

Forschungs-Symposium:

Atheistischer und jüdisch-christlicher Glaube: Wie wird Naturwissenschaft geprägt?

Universität Regensburg, 2. - 4. April 2008

GRENZEN DER PHYSIKALISCHEN ERKENNTNIS – GEDANKEN ZUM BOHRSCHEN KOMPLEMENTARITÄTSBEGRIFF¹

Matthias Brack

Sehr verehrte Damen und Herren,

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 sogenannt “makroskopischen Welt”; allgemein alles, was wir so im Alltag beobachten
- im Gegensatz dazu die sogenannt “mikroskopische Welt”. Dazu gehören:
 - Atome, Moleküle und kondensierte 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
 - im anderen Extrem: der Kosmos (Galaxien, schwarze Löcher, interstellare Materie); in der Kosmologie werden Erkenntnisse in 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 irgend einer 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 nicht darüber stellt oder negiert: Gottes Existenz kann mit naturwissenschaftlichen Methoden weder bewiesen noch widerlegt werden!

¹Dieser Text integriert wesentliche Teile des Vortrages “Abenteuer Physik: die fundamentale Neuorientierung zu Beginn des 20. Jahrhunderts”, den ich im Mai 2006 anlässlich des ESG-Bundestreffens in Regensburg hielt.

In diesem Vortrag möchte ich, entsprechend den Leitfragen dieses Symposiums, 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 der Physiker. Im ersten Teil will ich mich streng an den oben angedeuteten Rahmen dessen halten, was die Physik beschreiben kann oder zu beschreiben versucht. Ich werde dabei 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. Die Physikerinnen und Physiker unter Ihnen muss ich daher um Nachsicht bitten, wenn ich Ihnen nichts Neues erzähle. Im Interesse der Nicht-Fachleute werde ich versuchen, die Sachverhalte so einfach wie möglich zu schildern; ich werde auch nur eine einzige Formel verwenden.

Die neuen physikalischen Erkenntnisse – zu denen auch die Relativitätstheorie von Einstein gehört – haben die Weltanschauung und das Denken vieler Menschen, nicht nur von Physikern, beeinflusst. Ich möchte daher besonders auf den von Niels Bohr eingeführten Begriff der *Komplementarität* eingehen, welcher zum Ziel hat, den scheinbaren Widerspruch zwischen Teilchen- und Wellenbild aufzulösen oder jedenfalls in einen erkenntnistheoretischen Rahmen einzuordnen. Auch der Komplementaritätsbegriff gehört heute zum Bewusstsein jedes denkenden Physikers.

Im kürzeren zweiten Teil meines Vortrags werde ich mich, um dem Titel dieses Symposiums wenigstens teilweise gerecht zu werden, Zusammenhängen zwischen physikalischer Forschungstätigkeit und Fragen des Glaubens zuwenden. Was ich dazu sagen kann, ist aufgrund meiner christlichen Überzeugung rein persönlicher Natur und kann allenfalls für jene Physiker stellvertretend sein, die christlichen Glauben mit naturwissenschaftlicher Tätigkeit vereinbaren können – die aber keineswegs eine vernachlässigungswerte Teilmenge aller Physiker darstellen! Ich möchte dabei ansatzweise einen erweiterten Komplementaritätsbegriff als Paradigma für eine mögliche Vereinheitlichung physikalischen und religiösen Denkens vorstellen.

1. Teil: Grenzen der physikalischen Erkenntnis

1.1 Grundlegende Annahmen und Vorgehensweisen der Physik

Die Physiker versuchen, wie gesagt, gewisse Aspekte der Natur zu beschreiben. Sie beobachten die Natur und finden bestimmte Regelmäßigkeiten. Diese werden „Naturgesetze“ genannt und durch mathematische Formeln ausgedrückt. Der Experimentalphysiker entwirft und verwendet Instrumente, um die Natur auszumessen und die Gültigkeit der Naturgesetze zu überprüfen. Der Theoretiker macht 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 seine Berechnungen die Experimente richtig beschreiben, versucht er, neue Gesetze herzuleiten und Phänomene vorauszusagen, die vom Experimentalphysiker wiederum überprüft werden müssen. Wenn sich zwischen Theorie und Experiment keine Widersprüche ergeben, dürfen die Naturgesetze für richtig befunden und als Fundamente für die 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.

