

**24/2/1992**

SOLO IN TEDESCO

***“Einstein - Bohr: spettatori  
raffinati o coartefici del  
mondo?”***

***a cura di  
Prof. Günter Ludwig***

# Einstein - Bohr: Zuschauer der Evolution oder Mitgestalter der Welt?

G. Ludwig

Wenn wir uns heutzutage für die Diskussion zwischen Bohr und Einstein interessieren, ja, wenn sich heutzutage nicht nur die Physiker dafür interessieren, so sicherlich nicht, weil etwa eine Fachfrage, wie z.B. nach der Struktur des Kohlenstoffatoms, diskutiert worden wäre, oder auch nicht, weil man historisch an der Entwicklung der Quantenmechanik interessiert wäre, sondern deswegen, weil es um eine viel fundamentalere Frage ging, nämlich was man durch eine physikalische Theorie von der Welt erkennen kann oder erkennen sollte. Und in diesem Sinne wird die Diskussion bis in unsere Tage hinein fortgeführt.

In diesem Sinne möchte ich heute nicht den historischen Begebenheiten nachgehen, sondern die eigentliche, auch heute noch aktuelle Frage nach dem Erkenntnisinhalt einer physikalischen Theorie zu schildern versuchen. Dazu muß ich allerdings auf einige Grundstrukturen physikalischer Theorien eingehen, denn sonst kann man nicht erkennen, worum es bei unserer Frage geht.

Eine physikalische Theorie enthält zwei wesentliche, miteinander verknüpfte Teile: Zunächst eine mathematische Theorie (mathematical theory), die wir im Folgenden immer kurz MT nennen wollen. Haben Sie kein Angst, wir werden heute so gut wie nichts über die Struktur der verschiedenen MTs in verschiedenen physikalischen Theorien reden, denn um die Strukturen von MTs ging es bei den Diskussionen zwischen Bohr und Einstein nicht. Nur eines muß ich über MT sagen, damit keine falschen Vorstellungen entstehen.

Eine MT ist nichts anderes als eine sehr einfache Sprache mit sehr einfachen Sprachregeln und enthält logische Regeln und willkürlich gesetzte Axiome: Wichtig ist, daß das, was in einer MT steht, keine inhaltliche Bedeutung hat. Genau das macht es vielen schwer, Mathematik zu treiben, weil sie es nicht übers Herz bringen, inhaltlos, aber korrekt, zu reden (unkorrekt und inhaltlos zu reden, kann man dagegen häufig erleben). Man kann im Prinzip eine MT durch einen Computer simulieren, und es gelingt tatsächlich manchmal, mathematische Beweise mit Hilfe eines Computers schneller zu finden, als es durchaus geübte Mathematiker können. Aber letztlich gerät der Computer wegen der Fülle der Möglichkeiten ins Hintertreffen.

Eine solche inhaltlose MT hat zunächst überhaupt nichts mit der Welt zu tun, d.h. bietet überhaupt keine Erkenntnisse der Welt. Um eine physikalische Theorie zu bekommen, muß man also gewisse Symbole aus MT mit etwas aus der Welt in Verbindung setzen, d.h. kurz, wir müssen zu MT eine Interpretation hinzufügen. Dadurch geben wir vorher inhaltslosen Symbolen und Sätzen einen physikalischen Inhalt. Ein Mathematiker kann mit einer MT arbeiten, ohne die geringsten Kenntnisse einer von den Physikern benutzten Interpretation. Aber nur die Interpretation macht eine MT erst zu einem Erkenntniswerkzeug. Wie eine Interpretation aussehen kann oder aussehen sollte, das ist es, worüber man eben bis heute streiten kann.

Der erste große Erfolg einer physikalischen Theorie war der der Newtonschen Mechanik und der Newtonschen Gravitationstheorie. MT enthält als wesentliche Axiome die Newtonschen Bewegungsgleichungen und die Kraftgesetze, z.B. die Gesetze für Gravitationskräfte. MT wird interpretiert, indem man gewisse mathematische Größen mit den Orten der Planeten zu verschiedenen Zeiten identifiziert, d.h. mit den von Astronomen schon vor wie nach Newton gemessenen Orten zu verschiedenen Zeiten. Aus diesen Meßergebnissen heraus war

schon Kepler vor Newton zu einer Theorie der Planetenbewegungen gekommen, die sogenannten Keplerschen Gesetze. Aber Keplers Theorie bezog sich nur auf einen kleinen Anwendungsbereich, nämlich die Planeten; Newtons Theorie war viel allgemeiner, z.B. fliegen unsere Raumschiffe alle "nach Newton". Und aus Newtons Theorie folgen speziell für das Planetensystem die Keplerschen Gesetze.

