

W. Heisenberg [*Der Teil und das Ganze*,  
(dtv Taschenbuch No. 903, 9. Aufl. München 1985)] :

... Einstein war dann etwas beunruhigt, aber schon am nächsten Morgen hatte er beim Frühstück ein neues Gedankenexperiment bereit, komplizierter als das Vorhergehende, das nun die Ungültigkeit der Unbestimmtheitsrelation wirklich demonstrieren sollte. Diesem Versuch ging es freilich am Abend nicht besser als dem ersten, und nachdem dieses Spiel einige Tage fortgesetzt worden war, sagte Einsteins Freund Paul Ehrenfest, Physiker aus Leyden in Holland : „Einstein, ich schäme mich für dich ; denn du argumentierst gegen die neue Quantentheorie jetzt genauso, wie deine Gegner gegen die Relativitätstheorie.“ Aber auch diese freundschaftliche Mahnung konnte Einstein nicht überzeugen.

Wieder wurde mir klar, wie unendlich schwer es ist, die Vorstellungen aufzugeben, die bisher für uns die Grundlage des Denkens und der wissenschaftlichen Arbeit gebildet haben. Einstein hatte seine Lebensarbeit daran gesetzt, jene objektive Welt der physikalischen Vorgänge zu erforschen, die dort draußen in Raum und Zeit, unabhängig von uns, nach festen Gesetzen abläuft. Die mathematischen Symbole der theoretischen Physik sollten diese objektive Welt abbilden und damit Voraussagen über ihr zukünftiges Verhalten ermöglichen. Nun wurde behauptet, dass es, wenn man bis zu den Atomen hinabsteigt, eine solche objektive Welt in Raum und Zeit gar nicht gibt und dass die mathematischen Symbole der theoretischen Physik nur das Mögliche, nicht das Faktische, abbilden. Einstein war nicht bereit, sich — wie er es empfand — den Boden unter den Füßen wegziehen zu lassen. Auch später im Leben, als die Quantentheorie längst zu einem festen Bestandteil der Physik geworden war, hat Einstein seinen Standpunkt nicht ändern können. Er wollte die Quantentheorie zwar als eine vorübergehende, aber nicht endgültige Klärung der atomaren Erscheinungen gelten lassen. „Gott würfelt nicht“, das war ein Grundsatz, der für Einstein unerschütterlich feststand, an dem er nicht rütteln lassen wollte. Bohr konnte darauf nur antworten : „Aber es kann doch nicht unsere Aufgabe sein, Gott vorzuschreiben, wie Er die Welt regieren soll.“

R. Penrose [*Computerdenken* (Originaltitel *The Emperor's New Mind*),  
(Spektrum-Verlag Heidelberg 1991, § 6 )] :

Wenn wir  $\psi$  als Beschreibung der „Wirklichkeit“ auffassen, zeigt sich nichts von dem Indeterminismus, der angeblich ein Wesenszug der Quantentheorie ist – solange  $\psi$  der deterministischen Schrödinger-Entwicklung gehorcht. Diesen Entwicklungsvorgang wollen wir **U** nennen. Doch jedes Mal, wenn wir „eine Messung ausführen“ und Quanteneffekte auf die klassische Ebene vergrößern, ändern wir die Regeln. Dann verwenden wir *nicht* **U**, sondern wenden stattdessen ein völlig anderes Verfahren an, das ich **R** nenne: Wir bilden Absolutquadrate von Quantenamplituden, um klassische Wahrscheinlichkeiten zu erhalten! Es ist somit *ausschließlich* das Verfahren **R**, welches Unbestimmtheiten und Wahrscheinlichkeiten in die Quantentheorie einführt.