(Eine kurze Bemerkung am Rande: Experimentelle und theoretische Tätigkeiten können – und sollten idealerweise auch! – durchaus vom selben Physiker durchgeführt werden. Früher

war dies auch öfters der Fall. Heute allerdings sind die Theorien und die dabei verwendeten mathematischen Methoden einerseits und die experimentellen Apparate und Messverfahren andererseits so kompliziert geworden, dass sich eine zunehmende Spezialisierung in der einen oder anderen Richtung nicht mehr vermeiden lässt.)

Denkvoraussetzungen des Physikers sind also das mathematische Werkzeug und eine Reihe von Axiomen. *Axiome* sind Sätze oder Regeln, die wir im Rahmen einer Theorie nicht beweisen oder 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 also grundlegende *Glaubenssätze* der Physiker – wie auch der Mathe-matiker – 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 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 (mathematisch: monoton wachsenden) Zeit. 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*.² 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 näher eingehen werde.

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.

²Das Ökonomieprinzip 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.)

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 können Sie 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 (also nicht aus “Korpuskeln”). Damit konnte er eine alte Kontroverse beenden, in die unter anderen schon Newton und Goethe involviert waren. Maxwell konnte in der Tat auch 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 Billardspiel), und Wellen, die Interferenzen ergeben, wenn sie aufeinandertreffen (denken Sie 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 unteilbaren 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 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 irgend einer 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 Sie einige der dabei vorkommenden Begriffe nicht verstehen, hat dies für den Rest des Vortrags 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 zusammengesetzt sind. - Eine andere Entdeckung betraf das Spektrallicht der Sonne. Sie wissen, dass man das Licht der Sonne mit einem Prisma in seine einzelnen Farben zerlegen kann. Jede Farbe entspricht genau einer Wellenlänge respektive einer Frequenz des Lichts. In dem Farbspektrum, das man so erhält und das ganz 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 Lichtquel-

le – 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 Zeitgründen nicht erläutern. Aber Einsteins Erkenntnis, dass die Zeit nicht in allen verschiedenen bewegten Bezugssystemen 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: denken Sie zum Beispiel an die Probleme der Wetter- und Klimavorhersagen. - Die allergrößte Revolution aber brachte die Geburt der *Quantenphysik* mit sich, auf die ich nun näher eingehende.

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 Kombinationen 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 ganzzählige Vielfache einer kleinsten Portion, eines “Quants” ΔE , übertragen werden, welches proportional zur Frequenz ν der Strahlung ist:

$$\boxed{\Delta E = h\nu} \quad (E = \text{Energie}, \nu = \text{Frequenz}) \quad h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Die Proportionalitätskonstante h erwies sich als neue Naturkonstante; sie heißt jetzt das *Plancksche Wirkungsquantum*. Sie ist 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 rein theoretische Annahme, die er durch nichts rechtfertigen konnte – außer durch das Resultat einer einzigen, allgemeingültigen Strahlungsformel. Also: ein eindeutiger 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 beruhen die Photozellen, mit denen 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: er quantisierte den Drehimpuls der Elektronen im Atom. Daraus folgte er, dass auch die Energiezustände der Elektronen im Atom quantisiert sind, was später experimentell verifiziert wurde. Und 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 20er 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 die alte Streitfrage nach der Natur des Lichts dahingehend entscheiden, dass es aus elektromagnetischen Wellen besteht. Nun haben wir aber auch gehört, dass Einstein den Photoeffekt dadurch erfolgreich erklärte, dass das Licht in Form von “Quanten” von der Materie absorbiert werden kann. Diese Quanten – die Photonen – konnten wie Teilchen aufgefasst werden, die ihre Energie an die Elektronen abgaben. 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. Und tatsächlich: zwei Jahre danach wurde 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 auch 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 Größen betraf. Er fand heraus, dass man den *Ort* und den *Impuls* (das ist Masse mal Geschwindigkeit) eines Teilchens *nicht gleichzeitig exakt* messen kann. Je genauer man den Ort eines Teilchens in einer beliebigen Richtung festlegt, desto ungenauer wird sein Impuls in dieser Richtung – und umgekehrt.³ Heisenbergs **Unbestimmtheitsrelation** (oder “Unschärferelation”) ist nicht ohne Grund berühmt geworden: sie stellt ja ganz grundsätzlich die präzise Bedeutung der physikalischen Gesetze in Frage, wenn man deren Voraussagen nicht 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 nur *statistische* Voraussagen gemacht werden können. Man kann im Prinzip immer die *Wahrscheinlichkeit* berechnen, mit der eine Messung ein gewisses Resultat ergibt. Wenn die Messung genügend oft wiederholt wird und man die gemessenen

³Andere Paare von Größen, für die eine Unschärferelation besteht, sind z.B. Energie und Zeit, oder Drehwinkel und Drehimpuls um die selbe Drehachse.

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 gleichen 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 diese Grenzen ernst zu nehmen 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 hypothetische Grenzfall darstellen, in welchem die Plancksche Konstante h unendlich klein, also null ist. Die Mess-Unsicherheiten, die ich oben geschildert habe, sind nämlich durch die Größe von h bestimmt. In Wirklichkeit ist h nicht null, aber es ist sehr, sehr klein (Sie erinnern sich an die 34 Nullen im Nenner). Darum hat die Unbestimmtheitsrelation 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, das wir nicht auch in der makroskopischen Welt Folgen der Quantenmechanik auffinden können – wie z. B. die Absorptionslinien im Spektrum des Sonnenlichts oder die Phänomene von Supraleitung oder Supraflüssigkeit.

Ich habe bisher versucht, Ihnen einige der Grundzüge der Quantentheorie zu vermitteln und einige der Grenzen aufzuzeigen, welche diese der physikalischen Naturbeschreibung aufzwingt. Die Physiker haben gelernt, mit den scheinbaren Widersprüchen zwischen Teichen- 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 neues Gerät, in dem nicht ein Computerchip, ein kleiner Laser oder eine Leuchtdiode steckt – und ohne Quantenmechanik gäbe es alle diese Hilfsmittel nicht.

Aber wie steht es 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 philosophischer, erkenntnistheoretischer Ebene müssen wir uns doch eingestehen, dass wir diese Dinge nicht eigentlich begreifen können. Dass ein Teilchen und eine Welle ein und dasselbe Objekt darstellen können, ist nicht offensichtlich und scheint dem gesunden Menschenverstand zu widerstreichen. Und zu dem Umstand, dass die Quantentheorie meist nur Wahrscheinlichkeitsvoraussagen macht, schrieb Einstein in einem Brief an Max Born, einen der Mitbegründer der Quantenmechanik:⁴

“Die Quantenmechanik ist sehr beeindruckend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass sie noch nicht die letzte Wahrheit ist. Die Theorie produziert zwar viel, aber sie bringt uns kaum näher ans Geheimnis des Alten Herrn. Ich bin jedenfalls überzeugt davon, dass Er nicht würfelt.”

⁴A. Einstein, Brief vom 4. Dezember 1926 an Max Born. In englischer Übersetzung veröffentlicht in: *The Born-Einstein Letters*, Hrsg. I. Born (Walker, New York 1971). (Eigene Rückübersetzung ins Deutsche.)

Es gab also – und es gibt auch heute noch – Bedarf an Interpretation und Klärung. Bevor wir auf Zusammenhänge mit dem Glauben eingehen, wollen wir uns nun noch mit Bohrs Begriff der *Komplementarität* befassen.

