

Ein erstes Mal (Quantenphysik) gibt es auch beim Studium, da, wo sich die Geister scheiden.⁷ Nicht selten steigen die Studierenden leichten Fußes in Formalismen herum, rechnen alle Übungen, und alles scheint in Ordnung. Wirklich? Es gibt da jene wichtige (keineswegs boshaft gemeinte) Weisheit zum Studium: Was ich wirklich verstanden habe, das kann ich auch erklären, mir selbst, meiner kleinen Schwester (wenn sie will) und — und nun sind wir wieder bei den Hausfrauen.

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 würfeln 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 ψ als Beschreibung der „Wirklichkeit“ auffassen, zeigt sich nichts von dem Indeterminismus, der angeblich ein Wesenszug der Quantentheorie ist – solange ψ 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*

⁷ Literatur gibt es zur Quantenmechanik wie Sand am Meer. [?, III] ist für Beginner wohl zu schwer. Eine hübsch kurze Einführung (S.412–432) geben [?] in Bd. I. Alt geworden, aber gut geblieben ist [?], *quantum mechanics*. Es solle aber nicht Englisch sein: [?, 1] oder (etwas älter) [?, II]. — „Aber das ist doch eine *Theorie der Elektrizität* ?!“ — Sehr wohl, und im Band II wird die Sache richtig gemacht mit den Elektronen, welche sich (a) quantenmechanisch verhalten und (b) die Coulomb-Wechselwirkung im Hamilton-Operator stehen haben.

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 **R** etwa als ein komplizierter Einzelfall von **U** „herzuleiten“ wäre. Es handelt sich einfach um ein von **U** verschiedenes Verfahren, das die andere „Hälfte“ der Interpretation für den Quantenformalismus liefert. Der gesamte Nicht-Determinismus der Theorie stammt von **R** und nicht von **U**. *Sowohl U als auch 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. Obwohl 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.