Die Interpretation einer MT gibt also an, wie MT mit Meßergebnissen, d.h. mit etwas aus der Welt, verglichen werden kann. Für später wollen wir das, was wir an Feststellungen aus der Welt mit MT vergleichen können, kurz mit A (Anwendung, englisch: application) bezeichnen. A enthält also z.B. die tatsächlich vermessenen Orte der Planeten zu verschiedenen Zeiten, die auf Grund der Interpretation mit mathematischen Größen aus MT verglichen, ja, identifiziert werden können. Auch das alles ist nicht strittig. Was aber erkennt man nach dieser Methode? Sicherlich mit Hilfe der Newtonschen Theorie die Orte zu anderen Zeiten, wo in der Zukunft noch keine Messungen stattgefunden haben, oder wo in der Vergangenheit keine Messungen mehr gemacht werden können. Ist das aber der ganze Erkenntnisinhalt einer physikalischen Theorie? Kommt der Physiker als Subjekt in einer physikalischen Theorie nicht vor, wie es dem Anschein nach bei dem Beispiel des Planetensystems der Fall ist? Alles offene Fragen, über deren Beantwortung man streiten kann. Insbesondere soll uns die Frage über die Stellung eines Subjekts in einer physikalischen Theorie beschäftigen, über die Einstein und Bohr ganz verschiedene Meinungen hatten, wie wir sehen werden.

Wir wollen zu dieser Frage zwei Standpunkte schildern. Der erste der beiden Standpunkte kommt wohl am deutlichsten in der Schilderung des Laplaceschen Geistes zum Ausdruck: Laplace beschreibt einen Geist, der alle Anfangswerte von Ort und Geschwindigkeit aller Massenpunkte und alle Kraftgesetze kennt

und als Supermathematiker dann den ganzen Ablauf der Welt kennt! Dieser Geist ist für manche das zwar nie erreichbare Idealbild eines Physikers, der durch klassische Theorien, für die die Newtonsche Theorie nur als Beispiel dient, versucht, den objektiven Ablauf der Welt zu erfassen. Die physikalischen Theorien sollen eine objektive, nicht vom Subjekt abhängige Beschreibung der Welt liefern. Auch Einsteins gegenüber Newton verbesserte Mechanik und Gravitationstheorie (in mißverständlicher Weise "Allgemeine Relativitätstheorie" genannt) war eine solche klassische Theorie.

Der Laplacesche Geist steht der Welt als unbeteiligter Zuschauer gegenüber, der nur um diese Welt weiß, sie aber weder beeinflusst, gestaltet, noch von ihr berührt wird. So ähnlich auch der Physiker, der durch MT im übertragenen Sinne mehr "sieht" als allein durch seine Sinne, auch wenn seine beschränkten mathematischen Fähigkeiten ihn daran hindern, das von der interpretierten MT gelieferte objektive Bild der Wirklichkeit in voller Klarheit vor sich zu haben. Wir wollen diesen Standpunkt kurz den geistigen Zuschauerstandpunkt nennen.

Es ist sicher kein Zufall, wenn um dieselbe Zeit, als das Bild vom Laplaceschen Geist entworfen wurde, auch eine theologische Vorstellung entstand, die eine teilweise Ähnlichkeit mit dem Laplaceschen Geist hat: Gott hat zu einer Anfangszeit einmal die Welt mit bestimmten Anfangswerten geschaffen, und nun läuft diese Welt, wie von Gott geplant, aber isoliert von Gott ab. Der Uhrmacher hatte seine Uhr hergestellt, und nun lief sie ohne ihn. Diese Vorstellung von Gott ist vom christlichen Standpunkt aus eine Blasphemie.

Die sogenannten klassischen Theorien, wie Mechanik, Elektrodynamik, Allgemeine Relativitätstheorie, scheinen den geistigen Zuschauerstandpunkt des Physikers zu rechtfertigen, wenn es außer dem Problem der mathematischen Schwierigkeiten nicht noch einen Schönheitsfehler gäbe: die sogenannten

"Anfangswerte". MT läßt diese Anfangswerte offen und man muß wohl oder übel zu A, d.h. zu Messungen, seine Zuflucht nehmen, um die sogenannten "wirklichen" Anfangswerte zu finden. Um dabei den geistigen Zuschauerstandpunkt zu retten, führte man die Voraussetzung ein, daß man Messungen beliebig verfeinern, d.h. dem Standpunkt des geistigen Zuschauers, der einfach weiß, ohne was zu machen, beliebig annähern kann. Dieses "Verfeinern" beinhaltet dabei zwei Dinge: Messungen können immer genauer und mit immer geringeren Störungen des Objektes durchgeführt werden, d.h., man kann sich trotz des Schmutzes von A dem sauberen Ideal des reinen Geistes nähern. Außerdem hatte der Theoretiker dabei das gute Gewissen, daß er sich nicht in die Niederungen der Experimentalphysik zu begeben braucht, um die Welt zu erkennen, d.h. um seinen reinen Erkenntnisdrang zu befriedigen.

Tatsächlich aber war das Postulat, daß Messungen mit immer geringeren Störungen, d.h. schließlich mit vernachlässigbaren Störungen, durchgeführt werden können, vollkommen unnötig, um klassische Theorien experimentell zu prüfen. Dieses Postulat war eben nur dem Wunsch entsprungen, sich fast wie ein Laplacescher Geist Kenntnis von den Anfangswerten zu verschaffen. Der Unterschied zwischen klassischen Theorien und Quantenmechanik liegt eben nicht darin, ob man Meßstörungen vermeiden kann. Wir werden darauf noch einmal zurückkommen.

In der Literatur wird die Position des geistigen Zuschauers oft als die realistische Position betrachtet, wobei man eine objektive, d.h. von Subjekten unabhängige, Beschreibung als realistische Beschreibung bezeichnet. Ich möchte aber zwischen objektiver Beschreibung und realisiertem Standpunkt unterscheiden, weil ich die Position des geistigen Zuschauers für unrealistisch halte, was ich bald näher erläutern werde.

Meine Schilderung der Position des geistigen Zuschauers ließ sicherlich schon erkennen, daß ich diese Position nicht teile. Trotzdem möchte ich gleich jetzt, bevor wir zur Quantenmechanik kommen, zusätzlich einige kritische Bemerkungen anfügen, und zwar solche Argumente gegen den geistigen Zuschauerstandpunkt, die man schon vor der Entdeckung der Quantenmechanik hätte anführen können; und vielleicht hat man diese Argumente tatsächlich schon früher angeführt, nur daß ich das nicht weiß.

Ist es wirklich so, daß der physikalische Inhalt einer klassischen physikalischen Theorie durch die geistige Zuschauerposition vollständig erfaßt wird? Ich behaupte, daß die Arbeit der Physiker schon immer diesem reinen Zuschauerstandpunkt widersprochen hat, unabhängig davon, was diese oder jene Physiker über ihre eigene Arbeit gesagt haben.

Laplace schreibt seinem Geist folgende Fähigkeiten zu: Alle Kräfte und Anfangswerte zu kennen. Natürlich muß die Newtonsche Mechanik durch "Kraftgesetze" ergänzt werden. Bessere Kenntnisse der Kraftgesetze verbessern die Newtonsche Theorie. Aber wie steht es mit den Anfangswerten? Sollte man die Newtonsche Theorie auch durch Anfangswertgesetze ergänzen, Anfangswertgesetze, die uns dann über die richtigen Anfangswerte Auskunft geben, so daß wir nicht mehr auf die in A aufgeschriebenen Meßresultate angewiesen wären?

Als Physiker würde man wohl kaum zögern, solche Anfangswertgesetze als unangebracht zu bezeichnen, da man augenscheinlich oft viele verschiedene Anfangswerte "machen", d.h. in heutiger Fachsprache, "präparieren" kann. Zwar können wir nichts am Planetensystem ändern, aber wenn man eine neue Theorie, die gewisse Anfangswerte verbietet, z.B. auf Tennisbälle anwenden würde, so würde ich auf der Basis meines freien Willens gerade die verbotenen An-

fangswerte machen und so zu einem Widerspruch mit der Theorie kommen. Schon das benutzte Wort "Anfangswerte" ist verräterisch; vom geistigen Zuschauerstandpunkt aus ist keiner der Werte als "Anfang" ausgezeichnet. Die Bahnen laufen dynamisch determiniert ab, aber von wo bis wo?

Raketen und Raumschiffe waren als Möglichkeit auf der Basis der Newtonschen Mechanik von Physikern schon lange erkannt, bevor wir heute solche Dinge realisieren, wobei es von unseren freien Willensentscheidungen abhängt, was wir realisieren. Bei den Physikern war niemals das Bewußtsein verloren gegangen, daß eine physikalische Theorie auch etwas über Möglichkeiten aussagt; und für Techniker ist gerade das der zentrale Punkt physikalischer Theorien. Die Newtonsche Mechanik wird in dieser Weise durch ihre dynamisch determinierte Struktur zu einem Instrument zielstrebigem Handelns, auch dann, wenn man sich das Ziel gesetzt hat, gegnerische Soldaten durch eine Kanone zu beschießen. Die Physiker sind eben nicht nur geistige Zuschauer, sondern auch unausweichlich aktiv Handelnde und die Welt Wandelnde, ja auch dann, wenn sie etwas unterlassen, was sie tun könnten. Der Teil A einer physikalischen Theorie ist nicht nur eine Krücke, um durch MT noch nicht bestimmte Parameter mehr oder weniger genau festzulegen, sondern ist wesentlich mitbestimmt durch das, was Subjekte auf der Basis von MT nach freien Willensentscheidungen machen. Die Physiker sind eben nie unbeteiligte geistige Zuschauer, sondern "Mitspieler" im Spiel der Welt. Mitspielen heißt aber auch Mitverantwortung tragen, aus der wir uns auch nicht stehlen können, indem wir behaupten, wir wären nur geistige Zuschauer.

Man könnte einwenden, daß der Standpunkt des Mitspielers unhaltbar sei, da nach dem Weltbild des Laplaceschen Geistes die Welt determiniert abläuft und damit die von mir angegebene Möglichkeitsinterpretation zum Widerspruch mit diesem Weltbild gerät. Die Möglichkeiten und der freie Wille sind nur scheinbar,

