

KOMPLEMENTARITÄT ALS BRÜCKE ZWISCHEN PHYSIK UND RELIGION¹

Matthias Brack, Institut für Theoretische Physik, Universität Regensburg

Einleitung

Mit diesem Beitrag² möchte ich als Physiker das Spannungsfeld zwischen Rationalität und Religion anhand des Konzeptes der Komplementarität zu überbrücken versuchen. Der wegweisende Atomphysiker und Nobelpreisträger Niels Bohr hatte den Komplementaritätsbegriff zunächst im Rahmen der Quantentheorie eingeführt, um dort auftretende scheinbare konzeptuelle Widersprüche zu klären. Wie wir sehen werden, hat er ihn auch auf Gebiete außerhalb der Physik erweitert, und eine Anwendung auf die oft empfundene Kluft zwischen naturwissenschaftlicher Rationalität und Glauben erscheint mir als ein plausibler Schritt auf dem Weg zu einem einheitlichen Weltbild.

Im ersten Teil dieses Aufsatzes möchte ich auf einige der grundlegenden Annahmen und Vorgehensweisen der modernen Physik eingehen, aber insbesondere auch auf deren Grenzen, wie sie den Physikern zu Beginn des 20. Jahrhunderts bewusst geworden sind. Die Entdeckungen, die von Poincaré, Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg und Schrödinger gemacht wurden – um nur einige von vielen Namen zu nennen – können ohne Übertreibung als revolutionär bezeichnet werden. Sie erschütterten die Fundamente der damaligen Physik und veränderten in tiefgreifender Weise nicht nur das Weltverständnis, sondern auch das Selbstverständnis vieler Physiker. Ich werde vor allem auf die von Max Planck in die Wege geleitete Quantenphysik und einige ihrer Aspekte eingehen: auf den Dualismus zwischen Teilchen- und Wellennatur eines und desselben Objektes, auf den sogenannten Messprozess, und auf die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation. Die dabei gemachten physikalischen Erkenntnisse gehören heute zum Allgemeinwissen eines jeden Physikers und stehen in hunderten von Lehrbüchern.³ Die neuen Erkenntnisse – zu denen auch die Relativitätstheorie von Einstein gehört – haben die Weltanschauung und das Denken vieler Menschen, nicht nur von Physikern, beeinflusst.

Im zweiten Teil werde ich mich Zusammenhängen zwischen physikalischer Forschungstätigkeit und Fragen des Glaubens zuwenden. Ich werde zunächst auf den von Niels Bohr eingeführten Begriff der Komplementarität eingehen, welcher zum Ziel hatte, den scheinbaren Widerspruch zwischen Teilchen- und Wellenbild aufzulösen oder jedenfalls in einen erkenntnistheoretischen Rahmen einzuordnen. Dann möchte ich ansatzweise einen erweiterten Komplementaritätsbegriff als Paradigma für eine mögliche Vereinheitlichung physikalischen und religiösen Denkens vorstellen. Was ich dazu sagen kann, ist von persönlicher Natur und kann allenfalls für jene Physiker stellvertretend sein, die christlichen Glauben mit naturwissenschaftlicher Tätigkeit vereinbaren können.

¹ Beitrag zu: *Zwischen Rationalität und Religion - Interdisziplinäre Perspektiven* (Hrsg. Sigmund Bonk, Verlag Friedrich Pustet, Regensburg 2019), SS. 268-283.

² Neufassung des Vortrages: M. Brack, Grenzen der physikalischen Erkenntnis - Gedanken zum Bohrschen Komplementaritätsbegriff, in: *Atheistischer und jüdisch-christlicher Glaube: Wie wird Naturwissenschaft geprägt*, Forschungs-Symposium 2008 an der Universität Regensburg (Hrsg. Christiane Thim-Mabrey, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2009).

³ s.a. den Beitrag von B. Dick, der einige der hier erwähnten Phänomene auf sehr didaktische Weise illustriert und ausführlicher erklärt.

1. Teil: Grenzen der physikalischen Erkenntnis

1.1. Grundlegende Annahmen und Vorgehensweisen der Physik

Die moderne Physik gehört zu den sogenannten exakten Naturwissenschaften. Sie bedient sich der Sprache und des Formalismus der Mathematik, um die materiellen Aspekte der leblosen Natur so genau wie möglich zu beschreiben und, in beschränktem Rahmen, zu erklären. Zu diesen Aspekten gehören etwa:

- die Bewegung der Himmelskörper (mit der Astronomie hat unsere Wissenschaft im alten Babylon ihren Anfang genommen);
- die Bewegung von Teilchen und Wellen in der sogenannten "makroskopischen Welt" - allgemein alles, was wir so im Alltag beobachten;
- im Gegensatz dazu die sogenannte "mikroskopische Welt". Dazu gehören Atome, Moleküle und die Struktur von kondensierter Materie (Gase, Flüssigkeiten, Festkörper - hier überschneiden sich teilweise Physik und Chemie), Atomkerne und deren Bestandteile, die sogenannten Elementarteilchen, und deren Eigenschaften im Bereich von extrem kleinen Dimensionen;
- der Kosmos (Galaxien, schwarze Löcher, interstellare Materie) - in der Kosmologie werden Erkenntnisse aus größten und kleinsten Dimensionen vereint.

Zu den Aspekten, welche die Physik nicht beschreiben oder erklären kann, gehören etwa:

- menschliche Gedanken und Gefühle;
- Kunst: also Musik, Malerei, Dichtung usw.;
- Leben in irgendeiner Form. Dabei will ich nicht etwa sagen, dass in lebenden Organismen nicht viele physikalische Gesetze und Prozesse zur Anwendung kommen - damit beschäftigen sich Biologen und Biophysiker. Aber das, was das Leben an sich ausmacht, im Unterschied zur leblosen Materie, können wir nicht in mathematische Formeln fassen.
- Gott, falls man ihn überhaupt als Bestandteil der Natur auffasst und ihn nicht darüber stellt oder negiert: Gottes Existenz kann mit naturwissenschaftlichen Methoden weder bewiesen noch widerlegt werden.