Der deterministische Prozess **U** scheint derjenige Teil der Quantentheorie zu sein, der die Physiker bei ihrer Arbeit vor allem interessiert ; doch die Philosophen sind mehr von **R** fasziniert, der nicht-deterministischen *Reduktion des Zustandsvektors* (oder, wie man manchmal anschaulicher sagt, vom *Kollaps der Wellenfunktion*). Ob wir nun **R** einfach als eine Veränderung des zugänglichen „Wissens“ über ein System betrachten oder (wie ich) als etwas „Wirkliches“ – in jedem Fall stehen wir vor zwei völlig *verschiedenen* mathematischen Methoden, die zeitliche Veränderung des Zustandsvektors eines physikalischen Systems zu beschreiben. Denn **U** ist vollkommen deterministisch, während **R** ein Wahrscheinlichkeitsgesetz ist ; **U** erhält die komplexzahlige Quantenüberlagerung aufrecht, aber **R** verletzt sie krass ; **U** wirkt auf kontinuierliche Weise, aber **R** ist geradezu skandalös diskontinuierlich. Aus den Standardverfahren

der Quantenmechanik geht überhaupt nicht hervor, wie  $\mathbf{R}$  etwa als ein komplizierter Einzelfall von  $\mathbf{U}$  „herzuleiten“ wäre. Es handelt sich einfach um ein von  $\mathbf{U}$  verschiedenes Verfahren, das die andere „Hälfte“ der Interpretation für den Quantenformalismus liefert. Der gesamte Nicht-Determinismus der Theorie stammt von  $\mathbf{R}$  und nicht von  $\mathbf{U}$ . Sowohl  $\mathbf{U}$  als auch  $\mathbf{R}$  sind für all die wunderbaren Übereinstimmungen erforderlich, welche die Quantentheorie mit den Beobachtungstatsachen aufweist.

M. Tegmark und J. A. Wheeler [*100 Jahre Quantentheorie*,  
(in *Spektrum der Wissenschaft*, April 2001)] :

... rechtfertigen diese Schlussfolgerungen die seit langem geübte Praxis, das Lehrbuch-Postulat vom Kollaps der Wellenfunktion als pragmatisches Rezept – nach der Devise „Halt den Mund und rechne“ – zu benutzen: berechne Wahrscheinlichkeiten so, als würde die Wellenfunktion kollabieren, wenn das Objekt beobachtet wird. Obgleich von Everetts Standpunkt aus die Wellenfunktion streng genommen niemals kollabiert, stimmen die Dekohärenz-Forscher im Allgemeinen darin überein, dass die Dekohärenz eine Wirkung hat, die einem Kollaps zum Verwechseln ähnlich sieht.

... es an der Zeit ist, die Lehrbücher der Quantenmechanik zu aktualisieren. Obzwar diese Bücher in einem der ersten Kapitel unweigerlich den nicht-unitären Kollaps als fundamentales Postulat anführen, zeigt die Umfrage, dass heute viele Physiker – zumindest auf dem brandneuen Gebiet der Quantencomputer – dieses Postulat nicht mehr ernst nehmen. Der Begriff Kollaps wird zweifellos seinen Nutzen als Rechenrezept behalten. Aber ein warnender Kommentar, der verdeutlicht, dass es sich dabei wahrscheinlich nicht um einen fundamentalen Vorgang handelt, der die Schrödinger-Gleichung verletzt, könnte klugen Studenten stundenlanges Grübeln ersparen.

Cord A. Müller [*Was können wir messen?*,  
( [www.theo.physik.uni-konstanz.de/cord/Articles/messen\\_final.pdf](http://www.theo.physik.uni-konstanz.de/cord/Articles/messen_final.pdf) , 2009)] :