in Wirklichkeit ist alles festgelegt. Das Bild des Maschinenmenschen war geboren, und mag diese Maschine noch so kompliziert sein. Gegen diese Vorstellung kann man folgenden Einwand erheben: Wieso soll die ganze Welt determiniert ablaufen? Liegt nicht vielmehr der Verdacht nahe, daß man sich die Rosinen determiniert ablaufender Prozesse aus dem Weltkuchen herausgepickt hatte? Daß die Planetenbewegungen determiniert ablaufen, springt ja in die Augen. Das Wettergeschehen wäre wohl kaum ein Anlaß dazu gewesen, ein determiniertes Weltgeschehen vorauszusetzen. Und könnte man nicht auch gerade deshalb die determinierten Prozesse herausgesucht haben, um damit besser zielstrebig handeln zu können? Ein indeterminiertes Verhalten bereitet offensichtlich Schwierigkeiten, erstrebte Ziele sicher zu erreichen. Ein Weltkuchen, der nur aus Rosinen besteht, scheint mir mehr als fragwürdig und kann wenigstens nicht mit Hilfe der Physik als realistisch nachgewiesen werden. Im Gegenteil: Auch viele mathematische Bewegungsgleichungen, wie die der Hydrodynamik, die mathematisch ein dynamisch determiniertes Verhalten zeigen, haben durch ihre Lösungsmannigfaltigkeiten demonstriert, daß physikalisch oft ein indeterminiertes Verhalten vorliegt; denn kleinste mathematische Änderungen der Anfangswerte, kleiner als die physikalische Definitionsgenauigkeit der auftretenden Größen, führen zu total anderen Lösungen. Wohlgemerkt, nicht nur kleiner als die Genauigkeiten der gerade möglichen Messungen, sondern viel kleiner als die Genauigkeit, mit der diese Größen physikalisch sinnvoll definiert sind, wie z.B. die Dichte eines Gases oder einer Flüssigkeit. Es ist also gefährlich, wenn technische Geräte in den Bereich dieser Instabilitäten, d.h. dieses indeterminierten Verhaltens, gelangen, da dann ein zielstrebiges Handeln nicht mehr möglich ist. Flugzeugführer werden daher durch Signale gewarnt, wenn sich das Flugzeug einem solchen instabilen Flugzustand nähert oder es werden gleich automatisch Gegenmaßnahmen ergriffen, denn es ist wenig erfreulich, wenn nicht mehr feststeht, wo und wie man landet.

Ein determiniertes Verhalten der Welt ist zumindest eine durch Physik nicht begründbare Hypothese und in diesem Sinne ein physikalisches Märchen.

Das Festhalten am Standpunkt des geistigen Zuschauers ist auch aus dem Grund umso merkwürdiger, als es schon vor der Entdeckung der Quantenmechanik eine Theorie gab, die einen ganz anderen Eindruck machte, nämlich die Thermodynamik. Hier war von vornherein von Maschinen die Rede und von den Möglichkeiten und Unmöglichkeiten des Bauens solcher Wärmekraftmaschinen. Ohne die Unmöglichkeitssätze der Thermodynamik hätten wir heute keine Energieprobleme. Es ist nun ganz typisch für den geistigen Zuschauerstandpunkt, daß man die Thermodynamik als physikalische Theorie herabzusetzen versucht, daß man sie nicht als "eigentliche" Theorie ansieht, sondern nur als eine "heuristische" Theorie, als ein irgendwie geartetes Provisorium. Tatsächlich aber kann man, natürlich vom Standpunkt des Mitspielers aus, die Thermodynamik als Prototyp einer physikalischen Theorie betrachten, da sie recht einfach ist, was ich natürlich hier nicht demonstrieren kann.

Fassen wir zusammen: Vom Standpunkt des Mitspielers enthält jede physikalische Theorie schon den Begriff des Möglichen als Interpretationsbegriff von MT. Damit kein Mißverständnis entsteht: Der Möglichkeitsbegriff hat zunächst nichts mit dem Wahrscheinlichkeitsbegriff zu tun; er ist viel allgemeiner anwendbar als der Wahrscheinlichkeitsbegriff. Es gibt nämlich auch frei verfügbare Möglichkeiten, wie z.B. Anfangswerte in der Newtonschen Mechanik.

Die von mir angeführten kritischen Bemerkungen zum Standpunkt des geistigen Zuschauers waren aber vor der Entdeckung der Quantenmechanik augenscheinlich nicht die herrschende Meinung. Eine objektive Beschreibung der Prozesse in der Welt schien das Ziel der Physik zu sein, dem man sich scheinbar durch die Entdeckung der atomaren Welt zu nähern schien. Die Aufhellung, wie die Welt

objektiv ist und wie sie selbst funktioniert, war das lohnende Erkenntnisziel, für das man alle Mühe in Kauf nahm, um sich ihm zu nähern. Und man schien doch auf dem richtigen Weg zu sein, indem man die Atome als "kleine Planetensysteme" beschrieb, obwohl sich manche Schwierigkeiten ergaben. Diese Schwierigkeiten hoffte man durch weitere Fortschritte überwinden zu können. Mitten hinein in diese Bemühungen platzte die Arbeit von Heisenberg, die eine Quantenmechanik aufstellte. Er schrieb in dieser Arbeit:

"Bei dieser Sachlage scheint es geratener, jene Hoffnung auf eine Beobachtung der bisher unbeobachteten Größen (wie Lage, Umlauf des Elektrons) ganz aufzugeben, gleichzeitig also einzuräumen, daß die teilweise Übereinstimmung der genannten Quantenregeln mit der Erfahrung mehr oder weniger zufällig sei, und zu versuchen, eine der klassischen Mechanik analoge quantentheoretische Mechanik auszubilden, in welcher nur Beziehungen zwischen beobachtbaren Größen vorkommen."