1.3 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 20er 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 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 unbekannt. Wenn ich die Rolle des Lichtes beim Photoeffekt untersuche, erweist es sich als ein Strom von Teilchen und ich merke nichts von seiner Wellennatur; in anderen Experimenten ist es umgekehrt. Wenn ich den Ort eines Teilchens sehr genau bestimme, ist sein Impuls nur wenig genau bekannt. Je mehr ich von einer Eigenschaft kenne, desto weniger weiß ich von der dazu komplementären Eigenschaft. Komplementäre Messgrößen oder Begriffe *scheinen* sich zu widersprechen oder teilweise auszuschließen; in der Tat sind sie aber Teilaspekte eines Ganzen. Sie schränken einander ein und ergänzen sich gleichzeitig – ja sie bedingen sich sogar gegenseitig.

Hören wir, wie Bohr selber den Komplementaritätsgedanken im Jahr 1937 in einem Vortrag in Bologna formuliert hat:⁵

„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 unbekannten 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 Schrödinger-Gleichung 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. Im Sinne der Begriffsbildung, die Herr McClary in seinem einführenden Vortrag gegeben hat, gehört der Begriff der Komplementarität 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

⁵ Niels Bohr: *Biologie und Atomphysik*. In deutscher Fassung wiedergegeben in: *Atomphysik und menschliche Erkenntnis*, Aufsätze und Vorträge aus den Jahren 1930 bis 1961, Hrsgb. Karl von Meyenn (Vieweg, Braunschweig 1985), S. 18.

verantwortungsvollen Physiker der Grenzen seiner wissenschaftlichen Tätigkeit bewusst werden lassen und ihn zur Bescheidenheit führen.

Es ist offensichtlich, dass solche Überlegungen sich nicht nur auf die Physik beschränken können. Die unmöglich gewordene Trennung zwischen Subjekt und Objekt und der Gedanke der Komplementarität haben weitgehende erkenntnistheoretische 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:⁶

“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.”

Haben Sie bitte Verständnis dafür, dass ich auf diese Fragestellungen außerhalb der Physik hier nicht eingehen kann. Ich verweise dazu auf die hervorragende Biographie Niels Bohrs von Abraham Pais und die darin enthaltenen, sehr detaillierten Literaturangaben.⁷ Auf eine mögliche Erweiterung des Komplementaritätsbegriffs in den Bereich von Glaube und Religion möchte ich jedoch im nun noch folgenden, kurzen zweiten Teil meines Vortrages eingehen.

2. Teil: Physik und Glaube

Hier kann ich mich, wie eingangs erwähnt, nur auf einige Betrachtungen vorwiegend persönlicher Art beschränken. Ich will zunächst zur Leitfrage dieses Symposiums Stellung nehmen:

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 mein tieferes Verständnis von Physik und Natur geht im Sinne 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!”. Vom anthropischen Prinzip war ja schon ausführlich 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

⁶Niels Bohr: *Atomphysik und Philosophie – Kausalität und Komplementarität*, loc. cit., S. 110.

⁷Abraham Pais: *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity* (Clarendon Press, Oxford 1991).

Satz von Naturkonstanten hätte hernehmen können: dann hätte er eben dazu passende andere Naturgesetze geschaffen, so, dass die Welt damit im Gleichgewicht wäre, und 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 natürlich eine wichtige Rolle. Wir sind uns alle einig darüber, dass wir mit unserer Forschung der Menscheit 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 „*eisigen, kalten, unpersönlichen Art*“ der Naturgesetze meint.⁸ 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 Urknall-Theorie. Solches kann nur von außerhalb kommen – für mich eben: von Gott. Und dies führt mich nun zur umgekehrten Frage:

Prägt meine wissenschaftliche Tätigkeit meinen Glauben?

