit können Sie recht haben, aber das ist keineswegs sicher.«

Mir war diese Einstellung Einsteins sehr überraschend, obwohl mir seine Argumente einleuchteten...

...

[Einstein] »Kehren wir lieber wieder zum Gegenstand Ihres Vortrages zurück. Ich habe den Verdacht, daß Sie gerade an der Stelle, von der wir eben gesprochen haben, in Ihrer Theorie später noch Schwierigkeiten bekommen werden. Ich will das genauer begründen. Sie tun so, als könnten Sie auf der Seite der Beobachtung alles so lassen wie bisher, das heißt, als könnten Sie einfach in der bisherigen Sprache über das reden, was die Physiker beobachten. Dann müssen Sie aber auch sagen: In der Nebelkammer beobachten wir die Bahn des Elektrons durch die Kammer. Im Atom aber soll es nach Ihrer Ansicht keine Bahnen des Elektrons mehr geben. Das ist doch offenbar Unsinn. Einfach durch Verkleinerung des Raumes, in dem das Elektron sich bewegt, kann doch der Bahnbegriff nicht außer Kraft gesetzt werden.«

Ich mußte nun versuchen, die neue Quantenmechanik zu verteidigen. »Einstweilen wissen wir noch gar nicht, in welcher Sprache wir über das Geschehen im Atom reden können. Wir haben zwar eine mathematische Sprache, das heißt ein mathematisches Schema, mit Hilfe dessen wir die stationären Zustände des Atoms oder die Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Zustand zu einem anderen ausrechnen können. Aber wir wissen noch nicht - wenigstens noch nicht allgemein - wie diese Sprache mit der gewöhnlichen Sprache zusammenhängt. Natürlich braucht man diesen Zusammenhang, um die Theorie überhaupt auf Experimente anwenden zu können. Denn über die Experimente reden wir ja immer in der gewöhnlichen Sprache, das heißt in der bisherigen Sprache der klassischen Physik. Ich kann also nicht behaupten, daß wir die Quantenmechanik schon verstanden hätten. Ich vermute, daß das mathematische Schema schon in Ordnung ist, aber der Zusammenhang mit der gewöhnlichen Sprache ist noch nicht hergestellt. Erst wenn das einmal gelungen ist, wird man hoffen können, auch über die Bahn des Elektrons in der Nebelkammer so zu sprechen, daß keine inneren Widersprüche auftreten. Für eine Auflösung Ihrer Schwierigkeit ist es wohl einfach noch zu früh.«

»Gut, das will ich gelten lassen«, meinte Einstein, »wir werden uns ja in einigen Jahren noch einmal darüber unterhalten können. Aber vielleicht sollte ich im Zusammenhang mit Ihrem Vortrag noch eine andere Frage stellen. Die Quantentheorie hat ja zwei sehr verschiedene Seiten. Einerseits sorgt sie, wie besonders Bohr immer mit Recht betont, für die Stabilität der Atome; sie läßt die gleichen Formen immer wieder neu entstehen. Anderer-

seits beschreibt sie ein merkwürdiges Element von Diskontinuität, von Unstetigkeit in der Natur, das wir zum Beispiel sehr augenfällig erkennen, wenn wir im Dunkeln auf einem Leuchtschirm die Lichtblitze beobachten, die von einem radioaktiven Präparat ausgehen. Diese beiden Seiten hängen natürlich zusammen. In Ihrer Quantenmechanik werden Sie von diesen beiden Seiten reden müssen, wenn Sie zum Beispiel über die Aussendung von Licht durch die Atome sprechen. Sie können die diskreten Energiewerte der stationären Zustände berechnen. Ihre Theorie kann also, so scheint es, Rechenschaft geben von der Stabilität gewisser Formen, die nicht stetig ineinander übergehen können, sondern die eben um endliche Beträge verschieden sind und die offenbar immer wieder gebildet werden können. Was geschieht aber bei der Aussendung von Licht? Sie wissen, daß ich die Vorstellung versucht habe, daß das Atom von einem stationären Energiewert zum anderen gewissermaßen plötzlich herunterfällt, indem es die Energiedifferenz als ein Energiepaket, ein sogenanntes Lichtquant, ausstrahlt. Das wäre ein besonders krasses Beispiel für jenes Element von Unstetigkeit. Glauben Sie, daß diese Vorstellung richtig ist? Können Sie den Übergang von einem stationären Zustand zu einem anderen irgendwie genauer beschreiben?«

In meiner Antwort mußte ich mich auf Bohr zurückziehen. »Ich glaube, von Bohr gelernt zu haben, daß man über einen solchen Übergang in den bisherigen Begriffen überhaupt nicht reden, daß man ihn jedenfalls nicht als einen Vorgang in Raum und Zeit beschreiben kann. Damit ist natürlich sehr wenig gesagt. Eigentlich nur dies, daß man eben nichts weiß. Ob ich die Lichtquanten glauben soll oder nicht,

kann ich nicht entscheiden. Die Strahlung enthält ja offenbar dieses Element von Unstetigkeit, das Sie mit Ihren Lichtquanten darstellen. Andererseits aber auch ein deutliches Element von Kontinuität, das in den Interferenzerscheinungen zutage tritt und das man am einfachsten mit der Wellentheorie des Lichtes beschreibt. Aber Sie fragen natürlich mit Recht, ob man aus der neuen Quantenmechanik, die man ja auch noch nicht wirklich verstanden hat, etwas über diese schrecklich schwierigen Fragen lernen kann. Ich glaube, daß man es zum mindesten hoffen sollte. Ich könnte mir vorstellen, daß man zum Beispiel eine interessante Auskunft bekommen würde, wenn man ein Atom betrachtet, das im Energieaustausch mit anderen Atomen in der Umgebung oder mit dem Strahlungsfeld steht. Man könnte dann nach der / Schwankung der Energie im Atom fragen. Wenn sich die Energie unstetig ändert, so wie Sie es nach der Lichtquantenvorstellung erwarten, so wird die Schwankung, oder mathematisch genauer ausgedrückt, das mittlere Schwankungsquadrat größer sein, als wenn sich die Energie stetig ändert. Ich möchte glauben, daß aus der Quantenmechanik der größere Wert herauskommen wird, daß man das Element von Unstetigkeit also unmittelbar sieht. Andererseits müßte doch auch das Element von Stetigkeit zu erkennen sein, das im Interferenzversuch sichtbar wird. Vielleicht muß man sich den Übergang von einem stationären Zustand zu einem anderen so ähnlich vorstellen, wie in manchen Filmen den Übergang von einem Bild zum nächsten. Der Übergang vollzieht sich nicht plötzlich, sondern das eine Bild wird allmählich schwächer, das andere taucht langsam auf und wird stärker, so daß eine Zeitlang beide Bilder durcheinander gehen und man nicht weiß, was eigentlich gemeint ist. Vielleicht gibt es also einen Zwischenzustand, in dem man nicht weiß, ob das Atom im oberen oder im unteren Zustand ist.«

»Jetzt bewegen sich Ihre Gedanken aber in einer sehr gefährlichen Richtung«, warnte Einstein. »Sie sprechen nämlich auf einmal von dem, was man über die Natur weiß, und nicht mehr von dem, was die Natur wirklich tut. In der Naturwissenschaft kann es sich aber nur darum handeln, herauszubringen, was die Natur wirklich tut. Es könnte doch sehr wohl sein, daß Sie und ich über die Natur etwas Verschiedenes wissen. Aber wen soll das schon interessieren? Sie und mich vielleicht. Aber den anderen kann das doch völlig gleichgültig sein. Also, wenn Ihre Theorie richtig sein soll, so werden Sie mir eines Tages sagen müssen, was das Atom tut, wenn es von einem stationären Zustand durch Lichtaussendung zum anderen übergeht.«

»Vielleicht«, antwortete ich zögernd. »Aber es kommt mir so vor, als ob Sie die Sprache etwas zu hart verwendeten. Doch gebe ich zu, daß alles, was ich jetzt antworten könnte, den Charakter einer faulen Ausrede hat. Warten wir also ab, wie sich die Atomtheorie weiter entwickelt.«

## **Erste Gespräche über das Verhältnis von Naturwissenschaft und Religion, 1927**

[102 / 105]

Wolfgang [Pauli] pflichtete dieser Sorge bei. »Nein«, meinte er, »das wird kaum gutgehen können. Zu der Zeit, in der die Religionen entstanden sind, hat natürlich das ganze Wissen, das der betreffenden Gemeinschaft zur Verfügung stand, auch in die geistige Form gepaßt, deren wichtigster Inhalt dann die Werte und die Ideen der betreffenden Religion waren. Diese geistige Form mußte, das war die Forderung, auch dem einfachsten Mann der Gemeinschaft irgendwie verständlich sein; selbst wenn die Gleichnisse und Bilder ihm nur ein unbestimmtes Gefühl dafür vermittelten, was mit den Werten und Ideen eigentlich gemeint sei. Der einfache Mann muß überzeugt sein, daß die geistige Form für das ganze Wissen der Gemeinschaft ausreicht, wenn er die Entscheidungen seines eigenen Lebens nach ihren Werten richten soll. Denn Glauben bedeutet für ihn ja nicht »Für-richtig-Halten«, sondern »sich der Führung durch diese Werte anvertrauen«. Daher entstehen große Gefahren, wenn das neue Wissen, das im Verlauf der Geschichte erworben wird, die alte geistige /

Norm zu sprengen droht. Die vollständige Trennung zwischen Wissen und Glauben ist sicher nur ein Notbehelf für sehr begrenzte Zeit. Im westlichen Kulturkreis zum Beispiel könnte in nicht zu ferner Zukunft der Zeitpunkt kommen, zu dem die Gleichnisse und Bilder der bisherigen Religion auch für das einfache

Volk keine Überzeugungskraft mehr besitzen; dann wird, so fürchte ich, auch die bisherige Ethik in kürzester Frist zusammenbrechen, und es werden Dinge geschehen von einer Schrecklichkeit, von der wir uns jetzt noch gar keine Vorstellung machen können. Also mit der Planckschen Philosophie kann ich nicht viel anfangen, auch wenn sie logisch in Ordnung ist und auch, wenn ich die menschliche Haltung, die aus ihr hervorgeht, respektiere. Einsteins Auffassung liegt mir näher. Der liebe Gott, auf den er sich so gern beruft, hat irgendwie mit den unabänderlichen Naturgesetzen zu tun. Einstein hat ein Gefühl für die zentrale Ordnung der Dinge. Er spürt diese Ordnung in der Einfachheit der Naturgesetze. Man kann annehmen, daß er diese Einfachheit bei der Entdeckung der Relativitätstheorie stark und unmittelbar erlebt hat. Freilich ist von hier noch ein weiter Weg zu den Inhalten der Religion. Einstein ist wohl kaum an eine religiöse Tradition gebunden, und ich würde glauben, daß die Vorstellung eines persönlichen Gottes ihm ganz fremd ist. Aber es gibt für ihn keine Trennung zwischen Wissenschaft und Religion. Die zentrale Ordnung gehört für ihn zum subjektiven ebenso wie zum objektiven Bereich, und das scheint mir ein besserer Ausgangspunkt.«

»Ein Ausgangspunkt wofür?« wandte ich fragend ein. »Wenn man die Stellung zum großen Zusammenhang sozusagen als eine reine Privatsache ansieht, so wird man Einsteins Haltung zwar sehr gut verstehen können, aber dann geht von dieser Haltung doch gar nichts aus.«

Wolfgang: »Vielleicht doch. Die Entfaltung der Naturwissenschaft in den letzten zwei Jahrhunderten hat doch sicher das Denken der Menschen im ganzen verändert, auch über den christlichen Kulturkreis hinaus. So unwichtig ist es also nicht, was die Physiker denken. Und es war gerade die Enge dieses Ideals einer objektiven in Raum und Zeit nach dem Kausalgesetz ablaufenden Welt, die den Konflikt mit den geistigen Formen der verschiedenen Religionen heraufbeschworen hat. Wenn die Naturwissenschaft selbst diesen engen Rahmen sprengt - und sie hat das in der Relativitätstheorie getan und dürfte es in der Quantentheorie, über die wir jetzt so heftig /

diskutieren, noch viel mehr tun -, so sieht das Verhältnis zwischen der Naturwissenschaft und dem Inhalt, den die Religionen in ihren geistigen Formen zu ergreifen suchen, doch wieder anders aus. Vielleicht haben wir durch die Zusammenhänge, die wir in den letzten dreißig Jahren in der Naturwissenschaft dazu gelernt haben, eine größere Weite des Denkens gewonnen. Der **Begriff der Komplementarität** zum Beispiel, den Niels Bohr jetzt bei der Deutung der Quantentheorie so sehr in den Vordergrund stellt, war ja in den Geisteswissenschaften, in der Philosophie keineswegs unbekannt, selbst wenn er nicht so ausdrücklich formuliert worden ist. Daß er in der exakten Naturwissenschaft auftritt, bedeutet aber doch eine entscheidende Veränderung. Denn erst durch ihn kann man verständlich machen, daß die Vorstellung eines materiellen Objektes, das von der Art, wie es beobachtet wird, ganz unabhängig ist, nur eine abstrakte Extrapolation darstellt, der nichts Wirkliches genau entspricht. In der asiatischen Philosophie und in den dortigen Religionen gibt es die dazu komplementäre Vorstellung vom reinen Subjekt des Erkennens, dem kein Objekt mehr gegenübersteht. Auch diese Vorstellung wird sich als eine abstrakte Extrapolation erweisen, der keine seelische oder geistige Wirklichkeit genau entspricht. Wir werden, wenn wir über die großen Zusammenhänge nachdenken, in Zukunft gezwungen sein, die - etwa durch Bohrs Komplementarität vorgezeichnete - Mitte einzuhalten. Eine Wissenschaft, die sich auf diese Art des Denkens eingestellt hat, wird nicht nur toleranter gegenüber den verschiedenen Formen der Religion sein, sie wird vielleicht, da sie das Ganze besser überschaubar, zu der Welt der Werte mit beitragen können.«

**Werner Karl Heisenberg** (\* 5. Dezember 1901 in Würzburg; † 1. Februar 1976 in München) war einer der bedeutendsten Physiker des 20. Jahrhunderts und Nobelpreisträger (1932). Er formulierte 1927 die nach ihm benannte Heisenbergsche Unschärferelation, welche eine der fundamentalen Aussagen der Quantenmechanik trifft – nämlich, dass bestimmte Messgrößen eines Teilchens (etwa sein Ort und Impuls) nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden können.

**Wolfgang Ernst Pauli** (\* 25. April 1900 in Wien; † 15. Dezember 1958 in Zürich) war einer der bedeutendsten Physiker des 20. Jahrhunderts. 1945 erhielt Pauli den Nobelpreis für Physik in Würdigung seiner Formulierung des Ausschließungsprinzips bei der quantentheoretischen Beschreibung des Elektronenspins.

**Niels Henrik David Bohr** (\* 7. Oktober 1885 in Kopenhagen; † 18. November 1962 ebenda) war ein dänischer Physiker. Er erhielt den Nobelpreis für Physik im Jahr 1922 „für seine Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung“.