Damit war seit Beginn der Quantenmechanik das Messen mit zu einem Bestandteil der Theorie geworden. Das Messen wurde nicht mehr als notwendiges Übel angesehen, ein Übel, mit dem man sich Kenntnis der in der Natur an sich gegebenen Sachverhalte zu verschaffen suchte. Bohr schwenkte auf die neue Quantenmechanik ein und ließ sein Atommodell fallen. Nachdem dann Born die statistische Deutung der Wellenfunktion eingeführt hatte, wurden in Kopenhagen längere Diskussionen über die Interpretation der Quantenmechanik geführt und die sogenannte "Kopenhagener Interpretation" geboren. Grundlage dafür war die von Heisenberg eingeführte Hineinahme des Messens in die Theorie, wobei - wie es Heisenberg gleich am Beginn seines Buches "Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie" formulierte - die Ergebnisse der Experimente wie die Dinge des täglichen Lebens mit einer gewöhnlichen Sprache beschrieben werden können.

Die Hineinnahme des Messens mit seinen in einer Alltagssprache beschreibbaren Ergebnissen war eine eindeutige Absage an den Standpunkt des geistigen Zuschauers, der unberührt und ohne selber einzugreifen die Welt vor seinem geistigen Auge ablaufen läßt. Nicht mehr das, was objektiv auch ohne Messen ist, wie z.B. die Orte von Massen zu verschiedenen Zeiten, wurde zur Basis der Theorie, sondern das, was möglich ist, nämlich Präparier- und Meßmöglichkeiten. Heute ersetzen wir das Wort "Messen" lieber durch das allgemeinere "Registrieren", da das Wort "Messen" zu leicht die Vorstellung wachruft, daß etwas an sich Vorhandenes festgestellt, eben gemessen werden soll. Registrieren dagegen sagt nur, das etwas an einem Apparat passiert ist, etwas, was man in der Alltagssprache beschreiben kann. Was das Registrierte bedeutet, ist dann eben schon eine Frage der Theorie. Durch die Kopenhagener Deutung werden also die Präparier- und Registriermöglichkeiten zur Basis der Theorie gemacht.

Sicher war damals die Verbindung zwischen MT und der Kopenhagener Interpretation begrifflich noch nicht so präzise möglich wie heute. So unterscheiden wir heute zwischen den Präparier- und Registrierverfahren einerseits und den Gesamtheiten und Effekten andererseits. Etwas spezialisiert entspricht den Effekten das, was man damals Observable nannte. Aber auf alle diese begrifflichen Feinheiten brauchen und können wir heute nicht eingehen, zumal man dafür auch etwas genauer die Struktur von MT kennen müßte. Für uns ist nur wichtig, daß als Basis der Theorie in MT Symbole stehen, die den Präparier- und Registrierverfahren entsprechen. Entsprechend stehen in A keine Meßergebnisse im Sinne von festgestellten, objektiven Sachverhalten, sondern die realisierten Präparier- und Registrierverfahren. Das Wort "Verfahren" charakterisiert dabei, daß diese Verfahren eben durch Handeln von Subjekten realisiert werden können und wenn auch nur in der Form des Auswählens aus vorhandenen Vorgängen.

Daß die Präparier- und Registrierverfahren in der mathematischen Theorie MT der Quantenmechanik auftreten, ist nicht das Aufregende. Denn auch in den klassischen Theorien wie der Newtonschen Mechanik kann man MT so erweitern, daß Symbole für Präparier- und Registrierverfahren auftreten, z.B. für die Verfahren, mit denen die Astronomen die Stellung der Planeten zu verschiedenen Zeiten messen. Nur als Nebenbemerkung sei kurz betont, daß man dabei in keiner Weise voraussetzen muß, daß man mit vernachlässigbaren Störungen registrieren kann, was zwar beim Vermessen der Planetenbahnen der Fall ist.

Ist nun etwa durch das Einführen der Präparier- und Registrierverfahren in die klassischen Theorien jeder Unterschied zwischen Quantenmechanik und klassischen Theorien beseitigt? Wenn dem so wäre, hätten Einstein und Bohr gar nicht zu streiten brauchen.

Ein Unterschied ist tatsächlich durch das Umschreiben der klassischen Theorien beseitigt, nämlich derjenige, der die Stellung des Subjekts betrifft. In allen Theorien kommen dann Symbole für die möglichen Präparier- und Registrierverfahren vor, und damit findet in A das Tun der Experimentalphysiker als Realisierung von Verfahren ihren Niederschlag.

Aber was unterscheidet dann noch die Quantenmechanik von den klassischen Theorien? Eine wichtige Struktur, ja, die entscheidend wichtige Struktur, die hinter den Diskussionen zwischen Bohr und Einstein stand! In den klassischen Theorien kann man das Registrieren deuten als Registrieren objektiver Sachverhalte, d.h., als mehr oder weniger genaues Vermessen von objektiv vorhandenen Sachverhalten, wie z.B. als Vermessen der Bahnen von Massenpunkten. Die mit Hilfe der Einführung von Präparier- und

12

Registrierverfahren erweiterten klassischen Theorien kann man wieder so verkürzen, daß man die Verfahren herausschmeißt, und nur die Meßergebnisse bzw. möglichen Anfangswerte übrig läßt. Entsprechend ist dann A ebenfalls auf die mit den Verfahren erhaltenen Meßergebnisse zu verkürzen. Aber trotzdem scheinen mir auch im Falle der klassischen Theorien die so verkürzten Theorien einen wesentlichen Teil der Physik, nämlich die Tätigkeit der Experimentalphysiker nicht zu enthalten, und damit erscheinen mir die verkürzten Theorien verarmt zu sein, und nicht gereinigt, wie manche meinen. In diesem Sinne meine ich es, wenn ich die nicht verkürzten Theorien als realistischer bezeichne als die verkürzten.

Die Quantenmechanik erlaubt keine solche Deutung des Registrierens als Messen objektiver Sachverhalte und des Präparierens als Herstellung von Anfangswerten dieser Sachverhalte. Die Quantenmechanik erlaubt nicht, die Präparier- und Registrierverfahren aus der Theorie zu entfernen, sie erlaubt keine Elimination des handelnden Subjekts aus der Theorie. Dies kann man heute mathematisch korrekt beweisen; und einen ersten Hinweis darauf enthielt schon die berühmte Heisenbergsche Unschärferelation.

Die Nichteliminierbarkeit des handelnden Subjekts aus der Quantenmechanik führte zu starken emotionalen Reaktionen: Das kann doch nicht wahr sein, sagt man.

Auch für Einstein war die Physik eine Methode zum Erkennen des objektiven Ablaufs der Welt, die Erkenntnis, was eigentlich ist, vom Kosmos bis zu den kleinsten Strukturen war das Ziel und damit der Antrieb, Physik zu treiben, mag man auch die Anfangswerte offen lassen müssen; oder vielleicht auch nicht, wenn man die richtige Kosmologie gefunden hat?

Wie kein anderer spürte Einstein sofort, daß durch die Kopenhagener Quantenmechanik etwas Neues gegenüber dem Standpunkt des geistig erkennenden Beobachters in die Physik eingebrochen war. Da in der Anfangszeit noch nicht alles mathematisch sauber ableitbar war, hegte Einstein zunächst den Verdacht, daß die Kopenhagener Interpretation in sich selbst inkonsistent sein könnte. Er versuchte, dies an Gedankenexperimenten nachzuweisen, die zeigen sollten, daß in ihnen die Heisenbergsche Unschärferelation verletzt ist. Es ist wirklich interessant zu lesen, wie Bohr jeden dieser Versuche abschmettete. Um das zu zeigen, müßten wir allerdings weiter in die Quantenmechanik eindringen.

Wenn die Quantenmechanik in sich konsistent ist, aber den Prinzipien des geistigen Zuschauerstandpunkts widerspricht, blieb für Einstein nur der Ausweg, daß die Quantenmechanik eine provisorische Theorie sein muß, die man später durch eine bessere, objektive Beschreibung zu ersetzen hat. Wie stark für Einstein der Sinn der Physik in Frage gestellt wurde, wenn man die Quantenmechanik mit ihren Möglichkeiten und dem Handeln von Subjekten als endgültig ansehen würde, geht aus seinem Ausspruch hervor, daß er dann lieber gleich Handwerker geworden wäre. Die Physik nur ein verbessertes Handwerk? Wo bleibt da die Erkenntnis der Realität!

In seiner Einschätzung der Quantenmechanik als eine zwar in sich konsistente, handwerkartige Theorie, aber als ein vorübergehendes Provisorium, fühlte sich Einstein noch bestätigt durch die Tatsache, daß in der Quantenmechanik der Wahrscheinlichkeitsbegriff eine fundamentale Rolle spielt. Sein Ausspruch: 'Gott würfeln nicht' läßt seine Einstellung schlagartig aufleuchten.

Um dies besser zu verstehen, müssen wir noch einmal auf Laplace zurückgreifen. Seine Schilderung des Geistes, der alle Anfangswerte kennt und die ganze Welt vorausberechnen kann, steht nicht etwa am Anfang eines

Buches über Mechanik, sondern am Anfang eines Buches über Wahrscheinlichkeitsrechnung. Die Methode der Wahrscheinlichkeitsrechnung wird eingeführt, um trotz unserer leider nicht genauen Kenntnisse der Anfangswerte, noch etwas über das Verhalten der Systeme auszusagen. So wurde der Wahrscheinlichkeitsbegriff auch zunächst in der statistischen Mechanik benutzt, um z.B. etwas auszusagen über das Verhalten eines Schwarms von vielen Massenpunkten, die ein Gas darstellen. Der Wahrscheinlichkeitsbegriff war also kein fundamentaler Begriff, sondern ein Hilfsbegriff, um trotz unserer schwachen Fähigkeiten praktisch weiterzukommen; "in Wirklichkeit" lief aber alles nach Gesetzen ab. Diese Gesetze zu erkennen, war für Einstein die eigentliche Aufgabe der Physik.

Es gab noch einen anderen Wahrscheinlichkeitsbegriff, den die Techniker benutzen. Machen wir uns das an einem Beispiel klar, wo die betrachteten Systeme ebenfalls der klassischen Mechanik genügen: Man schießt mit einer Kanone Geschosse ab. Die Geschosse bewegen sich nach der Newtonschen Mechanik. Aus den Anfangswerten nach Verlassen des Kanonenrohres ergeben sich eindeutig die Einschlagstellen. Wenn man öfters mit der Kanone schießt, so sind die Anfangswerte der Geschosse nicht in jedem Fall genau dieselben. Durch die Kanone als Präparierverfahren für Geschosse ist aber bei sehr vielen Versuchen eine annähernd reproduzierbare Verteilung der Anfangswerte bestimmt. Diese bezeichnet man ebenfalls (mathematisch idealisiert) als durch das Präparierverfahren Kanone bestimmte "Wahrscheinlichkeitsverteilung" der Anfangswerte. Aus dieser ergibt sich dann eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einschlagstellen. Diese letztere Art des Wahrscheinlichkeitsbegriffes als die von den Präparier- und Registrierverfahren bedingten Häufigkeitsverteilungen ist auch die des Wahrscheinlichkeitsbegriffes der Quantenmechanik. Man könnte ihn als den handwerklichen bezeichnen.

Beide Wahrscheinlichkeitsbegriffe waren für Einstein, als Begriffe einer grundlegenden physikalischen Theorie, unakzeptierbar. Hinter Theorien, die einen von beiden Wahrscheinlichkeitsbegriffen benutzten, mußte nach Einstein eine grundlegende Theorie stehen, die die Welt objektivierend beschreibt. So versuchte er einerseits zu zeigen, daß die Quantenmechanik keine "vollständige Beschreibung der Realität" (wie er es ausdrückte) sein kann, obwohl sie eine brauchbare Theorie im Umgang mit der Realität ist. In diesem Bemühen entstand die Arbeit, die heute allgemein unter den Schlagworten "EPR-Paradoxon" oder "EPR-Experimente" zitiert wird. EPR steht für die Verfasser Einstein, Podolsky, Rosen. Natürlich handelt es sich nicht um ein Paradoxon der Quantenmechanik. Wie üblich hatte aber Einstein damit den Finger auf sehr markante Experimente der Quantenmechanik gelegt. Es sollte gezeigt werden, daß die Quantenmechanik nur eine unvollkommene Beschreibung der Realität sein kann. Wir wollen hier nicht versuchen, den von Einstein benutzten Realitätsbegriff zu analysieren. Wir wollen vielmehr kurz beschreiben, wieso diese Experimente als Paradoxa bezeichnet wurden. Die Experimente legen psychologisch nahe, daß den Mikrosystemen doch die zu messenden Größen objektiv zuzuordnen wären, was - wie ich schon erwähnte - im Widerspruch zur Quantenmechanik steht.

Andererseits dachte Einstein daran, daß er eventuell durch seine weiteren differentialgeometrischen Überlegungen zu einer Theorie gelangen könnte, die die Welt der Mikrosysteme objektivierend beschreibt und zu der die Quantenmechanik sich ähnlich verhält wie die statistische Mechanik zur Mechanik. Dies gelang aber nicht. Trotz dieses Mißerfolgs lebten aber in einer neuen Generation die Vertreter des geistigen Zuschauerstandpunktes wieder auf und versuchten, Einsteins Erbe fortzusetzen.

Die Rettungsversuche des geistigen Zuschauerstandpunktes wurden in zwei Richtungen geführt.

Einmal fragte man sich, ob tatsächlich die Quantenmechanik in allen ihren Konsequenzen vom Experiment bestätigt wird. Wie steht es denn wirklich mit einer experimentellen Nachprüfung von EPR-Experimenten? Diese legen psychologisch nahe, den Mikrosystemen objektiv gewisse Eigenschaften zuzuschreiben, eine objektive Zuordnung, die mit der Quantenmechanik in Widerspruch steht. Um hier ein experimentum crucis herauszuarbeiten, hat man sich überlegt, wie diese Experimente ausfallen müßten, wenn eine Zuordnung der dabei gemessenen Größen als objektive Eigenschaften der Mikrosysteme möglich wäre. Dann müßte, so fand man heraus, die Bellsche Ungleichung erfüllt sein, die natürlich im Widerspruch zur Quantentheorie steht, - aber auch im Widerspruch zum Experiment?

Für jene, die die Quantenmechanik kannten und sich nicht durch emotionale Momente gegen sie einnehmen ließen, war es ebenso sicher, daß die EPR-Experimente im Einklang mit der Quantenmechanik, aber im Widerspruch zur Bellschen Ungleichung stehen werden, ebenso sicher, wie die Umkreisung des Mondes durch ein Raumschiff nach der Newtonschen Theorie erfolgen wird und dann erfolgt ist. Für alle, die im Stillen oder offen gehofft hatten, daß die Experimente die Bellsche Ungleichung bestätigen werden, ging der Schuß nach hinten los. Jetzt war praktisch auch noch experimentell bestätigt, daß das Registrieren nicht als Messen von objektiven Eigenschaften gedeutet werden konnte. In der EPR-Arbeit findet man kein Anzeichen dafür, daß Einstein daran gezweifelt hätte, daß die Quantenmechanik den Ausgang der Experimente richtig beschreibt. Sein Argument war, daß die Quantenmechanik die Experimente nur unvollständig beschreibt.

Man sah sich also die Beweise an, die eine objektivierende Beschreibung als im Widerspruch zur Quantenmechanik zeigten. Welche Voraussetzungen gingen in diese Beweise ein? Die Voraussetzung war, daß die objektivierende Beschrei-

bung mit Größen erfolgt, die registrierbar sind. Man gab diese Voraussetzung auf und ließ auch nicht registrierbare Parameter, sogenannte verborgene Parameter, zu. Dies war zwar ganz im Sinne eines Laplaceschen Geistes, der eben auch uns unzugängliche Parameter wissen kann. Damit war allerdings allen Möglichkeiten Tür und Tor geöffnet, denn man könnte ja als verborgene Parameter den ganzen späteren Ablauf der Welt benutzen. Also mußte man schon versuchen, einschränkende Bedingungen für diese Parameter aufzustellen. So entstanden viele no-go- und go-Theoreme: Unter diesen Bedingungen geht es nicht, unter jenen geht es.