### 3.5 Dekohärenz

Während noch die orthodoxe Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik (QM) einen klaren Schnitt zwischen den Objekten der Mikrowelt und makroskopischen Messapparaten macht, ist in den letzten Jahrzehnten klar geworden, dass auch makroskopische Objekte prinzipiell durch die Gesetze der QM beschrieben werden können. Weil sie aber nicht ausreichend gut gegen Einflüsse ihrer Umwelt geschützt werden können, braucht man eine Beschreibung der Dynamik offener Quantensysteme, die zu Dekohärenz führt. Als Faustregel muss gelten, dass fast die gesamte Literatur zum Messprozess der Quantentheorie als veraltet zu betrachten ist, wenn sie vor der Entwicklung des Dekohärenzkonzeptes verfasst wurde. Der aktuelle Stand der Forschung ist in der Monographie von Maximilian Schlosshauer (*Decoherence and the quantum-to-classical transition*; Springer, Berlin und Heidelberg, 2007) und den Lecture Notes von Klaus Hornberger (*Introduction to Decoherence Theory*, in 'Entanglement and Decoherence'; Springer, Berlin und Heidelberg, 2009) festgehalten.

#### 3.5.1 Reflexionen über den Messprozess

Was geschieht eigentlich bei einem Messprozess? Im Abschnitt 2.2.2 hatten wir bereits bemerkt, dass bei einem klassischen Zufallsexperiment die durch Reibung induzierte irreversible Dynamik eine entscheidende Rolle spielt, um das Ergebnis des Würfel- oder Roulettewürfels endgültig und ablesbar festzuhalten. Ganz genauso verhält es sich auch mit Messungen, die an mikroskopischen Objekten gemacht werden. Nach einem fundamentalen Postulat der Quantentheorie entwickelt sich ein perfekt isoliertes System (aus wievielen Teilchen auch immer) nach der Schrödinger-Gleichung, und es entsteht eine Verschränkung aller wechselwirkender Freiheitsgrade; dies ist die sogenannte „unitäre“ Dynamik. ...

H. Dieter Zeh [*Die sonderbare Geschichte von Teilchen und Wellen*  
([www.zeh-hd.de](http://www.zeh-hd.de), Deutsche Texte, 2015. s.a. [www.decoherence.de](http://www.decoherence.de))] :

S.13: ... Wenn man begrifflich konsistent bleiben will, muss man also von einer Wellenfunktion des ganzen Universums ausgehen, ...

S.15: ... Nun kann aber der „Rest“ des durch die Wellenfunktion beschriebenen Quantenuniversums (also die „Umgebung“ der betrachteten Systeme) unter realistischen Bedingungen nicht unbeeinflusst bleiben, sobald man in den Bereich der Makrophysik kommt, also etwa eine mikroskopische Eigenschaft durch Messung auf eine makroskopische Zeigerstellung „verstärkt“. Denn im Rahmen der universellen Wellenfunktion muss jede makroskopische Eigenschaft wegen der Effizienz ihrer Wechselwirkung mit der Umgebung unvermeidbar und praktisch irreversibel auch mit dieser verschränkt werden – noch bevor irgendein Beobachter die Szene betritt. Das geschieht bereits dadurch, dass jedes permanent sichtbare (und dadurch unzweifelhaft real erscheinende) Objekt ständig Lichtquanten streut, die in diesem Falle Information über seinen Ort enthalten. Für die folgenden Konsequenzen reichen aber auch thermische Photonen; die „Information“ ist also nicht entscheidend – nur die Verschränkung mit der Umgebung als eine offenbar reale Eigenschaft. ...

S.27: ... 7. Zusammenfassung

Damit ist die seltsame Geschichte von Teilchen und Wellen im Prinzip zu einem (vorläufigen) Abschluss gekommen, wobei sich die immer wieder in Erscheinung tretenden Teilchen zu einer reinen Illusionen verflüchtigt haben. Auch wenn klassische Vorstellungen, wie die von Teilchen und Feldern, wegen der gewöhnlich unvermeidbaren Dekohärenz der Quantenzustände (also Wellenfunktionen) als effektive Konzepte weiterhin eine wichtige Rolle spielen, dürfen nur letztere in einem konsistenten physikalischen Weltbild auftreten. ...