Physiker versuchen also, gewisse Aspekte der materiellen Natur zu beschreiben. Sie beobachten die Natur und finden bestimmte Regelmäßigkeiten. Diese werden "Naturgesetze" genannt und in mathematische Formeln gefasst. Im Experiment entwirft und verwendet man Instrumente, um die Natur auszumessen und die Gültigkeit von Naturgesetzen zu überprüfen. Dann macht man mathematische Berechnungen - ausgehend von Theorien oder Modellen, die im Idealfall auf unwiderlegbaren Axiomen beruhen - um die Konsistenz und Widerspruchsfreiheit der bisher erkannten Naturgesetze sicherzustellen. Wenn die theoretischen Berechnungen die Experimente richtig beschreiben, versucht man, neue Gesetze herzuleiten und Phänomene vorauszusagen, die wiederum durch neue Experimente überprüft werden müssen. Wenn sich zwischen Theorie und Experiment keine Widersprüche ergeben, dürfen die Naturgesetze für richtig befunden und als Fundamente für weitere Forschung verwendet werden. Aber auch nur solange, bis sie durch neue Messresultate oder Erkenntnisse in Frage gestellt werden müssen - so, wie dies zu Beginn des 20. Jahrhunderts geschah.

Denkvoraussetzungen des Physikers sind also das mathematische Werkzeug und eine Reihe von Axiomen. Axiome sind Sätze oder Regeln, die wir im Rahmen einer Theorie weder beweisen noch aus anderen Sätzen herleiten können. Ihre Richtigkeit beruht alleine auf Erfahrung; sie drängt sich dem Forscher unmittelbar auf. Ein Beispiel ist das Newtonsche Axiom *“actio = reactio”*: jede Kraft bewirkt eine Gegenkraft mit gleicher Stärke, aber entgegengesetzter Richtung.

Axiome stellen grundlegende Glaubenssätze der Physiker – wie auch der Mathematiker – dar: wir können sie nicht beweisen, haben aber Vertrauen in ihre Gültigkeit. Es ist möglich, dass ein System von Axiomen aus einem anderen Axiomensystem hergeleitet werden kann, das aber auch wieder nur auf Evidenz beruht. Die beiden Axiomensysteme können dann als gleichwertig bezeichnet werden – es sei denn, dass eines wesentlich einfacher oder eleganter zu fassen ist als das andere. Nicht alle physikalischen Theorien lassen sich jedoch auf widerspruchsfreie, vollständige Sätze von Axiomen zurückführen. Oft muss man von gewissen Hypothesen ausgehen, die sich nicht unmittelbar aufdrängen und deren Richtigkeit sich erst aus den daraus abgeleiteten Resultaten erweist. Auch solche Hypothesen sind letztlich Glaubenssätze.

Zwei wichtige Prinzipien der mathematischen Naturbeschreibung sind der Determinismus und die Kausalität. Determinismus bedeutet, dass bei genauer Kenntnis der Anfangsbedingungen eines physikalischen Systems dessen weitere Entwicklung auf alle Zeiten genau vorausgesagt werden kann. Mathematisch erfolgt dies durch das Lösen der Gleichungen, in welche die zugrundeliegenden Gesetze gefasst werden. Damit hängt eng die Kausalität zusammen. Zwei verschiedene Zustände eines deterministisch erfolgenden Ablaufs können immer geordnet werden, und zwar entsprechend der sich immer nur vorwärts bewegenden Zeit: von der Ursache zur Wirkung. Ein Ereignis kann nicht ein anderes verursachen, das zeitlich zurückliegt, und noch viel weniger eines, das nicht durch dieselben Gleichungen erfasst wird. Die beiden Begriffe Determinismus und Kausalität mussten allerdings im letzten Jahrhundert überprüft und teilweise eingeschränkt werden.

Ein zunächst eher nur ästhetisch anmutendes Prinzip des Physikers ist, dass die Naturgesetze möglichst einfach und elegant aussehen sollten – also eine Art Ökonomieprinzip.⁴ Symmetrien jeglicher Art spielen dabei eine wichtige Rolle. Der Wunsch nach Vereinfachung der Formeln, in Verbindung mit einer möglichst allgemeinen Gültigkeit der Gesetze, hat in der Entwicklung der Physik immer wieder neue Fortschritte gebracht. Die Strahlungsformel von Planck ist ein einschlägiges Beispiel dafür, auf das ich im Folgenden noch eingehen werde.

⁴ Das ist nicht nur rein ästhetischer Natur: in der Form des Hamiltonschen Variationsprinzips hat es eine streng mathematische Formulierung erhalten, aus der sogar die Newtonschen Axiome der klassischen Mechanik hergeleitet werden können. Hier konnte man also ein System von Axiomen auf ein anderes Axiom oder Prinzip zurückführen, das aber wiederum aus nichts hergeleitet werden kann und sich einfach als intuitiv richtig aufdrängt: das *“Prinzip der kleinsten Wirkung”*. (Das Gleiche gilt auch in der Elektrodynamik. Heute liegt das Variationsprinzip den modernen Feldtheorien zugrunde, mit denen alle physikalischen Wechselwirkungen beschrieben werden.)

Schließlich ist es eine wichtige Eigenschaft unserer Wissenschaft, dass ihre Resultate – sowohl theoretischer wie experimenteller Art – aller Welt zugänglich sind und von jedermann verifiziert oder widerlegt werden können. Tatsächlich wird eine neue Theorie oder ein neues Experiment meist erst dann als “richtig” anerkannt, wenn es von unabhängigen Forschern reproduziert worden ist – vorzugsweise in einem anderen Labor und mit anderen Methoden. Wie jede seriöse Wissenschaft, so sollte auch die Physik immer falsifizierbar sein.

1.2. Die Revolution der Quantenphysik und einige ihrer Folgen

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts herrschte in der Physik eine gewisse Euphorie: man dachte, dass man die materielle Welt so mehr oder weniger verstanden hatte. Alle bekannten Phänomene konnten auf die Newtonsche Mechanik (und die daraus abgeleiteten Grundgesetze der Wärmelehre) sowie auf die Maxwellsche Elektrodynamik zurückgeführt werden. Die Mechanik befasst sich mit der Wechselwirkung von Teilchen: darunter kann man sich Billiardkugeln vorstellen, aber auch Himmelskörper. Die Elektrodynamik beschreibt alle elektrischen und magnetischen Phänomene – insbesondere auch das Licht. Es war ein großer Triumph von Maxwell, zeigen zu können, dass das Licht aus elektromagnetischen Wellen besteht. Damit konnte er eine alte Kontroverse (Licht = Welle oder Teilchen?) beenden, in die unter anderen schon Newton und Goethe involviert waren. Maxwell konnte in der Tat alle damals bekannten Phänomene der Optik aus seiner Theorie ableiten.