Der Fall der verborgenen Parameter ist eine typische Situation, um die sich ein Glaubenskrieg entwickeln kann; nämlich um die Frage, sind sie real oder nur mathematische Spielereien. Ich habe vorgeschlagen, nur solche Größen als physikalisch real zu bezeichnen, die (wenn auch auf noch so komplizierten Wegen) Registrierungen, d.h. dem Experiment zugänglich sind. Die verborgenen Parameter sind das zumindest bisher nicht. Die von mir vorgeschlagene Definition hat den Vorteil, daß man während der Entwicklung der Physik nichts zu widerrufen braucht: der Bereich der als physikalisch real erkannten Sachverhalte kann nur zunehmen.

Es ist sicherlich nicht verborgen geblieben, daß ich den Standpunkt des Mitspielers einnehme. Er ist überall brauchbar, von der Newtonschen Mechanik bis zur Elektrodynamik, von der Kosmologie bis zur Quantenmechanik und Elementarteilchenphysik, er verbietet nicht, daß bestimmte Bereiche objektivierend beschreibbar sind, wie eben auch der Kosmos; wie entscheidend wichtig sind aber auch für eine Kosmologie die neuen technischen Möglichkeiten der Registrierung von Signalen aus dem Kosmos.

Mögen sich manche noch so sehr für den geistigen Zuschauerstandpunkt engagieren und andere dagegen argumentieren, nur eines ist Unsinn, wenn von Revolutionen in der Physik gesprochen wird oder, wie man manchmal heute lesen kann, von einer Krise der Quantenmechanik oder gar vom Zusammenbruch der Quantenmechanik. Denn keine physikalische Theorie ist vom Standpunkt des Mitspielers begrifflich so korrekt und sauber formuliert worden, einschließlich des Meßprozesses, wie die Quantenmechanik; vielleicht die Thermodynamik ausgenommen. Verlassen wir aber die internen physikalischen Probleme.

Nimmt man den Standpunkt des Mitspielers ein, so hat das Konsequenzen für die Stellung der Physik in der menschlichen Gesellschaft. Man kann sich als Physiker nicht hinter dem Standpunkt des nicht für das Weltspiel verantwortlichen Zuschauers zurückziehen. Schon die erste bedeutende physikalische Theorie, die Newtonsche Mechanik, enthielt schon die heutigen Raketen und Satelliten als Möglichkeit.

Stellt man sich vom Standpunkt des Mitspielers aus die Frage, warum man eigentlich Physik macht, so kann man Physik nicht nur als Befriedigung der Neugierde beschreiben, sondern muß dies auch tun als Eröffnung neuer Möglichkeiten für das Leben der Menschen in dieser Welt.

Dies klingt sehr optimistisch. Dagegen ist es doch gerade heutzutage verständlich, wenn man bei den Bedrohungen, die gerade auch die moderne Technik heraufbeschwören kann, in einen Pessimismus verfällt, und die ganzen Naturwissenschaften lieber abschaffen würde, ja, wenn dies ginge! Ist das die richtige Haltung?

Waren nicht diejenigen im Recht, denen man noch vor 50 bis 30 Jahren, auch gerade im Bereich der Kirche, begegnen konnte, die da sagten: Naturwissen-

schaftler wollen wir nicht; oder war dies Hochmut gegenüber nur handwerklichen Physikern?

Steht man diesen Fragen gegenüber, so kann es tröstlich sein, daß schon andere Generationen vor ähnlichen Fragen standen.

Gregor von Nazianz (gestorben 390) beschrieb die Haltung eines Christen so: Unseres Wissens sind weder physikalische Energien noch die Speise der Menschen noch Materialien verschiedenster Art oder sonst etwas an sich ganz nützlich oder ganz schädlich, sondern je nachdem, wie die Gebrauchenden es wollen. So haben wir auch die weltlichen Wissenschaften übernommen, die sich mit der Erforschung und Untersuchung der Dinge befassen, aber verschmäht, was zu Irrtum und zum Abgrund der Verderbnis führt. Dadurch sind wir sogar in der Gottesfurcht gefördert worden, indem wir durch das weniger Gute zur Erkenntnis des Besseren gelangten und uns aus der Ohnmacht des rein weltlichen Denkens eine Stütze unseres Glaubens schufen. Demnach ist Bildung nicht zu verachten, wie einige meinen, sondern es sind als töricht und ungebildet zu betrachten, die eine solche Ansicht haben und wollen, daß alle mit ihnen übereinstimmen, damit ihre Unwissenheit bei der allgemeinen Unwissenheit verborgen bleibe und ihre Unwissenheit nicht bekannt werde.

Allerdings muß ich zugeben, daß ich ein ganz klein wenig geschummelt habe: statt heidnisch habe ich weltlich gesagt, statt Feuer physikalische Energien, statt Eisen Materialien verschiedenster Art. Aber vielleicht hätte man es auch so übersetzen können, wie ich es jetzt gesagt habe.