

Pareto, V.: Ausgewählte Schriften. Ullstein, Frankfurt a.M. 1975

Polybius: The Histories, Vol II.; transl. by R. Paton. Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass. 1966-1968

Schröder, R.: Die „schöne deutsche Physik“ von Gustav Hertz und der »weiße Jude« Heisenberg - Johannes Starks ideologischer Antisemitismus(1). In: Helmuth Albrecht, H. (Hrsg.): Naturwissenschaft und Technik in der Geschichte - 25 Jahre Lehrstuhl für Geschichte der Naturwissenschaft und Technik am Historischen Institut der Universität Stuttgart. Geschichte der Naturwissenschaft und der Technik, Stuttgart 1993

Smith, D: Kriege und Konflikte. Der Fischer Atlas. Fischer Taschenbuch, Frankfurt a.M. 1997

Spengler, O.: Der Untergang des Abendlandes. Umriss einer Morphologie der Weltgeschichte. Bd. 1, Braumüller, Wien 1918, Bd. 2, C.H. Becksche Verlagsbuchhandlung, München 1922. Neue Auflage: C.H. Beck, München 1990

Stachel, J., Schulmann, R., Renn, R. et al (eds.): Collected Papers of Albert Einstein (CPAE) (1979-1818), Vol 1-8a,b, Princeton University Press, Princeton 1987-1997

Stebner, G.: Welt im Frieden? Beiträge zu Krieg, Faschismus, Holocaust, Gewalt und Repression. Marburg, 1994.

Teller, E.: Better a Shield than a Sword. Perspectives on Defence and Technology. Free Press, New York 1987

Weizsäcker, C.F. von (Hrsg.): Kriegsfolgen und Kriegsverhütung. München 1971

Wickert, J.: Einstein. Rowohlt. Reinbek bei Hamburg 1979, 7. Aufl.

Wiener, A., Kahn, H.: Ihr werdet es erleben. Die Welt im Jahr 2000. Molden, Wien, Mohn, Gütersloh 1967. Engl.: The Year 2000. A Framework for Speculations on the next thirty three years. Crouton - on Hudson, New York 1963

Gregor Schiemann

Warum Gott nicht würfelt: Einstein und die Quantenmechanik im Licht neuerer Forschungen

Einsteins Wort, dass Gott nicht würfelt, hat eine bemerkenswerte und wohl auch noch nicht abgeschlossene Geschichte. Zu ihr gehört das seltsame Verhältnis, in dem die öffentliche Bekanntheit seiner Bemerkung zu dem eher privaten Kontext steht, dem sie entnommen ist. Meist hat sich die Rezeption auf ihre Äußerung in seinem Briefwechsel mit dem Physiker Max Born, einem der führenden Begründer der Quantenmechanik, bezogen. Auf Born geht die sogenannte "statistische Deutung" der Quantenmechanik zurück, welche die Mikrowelt als indeterministisch betrachtet. Alles Wissen, das man über den Zustand eines mikrophysikalischen Systems haben kann, reicht dieser Interpretation zufolge nicht aus, um alle Messwerte seiner späteren Zustände festzulegen. Was sich insgesamt von einem späteren Zustand ermitteln lässt, ist unaufhebbar durch den Zufall bestimmt.¹

Gegen diese Interpretation ist Einsteins Satz gerichtet. Im Dezember 1926 – es ist das Jahr, in dem Born seine statistische Deutung formuliert hatte – schrieb Einstein an ihn:

¹ Den Indeterminismus der Quantenmechanik verstehe ich als eine ontologische These, die nicht aus der Unvorhersagbarkeit von Meßwerten folgt und der Quantenmechanik nur im Rahmen von Interpretationen bzw. Deutungen zugeschrieben werden kann. Die Definitionen der Begriffe des Determinismus und Indeterminismus sowie ihre Anwendung auf die verschiedenen Objekte und Theorien der Physik sind umstritten. Übersichten bieten Earman 1986 und Koch 1994.

"Die Quantenmechanik ist sehr achtungsgebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt".²

Aus dem, was man von Einsteins Einstellung zur Religion weiß, kann man schließen, dass er mit dem "Geheimnis des Alten" vermutlich eine allen Erscheinungen zu Grunde liegende einheitliche Struktur der Natur meint. In seiner am ehesten als spinozistisch zu bezeichnenden Gottesauffassung steht Gott einerseits für das Ganze der Natur und andererseits für ein in der Natur wirksames aktives Prinzip.³ Indem er sich auf Gott bezieht, macht Einstein klar, dass die Frage nach dem Zufall ein Fundamentalproblem darstellt, das nicht nur die Grundlagen der Mikrophysik, sondern die der Naturauffassung überhaupt betrifft. Seiner Überzeugung nach gehen die Naturerscheinungen nicht aus einem subatomaren Spiel des Zufalls hervor, sondern sie beruhen auf universellen Gesetzmäßigkeiten. Anders wären die Phänomene dem Menschen nicht verständlich.

Schon bald nach 1926 hatte sich die statistische Deutung der Quantenmechanik in der Physik durchgesetzt. So anregend Einsteins Kritik für die Begründer der Quantenmechanik, vor allem für Niels Bohr, auch war, sie galt weithin als rückschrittlich gegenüber den Innovationen und Erfolgen der jungen Quantentheorie. Einstein, so dachte man, sei ein Vertreter eines überholten Weltbildes, das in seiner Nähe zum Determinismus Spinozas dem Weltbild der modernen Physik unvereinbar gegenüberstehe.⁴ Diese Einschätzung hat sich nun in den letzten Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts gründlich geändert. Einsteins Auffassungen zur Quantenmechanik sind bei zahlreichen Wissenschaftlern auf

² Brief an Max Born vom 4.12.1926, in: Einstein et al. 1969 129 f. (Hervorhebung im Original).

³ Vgl. Kouznetsov 1967, Naess 1983, Paty 1986, Jammer 1995.

⁴ Als exemplarische Vertreter dieser Ansicht können Wolfgang Pauli und Werner Heisenberg gelten, zur Kritik vgl. Jammer 1982 und Fine 1986.

ein erneutes Interesse gestoßen. Physiker, die sich wie beispielsweise Anton Zeilinger mit den Grundlagenproblemen der Quantenmechanik beschäftigen, würdigen Einstein als einen der wenigen, die erkannt haben, dass diese Theorie grundlegend unser physikalisches Verständnis der Welt herausfordert.⁵ Wissenschaftshistoriker haben die wegweisenden Debatten um die Interpretation der Quantenmechanik zwischen Einstein und Bohr detaillierten Untersuchungen unterzogen;⁶ Wissenschaftsphilosophen haben Einsteins inhaltliche Voraussetzungen der Naturerkenntnis und sein realistisches Verständnis von wissenschaftlichen Theorien rekonstruiert.⁷ Die dabei entstandenen Analysen nicht nur seiner Kritik, sondern auch seiner positiven Beiträge zur Begründung der Quantenmechanik haben teilweise zu überraschend neuen Sichtweisen seiner Position geführt.

Unter Einsteins Texte zur Quantenmechanik, die im Fokus der gestiegenen Aufmerksamkeit stehen, fallen allerdings nicht diejenigen, in denen er seine Behauptung, dass Gott nicht würfele, ausspricht. So häufig diese Behauptung in der Sekundärliteratur erwähnt wird, so selten wird sie einer näheren Deutung für wert gehalten.⁸ Diese Zurückhaltung ist insofern angemessen, als die Metaphorik des Satzes einen weiten Interpretationsspielraum lässt, den Einstein nicht durch nähere Erläuterungen eingeschränkt hat.⁹ Dennoch glaube ich, dass der Einstellungswandel gegenüber Einsteins Bewertung der Quantenmechanik auch ein neues Licht auf seinen nicht würfelnden Gott wirft. Einige neuere Arbeiten

⁵ Zeilinger 2000 640, vgl. auch Zeilinger 2003, für das Einsteins Name titelgebend ist.