Entsprechend den beiden Disziplinen der sogenannt “klassischen Physik” – der Mechanik und der Elektrodynamik – konnte man sauber zwischen Teilchen und Wellen trennen: Teilchen, die auf wohldefinierten Bahnen verlaufen (z.B. Planetenbahnen) und gegenseitig Stöße ausüben (z.B. beim Billiardspiel), und Wellen, die Interferenzen ergeben, wenn sie aufeinandertreffen (man denke an Wellen auf einer Wasseroberfläche oder an Interferenzmuster in der Optik). Diese beiden Disziplinen bildeten zwei abgeschlossene, in sich widerspruchsfreie Systeme von Naturgesetzen, mit denen letztlich alle physikalischen Beobachtungen erklärt werden konnten. Beide waren streng deterministisch und folgten dem Prinzip der Kausalität. Alle Materie bestand aus unteilbar gedachten Atomen, und in Verbindung mit dem periodischen System der Elemente konnten auch die chemischen Prozesse mit diesem physikalischen Weltbild vereint werden. Die Beschreibung komplexer Systeme konnte dabei zwar zunehmend komplizierte Rechnungen benötigen, aber man erwartete keine fundamentalen Schwierigkeiten oder grundlegend neue Einsichten. Als Max Planck seine Lehrer befragte, über welches Thema der Physik er promovieren solle, wurde ihm davon abgeraten: es gäbe in der Physik nichts Neues mehr zu entdecken. Er sei zu intelligent, um bloß noch die siebente oder achte Stelle hinter dem Komma irgendeiner physikalischen Größe auszurechnen, und solle sich lieber einer anderen Disziplin zuwenden!

Doch um die Jahrhundertwende wurden diverse Entdeckungen gemacht, die an den Fundamenten der klassischen Physik rüttelten. Ich nenne hier nur kurz und summarisch ein paar Beispiele. Wenn einige der dabei vorkommenden Begriffe dem Leser nicht vertraut sind, hat dies für den zweiten Teil des Aufsatzes keine Bedeutung.

- Man entdeckte das Elektron, ein winziges, elektrisch geladenes Teilchen, das im Periodensystem keinen Platz hatte. Heute wissen wir, dass der elektrische Strom meist aus bewegten Elektronen besteht, also aus Teilchen. Der Strom ist also nicht ein kontinuierliches "Fluidum", wie man sich ihn in der klassischen Elektrizitätslehre vorstellte.
- Man entdeckte die Radioaktivität: Atome können verschiedene Arten von Strahlen aussenden und dabei auch in andere Atome übergehen. Eine Art dieser Strahlen besteht aus Elektronen. Die "Atome" sind also nicht unteilbar und können sogar zerfallen. Auch die Protonen und Neutronen, aus denen die Atomkerne bestehen und die eine Zeitlang als Elementarteilchen galten, können zerfallen; heute wissen wir, dass sie aus noch kleineren Elementarteilchen („Quarks“) zusammengesetzt sind.
- Eine andere Entdeckung betraf das Spektrallicht der Sonne. Bekanntlich kann man das Licht der Sonne mit einem Prisma in seine einzelnen Farben zerlegen. Jede Farbe entspricht genau einer Wellenlänge, respektive einer Frequenz des Lichts. In dem Farbspektrum, das man so erhält und das ähnlich aussieht wie die Farbverteilung in einem Regenbogen, entdeckte Fraunhofer kleine Lücken: enge schwarze Linien an der Stelle von bestimmten Farben, die keiner verstehen konnte. Balmer und später Rydberg konnten die Systematik dieser sogenannten Absorptionslinien zwar in einfache Formeln fassen, hatten dafür aber keinerlei Begründung oder Beweise.
- In jener Zeit wurde auch experimentell nachgewiesen, dass das Licht eine universelle Geschwindigkeit besitzt, welche nicht von der Bewegung der Lichtquelle – etwa der Sonne – oder von der Geschwindigkeit des Beobachters auf der Erde abhängt. Wie und warum dies zu Problemen führte, und wie diese durch die spezielle Relativitätstheorie von Einstein gelöst wurden, kann ich hier aus Platzgründen nicht erläutern. Aber Einsteins Erkenntnis, dass die Zeit in verschieden bewegten Bezugssystemen nicht dieselbe ist, was die Relativierung des Gleichzeitigkeitsbegriffs zur Folge hatte, erschütterte nicht nur die Physiker, sondern wohl alle denkenden Menschen.
- Kurz vor Ende des 19. Jahrhunderts hatte Poincaré, der übrigens auch maßgeblich an der Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie beteiligt war, die Grundlagen der modernen Chaostheorie formuliert. Diese drang zwar erst viel später, im Zeitalter der Computer, ins allgemeine Bewusstsein. Aber Poincaré deckte schon damals – und zwar im Rahmen der klassischen Mechanik! – gewisse Grenzen des Determinismus in komplexen Systemen auf: man denke zum Beispiel an die Probleme der Wetter- und Klimavorhersagen.
- Die allergrößte Revolution aber brachte die Geburt der Quantenphysik mit sich, auf die ich nun noch etwas näher eingehe.

Im Jahre 1899 befasste sich Planck – welcher zum Glück doch bei der Physik geblieben war – mit elektromagnetischen Wellen in Form von Licht und Wärme, wie sie von der Sonne und anderen Sternen ausgestrahlt werden. Er versuchte, eine einheitliche "Strahlungsformel" zu finden. Diese gibt an, wie die Intensität (oder die Energiedichte) der Strahlung von der Temperatur des strahlenden Körpers und von der Frequenz der Wellen abhängt. Aus der klassischen Physik hatte man zwei verschiedene Formeln hergeleitet, welche in den beiden Grenzfällen hoher und tiefer Temperaturen – bzw. kleiner und großer Frequenzen – gültig waren und die beobachteten Abhängigkeiten richtig wiedergaben. Die beiden Formeln sahen aber ganz verschieden aus, und für

gewisse Bereiche von Frequenz und Temperatur waren sie nicht zu gebrauchen. Max Planck fand eine neue geschlossene Formel – heute die „Plancksche Strahlungsformel“ genannt – welche nicht nur die beiden schon früher bekannten Grenzfälle enthält, sondern für alle Temperaturen und Frequenzen gültig ist. Aber er musste zur Herleitung dieser neuen Formel folgende gewagte Quantenhypothese machen: Die Energie E der Strahlung kann nur durch ganzzahlige Vielfache eines „Quantums“ ΔE übertragen werden, welches proportional zur Frequenz ν der Strahlung ist: $\Delta E = h\nu$ (E = Energie, ν = Frequenz). Die Konstante h erwies sich als neue Naturkonstante; sie heißt jetzt das „Plancksche Wirkungsquantum“. Sie hat den Wert $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js, ist also winzig: in den Standard-Einheiten von Joule (J) für die Energie und Sekunden (s) für die Zeit gemessen, ist h etwa 6.6 geteilt durch eine Eins mit 34 Nullen!

