



Laura F. Martignon  
Thomas H. Seligman

## Einsteins Einsamkeit: Vorbild oder Inspiration

*Aus aktuellem Anlass, im Jahr, das zum Einsteinjahr ausgerufen worden ist, haben wir uns gefragt, inwiefern Einstein als Forscherpersönlichkeit ein Vorbild sein kann für die nachfolgenden Generationen von Wissenschaftlern, Frauen und Männern. Dabei hat uns in der Auseinandersetzung mit dieser Frage interessiert, was oder wem Einstein die Treue hielt.*

Es ist ein Jahrhundert vergangen, seitdem Einstein in nur neun Monaten drei Arbeiten vorlegte, die jede eines Nobelpreises würdig gewesen wäre. In diesem Zusammenhang mag man die Frage stellen, welche seiner Arbeiten heute die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen in der Physik am stärksten beschäftigt. Als Index für das wissenschaftliche Interesse kann die Häufigkeit gelten, mit der jede seiner Arbeiten im letzten Jahr in der Fachliteratur zitiert wurde, also auf die eine Wissenschaftlerin oder ein Wissenschaftler unmittelbar Bezug nahm.

Dank Internet ist es heute leicht, diese Zahlen zu ermitteln; man muss nur im Web of Science eine entsprechende Anfrage für das Jahr 2004 stellen. Wie erwartet, werden die Arbeiten zur Relativitätstheorie inzwischen wenig zitiert. Sie sind in einem solchen Ausmaß Bestandteil der Physik geworden, dass sie als Standardwissen ohne Zitat verwendet werden und ihre Anwendung kaum mehr Einsteins Denken direkt in die Arbeit einfließen lässt. Überraschend ist jedoch, dass nicht die ebenfalls nobelpreiswürdige Arbeit über die Brown'sche Bewegung an erster Stelle erscheint. Es handelt sich vielmehr um den Artikel von 1935 »Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?«, den Einstein mit Boris Podolsky und Nathan Rosen verfasste.\* Allein im Jahr

2004 wurde dieser Artikel 200 Mal zitiert. Diese Zahl ist nach jedem Maßstab sehr hoch, und man fragt sich, wie dieser Impact Factor zustande kommt.

In diesem Artikel brachte Einstein seine Unzufriedenheit mit der Quantentheorie zum Ausdruck. Er beschrieb ein Gedankenexperiment, das seiner Meinung nach die quantenmechanische Darstellung physikalischer Systeme entweder als »unvollständig« oder als »paradox« qualifizierte.

Seine Haltung blieb die gleiche, auch als er 1950 in der von Paul Schilpp zur Feier seines 70. Geburtstags herausgegebenen Festschrift allen Kollegen antwortete, die in den feierlichen Artikeln durchaus ihre Meinungsverschiedenheiten betont hatten. Einstein schrieb, dass zur Vermeidung eines intrinsischen Paradoxons der Quantenmechanik nicht beide der folgenden Thesen gleichzeitig haltbar seien:

- 1 Die Beschreibung durch eine Wahrscheinlichkeitsamplitude ( $\Psi$ -Funktion) ist vollständig.
- 2 Die realen Zustände von räumlich getrennten Objekten sind voneinander unabhängig.

Mit anderen Worten meinte er, die Quantenmechanik sei entweder *nichtlokal* oder ihre Beschreibung eines Systems sei *unvollständig*.

Man muss nun festhalten, dass es sich bei jener Arbeit aus dem Jahre 1935 um eine sehr sorg-



fältig durchgeführte Analyse eines Quantenprozesses gehandelt hat, die anhand logischer Argumente zeigte, dass die Quantenmechanik, falls vollständig, eine nichtlokale Theorie sein muss. Was für Einstein ein Ding der Unmöglichkeit war, schien den anderen Großen der Quantenmechanik, etwa Bohr, Born, Schrödinger, Heisenberg oder Pauli, – implizit oder explizit – durchaus plausibel. Einstein jedoch hielt im Gegensatz zu ihnen die Lokalität für unverzichtbar und entschied sich für die entgegengesetzte Schlussfolgerung, nämlich die, dass die Quantenmechanik unvollständig sei!