⁶ Zur Debatte zwischen Einstein und Bohr vgl. Whitaker 1996 und Held 1998.

⁷ Übersichten bieten Fine et al. 1998 und Howard 2004.

⁸ Eine Ausnahme bildet die Diskussion von Stent 1979.

⁹ Einsteins Wort, daß Gott nicht würfelt, findet sich außer in dem Brief vom 4.12.1926 (s.o.) auch in einem weiteren an Max Born vom 7.9.1944 (s.u.) und in einem an C. Lanczos v. 21.3.1942 (zit. in: Calaprice 1996 176 und Hoffmann and Dukas 1972 Chap. 10). Seine erste Verbreitung hat es eher auf mündlichem als auf schriftlichem Weg gefunden. Über den Solvay-Kongreß der Physiker im Herbst 1927 berichtet Heisenberg: "Wir wohnen alle im gleichen Hotel, und die schärfsten Diskussionen wurden nicht im Konferenzraum, sondern während der Mahlzeiten im Hotel geführt. Bohr und Einstein trugen die Hauptlast dieses Kampfes um die neue Deutung der Quantentheorie. [...] 'Der liebe Gott würfelt nicht', das war eine Wendung, die man in diesen Diskussionen oft von [...] Einstein] hören konnte" (Heisenberg 1969 127).

heben hervor, dass Einsteins Kritik an der statistischen Deutung der Quantenmechanik nicht Ausdruck eines überholten Weltbildes ist, sondern umgekehrt auf rückschrittliche Elemente dieser Deutung, wie sie von Werner Heisenberg und Niels Bohr weiterentwickelt wurde, hinweist.¹⁰ Könnte dies dem Satz vom nicht würfelnden Gott eine bestimmte Interpretationsrichtung vorgeben?

Einsteins Position zur statistischen Deutung der Quantenmechanik ist physikalisch höchst voraussetzungsvoll. Zudem ist sie nicht einheitlich. Mehrfach haben sich die Gegenstände und Inhalte seiner Kritik verändert,¹¹ was zum Teil auf einen grundlegenden Wandel seiner Wissenschaftsauffassung zurückging, der wiederum in Beziehung zur Entwicklung seiner religiösen Einstellung stand.¹² Entsprechend komplex gestaltet sich ihre Rezeptionsgeschichte. Sie hat in der Physik eine andere Verlaufsform als in der Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftsphilosophie genommen, so dass auch divergierende Forschungsergebnisse vorliegen.¹³ Ich werde im folgenden auf die Darstellung vieler Einzelheiten verzichten müssen und mich auf eine Diskussion exemplarischer Argumente konzentrieren.

Ich werde in drei Schritten vorgehen. Der erste rekonstruiert Argumente, die dafür sprechen, Einsteins Wort, dass Gott nicht würfelt, als rückschrittlich aufzufassen. Im zweiten Schritt benenne ich einige Forschungsergebnisse der letzten Jahrzehnte, die mir für eine Neubewertung seiner Position zur dominanten Interpretation der Quantenmechanik wichtig erscheinen. Im letzten Schritt

¹⁰ Fine 1986, Held 1998, Beller 1999.

¹¹ Dass sich Einsteins Auffassungen zur Interpretation der Quantenmechanik wandelten, behaupten Jammer 1982 und Held 1998, daß sie im wesentlichen unverändert blieben, meint hingegen Fine 1986.

¹² Holton 1981 230 ff. Religiöse Fragen haben für Einstein eine nicht unwichtige Rolle gespielt und auch sein wissenschaftliches Denken beeinflusst. Vgl. hierzu die bisher umfassendste Darstellung Jammer 1995.

¹³ In der Wissenschaftsgeschichte und -philosophie hat tendenziell ein größeres Interesse an Einsteins Arbeiten als in der Physik bestanden, was mit der positiven Aufnahme der sogenannten Theorien der verborgenen Parameter, die eine Verwandtschaft zu Einsteins Vorstellungen haben, in diesen geisteswissenschaftlichen Disziplinen zusammenhängt. Das Verhältnis zwischen diesen Theorien und Einsteins Vorstellungen diskutieren Fine 1986 56 ff. und Cushing 1994 146 ff.

werte ich diese Resultate für die Möglichkeiten einer Reinterpretation seines Satzes vom nicht würfelnden Gott aus.

1.

Dass Einsteins Kritik an der statistischen Deutung der Quantenmechanik seinen Zeitgenossen rückschrittlich vorkam, verwundert nicht, wenn man den Gegenstand seiner Kritik etwas genauer betrachtet. Die von ihm abgelehnte Deutung knüpft an der vielleicht revolutionärsten Erkenntnis der Atomphysik des vergangenen Jahrhunderts an: Die gemessenen atomphysikalischen Einzelereignisse – z.B. beim radioaktiven Zerfall oder bei der Beugung von Teilchenstrahlen – lassen sich nicht exakt, sondern nur statistisch voraussagen. Wann beispielsweise ein radioaktives Atom ein bestimmtes Teilchen emittiert, ist im mathematischen Sinn zufällig;¹⁴ der Zeitpunkt ist prinzipiell beliebig. Man kann nur Wahrscheinlichkeiten für die Emission angeben, die bei einer großen Anzahl von Teilchen allerdings zu einer hohen Präzision der vorausgesagten Messwerte führen.

Wahrscheinlichkeiten wurden nicht erst mit der Quantenmechanik in die Physik eingeführt. Sie spielten schon in mechanistischen Atomtheorien des 19. Jahrhunderts, mit denen Einstein bestens vertraut war, eine Schlüsselrolle.¹⁵ Aus statistischen Annahmen über die mechanische Bewegung der unsichtbaren Atome wurden mit diesen Theorien messbare Wärmeerscheinungen erklärt. Für die Erklärungen benötigte man kein exaktes Wissen über den Bewegungszustand der einzelnen Atome. Es reichten unter anderem Durchschnittswerte über die Zustände einer bestimmten Anzahl von Atomen, um die Wärmeerscheinungen eines Stoffes, der als aus diesen Teilchen zusammengesetzt gedacht war,

¹⁴ Den Begriff der mathematischen Zufälligkeit erläutert Drieschner 2002 80 und 129 f.

¹⁵ Brush 1976 stellt die mechanistischen Atomtheorien des 19. Jahrhunderts umfassend dar.

abzuleiten. Dieses Verfahren konnte sich mit der Vorstellung verbinden, dass bei vorgegebenen Durchschnittswerten die Zustände der einzelnen Atome zufällig bestimmt sind. In einem Heißluftballon beispielsweise wären die Richtungen, mit denen die einzelnen Atome durch den Raum fliegen, völlig zufällig verteilt, im Durchschnitt aber wären alle Richtungen gleichmäßig vertreten, weswegen der Ballon nach allen Seiten gleichmäßig prall ist. Würde man die Atombewegungen in dem Ballon in einem Modell nachbilden, könnte man die Komponenten der Flugrichtung eines einzelnen Atoms mit einem Würfel bestimmen. Würde man die Flugrichtungen aller Atome erwürfeln, würde jede mit gleicher Wahrscheinlichkeit vorkommen.