Planck war sich der Sprengkraft seiner Hypothese wohl bewusst. Sie widersprach aller Erfahrung in der klassischen Physik. Dort ist nämlich die Energie immer eine kontinuierliche Größe, das heißt, Änderungen der Energie können beliebig klein sein. Plancks Hypothese aber besagt, dass Energieänderungen der Strahlung nicht kleiner als h mal ν sein dürfen. Wir sagen heute: die Energieübertragung ist „quantisiert“. Planck mochte zunächst seine Quantenhypothese überhaupt nicht. Sie war eine theoretische Annahme, die er durch nichts rechtfertigen konnte – außer durch das Resultat einer einzigen, allgemeingültigen Strahlungsformel. Also: ein Erfolg des Ökonomieprinzips, aber sozusagen „wider die gesunde Vernunft“.

Etwa fünf Jahre später – in einer von drei berühmten Arbeiten aus dem Jahre 1905 veröffentlicht – gab Albert Einstein der Beziehung $\Delta E = h\nu$ eine physikalische Bedeutung. Er konnte damit den photoelektrischen Effekt erklären, der zwar schon seit etlichen Jahren bekannt, aber nicht richtig verstanden war. Bei diesem Effekt wird durch Licht ein Elektron aus einem Material herausgeschlagen. (Darauf beruht die Photovoltaik, mit der man heute aus dem Sonnenlicht Strom gewinnt.) Dabei entspricht $\Delta E = h\nu$ genau der Energie eines „Lichtquants“ – heute nennen wir es ein „Photon“ – das vom Material absorbiert wird und seine Energie auf das herausgeschlagene Elektron überträgt. (Es mag übrigens interessieren, dass Einstein für diese Entdeckung den Nobelpreis erhielt, und nicht für die Relativitätstheorie.)

Im Jahre 1913 leitete Niels Bohr sein Atommodell her. Er verwendete dazu ebenfalls eine Quantenhypothese, in der das Plancksche Wirkungsquantum vorkam, nämlich für den Drehimpuls (= Drehgeschwindigkeit mal Masse) der Elektronen im Atom. Daraus folgerte er, dass auch die Energien der Elektronen im Atom quantisiert sind - was später experimentell verifiziert wurde. Daraus wiederum konnte er die Formeln von Balmer und Rydberg herleiten, welche diese zwar richtig erraten, aber nicht verstanden hatten.

Dies sind nur einige Beispiele der Ideen, die vor ungefähr 100 Jahren den Beginn der neuen „Quantenphysik“ hervorriefen und dabei viele Konzepte der klassischen Physik über den Haufen warfen. Die Bohrsche Quantisierungsregel musste verallgemeinert werden, erwies sich dann aber doch als ungenügend. Weitere überraschende Phänomene wurden entdeckt, und erst im Laufe der 1920er Jahre einigte man sich auf die Theorie, die wir heute die Quantenmechanik nennen und unseren Studenten beibringen.

Ich will im Folgenden zwei grundlegende Aspekte der Quantenmechanik erläutern, die einen tiefgreifenden Einfluss auf unser Denken genommen haben: (a) den Dualismus von Wellen und Teilchen und (b) die eingeschränkte Messbarkeit von physikalischen Größen.

(a) Wie bereits oben erwähnt, konnte Maxwell aus seiner elektromagnetischen Theorie die alte Streitfrage nach der Natur des Lichts dahingehend entscheiden, dass dieses aus Wellen besteht. Nun haben wir aber auch gehört, dass Einstein den Photoeffekt damit erfolgreich erklärte, dass das Licht in Form von "Quanten" von der Materie absorbiert werden kann. Diese Quanten – die „Photonen“ – können wie Teilchen aufgefasst werden, die ihre Energie an die Elektronen übertragen. In der Tat: im Jahre 1923 zeigte Compton in raffinierten Experimenten eindeutig, dass Lichtquanten, wenn sie mit Elektronen zusammenstoßen, sich wirklich wie punktförmige Teilchen aufführen können und dabei genau den Stoßgesetzen der klassischen (allerdings relativistischen) Mechanik unterliegen. Es ist also, als ob das Licht zwei verschiedene Naturen in sich trüge: eine Wellen- und eine Teilchennatur. Je nachdem, welche Art von Experiment man durchführt, kommt die eine oder andere Natur zum Vorschein.

1925 formulierte Louis de Broglie die umgekehrte Hypothese: dass nämlich Teilchen auch eine Doppelnatur besitzen und sich wie Wellen verhalten könnten. Zwei Jahre danach wurde tatsächlich experimentell demonstriert, dass Elektronen, wenn man sie durch einen Kristall schickt, Interferenzmuster erzeugen, wie man sie sonst nur von Wellen kennt.

Dieser Teilchen-Welle-Dualismus hat die Physiker sehr beschäftigt. Es dauerte einige Zeit, bis die sogenannte "Wellen-" oder Quantenmechanik formuliert wurde. Anhand der Schrödinger-Gleichung wird sie heute am häufigsten verwendet. Damit kann man die beiden gegensätzlichen Aspekte von Teilchen und Wellen miteinander vereinen und die oben geschilderten Experimente quantitativ richtig beschreiben.

(b) Aber es wurde noch komplizierter. Werner Heisenberg, der an der Entwicklung der Quantenmechanik ganz maßgeblich beteiligt war, machte eine tiefgreifende Entdeckung, welche die Messung von bestimmten Paaren von Größen betraf. Er fand heraus, dass man den Ort und den Impuls (das ist Masse mal Geschwindigkeit) eines Teilchens nicht gleichzeitig exakt („scharf“) messen kann. Je genauer man den Ort eines Teilchens in einer beliebigen Richtung festlegt, desto ungenauer („unschärfer“) wird sein Impuls in dieser Richtung – und umgekehrt.⁵ Heisenbergs Unbestimmtheitsrelation, auch "Unschärferelation" genannt, ist nicht ohne Grund berühmt geworden: sie stellt ja ganz grundsätzlich die präzise Bedeutung der physikalischen Gesetze in Frage, wenn man deren Voraussagen nicht immer genau nachmessen kann.

Die Unschärferelation ist eng mit dem Planckschen Wirkungsquantum verbunden und aus der Quantentheorie nicht wegzudenken. Sie hat letztlich zur Folge, dass mit dieser Theorie oft nicht exakte, sondern bloß statistische Voraussagen gemacht werden können. Man kann im Prinzip oft nur die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der eine Messung ein gewisses Resultat ergibt. Wenn die Messung genügend oft wiederholt wird und man die

⁵ Andere Paare von (sog. „komplementären“) Größen, für die eine Unschärferelation existiert, sind z.B. Energie und Zeit, Drehwinkel und Drehimpuls um dieselbe Drehachse, oder verschiedene Komponenten des Drehimpulses.

gemessenen Werte mittelt, erhält man sehr genau den vorausgesagten Mittelwert (den sogenannten "Erwartungswert").

Bei einer einzigen Messung kann das Resultat jedoch im Allgemeinen nicht exakt vorausgesagt werden. Mehr noch: eine Messung kann das untersuchte System verändern: es ist vor und nach einer Messung nicht immer im selben Zustand. Der Beobachter verändert mit seiner Messung das untersuchte System. Philosophisch ausgedrückt: Subjekt und Objekt lassen sich nicht sauber trennen. Durch die genannten Begrenzungen der Messbarkeit von Beobachtungsgrößen und der Objektivität von physikalischen Aussagen werden natürlich auch die Begriffe des Determinismus und der Kausalität in Frage gestellt oder zumindest stark eingeschränkt. Aber dies ist nun einmal der Preis für eine ansonsten erfolgreiche theoretische Beschreibung des Welle-Teilchen-Dualismus in all seinen experimentell beobachtbaren Facetten.

Es drängt sich vielleicht die Frage auf, was denn von der klassischen Physik noch übrigbleibt, wenn man alle Begrenzungen erkannt hat, die uns die Quantentheorie auferlegt. Hier kommt zum Glück eine beruhigende Antwort: die alte, klassische Physik ist nicht prinzipiell falsch. Sie lässt sich als der Grenzfall darstellen, in welchem die Plancksche Konstante h vernachlässigbar klein ist. Die oben geschilderten Messunschärfen sind nämlich durch den Wert von h bestimmt. h ist zwar nicht null, aber es ist sehr, sehr klein (man erinnere sich an die 34 Nullen im Nenner). Darum hat die Unschärferelation im praktischen Leben keine Bedeutung. Die Orts- oder Impuls-Unschärfe einer kleinen Kugel in unserer makroskopischen Welt ist so winzig, dass sie auch mit sehr feinen Instrumenten nicht nachgewiesen werden kann. Nur wenn wir in die mikroskopischen Dimensionen von Molekülen oder Atomen eindringen, wird die Unschärferelation relevant – und dort muss sie auch ernst genommen werden. Was aber nicht heißt, dass wir nicht auch in der makroskopischen Welt Spuren der Quantenmechanik auffinden können – wie z. B. die Absorptionslinien im Spektrum des Sonnenlichts.

2. Teil: Physik und Glaube

Ich habe oben versucht, einige der Grundzüge der Quantentheorie zu vermitteln und die Grenzen aufzuzeigen, welche diese der physikalischen Naturbeschreibung aufzwingt. Die Physiker haben gelernt, mit den scheinbaren Widersprüchen zwischen Teilchen- und Wellenbild zu leben und die Unsicherheiten von Messgrößen in Kauf zu nehmen. Die Quantenmechanik "funktioniert", und sie hat nicht nur für das physikalische Naturverständnis unschätzbare Fortschritte gebracht, sondern auch für deren technologische Anwendungen. Gibt es doch heute kaum mehr ein Gerät, in dem nicht ein Computerchip, ein kleiner Laser oder eine Leuchtdiode steckt – und ohne Quantenmechanik gäbe es alle diese Hilfsmittel nicht. Es gibt wohl heute kaum noch Physiker, die nicht an die grundsätzliche Richtigkeit der Quantenmechanik glauben.

Wie steht es aber mit unserem tieferen Verständnis des Welle-Teilchen-Dualismus, der Unbestimmtheitsrelation und der daraus folgenden Wahrscheinlichkeitsaspekte? Ein nüchterner, pragmatischer "Quantenmechaniker" kann sich auf den Standpunkt stellen, dass er alles, was er mit mathematischen Formeln und deren Lösungen zu beschreiben und experimentell zu bestätigen vermag, damit auch "verstanden" hat. Aber auf erkenntnistheoretischer Ebene müssen wir uns doch eingestehen, dass wir diese Dinge nicht wirklich begreifen, sondern nur einfach glauben können. Dass ein Teilchen und eine Welle ein und dasselbe Objekt darstellen können, ist nicht offensichtlich und scheint dem gesunden Menschenverstand zu widersprechen. Zu dem Umstand, dass die Quantentheorie meist nur Wahrscheinlichkeitsvoraussagen macht, schrieb Einstein in einem Brief an Max Born, einen der Mitbegründer der Quantenmechanik:⁶

"Die Quantenmechanik ist sehr beeindruckend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass sie noch nicht die letzte Wahrheit ist. Die Theorie produziert zwar eine Menge, aber sie bringt uns kaum näher zum Geheimnis des Alten Herrn. Ich bin auf alle Fälle überzeugt davon, dass Er nicht würfelt."

Es gab also – und es gibt auch heute noch – Bedarf an Interpretation und Klärung. Einen wichtigen Schritt dazu stellt Bohrs Begriff der Komplementarität dar, mit dem wir uns im Folgenden befassen.