Um seine Haltung zu verstehen, müssen wir uns vorstellen, welchen Stellenwert Lokalität für Einstein haben musste. Drei Jahrhunderte zuvor hatte Galileo das Prinzip der Invarianz der Physik in jedem Inertialsystem eingeführt. Ein knappes Jahrhundert nach Galileos Einführung der Invarianz hatte Newton Gesetze postuliert, die das lange vor ihm vermutete Kausalitätsprinzip zumindest für die Mechanik klar festlegten. Einstein kombinierte diese zwei Prinzipien, Invarianz (in verallgemeinerter Form) und Kausalität, mit dem Prinzip der Lokalität und erreichte auf dieser Basis die grundlegende Konstruktion der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie, die ihn sehr jung neben Galileo und Newton in den Olymp der Physik versetzte.

Es ist Aufgabe der Wissenschaftsgeschichte, die Plausibilität der Hartnäckigkeit zu ergründen, mit der Einstein am Prinzip der Lokalität sein Leben lang festhielt. In wenigen Worten kann man das Plausibilitätsargument so formulieren: Wie andere zu seiner Zeit, suchte Einstein nach einer einheitlichen Theorie der Physik, und im Sinne dieser einheitlichen Theorie war die Lokalität für ihn eine *Conditio sine qua non*. Dazu kommt, dass es zu seiner Zeit keine konsistente und solide Evidenz gegen seine Lokalitätsannahme geben konnte.

Zur Unifikation der Physik muss gesagt werden, dass sie bis heute ein Bestandteil in der Agenda vieler Physiker bleibt und auf dem Wege der kleinen Schritte seither ein gewisser Fortschritt in dieser Richtung erzielt worden

ist. Dennoch ist dieses Ziel mittlerweile in weite Ferne gerückt; vom Standpunkt zukünftiger Generationen von Physikern wohl erfreulicherweise. In Einsteins Versuch, eine Vereinheitlichung zu erzielen, war die Nichtlokalität der Quantenmechanik natürlich ein echter, nicht überholbarer Stolperstein. Einstein war jedoch zu sehr Physiker, als dass er die enormen Erfolge dieser Theorie hätte übersehen wollen, da sie auch zu seiner Zeit ständig neue, wichtige Experimente mit zum Teil größter Genauigkeit reproduzierte. Das Problem wurde für ihn zentral. Der Ausweg der Unvollständigkeit eröffnete sich anhand der Behauptung, dass die Quantenmechanik nur Ensembles von Systemen – und nicht einzelne Systeme – beschreiben kann. Da damals nur Messungen an Ensembles vorgenommen werden konnten, war es unmöglich, diesen Ausweg auszuschließen. Seither haben sich mit dieser Frage eine Reihe von Physikern theoretisch beschäftigt, und Bell gelang es in einer bedeutenden Arbeit, Ungleichungen aufzustellen, welche die Lokalität als Konsequenz nach sich ziehen (1964) und die wiederum von der Quantenmechanik nicht erfüllt sind. Die genaue mathematische Formulierung ist zwar aufwändig, aber es ist dennoch überraschend leicht, auch für einen Laien, sich vorzustellen, was mit Nicht-Lokalität gemeint ist: Spock vom Raumschiff Enterprise kommuniziert während einer Rettungsexpedition auf irgendeinem wilden Planeten mit dem Schiff: »Transporterraum, beamen, Energie!« Und schon ist, wer immer gerettet werden soll, in Sicherheit. Diese Möglichkeit der Teleportation wollte Einstein nicht akzeptieren.

Dass die Arbeit von 1935 im Jahre 2004 so oft zitiert wird, liegt daran, dass sie Experimente zu Teleportation motiviert hat, die in letzter Zeit gelungen sind. Spock, in Begleitung von Pauli, Born und anderen, hat Recht, und Einstein hat Unrecht – nicht mit seiner Analyse, sondern mit der Wahl, welche der beiden sich ausschließenden von ihm aufgestellten Optionen die richtige ist. Teleportation ist in Innsbruck von Anton Zeilinger 1997 zum ersten

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Mal mit Photonen durchgeführt worden, und daselbst hat Rainer Blatt 2004 erstmals Atome teleportiert. Zeilinger hat mittlerweile auch Codes über das normale Glasfasernetz von der Universität Wien an eine Bank übermittelt, was wichtige Anwendungen in nicht allzu ferner Zukunft wahrscheinlich macht. Eine neue Ära der Übertragung geheimer Daten steht uns bevor.