Weiter nahm man an, dass Wahrscheinlichkeiten Ausdruck einer Unkenntnis sind. Man glaubte nicht nur, das Wissen über die Bewegung von einzelnen Atomen nicht zu brauchen, man hätte auch nicht über die Verfahren verfügt – die Möglichkeit dieses Wissens vorausgesetzt –, es zu ermitteln. Wo exaktes Wissen fehlt, können Wahrscheinlichkeiten an seine Stelle treten. In diesem Sinn zeugen Wahrscheinlichkeiten von einer Unvollständigkeit der Erkenntnis, die sich möglicherweise beseitigen lässt. Warum sollte es in Zukunft nicht Verfahren geben, so dachte man, die es erlauben, den mechanischen Bewegungszustand eines Gasatoms exakt zu ermitteln und alle Ursachen anzugeben, die zu diesem Zustand geführt haben? Im Resultat würde man dann die Bewegungen des Atoms und seine Zusammenstöße mit anderen Atomen präzise zurückverfolgen können. Dieselben Überlegungen lassen sich auch auf den Wurf eines Würfels anwenden. Würde man die Bedingungen der Bewegungen genau kennen, könnte man exakt voraussagen, wie der Würfel fällt. Man würde dann wissen, wie der Zufall nach kausalen Gesetzen produziert wird.

An diesen Überlegungen aus dem Themenkreis der klassischen Physik lassen sich beispielhaft elementare Beziehungen zwischen Zufälligkeit und Kausalität verdeutlichen, die für das Verständnis von Einsteins Position zur Quantenmechanik grundlegend sind. Zufälligkeit *kann* die Abwesenheit von Ursachen meinen und in dieser Bedeutung der Kausalität widersprechen. Ein hierzu pas-

sender Kausalitätsbegriff bezeichnet die gesetzmäßige Verknüpfung zeitlich aufeinanderfolgender Ereignisse oder Ereignisklassen. Wie der Begriff der Kausalität umfasst aber auch der des Zufalls verschiedene Bedeutungen.¹⁶ Zufall *muss* deshalb nicht in Gegensatz zur Kausalität als gesetzmäßiger Ereignisverknüpfung stehen. Auch ein Ereignis, dessen vorangehende Ursachen nur aus praktischen, nicht aber aus prinzipiellen Gründen unbekannt sind, kann man zufällig nennen. Dies ist die Bedeutung, in der die klassische Physik die Atombewegungen für zufällig hielt und die durch die Metapher des Würfels zum Ausdruck gebracht wird. Das Würfeln beschreibt im allgemeinen die Herstellung von Zufallsereignissen und im besonderen ein Herstellungsverfahren für solche Ereignisse, die kausalen Gesetzen folgen.

Der für die klassische Physik des 19. Jahrhunderts typische Zusammenhang von Kausalität und Zufall lässt sich auch durch ein Schichtenmodell veranschaulichen.¹⁷ Die unterste Schicht wird durch einzelne atomare Objekte gebildet, die strengen Kausalgesetzen folgen. Die darüber liegende Ebene umfasst eine größere Anzahl dieser Objekte, wie z. B. die Atome in einem Heißluftballon. Hier scheinen die Bewegungen der einzelnen Objekte zufällig zu sein bzw. dürfen sie als zufällig angenommen werden. Im Modell der klassischen statistischen Thermodynamik produzieren diese Zufallsbewegungen die Gesetzmäßigkeiten der sichtbaren Welt, wie etwa das (nicht kausale) Gesetz der Beziehung von Druck und Volumen eines Gases oder das (kausale) Gesetz der Wärmeleitung.¹⁸

Die statistische Interpretation der Quantenmechanik behauptet die Unanwendbarkeit der klassischen Vorstellungen im Bereich der kleinsten Dimensionen. Ihr zufolge sind die Wahrscheinlichkeiten der Quantenmechanik nicht Ausdruck einer Unkenntnis über den Zustand der atomaren Objekte, sondern ein Charakte-

¹⁶ Zu den Bedeutungen des Zufallsbegriffes: Erbrich 1988 11 ff. und Krickeberg (Hg.) 1999, zum Kausalitätsbegriff in der Physik: Carrier 1992.

¹⁷ Vgl. Holton 1981 38 ff.

¹⁸ Das Boyle-Mariottesche Gesetz für die Beziehung von Druck und Volumen bei idealen Gasen ist im hier genannten Sinn nicht kausal, weil es nicht wie die Wärmeleitung zeitabhängig ist.

ristikum ihres Zustandes. Anders formuliert, postuliert die statistische Interpretation ein irreduzibles Zufallselement als Wesensmerkmal ihrer Objekte. Im Bild des eben genannten Schichtenmodells bestreitet sie die Existenz einer untersten kausalen mikrophysikalischen Schicht. Statt dessen geht sie von der Annahme aus, dass den quantenmechanischen Objekten eine Unschärfe eigen ist, die dafür sorgt – um eine populäre Formulierung von Manfred Eigen und Ruthild Winkler zu gebrauchen –, "daß man niemals *gleichzeitig* genau wissen kann, *wo* etwas ist und *wie schnell* es sich bewegt".¹⁹ Die ist eine Konsequenz der auf Werner Heisenberg zurückgehenden Unbestimmtheitsrelation. Auf die Zusammenstöße von mikroskopischen Objekten angewandt, führt sie zur Vorstellung, dass sich ihnen keine wohlbestimmten raumzeitlichen Bahnen zuschreiben lassen. Um Einsteins Position zu umreißen, reicht diese nur sehr skizzenhafte Darstellung der statistischen Deutung schon aus. Dass sie in einer kaum übersehbaren Zahl unterschiedlicher Varianten vertreten wurde und wird, kann ich hier nur erwähnen.²⁰

Einstein war mit der statistischen Deutung zeitlebens nicht einverstanden,²¹ weil seiner Auffassung nach eine Theorie, die auf die Angaben von Ursachen für die Zufälligkeit ihrer Phänomene verzichtet, unvollständig ist. In einem späteren Brief an Max Born aus dem Jahr 1944 heißt es:

"In unserer wissenschaftlichen Erwartung haben wir uns zu Antipoden entwickelt. Du glaubst an den würfelnden Gott und ich an volle Gesetzlichkeit in einer Welt von etwas objectiv Seiendem".²²

Nicht gegen den mathematischen Formalismus der Quantenmechanik, sondern gegen seine Interpretation als vollständige Theorie wendet sich Einstein. Die

¹⁹ Eigen und Winkler 1983 36 (Hervorhebungen im Original).

²⁰ Aus der ebenfalls stattlichen Anzahl von Übersichten über die Interpretationen der Quantenmechanik seien Cushing 1998, Auletta 2001 und Ruetsche 2002 genannt.

²¹ Für die Kontinuität seiner Auffassung argumentiert Fine 1986 12 ff.

²² Brief an Born vom 7.9.1944, in: Einstein et al. 1969 204.

Wahrscheinlichkeitsinterpretation sei den Phänomenen angemessen, könne aber nicht das letzte Wort ihres theoretischen Verstehens sein. Man müsse die zukünftige Möglichkeit einer deterministischen Grundlegung der physikalischen Theoriebildung offen lassen.²³ Mit dieser Option klagt Einstein nicht den Begriff einer durch die Gesetze der klassischen Mechanik exakt bestimmbar Ursache ein. Sein Begriff der "vollen Gesetzlichkeit" meint eine Kausalität (im weiten Sinn), nach der alle Phänomene der Natur als notwendige Erscheinungen einer zu Grunde liegenden Ordnung begriffen werden können. "Begreiflichkeit" bedeutet nach Einstein durch "Schaffung allgemeiner Begriffe und Beziehungen zwischen diesen Begriffen sowie durch irgendwie festgelegte Beziehungen zwischen Begriffen und Sinneserlebnissen irgendeine Ordnung" herstellen.²⁴ Die angestrebte deterministische Grundstruktur schließt die gesetzmäßige Verknüpfung zeitlich aufeinanderfolgender Ereignisse (Kausalität im engen Sinn) ein und bildet ein rationalistisches Prinzip der Naturerklärung, nach dem Einstein die Quantenmechanik bewertet.²⁵ Statt sich auf bestimmte mikrophysikalische Tatsachen zu berufen, bezieht es sich auf einen allgemeinen Erfahrungsbestand der Naturwissenschaft: die durch die Bewährung nicht statistischer Theorien empirisch belegte Begreifbarkeit der Natur.