2.1. Bohrs Komplementaritätsbegriff

Niels Bohr war nicht nur einer der bedeutendsten Mitbegründer und Wegbereiter der neuen Physik des 20. Jahrhunderts; er bemühte sich immer auch sehr um deren tieferes philosophisches Verständnis. In den 1920er Jahren war Kopenhagen das Mekka der um die neuen Entwicklungen bemühten Physiker. An dem von Bohr selber gegründeten und geleiteten "Institut für Theoretische Physik" (heute: das "Niels Bohr-Institut") beherbergte er Leute wie Heisenberg, Schrödinger, Einstein, Born und viele andere. In den endlosen Gesprächen über das Verständnis der Quantentheorie, die er mit seinen

⁶ ins Deutsche rückübersetzt aus: A. Einstein, Brief vom 4. Dezember 1926 an Max Born, auf Englisch erschienen in: The Born-Einstein Letters (Hrsg. I. Born, Walker, New York 1971).

Kollegen – oft auf langen Spaziergängen – führte, reifte in ihm allmählich ein neues Konzept heran, das er mit dem Begriff „Komplementarität“ zusammenfasste. Damit wollte er die scheinbaren Widersprüche des Teilchen-Welle-Dualismus und der Unschärferelation auflösen und auf philosophischer Ebene zu einer höheren Einheit zusammenfügen.

Nach dem Komplementaritätsprinzip können physikalische Experimente immer nur gewisse Teilaspekte der untersuchten Phänomene enthüllen; andere Aspekte bleiben dabei verborgen. Je nach experimenteller Anordnung kann ich das Licht als Welle beobachten und merke nichts von seiner Wellennatur -- oder umgekehrt. Dasselbe gilt auch für Strahlen von Teilchen. Wenn ich den Ort eines Teilchens sehr genau bestimme, ist sein Impuls nur ungenau bekannt. Je mehr ich von einer Größe kenne, desto weniger weiß ich von der dazu komplementären Größe. Komplementäre Begriffe oder Größen scheinen sich zu widersprechen oder teilweise auszuschließen; trotzdem sind sie aber Teilaspekte eines Ganzen. Sie schließen sich teilweise aus und ergänzen sich zugleich.

Hören wir Bohrs eigene Erklärung des Begriffes, wie er sie im Jahr 1937 in einem Vortrag in Bologna formuliert hat:⁷

“Die verschiedenen Aspekte der Quantenphänomene, die unter gegenseitig sich ausschließenden Versuchsbedingungen auftreten, dürfen daher nicht als widersprechend aufgefasst, sondern müssen als “komplementär” in einem bisher unbekanntem Sinne betrachtet werden. Dieser sogenannte Komplementaritätsgesichtspunkt bedeutet keineswegs einen willkürlichen Verzicht auf die genauere Analyse der Atomphänomene; er ist vielmehr der Ausdruck einer rationellen Synthese der Gesamtmenge aller Erfahrungen auf diesem Gebiete, die weit über die Grenzen hinausgeht, innerhalb derer das Kausalitätsideal seine natürlichen Anwendungsmöglichkeiten findet.”

Um gleich einem möglichen Missverständnis vorzubeugen: Die Quantentheorie *per se* kommt ohne den Begriff der Komplementarität aus. Der Teilchen-Welle-Dualismus und die Unschärferelation sind, wie schon gesagt, in der Quantenmechanik eingebaut und müssen beim Lösen der Schrödingergleichung nicht weiter hinterfragt werden. Das Konzept der Komplementarität will uns zu einem tieferem Verständnis weiterhelfen: es geht dabei um die Interpretation der Quantentheorie auf philosophischer Ebene. Der Begriff der Komplementarität gehört also nicht zur physikalischen Wissenschaft, sondern zum Weltbild eines Physikers. Letztlich geht es dabei um die Erkenntnis, dass wir mit unserer Wissenschaft immer nur Teilaspekte, aber nie das ganze Wesen der Natur – auch der leblosen – erfassen können. Diese Erkenntnis sollte einen verantwortungsvollen Physiker der Begrenztheit seiner wissenschaftlichen Tätigkeit bewusst werden lassen und ihn zur Bescheidenheit führen.

⁷ Niels Bohr, *Biologie und Atomphysik*, in deutscher Fassung wiedergegeben in: *Atomphysik und menschliche Erkenntnis, Aufsätze und Vorträge aus den Jahren 1930 bis 1961* (Hrsg. Karl von Meyenn, Vieweg, Braunschweig 1985), S. 18.

Es ist offensichtlich, dass solche Überlegungen sich nicht nur auf die Physik beschränken müssen. Die unmöglich gewordene Trennung zwischen Subjekt und Objekt und der Gedanke der Komplementarität haben weitgehende philosophische Konsequenzen. Bohr selber hat viel über mögliche Verallgemeinerungen des Komplementaritätsbegriffs über die Physik hinaus nachgedacht, insbesondere im Rahmen der Psychologie und der Biologie, aber auch über Anwendungen auf menschliche Kulturen und die Sprache. Seinen Beitrag zu einer Max-Planck-Festschrift im Jahr 1958 beschloss Bohr mit den folgenden Worten:⁸

“In Bezug auf den allgemeinen philosophischen Ausblick ist es von Bedeutung, dass bei der Analyse und Synthese in anderen Erkenntnisgebieten Umstände vorliegen, welche an jene in der Quantenphysik erinnern. So weisen die Integrität lebender Organismen und die Merkmale bewusster Individuen und kultureller Gemeinschaften Ganzheitszüge auf, deren Beschreibung eine typisch komplementäre Ausdrucksweise fordert. Infolge des verschiedenartigen Gebrauchs des reichen Wortschatzes, der in diesen weiteren Wissensgebieten zur Mitteilung von Erfahrungen verfügbar ist, und vor allem wegen der wechselnden Auffassungen des allgemeinen Kausalitätsbegriffes, die in der philosophischen Literatur zum Ausdruck kommen, ist das Ziel solcher Vergleiche zuweilen missverstanden worden. Die allmähliche Entwicklung einer treffenden Terminologie zur Darstellung der einfacheren Situation in der physikalischen Wissenschaft weist jedoch darauf hin, dass wir es nicht mit mehr oder weniger vagen Analogien zu tun haben, sondern mit klaren Beispielen logischer Beziehungen, welchen wir auf verschiedenen Zusammenhängen auf weiteren Forschungsgebieten begegnen.”

