

## Gott würfelt nicht

### Einsteins immer noch aktuelle Kritik der Quantenmechanik

Kaum eine Äußerung Einsteins ist so bekannt wie sein Wort, dass Gott nicht würfelt. Es findet sich nicht nur in vielen Darstellungen von Einsteins Leben und Werk. Für einige Bücher zu Fragen der modernen Physik und Mathematik ist es sogar schon titelgebend geworden. In bemerkens-

wertem Kontrast zur Popularität des Satzes steht der eher private Kontext, dem er entstammt. Einstein hat seine Bemerkung weniger in seinen Schriften zur Physik erläutert, als dass er sie in seiner Korrespondenz und häufiger noch in mündlichen Diskussionen mit anderen Physikern eingesetzt hat. Dabei ging es um die „statistische Deutung“ der in den 1920er-Jahren begründeten Atomtheorie, der sogenannten Quantenmechanik.

Einiges spricht dafür, dass Einstein sich mit seiner Äußerung gegen die von dieser Deutung und heute noch in der Physik vertretene Auffassung richtete, es gebe in der Welt des ganzen Kleinen für das raumzeitliche Auftreten von einzelnen Ereignissen keine Ursachen.

Einsteins Kritik galt lange Zeit als rückschrittlich gegenüber den Innovationen und Erfolgen der Quantenmechanik. Einstein, so dachte man, sei ein Vertreter eines überholten Weltbildes, das in seiner Nähe zum Determinismus Spinozas dem Weltbild der modernen Physik unvereinbar gegenüberstehe. Gegen diese Einschätzung sind aber in den letzten Jahrzehnten ernst zu nehmende Bedenken vorgebracht worden. Einsteins Auffassungen zur modernen, bis heute unverändert gültigen Quantenmechanik sind bei zahlreichen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern auf ein erneutes Interesse gestoßen.

Der Einstellungswandel gegenüber Einsteins Auseinandersetzung mit der Quantenmechanik wirft ein anderes Licht auf seinen nicht würfelnden Gott. Die neueren Arbeiten heben hervor, dass Einsteins Kritik an der statistischen Deutung nicht Ausdruck einer unhaltbaren Physikauffassung sei, sondern umgekehrt auf immer noch nicht eingelöste zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten der Atomtheorie hinweise. Damit ist auch dem Satz vom nicht würfelnden Gott eine neue Interpretationsrichtung vorgegeben.

In ähnlicher Weise, wie Einstein diese Äußerung unerläutert gelassen hat, ist allerdings seine gesamte Position zur Quantenmechanik von Uneindeutigkeiten nicht frei geblieben. Für seine Würfelmetapher ergibt sich ein Spielraum von gegensätzlichen Sichtweisen. Sie lässt sich zum einen mit den jüngeren Forschungsergebnissen verbinden und weist zum anderen unverändert auf rückschrittliche Elemente in Einsteins Denken hin. Ich wende mich zuerst diesen Elementen zu und betrachte dann eine dazu entgegengerichtete Interpretationsvariante, die an den neueren Resultaten anknüpft.

### Liegt den Naturphänomenen kein Zufall zugrunde?

Dass Einsteins Kritik an der statistischen Deutung seinen Zeitgenossen antiquiert 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 etwa ein radioaktives Atom ein bestimmtes Teilchen emittiert, ist im mathematischen Sinn zufällig; der Zeitpunkt ist prinzipiell beliebig. Man kann nur Wahrscheinlichkeiten für die Emission berechnen,



Max Born,  
um 1931

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 den Atomtheorien der klassischen Physik des 19. Jahrhunderts, mit denen Einstein bestens vertraut war, eine Schlüsselrolle. Aus statistischen Annahmen über die zufällig verteilten Bewegungen der unsichtbaren Atome wurden

gung steht die Metapher des Würfels. Würde man die Bedingungen der Bewegungen eines geworfenen Würfels nur genau genug kennen, könnte man voraussagen, wie der Würfel fallen wird. Man würde dann wissen, wie der Zufall nach kausalen Gesetzen produziert wird. Paradox formuliert, hätte der Zufall alle Zufälligkeit verloren. Das Wissen ist aber schon bei Gott. So erscheint dem Menschen als gewürfelt, was göttlich gesehen ohne jeden Zufall ist.



Niels Bohr und Albert Einstein bei Ehrenfest in Leyden, Ende der 1920er-Jahre (Foto: Paul Ehrenfest)

mit diesen Theorien messbare Wärmeerscheinungen erklärt. Die Temperaturerhöhung eines Gases wurde etwa auf eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der Gasatome zurückgeführt. Das nicht verfügbare Wissen über die Bewegung von einzelnen Atomen glaubte man zukünftig erhalten zu können. Warum sollte es nicht möglich sein, den Bewegungszustand eines Atoms exakt zu ermitteln und alle Ursachen anzugeben, die zu diesem Zustand geführt haben? Für diese Überle-

Die statistische Deutung der Quantenmechanik behauptet die Unanwendbarkeit solcher Vorstellungen im Bereich der kleinsten Dimensionen. Ihr zufolge sind die mathematisch berechneten Wahrscheinlichkeiten nicht Ausdruck einer Unkenntnis über den Zustand der atomaren Objekte, sondern ein Charakteristikum ihres Zustandes. Einstein war zeitlebens damit nicht einverstanden, weil es seiner Auffassung nach zu den Aufgaben einer Theorie gehört, Ursachen für die von ihr be-

Albert Einstein  
in der Bibliothek  
der Haberland-  
straße, 1929



schriebenen Phänomene anzugeben. Man müsse die zukünftige Möglichkeit einer deterministischen Grundlegung der physikalischen Theoriebildung offen lassen.