Weil es freilich keine Garantie dafür gibt, dass die Natur in Zukunft in dieser Weise begreifbar sein wird, mündet das rationalistische Prinzip in einen Glaubenssatz, dem Einstein durch eine religiöse Deutung Gewicht zu verleihen versteht. Eine der prägnantesten Formulierungen dieses Zusammenhanges findet

²³ Einstein macht diese Position am Ende seines Aufsatzes "Das Fundament der Physik" von 1940 deutlich: Vom "empirischen Standpunkt aus [ist] die Konstatierung einer streng deterministischen Struktur des Naturgeschehens [...] prinzipiell ausgeschlossen [...]. Es ist deshalb wohl ausgeschlossen, daß künftige Erfahrungen die Physik dazu zwingen können, eine statistische theoretische Grundlage zugunsten eines deterministischen theoretischen Fundaments wieder zu verlassen. Es handelt sich in dieser Frage logisch betrachtet um zwei Möglichkeiten, zwischen denen wir im Prinzip wählen können" (Einstein 1940 120).

²⁴ Einstein 1936 65 f.

²⁵ Kausalität als gesetzmäßige Verknüpfung zeitlich aufeinanderfolgender Ereignisse beinhaltet Determinismus im Sinne einer eindeutigen Festlegung der zeitlichen Entwicklung von Systemzuständen. Sofern in diese Festlegung auch nicht zeitliche Relationen eingehen, kann Determinismus nicht mit Kausalität als Ereignisverknüpfung gleichgesetzt werden. Zum Verhältnis von Kausalität und Determinismus vgl. Carrier 1992.

sich im Essay "Über den gegenwärtigen Stand der Feldtheorie" von 1929, aus dem ich etwas ausführlicher zitiere:

"Die Theorie hat zwei Sehnsüchte:

1. möglichst alle Erscheinungen und deren Zusammenhänge zu umfassen [...];

2. [...] Wir wollen nicht nur wissen *wie* die Natur ist (und *wie* ihre Vorgänge ablaufen), sondern wir wollen auch nach Möglichkeit das vielleicht utopisch und anmaßend erscheinende Ziel erreichen zu wissen, warum die Natur *so und nicht anders ist*.

Auf diesem Gebiete liegen die höchsten Befriedigungen des wissenschaftlichen Menschen. [...] Hat man nämlich einmal die Grundhypothese der molekular-kinetischen Theorie der Wärme angenommen, so erlebt man gewissermaßen, daß selbst Gott jene Zusammenhänge nicht anders hätte festlegen können, als sie tatsächlich sind, ebenso wenig, als es in seiner Macht gelegen wäre, die Zahl 4 zu einer Primzahl zu machen. Dies ist das prometheische Element des wissenschaftlichen Erlebens [...]. Hier hat für mich stets der eigentliche Zauber wissenschaftlichen Nachdenkens gelegen; es ist sozusagen die religiöse Basis des wissenschaftlichen Bemühens".²⁶

Obwohl Einstein nicht den Begriff einer mechanisch bestimmbar Ursache verteidigt, vertritt er doch ein Anliegen, das zurückgreift auf die Vorstellungen der klassischen Physik des 19. Jahrhunderts und auf das damit verbundene Weltbild einer strengen Naturgesetzlichkeit, die auf einer fundamentalen Ebene wirksam sein und dort keinen Raum für zufällige Ereignisse vorsehen soll. In diesem Sinn verweist sein Wort, dass Gott nicht würfelt, auf ein überholtes Programm der deterministischen Naturerklärung.

²⁶ Einstein 1929 126 f. (Hervorhebungen im Original).

2.

In der eben zitierten Stelle nennt Einstein noch ein weiteres Element seiner Wissenschaftsauffassung, auf das ich hinweisen möchte, da es für seine Kritik an der statistischen Deutung und das weitere Schicksal der Rezeption seiner Würfelmetapher ebenfalls relevant ist. Die Theorie soll, "alle Erscheinungen und deren Zusammenhänge [...] umfassen". Dieser Universalitätsanspruch verlangt das Streben nach einer einheitlichen, alle Phänomene einbegreifenden physikalischen Theorie.²⁷ Sofern die statistische Deutung der Quantenmechanik die Behauptung einer irreduziblen Zufälligkeit auf die Mikroebene beschränkt, ist sie mit dem Universalitätsanspruch unvereinbar. In der bis heute wohl einflussreichsten Variante der statistischen Deutung, der sogenannten Kopenhagener Interpretation, spielt diese Beschränkung des Anwendungsbereiches der Quantenmechanik eine zentrale Rolle. Die Kopenhagener Interpretation – nach dem Ort, an dem sich das von Niels Bohr geleitete Institut befand, benannt – behauptet, dass zwischen der Quantenwelt und der durch die klassische Physik beschreibbaren makroskopischen Welt strikt unterschieden werden müsste. Die Gesetze der Quantenmechanik können demnach so wenig auf die makroskopische Welt Anwendung finden wie umgekehrt die Gesetze der klassischen Physik auf die Quantenwelt. Allerdings seien die Quantenphänomene nur durch Apparate der klassischen Physik messbar und nur in deren Begriffen, die einem lebensweltlichen Verständnis meist noch zugänglich seien, beschreibbar. Aufgrund dieser Grenzen entziehe sich die Natur der gemessenen Quantenobjekte der Erkenntnis.

Einsteins Kritik richtet sich gegen diese Trennung von mikroskopischer und makroskopischer Welt. In einem Gedankenexperiment, das Schrödingers berühmter Katze verwandt ist, zeigt er, welche absurden Konsequenzen sich aus der Quantenmechanik ergeben, wenn man ihre Gesetzmäßigkeiten auf makroskopi-

²⁷ Jammer 1982 68.

sche Phänomene anwendet.²⁸ Dass die Quantenmechanik in der makroskopischen Welt nicht gelten kann, wertet er als Ausdruck ihrer Unvollständigkeit. Umgekehrt müssen nach Einstein die in der sichtbaren makroskopischen Welt gültigen Grundsätze der physikalischen Erkenntnis auch den Mikrobereich mit einbegreifen. Drei dieser Grundsätze möchte ich hervorheben: Einstein vertritt erstens einen wissenschaftlichen Realismus. Er postuliert die Existenz einer unabhängig von der Erkenntnis bestehenden Objektwelt, auf die die Aussagen der Theorien (nicht korrespondenztheoretisch) bezogen sind. Zweitens hält er es für evident, dass die Objekte der physikalischen Erkenntnis immer einen wohldefinierten Ort im Raum und in der Zeit haben. Schließlich nimmt er drittens an, dass Objekte, die "in verschiedenen Teilen des Raumes liegen", "zu einer bestimmten Zeit [...] eine voneinander unabhängige Existenz" haben, d.h. sich in ihren Eigenschaften "nicht unmittelbar beeinflussen".²⁹ Wiederum weist Einstein nach, dass die Kopenhagener Interpretation diesen Grundsätzen nicht gerecht wird.

Neben Einsteins Forderung nach einer im weiten Sinn kausalen Beschreibung sind es vor allem diese Grundsätze, die unter Physikern auf Ablehnung gestoßen sind. Sie entstammen, so haben seine Kritiker angenommen, dem Alltagsdenken und können auf die Mikrowelt nicht übertragen werden. Die Quantenmechanik lasse weder eine realistische noch eine anschauliche Interpretation zu. Diese Behauptungen geben der Kopenhagener Deutung bis heute Auftrieb.

Neuere wissenschaftshistorische Forschungen, auf deren Ergebnisse ich jetzt zu sprechen kommen möchte, haben allerdings gezeigt, dass die Verhältnisse wesentlich verwickelter sind, als man lange Zeit glaubte. Eine Schlüsselrolle nimmt dabei der von Einstein zusammen mit Boris Podolsky und Nathan Rosen

²⁸ Einsteins Brief an Erwin Schrödinger vom 19.6.1935, zitiert in Held 1998 131 f. und Fine 1986 69 f. Den Zusammenhang von Einsteins und Schrödingers Gedankenexperiment kommentieren Held 1998 130 ff. und Fine 1986 64 ff. ausführlich.

²⁹ Einstein 1948 321 und 323, zur Diskussion dieses Textes vgl. Esfeld 2002 46 ff.

1935 veröffentlichte Artikel "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" ein. Dieser Artikel, der an Einsteins eben genannten Grundsätzen der physikalischen Erkenntnis anknüpft, entwickelt zum Nachweis der Unvollständigkeit der Quantenmechanik ein Gedankenexperiment, das sich – Jahrzehnte später – leicht modifiziert in eine reale Versuchsanordnung übersetzen ließ. Nach theoretischen Vorarbeiten von David Bohm und John Bell wurde experimentell der Nachweis erbracht, dass zwischen den Messwerten an zwei geeignet präparierten, räumlich voneinander getrennten Quantenobjekten Korrelationen bestehen. In der quantenmechanischen Beschreibung bilden die beiden Objekte zusammen ein System, das sich in einem sogenannten verschränkten Zustand befindet. Weil die messbaren Eigenschaften dieser Objekte voneinander abhängig sind, ist es unmöglich, jedem von ihnen jeweils für sich einen quantenmechanischen Zustand zuzuordnen. Das aber widerspricht den Thesen des Artikels von Einstein, Rosen und Podolsky.³⁰

Gründe dafür, dass Einsteins Kritik von diesen Ergebnissen jedoch nur bedingt betroffen ist, hat Arthur Fine 1986 in seinem vielbeachteten Buch "The Shaky Game" dargelegt. Nach Fines Recherchen und Analysen kann Einsteins Verfasserschaft an dem von ihm mit unterzeichneten Artikel nicht als gesichert gelten. Nicht Einstein, sondern Rosen habe das Papier verfasst. Ob Einstein den Text vor der Veröffentlichung überhaupt gelesen habe, sei unklar.³¹ Einsteins Position weiche in wesentlichen Punkten von der Argumentation des Artikels ab. Während der Artikel von Messresultaten auf reale Eigenschaften der gemessenen Objekte schließe, nehme Einstein direkt auf diese Eigenschaften Bezug. Die von ihm angenommene "unabhängige Existenz" der Objekte müsse den quantenmechanischen Korrelationen nicht widersprechen.³²

³⁰ Einführend mit weiteren Hinweisen: D'Espagnat 1980 und Shimony 1988.

³¹ Fine 1986 35 f.

³² Fine 1986 59 ff. Eine andere Lesart vertritt Howard 1985.

Fines Untersuchungen, die viel zur Rehabilitation von Einsteins Kritik beigetragen haben, stehen nicht allein. Wissenschaftshistoriker wie Max Jammer und Mara Beller haben auf den beachtlichen Einfluss von Einsteins Beiträgen zur Begründung der Quantenmechanik hingewiesen.³³ Einstein wirkte nicht nur mit seinen eigenen theoretischen Arbeiten, wie der Erklärung des Photoeffektes und der Ausarbeitung der Quantentheorie der idealen Gase. Er hatte auch durch persönliche Kontakte, durch eine intensive Korrespondenz und zahllose Gespräche mit Kollegen einen erheblichen Anteil an der Entwicklung der Quantenphysik.

Das Interesse an der historischen Klärung der Rolle, die Einstein bei der Formulierung der Quantenmechanik gespielt hat, geht auf die Aktualität seiner Kritik an der statistischen Deutung zurück. Die verfügbaren Interpretationen des mathematischen Formalismus liefern bis heute kein befriedigendes Verständnis der mikrophysikalischen Phänomene. Zwar hat sich die Quantenmechanik als physikalische Theorie bisher in einer wohl beispiellosen Weise bewährt. Sie zählt unangefochten zu den Grundlagentheorien der Physik. Doch über die Natur der Prozesse, die den mess- und berechenbaren Phänomenen zu Grunde liegen, hat man noch keine Klarheit gewonnen. Die von Einstein kritisierte Variante der statistischen Deutung hat in den vergangenen Jahrzehnten deutlich an Boden verloren. Gegen den von ihr erhobenen Vollständigkeitsanspruch sind ernstzunehmende Einwände geltend gemacht worden. Es lässt sich bezweifeln, ob von der Zufälligkeit der Werte gemessener Einzelereignisse auf eine indeterministische Fundamentalstruktur der Naturprozesse geschlossen werden kann. Die Zufälligkeit braucht keine intrinsische Eigenschaft der Quantenobjekte zu sein. Sie könnte etwa erst durch den Prozess ihrer Messung oder allgemeiner durch die Wechselwirkung mit ihrer Umgebung hervorgerufen sein.³⁴ Als solche wäre

³³ Jammer 1982, Beller 1999.

³⁴ So erklären beispielsweise die Theorien der Dekohärenz den Übergang von der quantenmechanischen Unbestimmtheit zur physikalischen Beobachtung des zufällig eingetretenen Endzustandes durch die Wechselwirkung des quantenmechanischen Systems mit seiner Umgebung. Vgl. zur Übersicht Blanchard et al. 2000

sie durch die bekannten Theorien der Physik noch nicht erfasst. Zudem ist es David Bohm gelungen, eine kausale Theorie der Quantenphänomene zu entwickeln, die zu den gleichen Wahrscheinlichkeitsvorhersagen wie die Quantenmechanik führt.³⁵ Demnach ist man aus Sicht der theoretischen Physik des ganz Kleinen auf die Annahme irreduzibler Zufallsereignisse nicht mehr notwendig angewiesen.

Die gegenwärtig erörterten Interpretationsprobleme betreffen nicht nur den Geltungsanspruch der statistischen Deutung. Nach wie vor fehlt auch ein anschauliches Verständnis der quantenmechanischen Prozesse. So weiß man seit den Anfängen der Quantenmechanik, dass, grob gesprochen, bestimmte Eigenschaften der gemessenen Phänomene von der Art der verwendeten Messapparaturen abhängen. Will man diese Abhängigkeit ausnutzen, um von ihr auf die den Phänomenen zugrunde liegenden Vorgänge zurückzuschließen, erhält man Resultate, die sich anschaulich nicht konsistent interpretieren lassen. Der berühmte Welle-Teilchen-Dualismus ist ein Beispiel für eine solche Verständnisschwierigkeit. Quantenmechanische Objekte zeigen in einigen Messanordnungen Welleneigenschaften und in anderen Anordnungen Teilcheneigenschaften.

Der Versuch der Kopenhagener Deutung, diese Problematik durch die Trennung von Mikro- und Makrophysik zu umgehen, hat in den letzten Jahrzehnten viel von seiner Plausibilität eingebüßt. Experimente der jüngsten Zeit haben immer deutlicher gemacht, dass sich die Grenze zwischen dem ganz Kleinen und den mittleren Größenordnungen nicht scharf ziehen lässt. Quanteneigenschaften treten nicht nur in subatomaren oder atomaren Dimensionen auf. Sie sind mittlerweile auch an Molekülverbänden im Nanometerbereich oder an makroskopischen Systemen bei tiefen Temperaturen (Tunneleffekt an unterbrochenem supraleitendem Ring) nachgewiesen; in den Bereichen der Nachrichtenver-

³⁵ Zu Bohms Theorie existiert eine umfangreiche Sekundärliteratur, aus der einleitend Albert 1994 und Cushing 1994 genannt seien.

schlüsselung, der Kommunikation und Datenverarbeitung zeichnen sich spektakuläre technische Anwendungen von Quanteneigenschaften ab.³⁶

Diese Entwicklungen haben nicht zu einer Lösung, sondern zu einer Verschärfung der Interpretationsprobleme der Quantenmechanik geführt. Interpretationen, die im Gegensatz zur immer noch verbreiteten Kopenhagener Interpretation von einem wissenschaftlichen Realismus ausgehen, haben beträchtlich an Einfluss gewonnen.³⁷ Mit der gewachsenen Bedeutung des Realismus für das Verständnis der Quantenmechanik haben sich auch die Bedingungen der Rezeption von Einsteins Kritik an der statistischen Deutung verbessert. Einsteins Aktualität besteht dabei nicht darin, dass die realistischen Interpretationen unmittelbar an seinen Überlegungen anknüpfen könnten. Er hat nur einzelne Elemente einer alternativen realistischen Interpretation skizziert, die keine hinreichende Grundlage für eine Ausarbeitung bieten.³⁸ Seine Auseinandersetzung mit der Quantenmechanik konzentrierte sich auf die Kritik ihrer Deutung als einer vollständigen Theorie. Mit der Zurückweisung des Vollständigkeitsanspruches der statistischen Interpretation verband Einstein die Überzeugung, dass die mikrophysikalischen Phänomene einen grundlegend neuen Theorietyp erfordern. Die Grundbegrifflichkeit der Quantenmechanik sollte seiner Auffassung nach nicht durch kleine Korrekturen verbessert, sondern durch einen anderen "Ausgangspunkt" ersetzt werden.³⁹ In seinem autobiographischen Essay von 1949 schreibt er:

"Meine Meinung ist die, daß die gegenwärtige Quantentheorie bei gewissen festgelegten Grundbegriffen, die im wesentlichen der klassischen Mechanik entnommen sind, eine optimale Formulierung der Zusammenhänge darstellt. Ich glaube aber, daß diese Theorie keinen brauchbaren Ausgangspunkt für die

³⁶ Über die neueren technischen Anwendungen von Quantenphänomenen informiert Audretsch (Hg.) (2002).

³⁷ Die Möglichkeiten realistischer Interpretationen der Quantenmechanik diskutiert beispielsweise Rae 1996.

³⁸ Fine 1986 53 ff.

³⁹ Einstein vertritt damit gegenüber der Quantenmechanik eine Auffassung, die Heisenbergs Konzeption der "abgeschlossenen Theorien" (Heisenberg 1948) verwandt ist.

künftige Entwicklung bietet. Dies ist der Punkt, in welchem meine Erwartung von derjenigen der meisten zeitgenössischen Physiker abweicht".⁴⁰

Einstein sagt nicht, warum die Quantentheorie "keinen brauchbaren Ausgangspunkt" darstellt. Ich möchte mich der Deutung von Arthur Fine anschließen, dass Einsteins Formulierung aber doch die Vermutung nahe legt, es mangle der Quantenmechanik gerade wegen ihres Bezuges zur klassischen Physik an Zukunftstauglichkeit.⁴¹ Damit würde Einstein den Spieß der gegen ihn gerichteten Kritik umdrehen: Nicht seine Suche nach einer realistischen und kausalen Theorie der Mikrophysik, sondern die vorliegende Quantenmechanik wäre noch zu sehr einer traditionellen Begrifflichkeit verhaftet. Mit diesem Vorwurf würde er nicht nur an den formalen Strukturanalogien und inhaltlichen Beziehungen ansetzen, die zwischen der klassischen Mechanik und der Quantenmechanik bestehen.⁴² Er würde auch einen zentralen Punkt der Kopenhagener Interpretation treffen, der den Bezug zur klassischen Begrifflichkeit zum Programm ihrer Deutung der Quantenmechanik erhebt. Denn ihr zufolge lassen sich die mikrophysikalischen Phänomene, wie erwähnt, nur mit Begriffen der klassischen Physik beschreiben.

Auch die neueren Aufarbeitungen der Debatten zwischen Einstein und Bohr haben deutlich gemacht, dass Einstein mit seiner Kritik wahrscheinlich auf diejenigen Elemente der Kopenhagener Deutung abzielt, deren Fragwürdigkeit ihrem offenkundigen Bezug zum Vorstellungskreis der klassischen Physik entspringt. Paradigmatisch für diese Stoßrichtung ist seine Ablehnung der sogenannten "Störungsinterpretation". Sie geht auf Heisenberg zurück, wurde auch von Bohr vertreten und ist heute noch sehr einflussreich.⁴³ Nach dieser Interpre-

⁴⁰ Einstein 1949 32 f.

⁴¹ Fine 1986 58.

⁴² Darrigol 1992.

⁴³ Held 1998 enthält eine einführende Charakterisierung der in Heisenberg 1927 enthaltenen Störungsinterpretation und stellt Einsteins Kritik umfassend dar; Beller 1999 diskutiert die Veränderung in Bohrs Position zu dieser Interpretation; Whitaker 1996 172 weist auf ihren aktuellen Einfluß hin.

tation resultiert der akasale Charakter der quantenmechanischen Messresultate daraus, dass die Objekte, auf die sie sich beziehen, durch den Messvorgang unvermeidlich und unkontrollierbar gestört werden. Das Argument kann mit einem von Heisenberg vorgeschlagenen Gedankenexperiment veranschaulicht werden. Um den genauen Ort und Impuls eines Elektrons zu messen, wird es mit einer Lichtquelle beleuchtet. Aus dem am Elektron reflektierten Licht soll die Information über die beiden Eigenschaften gewonnen werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Elektron durch das auftreffende Licht aus seiner Position abgelenkt wird. Den Aussagen der Quantenmechanik lässt sich entnehmen, dass die Größe dieser Wechselwirkung unbestimmbar ist. Heisenberg spricht von einer "unstetigen" Veränderung, die es unmöglich mache, den Ort und den Impuls zugleich exakt zu messen.⁴⁴ Das Fragwürdige dieses Arguments liegt in der stillschweigenden Voraussetzung, das Elektron habe anfänglich klassisch definierbare Orts- und Impulseigenschaften, die erst durch die Wechselwirkung mit dem Licht "gestört" würden. Der akasale Charakter würde demnach erst nachträglich auftreten und nicht zum Wesen der Objekte gehören. Insofern knüpft die Störungsinterpretation an einer Vorstellung an, die der klassischen Physik entspringt.⁴⁵

3.

Indem Einstein die Störungsinterpretation zurückweist, wendet er sich – so könnte man seine Kritik wohl interpretieren – gegen den Versuch, die Behauptung einer vermeintlich unhintergehbaren Akausalität mikrophysikalischer Prozesse mit Rückgriff auf Vorstellungen der klassischen Physik zu begründen. Dieses Beispiel zeigt, wie sich seine Ablehnung des Vollständigkeitsanspruches der statistischen Deutung mit dem Bemühen verbindet, traditionelle Vorstellungen in Frage zu stellen und den Boden für einen grundlegenden Neuanfang zu

⁴⁴ Heisenberg 1927 56.

⁴⁵ Sie unterscheidet sich darin von den in Anm. 34 genannten Überlegungen, die Zufälligkeit quantenphysikalischer Einzelereignisse aus der Wechselwirkung von Messobjekt und -apparatur zu erklären.

bereiten. Nicht eine Bindung an das überkommene Weltbild der Physik des 19. Jahrhunderts, sondern umgekehrt die Absicht, es zu überwinden, werden als mögliche Motive seiner Kritik deutlich. Folgt man dieser Sichtweise, dann erscheint auch seine Bemerkung, dass Gott nicht würfelt, in einem anderen Licht. Neben die grundsätzliche Ablehnung elementarer Zufallsereignisse tritt die Kritik am Versuch hervor, das Zustandekommen von Zufallsereignissen mit Hilfe klassischer Vorstellungen erklären zu wollen. Mit der Metapher des Würfels verbindet sich die Idee, dass Zufälle durch eine an sich kausal verfasste Natur hervorgebracht werden.⁴⁶ Würde man die Bedingungen der Bewegungen des Würfels nur genau erfassen können, dann würde man die Ursachen erkennen, aus denen die Resultate jedes Wurfes notwendig hervorgehen. Ähnliche Überlegungen lassen sich mit der Störungsinterpretation verbinden: Würde man die Störung durch die Beobachtung minimieren können, dann würde sich die Natur in ihrer an sich kausalen Verfassung zeigen.⁴⁷ Mit der Würfelmetapher könnte Einstein also auch zum Ausdruck gebracht haben wollen, dass die Zufälligkeit der quantenmechanischen Phänomene nicht in Analogie zum Würfelwurf zustande kommt. Dieser Sichtweise kommt die sprachliche Form der Verneinung entgegen. Sie erlaubt es Einstein, mit seiner Metapher nicht nur eine Bedingung der Naturgesetze auszusprechen, sondern auch die Überzeugung seiner Gegner zu kennzeichnen. In dem zitierten Brief an Born von 1944 heißt es dementsprechend: "Du glaubst an den würfelnden Gott".

Das neue Licht, das die neueren Forschungen über Einsteins Kritik an der statistischen Deutung der Quantenmechanik auf seine Würfelmetapher werfen, kann jedoch andere Lesarten nicht gänzlich entkräften. Zum einen zeigen auch diese Forschungen, dass Einsteins Position, die vor allem durch Kritik gekennzeichnet war, nicht eindeutig war. In der Auseinandersetzung um die Interpretationen der Quantenmechanik finden sich klassische Inhalte ebenso unter den Gegenständen

⁴⁶ Beller 1999 61 f.

⁴⁷ Folse 1985.

seiner Kritik wie in seinen eigenen Vorstellungen. Zudem ist, wie Einstein selbst bemerkte, der Begriff des "Klassischen" nicht klar bestimmt. Seine nähere Diskussion müsste etwa auch die für Einstein zentrale Frage der Bedeutung von Feldtheorien für die Einheit der Naturerklärung mit einbeziehen.⁴⁸ Zum anderen ließ Einstein seine Würfelmetapher selbst unerläutert, so dass jede Deutung auf Vermutungen angewiesen bleibt. Auch bezog er sie selbst nicht auf die Auseinandersetzung um die Störungsinterpretation. Indem er einen Spielraum von Deutungsmöglichkeiten erlaubte, gab er der fehlenden Eindeutigkeit seiner Position zur Quantenmechanik mit dieser Metapher einen beredten Ausdruck. Lassen Sie mich abschließend diesen Spielraum noch einmal ausleuchten und bewerten.

Ich habe zwei konträre Deutungsvarianten unterschieden: Die erste entspricht der traditionellen Lesart, nach der Einstein eine konservative, dem Realismus der klassischen Physik verpflichtete Position vertrat. Demnach meinte Einstein mit seinem Wort, dass Gott nicht würfele, die Quantenphänomene würden nicht aus einem irreduziblen Spiel des Zufalls hervorgehen, sondern auf universellen kausalen Gesetzmäßigkeiten gründen. Gegenüber dieser Position wird man gut beraten sein, sich des Urteils zu enthalten. So divergent die Resultate der mikrophysikalischen Grundlagenforschung heute auch gedeutet werden, so ist es unter den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern doch weitgehend unbestritten, daß sie gegenwärtig keine eindeutige Antwort auf die Frage nach den Möglichkeiten einer kausalen Begründung der Quantenmechanik erlauben. Zwischen kausalen und nicht kausalen Ansätzen kann bislang oder vielleicht auch prinzipiell nicht entschieden werden. Man kann heute nicht wissen, ob zukünftig Gründe überzeugender für eine bestimmte Antwort sprechen werden oder ob sich die Fragestellung als sinnlos erweisen wird.

Die zweite Deutungsvariante ist der ersten entgegengerichtet. Ihr zufolge kritisierte Einstein mit seiner Äußerung die Orientierung der Quantenmechanik am

⁴⁸ Klein 1985 251 f.

Determinismus der klassischen Physik. Dass Gott nicht würfelt, hieße dann, dass der Zufall in der Mikrophysik nicht auf eine Weise zustande kommt, die in Anlehnung an mechanische Vorstellungen erklärbar ist. Die allgemeine Zustimmung, die diese Position heute findet, stützt sich vielfach auf ähnliche Argumente, wie sie von Einstein vorgetragen wurden. Einstein hat vorausgesehen, dass aus der Geltung der Unbestimmtheitsrelation Eigenschaften der Quantenphänomene folgen, die mit der klassischen Physik und der lebensweltlichen Anschauung nicht vereinbar zu sein scheinen. Die eindrucksvollen experimentellen Bestätigungen und theoretischen Begründungen dieser eigenartigen Merkmale legen die Überzeugung nahe, dass sie sich wohl kaum in Analogie zu den Gesetzen der sichtbaren Dinge, unter die auch der Würfel fällt, werden verstehen lassen.

Literatur:

- Albert, D.Z. (1994): Bohm's Alternative to Quantum Mechanics, in: Scientific American, May, 58 ff.
- Arendes, L. (1992): Gibt die Physik Wissen über die Natur? Das Realismusproblem in der Quantenmechanik. Würzburg
- Audretsch, J. (Hg.) (2002): Verschränkte Welt. Physik und Philosophie korrelierter Quantensysteme. Berlin
- Auletta, G. (2001): Foundations and interpretation of quantum mechanics: In the light of a critical-historical analysis of the problems and of a synthesis of the results. Singapore u.a.
- Beller, M. (1999): Quantum dialogue: the making of a revolution. Chicago/London
- Blanchard, P., et al. (Eds.). (2000): Decoherence: Theoretical, Experimental and Conceptual Problems. Berlin etc.
- Brush, S.G. (1976): The Kind of Motion we call heat. A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Cent. 2 Vols. Amsterdam etc.

- Calaprice, A. (Ed.) (1996): *The quotable Einstein*. Princeton
- Carrier, M. (1992): *Aspekte und Probleme kausaler Beschreibungen in der gegenwärtigen Physik*, in: *Neue Hefte für Philosophie* 32/33 82-104
- Cushing, J. T. (1994): *Quantum Mechanics. Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago/London
- Cushing, J. T. (1998): *Philosophical concepts in physics: the historical relation between philosophy and scientific theories*. Cambridge
- D'Espagnat, B. (1980): *Quantentheorie und Realität*, in: *Spektrum der Wissenschaft*, Nr.1 68-81
- Darrigol, O. (1992): *From c-numbers to q-numbers: the classical analogy in the history of quantum theory*. Berkeley u.a.
- Drieschner, M. (2002): *Moderne Naturphilosophie. Eine Einführung*. Paderborn
- Earman, J. (1986): *A Primer on Determinism*. Dordrecht
- Eigen, M., und R. Winkler (1983): *Das Spiel. Naturgesetze steuern den Zufall*. München/Zürich
- Einstein, A. (1929): *Über den gegenwärtigen Stand der Feldtheorie*, in: E. Honegger (Hg.), *Festschrift Prof. A. Stodola zum 70. Geburtstag*. Zürich/Leipzig, 126-32, zit. nach Holton 1981 232
- Einstein, A. (1936): *Physik und Realität*, in: Ders., *Aus meinen späten Jahren*. Stuttgart 1979
- Einstein, A. (1940): *Das Fundament der Physik*, in: Ders., *Aus meinen späten Jahren*. Stuttgart 1979
- Einstein, A. (1948): *Quantenmechanik und Wirklichkeit*, in: *Dialectica* 2, 320-324
- Einstein, A. (1949): *Autobiographisches*, in: Schilpp (Hg.)
- Einstein, A., B. Podolsky and N. Rosen (1935): *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, in: *Physical Review* 47: 777-780
- Einstein, A., et al. (1969): *Briefwechsel 1916-1955. Kommentiert von Max Born*. München