Auf diese Fragestellungen außerhalb der Physik kann ich hier nicht näher eingehen; ich verweise dazu auf die hervorragende Biographie Niels Bohrs von Abraham Pais und die darin enthaltenen, sehr detaillierten Literaturangaben.⁹ Auf eine mögliche Erweiterung des Komplementaritätsbegriffs in den Bereich von Glaube und Religion¹⁰ möchte ich jedoch im nun noch folgenden letzten Teil dieses Beitrages eingehen.

2.2. Komplementarität im Spannungsfeld von Wissenschaft und Glaube

Hier kann ich mich, wie eingangs erwähnt, nur auf einige Betrachtungen vorwiegend persönlicher Art beschränken. Ich möchte im Folgenden zwei entgegengesetzte Fragen stellen und sie zu beantworten versuchen. Zunächst aber ein *Caveat*: Ich meine, dass man die beiden Fragen nicht allein diskutieren kann. Vermutlich liegt das an meiner Prägung als Physiker im Sinne des Keplerschen Axioms *actio = reactio*. Eine Wirkung in einer Richtung hängt immer auch eng mit der Wirkung in der Gegenrichtung zusammen, insbesondere in einem System, das im Gleichgewicht ist. Und wie ich gleich ausführen werde, ist es mir ein besonderes Anliegen, naturwissenschaftliches und religiöses Denken im Sinne des Komplementaritätsprinzips zu einem einheitlichen Weltbild zusammenzufügen. Dazu brauchen wir deren Abhängigkeiten und Beeinflussungen in beiden Richtungen.

⁸ Niels Bohr, Atomphysik und Philosophie – Kausalität und Komplementarität, loc. cit., S. 110.

⁹ Abraham Pais, Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity (Clarendon Press, Oxford 1991).

¹⁰ s.a. S. Bonk, Einleitung zu diesem Sammelband, S. 29: Zitat v. Joseph Ratzinger mit Anmerkung 31.

a) Prägt mein Glaube meine naturwissenschaftliche Denkweise und Tätigkeit?

Wenn es um meine rein fachliche Tätigkeit geht, lautet die Antwort: Nein. In meiner Arbeit als theoretischer und mathematischer Physiker verwende ich keinerlei religiöse oder theologische Konzepte. Habe ich einen Beweis für eine Vermutung gefunden, so schreibe ich "q.e.d." darunter und nicht "Amen". Die Physik an sich kommt ohne Gott aus und kann auch ohne Bezug auf Gott verstanden und gelehrt werden.

Wenn es aber um ein tieferes Verständnis von Physik und Natur geht, im Rahmen eines Weltbildes, dann lautet meine Antwort durchaus: Ja. Ich sehe in vielen physikalischen Formeln und Gesetzmäßigkeiten die Fingerabdrücke eines Schöpfergottes. Und wenn ich in meiner Forschung ein befriedigendes Resultat gefunden habe, kann ich durchaus sagen: "Danke!".

Im Zusammenhang mit der Diskussion von Glaube und Wissenschaft ist oft vom „anthropischen Prinzip“¹¹ die Rede. Ich reihe mich zu denen, die darin einen Hinweis auf Gottes Schöpfungskraft und -genius sehen. Aber ich will gleich auch klarstellen, dass ich in der Feinabstimmung der Naturkonstanten keinen Gottesbeweis sehen kann. Und zwar aus der ganz einfachen logischen Überzeugung heraus, dass Gott genauso gut einen anderen Satz von Naturkonstanten hätte hernehmen können: dann hätte er eben dazu passende andere Naturgesetze geschaffen -- so, dass die Welt damit im Gleichgewicht wäre, und er hätte die Menschen und Tiere so geschaffen, dass für sie wiederum optimale Lebensbedingungen gegeben wären!

Wenn es um unsere Verantwortlichkeit für die technologischen Anwendungen physikalischer Forschung geht, spielt unsere ethische Grundhaltung eine wichtige Rolle. Wir sind uns alle einig darüber, dass wir mit unserer Forschung der Menschheit und der Natur nicht schaden dürfen – dazu bedarf es nicht einmal des Glaubens an einen Gott. Aber es ist ganz klar, dass ein christlich geprägtes Weltbild auf ethische Grundsatzfragen einen großen Einfluss hat.

Wie ich zu Beginn festgestellt habe, kann unsere Wissenschaft nur die leblose, materielle Welt beschreiben. Das ist es wohl, was Steven Weinberg mit der *„eigigen, kalten, unpersönlichen Art der Naturgesetze“* meint.¹² Und wenn er weiter sagt: *„Ich bin der Überzeugung, dass es keine Bedeutung, keinen Sinn im Universum gibt, der mit den Methoden der Naturwissenschaft entdeckt werden könnte“*, dann muss ich ihm völlig recht geben, jedenfalls was die Physik betrifft: sie kann Sinn und Zweck der Schöpfung niemals erklären – auch nicht im Rahmen der Big Bang - Theorie. Solches kann nur von außerhalb kommen – für mich eben: von Gott. Und dies führt mich nun zur umgekehrten Frage:

¹¹ Das „anthropische Prinzip“ drückt den Umstand aus, dass alle Naturkonstanten, die in der mathematischen Beschreibung der materiellen Welt auftreten, fein aufeinander abgestimmte Werte haben, die auf der Erde überhaupt ein Leben ermöglichen.

¹² übersetzt aus: Steven Weinberg, *The First Three Minutes* (Basic Books, New York 1993).

b) Prägen meine wissenschaftliche Tätigkeit, respektive naturwissenschaftliche und insbesondere physikalische Erkenntnisse, meinen Glauben?

Die Antwort lautet eindeutig: Ja. Zunächst dahingehend, dass ich den Schöpfungsbericht in der Bibel nicht wörtlich glauben kann, was seine naturwissenschaftlichen Aspekte betrifft. Dass die Entstehung der Meere und Kontinente, der Pflanzen und Tiere und des Menschen viel länger gedauert hat, als es der biblische Schöpfungsbericht nahelegt, brauche ich hier wohl nicht weiter zu vertiefen. Aber dies beeinträchtigt in keiner Weise meinen Glauben daran, dass Gott die gesamte Natur geschaffen hat – also meinen Glauben an die Essenz des Schöpfungsberichts.

Ich denke, dass gerade ein Physiker – mit den geschilderten Erkenntnissen des letzten Jahrhunderts – in seinem Weltbild Platz für Gott schaffen kann. Und zwar nicht bloß für einen Gott als Lückenbüßer dafür, was wir noch nicht verstanden haben (und vielleicht in 20 oder 100 Jahren doch noch verstehen werden). Die Einsicht, dass unsere physikalischen Theorien nie gesichert sind, sondern plötzlich neu überdacht und revidiert werden müssen – so wie das an der vorigen Jahrhundertwende geschah – diese Einsicht sollte uns zu einer gewissen Demut führen. Und ein daraus resultierendes Bewusstsein, dass unsere Wissenschaft nicht alle Fragen beantworten kann, sollte es erleichtern, an einen Gott zu glauben.

Ich möchte noch einen Schritt weiter gehen. Ich denke nämlich, dass einige der genannten Erkenntnisse aus der Physik auch dem Glauben an biblische Wunder helfen können. Wunder wie die Verwandlung von Wasser zu Wein, oder das Wunder aller Wunder: die Auferstehung Christi -- sie sind ja für viele Leute ein Stein des Anstoßes. Für Agnostiker und Atheisten können sie Anlass zur Negierung Gottes werden: was naturwissenschaftlich nicht erklärbar ist, das kann oder darf nicht sein.

Die scheinbaren Widersprüche zwischen naturwissenschaftlicher Erkenntnis und Glaubensinhalten wie den biblischen Wundern können aber meines Erachtens im Sinne des Bohrschen Komplementaritätsprinzips aufgelöst werden. Die Natur hat viele Aspekte und Eigenschaften, die wir physikalisch messen und mathematisch beschreiben können. Aber andere Aspekte – wie z.B. die Wunder in der Bibel oder persönliche religiöse Erfahrungen – werden dabei ausgeschlossen oder erscheinen uns widersprüchlich und unverständlich. Umgekehrt, wenn ich mich mit Fragen des Glaubens und mit Gott auseinandersetze, treten physikalische Aspekte in den Hintergrund und werden bedeutungslos -- wenn sie nicht gar durch Gott außer Kraft gesetzt werden, wie etwa in Verbindung mit Nahtoderlebnissen berichtet wird.

Göttliche und physikalische Erscheinungen können sich scheinbar widersprechen – sich aber auch gegenseitig ergänzen. Wenn naturwissenschaftliche und religiöse Erfahrungen unter diesem Blickwinkel betrachtet werden, dann können sie ohne Widersprüche nebeneinander bestehen. Für mich selber kann ich jedenfalls sagen, dass ich auch als Physiker keine Probleme mit Wundern habe. Das fängt schon damit an, dass ich doch im Rahmen der Quantenmechanik auf viel Widersprüchliches treffe: für mich ist die

Aussage, dass ein Elektron eine Welle sein soll, nicht viel weniger verwunderlich als dass Jesus Wasser zu Wein gemacht haben soll.

Wohlgemerkt: mit dem Komplementaritätsgedanken will ich hier nicht den Menschen einerseits und Gott andererseits erfassen. Komplementäre Dinge oder Begriffe müssen sich auf gleicher Ebene befinden; Gott aber steht weit über dem Menschen. Aber naturwissenschaftliches Denken auf der einen und religiöses Denken auf der anderen Seite können als komplementär aufgefasst werden. Unser menschliches Denken und Vermögen ist beschränkt; wir können uns immer nur mit Teilaspekten befassen. Nicht nur unsere Naturbeschreibung ist beschränkt, sondern auch unsere Erkenntnis von Gott und seinem Wirken ist beschränkt. Wenn ich mich aber mit dem einen Aspekt beschäftigen will, kann ich allerdings den anderen außer Acht lassen.

Wer sich nur auf das naturwissenschaftliche Denken beschränkt und im Extremfall nur dieses allein gelten lässt, kann sich dazu versteigen, zu behaupten, dass es keinen Gott gibt. Wer sich andererseits nur auf religiöses Denken beschränkt und nur dieses allein gelten lässt, kann sich anmaßen, zu behaupten, dass alle moderne Naturwissenschaft Humbug sei. Beide extremen Haltungen werden ja hin und wieder vertreten -- manchmal auch in polemischer Weise. Die Beziehung zwischen solch extremen Haltungen, die sich gegenseitig ausschließen, hat für mich eine gewisse Ähnlichkeit mit der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation: eine extreme Aussage (z.B. exakte Angabe des Orts) schließt die andere extreme Aussage (exakte Angabe des Impulses) völlig aus. Wenn aber beide Denkkategorien (und die entsprechenden Tätigkeiten) in einer ausgewogenen Weise miteinander vereinbart werden, und wenn man sich der auf beiden Seiten gegebenen Begrenzungen bewusst ist, sollte es nicht zu solch extremen Aussagen kommen.

Schließlich liegt es auch im Wesen einer Komplementaritätsbeziehung, dass die eine Seite ohne die andere gar nicht existieren kann. Vielleicht kann dies ja einem Skeptiker dazu verhelfen, zu akzeptieren, dass es jenseits der rein naturwissenschaftlichen Erkenntnis auch noch eine andere Form der Naturerkenntnis geben muss. Für mich scheint dieser Schluss, ganz im Sinne des obigen zweiten Zitats von Bohr, nicht nur aus einer "mehr oder weniger vagen Analogie" zu folgern, sondern aus einem "klaren Beispiel einer logischen Beziehung".

In meiner menschlichen Beschränktheit kann ich immer nur Teilaspekte von Natur und Gott verstehen und beschreiben, und deshalb kommen mir viele Dinge rätselhaft vor. Aber als Christ darf ich ja hoffen, in einem anderen, ewigen Leben dereinst Gott und die Natur in ihrer Vollkommenheit erkennen und ganz verstehen zu können!

So jedenfalls möchte ich die Worte von Paulus interpretieren, mit denen ich meine Ausführungen beschließe:¹³

"Wir sehen jetzt durch einen Spiegel und rätseln; dann aber von Angesicht zu Angesicht. Jetzt erkenne ich stückweise; dann aber werde ich erkennen, gleichwie ich erkannt bin."

¹³ Paulus: 1. Korintherbrief (Kap. 13, Vers 12).