Zwei Anmerkungen sind hier wichtig: Einerseits muss sich Spock per Funkgerät mit dem Transporterraum verbinden; ohne *normale* Verbindung (das heißt einer Verbindung nicht schneller als Lichtgeschwindigkeit) ist Teleportation nicht durchzuführen; damit sind die Prinzipien der Relativitätstheorie nicht verletzt, aber die Nicht-Lokalität besteht. Was *normal* übermittelt wird, ist nicht Spock selbst, sondern nur eine kurze Nachricht von ihm! Zum Zweiten ist anzumerken, dass in der wahren Welt der heutigen Physik nicht die Masse des Atoms teleportiert wird, sondern lediglich sein Zustand.

Und nun zurück zu Einsteins Zweifeln an der Quantenmechanik: Wenn sie nicht von Einstein ausgegangen wären, hätten sie kaum diesen Widerhall gefunden, und weder Born noch Pauli hätten die Geduld aufgebracht, das ihnen selbst Offensichtliche immer wieder zu erklären. Einstein konnte und wollte den Zufall nicht als grundlegendes Element der Wirklichkeit akzeptieren. Und dieser wird mit der Nichtlokalität der Quantenmechanik zwingend. Der Ausweg über die Einschränkung der Quantenmechanik auf Ensembles musste auch entfallen.

Die Unzufriedenheit Einsteins und der damit verbundene systematische Zweifel sind umso erstaunlicher, wenn man bedenkt, dass es im Wesentlichen Einstein selbst gewesen war, der die Notwendigkeit einer neuen physikalischen Theorie erkannt hatte, die auf Quanten basiert. Viele Jahre davor hatte er die Lichtabstrahlung einerseits als Welle und andererseits als diskretes Teilchen beschrieben und sich gründlich mit den Aspekten der Lichtabstrah-

lung auseinander gesetzt. Neben einer »erzwungenen« Lichtabstrahlung hatte er auch die »spontane« Lichtabstrahlung charakterisiert. Bei der spontanen Emission von Licht hatte er weiterhin postuliert, dass nicht vorausgesagt werden kann, wann ein Photon abgegeben wird. Das Erscheinen an einem oder dem anderen Ort eines solchen Teilchens lässt sich nur durch eine Wahrscheinlichkeitsamplitude beschreiben. Damit hatte Einstein dem Zufall eine Rolle zugeordnet, die in der Geschichte der Wissenschaft absolut neu und revolutionär war. Der Zufall erschien ab diesem Moment nicht nur als strikt epistemisches Phänomen, das heißt eine subjektive Konstruktion der wahrgenommenen Realität (zum Beispiel eines Münzwurfs, der, genau betrachtet, gänzlich deterministisch ist), sondern konnte auch als ontisches Phänomen auftreten, also ein Teil der vom Betrachter unabhängigen Realität sein. Oder, um eine spätere Metapher von Einstein zu zitieren, in der Mikrowelt der Quanten

*In der Mikrowelt der Quanten scheint sich Gott von seiner spielerischen Seite zu zeigen ... und würfelt.*

scheint sich Gott von seiner spielerischen Seite zu zeigen ... und würfelt. An seinen Freund Max Born schrieb er Zeilen, die uns bis heute mit einer Mischung aus Bewunderung und Staunen erfüllen:

»Du glaubst an den würfelnden Gott und ich an volle Gesetzmäßigkeit in einer Welt von etwas objektiv Seiendem, das ich auf wild spekulativem Wege zu erhaschen suche. Ich glaube fest, aber ich hoffe, daß einer einen mehr realistischen Weg, bzw. eine mehr greifbare Unterlage finden wird, als es mir gegeben ist. Der große anfängliche Erfolg der Quantentheorie kann mich doch noch nicht zum Glauben an das fundamentale Würfelspiel bringen, wenn ich auch wohl weiß, daß die jüngeren Kollegen dies als Folge der Verkalkung auslegen.«

Mit ähnlicher Bestimmtheit schrieb er jahrelang Niels Bohr. Dieser antwortete im April 1949: »Ich möchte sogar sagen, daß niemand

– und nicht einmal der liebe Gott selber – wissen kann, was ein Wort wie würfeln in diesem Zusammenhang heißen soll.«

Einstein führte während der zweiten Hälfte seines Lebens einen hartnäckigen und einsamen Kampf. Diese zweite Lebensspanne spielte sich in Amerika ab, im Exil in Princeton, weit weg von seinen liebsten Freunden und Kollegen, denen er allerdings regelmäßig Briefe schrieb. Verwitwet und einsam in der Mercier Street und in seinem Büro im Institut, verbrachte er viele Jahre vergeblicher Suche nach der ›unifizierenden‹ Feldtheorie und nach dem endgültigen Beweis der Unvollständigkeit der Quantenmechanik. Wolfgang Pauli hat sich jedes Jahr ironisch über den neuen Versuch des alten Genies geäußert, der die ganze Physik unter einen einzigen Hut bringen wollte. Aber obwohl seine Kollegen aus der Quantenmechanik ›wussten‹, dass die Quantenmechanik Nichtlokalität leisten muss, konnten sie dem alten Meister keine endgültige, das heißt auf Empirie basierende Antwort geben. In diesem Punkt ist die Physik eindeutig: Hier zählt in letzter Instanz das Experiment. Der Augenblick der Wahrheit entscheidet sich in der Empirie.

Da Einstein vor allem Physiker war, würde er heute über die empirisch erwiesene Teleportation wohl jubeln und seine Einsichten revidieren.

Es ist müßig, zu fragen, was Einstein vielleicht noch geleistet hätte, wenn das befreiende Experiment zur Teleportation 1934 hätte realisiert werden können und damit seine Energie auf neue Bahnen gelenkt worden wäre.

Wenn schon Einsteins Weg zum Jahre 1905 von wissenschaftlicher Isolation im Berner Patentamt gekennzeichnet war, so hatte er später Kontakt zu den Besten seiner Zeit. Die Jahre, die er in Berlin verbrachte, erlaubten ihm eine intensive Kommunikation mit den anderen großen Physikern Europas. Es kam aber zu keiner Kooperation, sondern zur Kontroverse über die Quantenmechanik.

Die Kontroverse war auch dafür verantwortlich, dass er letztlich nie mit der aktiven Zusammenarbeit seiner berühmten Kollegen rechnen konnte, was wiederum zur Konsequenz hatte, dass er in der Quantenmechanik nie einen weiteren Beitrag leistete. Dies ist bemerkenswert, wenn man sich verdeutlicht, dass Einstein von sich selbst sagte: »Ich hab viel mehr über die Quantenmechanik nachgedacht als über die Relativitätstheorie.«

Es ist dieser Hang zur Isolation, der ihn kaum als Vorbild empfiehlt; die Isolation braucht nämlich die Kraft und die Gelassenheit eines Riesen. Einstein blieb, wie wir auch aus den vielen Biografien wissen, in seiner Einsamkeit heiter. Seine Briefwechsel sind argumentative Debatten, in denen sich die Gesprächspartner respekt- und oft humorvoll um die Sache streiten. Dennoch folgen diese edlen Debatten einer Dramaturgie, auf die Einstein so inspirierend wirkt wie ein moderner epischer Held. Wer hätte es besser ausdrücken können als Einstein selbst:

»Wer es unternimmt, auf dem Gebiet der Wahrheit und der Erkenntnis als Autorität aufzutreten, scheitert am Gelächter der Götter.«

Einstein sagte oft von sich selbst: »Ich bin ein richtiger Einspänner«, und fühlte sich in dieser Isolation mit kaum einem anderen enger verwandt als mit Newton selbst. Seine Bewunderung für Newton ist legendär: Als Einstein 1931 die Einführung zu einer neuen Ausgabe von Newtons *Opticks* schrieb, sprach er über seinen Meister mit Worten, die man im Grunde heute über Einstein selbst schreiben kann:

»Die Natur war für ihn wie ein offenes Buch ... Er vereinte in einer Person den Experimentator, den Mechaniker und nicht zuletzt den ausgesprochenen Künstler. Er steht vor uns, stark, sicher – und allein.«

\* *Physical Review*, ser. 2, vol. 47, pp. 777–780