- Erbrich, P. (1988): *Zufall: eine naturwissenschaftlich-philosophische Untersuchung*. Stuttgart u.a.
- Esfeld, M. (2002): *Einführung in die Naturphilosophie*. Darmstadt
- Fine, A. (1986): *The shaky game: Einstein, realism and the quantum theory*. Chicago/London
- Fine, A., et al. (1998): *Albert Einstein*, in: *Routledge Encyclopedias of Philosophy*. London
- Folse, H.J. (1985): *The Philosophy of Niels Bohr*. Amsterdam
- Heisenberg, W. (1927): *Über den anschaulichen Inhalt der quantenmechanischen Kinematik und Mechanik*, in: *Zeitschrift für Physik* 43 172-98, zitiert nach: K. Baumann und R.U. Sexl (Hg.), *Die Deutung der Quantentheorie*. Braunschweig/Wiesbaden 1984
- Heisenberg, W. (1948): *Der Begriff der "Abgeschlossenen Theorie" in der modernen Naturwissenschaft*, in: *Dialectica* 2, 331-336. Wiederabgedruckt in: Ders., *Werke* CI, 335-40
- Heisenberg, W. (1969): *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*. Zürich
- Held, C. (1998): *Die Bohr-Einstein-Debatte: Quantenmechanik und physikalische Wirklichkeit*. Paderborn u.a.
- Holton, G. (1981): *Thematische Analyse der Wissenschaft. Die Physik Einsteins und seiner Zeit*. Frankfurt a.M.
- Howard, D. (1985): *Einstein on Locality and Separability*, in: *Studies in History and Philosophy of Science* 16: 171-201
- Howard, D. (2004): *Albert Einstein, Philosophy of Science*, in: *Stanford Encyclopaedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/>
- Jammer, M. (1982): *Einstein and Quantum Physics*, in: G. Holton und Y. Elkana (Eds.), *Albert Einstein. Historical and cultural perspectives*. Princeton
- Jammer, M. (1995): *Einstein und die Religion*. Konstanz

- Klein, M. J. (1985): Einstein und die Entwicklung der Quantenphysik, in: A.P. French (Hg.), Albert Einstein, Wirkung und Nachwirkung. Braunschweig/Wiesbaden
- Koch, G. (1994): Kausalität, Determinismus und Zufall in der wissenschaftlichen Naturbeschreibung. Berlin
- Kouznetsov, B. (1967): Spinoza et Einstein, Revue de synthèse 88, ser. gen. Nos 45-6, 3è série, janvier-juin, 31-52
- Krickeberg, K. (Hg.) (1999): Der Zufall, in: Nova Acta Leopoldina 308
- Naess, A. (1983): Einstein, Spinoza, and God, in: A. Van der Merwe (Ed.), Old and new questions in physics, cosmology, philosophy, and theoretical biology. New York
- Paty, M. (1986): Einstein and Spinoza, in: M. G. Grene and D. Nails (Hg.), Spinoza and the Sciences. Dordrecht
- Ruetsche, L. (2002): Interpreting Quantum Theories, in: P. Machamer und M. Silberstein (Eds.), The Blackwell Guide to the Philosophy of Science. Malden (MA)/Oxford (UK)
- Schilpp, P.A. (Hg.) (1955): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Braunschweig/Wiesbaden 1983
- Shimony, A. (1988): Die Realität der Quantenwelt, in: Spektrum der Wissenschaft Nr.3, 78-85
- Stent, G.S. (1979): Does God play dice?, in: The Sciences 19 18-23
- Whitaker, A. (1996): Einstein, Bohr and the quantum dilemma. Cambridge
- Zeilinger, A. (2000): The Quantum Centennial, in: Nature 408 639 ff.
- Zeilinger, A. (2003): Einsteins Schleier. Die neue Welt der Quantenphysik. München

Die Autoren

HÄGELE, PROF. DR. PETER C., geb. 1941. Studierte Physik in Stuttgart, beendete seine Dissertation 1972 an der Universität Ulm und habilitierte sich dort für das Fach Physik. Von 1978 bis zu seiner Emeritierung 2006 war er Professor für Physik an der Abteilung für Angewandte Physik der Universität Ulm und beschäftigte sich dort mit Fragen, die den Zusammenhang zwischen chemischem Aufbau und den Materialeigenschaften von Polymeren betreffen. Prof. Hägele war viele Jahre stellv. Sprecher des Humboldt-Studienzentrums für Geisteswissenschaften und Philosophie der Universität Ulm und ist Mitglied folgender Organisationen: Fachausschuß Polymere der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Institut für wissenschaftstheoretische Grundlagenforschung im Institut für Bildung und Wissen (Paderborn), Karl-Heim-Gesellschaft (Berlin) und Institut für Glaube und Wissenschaft (IGUW, Marburg).

KEUL, DR. HANS-KLAUS, studierte Germanistik, Politikwissenschaften und Philosophie an der Universität Tübingen. Er promovierte im Fach Philosophie in Tübingen mit einer Arbeit über die *Kritik der emanzipatorischen Vernunft. Zum Aufklärungsbegriff der Kritischen Theorie*. Als DAAD-Dozent war er in Sofia, Bukarest und Cluj tätig. Wissenschaftliche Schwerpunkte: Praktische Philosophie und Sozialphilosophie, Allgemeine und angewandte Ethik. Kant und die Philosophie des Deutschen Idealismus, philosophische Anthropologie und Handlungstheorie, Hermeneutik und Kritische Theorie. An der Universität Ulm koordiniert Herr Dr. Keul das Ethisch-Philosophisches Grundlagenstudium (EPG) und den Bereich für additive Schlüsselqualifikationen (ASQ).

KORNWACHS, PROF. DR. KLAUS, geb. 1947 in Engen (Kreis Konstanz). 1966-1973 Studium der Mathematik, Physik und Philosophie an den Universitäten Tübingen, Freiburg und Kaiserslautern. Das Diplom erwarb er

Einstein

Mit Beiträgen von

Peter C. Hägele
Hans-Klaus Keul
Klaus Kornwachs
Gregor Schiemann

HUMBOLDT-STUDIENZENTRUM
Universität Ulm
2011

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Einstein

Humboldt-Studienzentrum, Universität Ulm. Mit Beitr. von...
Ulm: Humboldt-Studienzentrum 2011
(Bausteine zur Philosophie; Bd. 27)
ISBN 3-928579-26-6

(c) 2010, *HUMBOLDT-STUDIENZENTRUM*, Universität Ulm
Umschlaggestaltung: Graphikdesign Verlagsservice Reutlingen
Herstellung: Kommunikations- und Informationszentrum
der Universität Ulm (kiz).

Auslieferung: *HUMBOLDT-STUDIENZENTRUM*, Universität Ulm
Albert-Einstein-Allee 11, 89081 Ulm
Printed in Germany ISBN 3-928579-26-6

Bausteine zur Philosophie

Interdisziplinäre Schriftenreihe des Humboldt-Studienzentrums

Universität Ulm

herausgegeben von Renate Breuninger

begründet von Klaus Giel

Band 27: Einstein