Auch wenn ich diese Frage im Katalog für unser Symposium nicht finden konnte, werden Sie mir hoffentlich erlauben, kurz darauf einzugehen. Ich meine, dass man nicht nur die umgekehrte Frage 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 Sie gleich hören werden, ist es mir ein besonderes Anliegen, naturwissenschaftliches und religiöses Denken im Sinne des Komplementaritätsprinzips zu einem einheitlichen Weltbild zusammenzufügen. Dabei sind deren Abhängigkeiten und Beeinflussungen in beiden Richtungen gleich wichtig.

Also: beeinflussen naturwissenschaftliche und insbesondere physikalische Erkenntnisse meinen Glauben? Meine 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 ja 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 Einsichten des letzten Jahrhunderts – in seinem Weltbild Platz für Gott schaffen kann. Und zwar nicht bloß für einen Gott als Lückenfüller 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 ich Ihnen das in den letzten 30 Minuten geschildert habe – diese Einsicht sollte uns zu einer gewissen Demut führen. Und ein daraus resultierendes Bewusstsein, dass unsere Wissenschaft nicht allmächtig ist, kann es leichter machen, an einen Gott zu glauben.

Ich möchte noch einen Schritt weiter gehen. Ich denke nämlich, dass einige der physikalischen Erkenntnisse, von denen ich heute gesprochen habe, auch dem Glauben an die biblischen *Wunder* helfen können. Wunder wie die Verwandlung von Wasser zu Wein oder die Auferstehung Christi sind ja für viele Leute ein Stein des Anstoßes. Für Agnostiker und Atheisten können sie Anlass zur Negierung Gottes geben: „Was naturwissenschaftlich nicht erkläbar ist, das kann oder darf nicht sein.“

⁸Steven Weinberg: Zitate im Vortrag von Richard McClary (dieses Symposium).

Die scheinbaren Widersprüche zwischen naturwissenschaftlicher Erkenntnis und Glaubensaussagen wie den biblischen Wundern können aber meines Erachtens im Sinne des Bohrschen Komplementaritätsprinzips verstanden 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 bleiben uns völlig unverständlich. Umgekehrt, wenn ich mich mit Fragen des Glaubens und mit Gott auseinandersetze, treten physikalische Aspekte in den Hintergrund und werden bedeutungslos. 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 gerade auch als Physiker keine Probleme mit Wundern habe. Das fängt schon damit an, dass ich doch im Rahmen der Quantentheorie auch auf so etwas wie Wunder treffe: für mich ist die Aussage, dass ein Elektron eine Welle sein soll, nicht viel weniger verwunderlich, als wenn ich lese oder höre, 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 über dem Menschen. Aber naturwissenschaftliches Denken auf der einen und religiösen Denken auf der anderen Seite können als komplementär aufgefasst werden. Unser menschliches Denken und Vermögen ist beschränkt; wir können uns immer nur mit Teilespekten befassen. Solange ich mich nur mit dem einen Aspekt beschäftige, kann ich den anderen außer Acht lassen. Wer sich im Extremfall nur auf das naturwissenschaftliche Denken beschränkt und nur dieses allein gelten lässt, kann sich dazu versteigen, zu behaupten, dass es keinen Gott gibt. Wer sich andererseits nur auf religiösen 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 sogar 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 vereint werden, und wenn man sich der beiderseits vorhandenen 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 wissenschaftlichen Erkenntnis auch noch eine andere Form der Naturerkennung 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 Teilespekte 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 verstehen zu können!

So jedenfalls möchte ich die folgenden Worte von Paulus auslegen, mit denen ich meine Ausführungen beschließe:⁹

„Wir sehen jetzt durch einen Spiegel undrätseln; dann aber von Angesicht zu Angesicht. Jetzt erkenne ich stückweise; dann aber werde ich erkennen, gleichwie ich erkannt bin.“

Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit und Geduld.

⁹Paulus: *1. Korintherbrief* (Kap. 13, Vers 12).