Mit dieser Ansicht greift Einstein zurück auf die Vorstellungen der klassischen Physik des 19. Jahrhunderts und auf das damit verbundene Weltbild einer strengen Naturgesetzlichkeit, die auf einer fundamentalen Ebene wirksam ist und dort keinen Raum für zufällige Ereignisse vorsieht. In diesem Sinn verweist sein Wort, dass Gott nicht würfelt, auf ein überholtes Programm der deterministischen Naturerklärung.

#### Oder liegt dem Zufall kein Würfeln zugrunde?

Die neueren wissenschaftshistorischen Forschungen haben aber gezeigt, dass Einsteins Kritik nicht in ihren rückwärts gewandten, problematischen Elementen aufgeht. Wesentliche Argumente hat Arthur Fine 1986 in seinem vielbeachteten Buch

*The Shaky Game. Einstein, Realism and the Quantum Theory* dargelegt. Nach Fines Analysen wendet sich Einstein nicht gegen den mathematischen Formalismus der Quantenmechanik, sondern gegen ihre Auffassung als vollständige, der Ergänzung nicht mehr bedürftige Theorie.

Mit der Zurückweisung des Vollständigkeitsanspruches der statistischen Deutung verbindet Einstein die Überzeugung, dass die mikrophysikalischen Phänomene einen neuen Theorietyp erfordern. Die Grundbegrifflichkeit der Quantenmechanik soll seiner Auffassung nach nicht durch kleine Korrekturen verbessert, sondern durch einen anderen „Ausgangspunkt“ ersetzt werden. Späte Formulierungen aus den 1940er- und 1950er-Jahren legen die Vermutung nahe, es mangle der Atomtheorie wegen ihrer noch bestehenden Strukturanalogien und inhaltlichen Beziehungen zur klassischen Physik an Zukunftstauglichkeit. Damit würde Einstein den Spieß der gegen ihn gerichteten Kritik umdrehen: Nicht sei-

ne Suche nach einer realistischen und kausalen Theorie der Mikrophysik, sondern die vorliegende Quantenmechanik wäre noch zu sehr einer traditionellen Begrifflichkeit verhaftet.

Für diese Stoßrichtung könnte auch seine vorangehende Ablehnung der sogenannten „Störungsinterpretation“ sprechen. Sie geht

auf Werner Heisenberg zurück und ist heute noch sehr einflussreich. Nach dieser Interpretation resultiert der akausale Charakter der atomphysikalischen Messresultate daraus, dass die Objekte, auf die sie sich beziehen, durch den Messvorgang unvermeidlich und unkontrollierbar gestört werden. Das Fragwürdige dieser Vermutung liegt in der stillschweigenden Voraus-

setzung, die Objekte hätten vor ihrer Wechselwirkung mit den Messapparaten klassisch definierbare Orts- und Impulseigenschaften. Der akausale Charakter würde demnach erst nachträglich auftreten und (im Unterschied zur „statistischen Deutung“) nicht zum Wesen der Objekte gehören. Indem Einstein die Störungsinterpretation zurückweist, wendet er sich - so könnte man seine Kritik auffassen - intuitiv gegen den Versuch, die Behauptung einer vermeintlich unhintergehbaren

Akausalität mikrophysikalischer Prozesse mit Rückgriff auf Vorstellungen der klassischen Physik zu begründen.

Folgt man dieser Sichtweise, dann erscheint auch seine Bemerkung, dass Gott nicht würfelt, in einem anderen Licht. Die Metapher des Würfels drückt die Überzeugung aus, dass Zufälle durch eine an sich kausal verfasste Natur in Analogie zur klassischen Physik hervorgebracht werden. Würde man die Bedingungen der Bewegungen des Würfels 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 Messung minimieren können, dann würde sich die deterministische Grundstruktur der Natur zeigen. Doch würfelt Gott nicht. Wenn den beobachtbaren atomaren Zufällen etwas zugrunde liegt, kann es nicht von der Art eines im Prinzip kausal erforschbaren Würfelspiels sein. Ob die Zufälligkeit der atomaren Phänomene zu ihrem Wesen gehört oder aus einem vielleicht nicht zufälligen Prozess resultiert, ist bis heute ungeklärt geblieben. Einsteins Wort und dessen Wirkung haben viel dazu beigetragen, das Bewusstsein wachzuhalten, dass die Lösung dieses Problems zu den Aufgaben der Physik der Zukunft gehört.



Werner Heisenberg,  
um 1958  
(Foto: Fritz Eschen)

Jürgen Renn (Hrsg.)

**INGENIEUR  
DES UNIVERSUMS**

# **Albert Einstein**

**HUNDERT AUTOREN  
FÜR EINSTEIN**



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA