

DAS SYSTEM UND DER REST

DAS SYSTEM UND DER REST

GRENZEN DER GRENZZIEHUNG

MATTHIAS WEIDEMÜLLER

Makroskopisch ist die Welt eindeutig: Etwas ist tot oder lebendig, draußen oder drinnen, links oder rechts. In der quantenmechanischen Welt aber ist alles anders. Atome, Moleküle und die Teilchen des Lichts können Überlagerungszustände einnehmen, die eine derart einfache Grenzziehung nicht mehr zulassen. Zwischenzeitlich haben die Physiker nachgewiesen, dass quantenmechanische Überlagerungszustände auch in der makroskopischen, von uns wahrnehmbaren Welt möglich sind. Derzeit untersuchen sie, inwieweit die Natur solche Überlagerungen nutzt, um biologische Prozesse wie die Photosynthese zu optimieren. Ihre Untersuchungen werfen ein neues Licht auf die Grenzziehung zwischen einem System und seiner Umgebung.



PROF. DR. MATTHIAS WEIDEMÜLLER wurde 2008 auf eine Professur für Experimentalphysik an die Universität Heidelberg berufen und ist seit 2010 Gründungsdirektor des Heidelberger Zentrums für Quantendynamik. Zuvor hatte er einen Lehrstuhl am Physikalischen Institut der Universität Freiburg (2003 bis 2008) inne und forschte am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg (1997 bis 2003). Forschungsaufenthalte führten ihn nach Paris, Amsterdam, São Paulo und Innsbruck. Derzeit etabliert er ein Forschungslabor an der University of Science and Technology of China in Shanghai im Rahmen des „Chinese National 1000 Talent Program“. Matthias Weidemüller ist Vorsitzender der Sektion „Atome, Moleküle, Quantenoptik und Plasmen“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und Fellow der American Physical Society.

Kontakt: weidemueller@uni-heidelberg.de

E

Erkenntnis setzt voraus, dass wir eine Grenze ziehen zwischen dem Objekt unserer Untersuchungen (*System*) und dem Rest (*Umgebung*), über dessen Einfluss auf das System wir nur vage Aussagen treffen können. Bei genauerem Betrachten stellen wir jedoch fest, dass sich diese Grenzlinie selbst in den Naturwissenschaften nur in den wenigsten Fällen scharf ziehen lässt. Dennoch wird sie, oft implizit, als wohldefiniert angenommen. Man denke beispielsweise an die Erkundung unseres Universums oder die moderne Hirnforschung. Wo endet hier das System, welches mit Modellen beschrieben und abgebildet wird, und wo beginnt der Rest, der nicht mehr adäquat in die Modelle integriert werden kann? Die unscharfe Grenzziehung – verbunden mit der Unmöglichkeit, das System auf alles Erdenkliche auszudehnen – verbannt jegliches Spekulieren über eine „Theory of Everything“ oder die Suche nach dem berühmten „Letzten Grund“ in den Bereich der Metaphysik. Es ist vielmehr notwendig, die Rückwirkung der Umgebung auf das System zu verstehen und möglichst quantitativ in einem in sich schlüssigen Bild zu beschreiben. So lassen sich Inkonsistenzen, die allein auf der unscharfen Grenzziehung beruhen, offenlegen und vermeiden.

Viele bis in die Populärliteratur hineinwirkende Paradoxa und scheinbare Widersprüche der Naturerkenntnis lassen sich auf die unscharfe Trennung zwischen System und Rest zurückführen. Die moderne Quantenphysik mit ihren Methoden zur präzisen Kontrolle von quantenmechanischen Objekten wie Atomen, Molekülen und Photonen (den Teilchen des Lichts) erlaubt, die Rolle der Wechselwirkungen zwischen Umgebung und System vertieft zu verstehen. Dies lässt sich am Beispiel des von Erwin Schrödinger aufgeworfenen Paradoxons verdeutlichen.

Schrödingers Gedankenexperiment

In seiner berühmten Arbeit „Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik“ aus dem Jahr 1935 beschreibt Erwin Schrödinger, Physiker und Nobelpreisträger für Physik des Jahres 1933, das folgende Gedankenexperiment: „Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muss): in einem Geiger'schen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Lauf einer Stunde vielleicht

eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die ψ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, dass in ihr die lebende und die tote Katze zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind. Das Typische an diesen Fällen ist, dass eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden lässt. Das hindert uns, in so naiver Weise ein ‚verwaschenes Modell‘ als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen.“

Schrödinger will mit seinem Gedankenexperiment Folgendes verdeutlichen: Die Konzepte der Quantenphysik, insbesondere die ihr innewohnende Möglichkeit, Überlagerungen aus zwei Zuständen zu bilden, lassen sich nicht auf die uns umgebende makroskopische Welt verallgemeinern. Das Atom hingegen kann sich in einem Überlagerungszustand aus angeregtem Zustand (= noch nicht zerfallen) und Grundzustand (= zerfallen) befinden. Bei einer Messung nach einer Stunde, so Schrödinger in seinem Beispiel, fände man das Atom in 50 Prozent der Fälle im angeregten, in 50 Prozent der Fälle im Grundzustand. Vor der Messung hingegen ist das Atom in einer Überlagerung beider Zustände. Im Gegensatz hierzu ist eine Katze nach menschlicher Intuition immer entweder tot oder lebendig, unabhängig davon, ob man in die Stahlkammer schaut oder nicht. Allenfalls ist es vorstellbar, dass man den beiden Zuständen eine gewisse Wahrscheinlichkeit zuordnen kann, abhängig von dem Grad der Information, die man

„Viele scheinbare Widersprüche der Naturerkenntnis sind zurückzuführen auf die unscharfe Trennung zwischen dem Objekt unserer Untersuchung und seiner Umgebung.“

Zentrum für Quantendynamik

Das Zentrum für Quantendynamik wurde im Jahr 2010 im Rahmen des Zukunftskonzepts der Universität Heidelberg eingerichtet und befasst sich mit der Grundlagenforschung im Bereich der Quantenphysik. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Zentrums erforschen unter anderem Phänomene nahe des absoluten Nullpunkts der Temperatur sowie quantenmechanische Effekte in ultraschnellen Prozessen bis hin zu biologisch relevanten Vorgängen. Im Vordergrund stehen Fragen der Dynamik von Systemen und der Entwicklung von Nicht-Gleichgewichtszuständen. Beteiligt sind Arbeitsgruppen aus der Fakultät für Physik und Astronomie, der Fakultät für Chemie und Geowissenschaften sowie aus dem Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik. Mitgründer und Leiter des Zentrums ist Prof. Dr. Matthias Weidemüller.

über den Zustand der Katze in der geschlossenen Höllenmaschine hat. Eine „verschmierte“ Überlagerung zwischen diesen beiden Zuständen der Katze – wie es für quantenmechanische Zustände, welche durch eine Wellenfunktion beschrieben werden, möglich ist – sollte es in unserer makroskopischen Welt nicht geben.

Erfreulicherweise wurde die von Schrödinger vorgeschlagene Höllenmaschine in dieser Form nie in die Realität umgesetzt. Neueste Erkenntnisse zeigen jedoch, dass sich Überlagerungszustände sehr wohl auch für makroskopische Systeme realisieren lassen. Die Überlagerungen gehen jedoch umso schneller in einen definierten Zustand (tot oder lebendig) über, je makroskopischer der Quantenzustand ist. Der Schlüssel für diesen Übergang eines Quantenzustands in einen „klassischen“, wohldefinierten Zustand ist die Wechselwirkung des Systems mit seiner Umgebung.

Überlagerungszustände in der uns umgebenden Welt

In den vergangenen Jahren wurde es möglich, Schrödingers Gedankenexperiment im Labor nachzustellen, glücklicherweise nicht mit Katzen, sondern mit speziellen quantenmechanischen Zuständen, die sich beliebig von mikroskopischen auf makroskopische Dimensionen ausdehnen lassen. Zugleich kann die Wechselwirkung des gesamten Systems mit seiner Umgebung sehr genau kontrolliert

werden. Pionierexperimente unternahmen die Gruppen von Dave Wineland (National Institute of Standards and Technology, Boulder, USA) und Serge Haroche (Ecole Normale Supérieure, Paris, Frankreich) in den 1990er-Jahren. Beide Wissenschaftler erhielten für ihre bahnbrechenden Arbeiten den Nobelpreis für Physik des Jahres 2012. Stellvertretend sollen hier die Experimente von Serge Haroche und seinen Mitarbeitern vorgestellt werden.

In diesen Experimenten wird das radioaktiv zerfallende Atom durch ein Atom mit zwei Zuständen repräsentiert – einem Atom im Grundzustand und einem Atom im angeregten Zustand. Schrödingers Katze wird durch einen speziellen Quantenzustand des Lichts dargestellt, den „Glauber-Zustand“, so benannt nach dem Wissenschaftler Roy Glauber, der im Jahr 2005 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde. Das Besondere am Glauber-Zustand ist: Er lässt sich in einfacher Weise von mikroskopischen Lichtfeldern (im Extremfall das Vakuum, das im Mittel keine Photonen enthält) zu makroskopischen Feldern (zum Beispiel Laserlicht mit einer riesigen mittleren Zahl von Photonen) ausdehnen. Der Überlagerungszustand der Katze wird dann durch die Überlagerung aus zwei derartigen Lichtfeldern dargestellt. In einer anschaulichen Analogie entspricht dies einer Schaukel, welche zwischen linker und rechter Seite hin und her schwingt und die sich in einem

„Die moderne Quantenphysik erlaubt es, die Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umgebung zu verstehen.“

Überlagerungszustand aus Schaukel links (= Katze tot) und Schaukel rechts (= Katze lebendig) befindet. Nun lassen sich derartige Überlagerungszustände von Katzen auf Schaukeln leider nicht beobachten (wir werden gleich sehen, warum), für die entsprechenden Lichtfelder gelingt dies aber sehr wohl.

In ihrem Experiment konnten Haroche und seine Kollegen zeigen, dass sich Überlagerungszustände des Lichtfelds in der oben beschriebenen Art in der Tat erzeugen und nachweisen lassen – und zwar derart, dass der Zustand des Atoms mit dem Zustand des Lichtfelds in quantenmechanischer Weise verkoppelt (im Fachjargon: verschränkt) ist. Abhängig vom Atomzustand ist die „Katze“ (in diesem Fall repräsentiert durch das Lichtfeld) also tot oder lebendig. Selbst der von Schrödinger als „grobsinnliche Unbestimmtheit“ klassifizierte quantenmechanische Überlagerungszustand der Quanten-Katze lässt sich experimentell realisieren. Die Experimente zeigten aber auch, dass sich dieser Überlagerungszustand des Systems umso schwieriger aufrechterhalten lässt, je makroskopischer der Zustand des Lichtfelds ist, also je mehr mittlere Photonen es enthält. Kleinste Einflüsse der Umgebung – in den Experimenten vor allem die Kopplung an das fluktuierende Feld bei einer gewissen Temperatur – sorgen dafür, dass der Überlagerungszustand in einen probabilistischen Zustand übergeht, in dem die Katze definitiv entweder tot oder lebendig ist, wenn auch mit einer wohlbestimmten Wahrscheinlichkeit. Dabei ist die Zeit, während der dieser Übergang stattfindet (die sogenannte Dekohärenzzeit), von der Größe des Systems und der Ankopplung an die Umgebung abhängig. Schätzungen zeigen, dass die Zeitskala für den Übergang in allen uns umgebenden Systemen, so auch

„Die Zeitspanne für den Übergang eines quantenmechanischen in einen wohldefinierten Zustand ist unfassbar klein. Wir können immer nur den einen oder den anderen Zustand beobachten.“

Schrödingers Katze in der Höllenmaschine, unfassbar kurz ist. Beispielsweise liegt die Dekohärenzzeit für eine Masse von einem Gramm auf einer Schaukel mit Auslenkung von einem Zentimeter bei Raumtemperatur unterhalb von 10^{-23} Sekunden. Wir können deshalb immer nur den einen oder den anderen Zustand beobachten und finden unsere Katze auf der Schaukel immer entweder auf der rechten oder der linken Seite – aber niemals gleichzeitig in beiden Zuständen.

Steuert man die Wechselwirkung des Systems mit seiner Umgebung, beispielsweise indem man die Temperatur drastisch bis hin zum Nullpunkt verringert, lassen sich exotische Überlagerungszustände selbst in makroskopischen Systemen erzeugen. Ein spektakuläres Beispiel sind Gaswolken bei Temperaturen von millionstel Grad oberhalb des absoluten Nullpunkts, sogenannte Bose-Einstein-Kondensate. Für deren Realisierung bekamen Wolfgang Ketterle, Eric Cornell und Carl Wieman den Physik-Nobelpreis des Jahres 2001 zuerkannt. Die Eigenschaften derart exotischer Quantenmaterie werden auch in den Laboratorien der Gruppen von Markus Oberthaler (Kirchhoff-Institut für Physik), Selim Jochim, Jianwei Pan und meiner Gruppe (Physikalisches Institut) experimentell untersucht. Alle Gruppen forschen unter dem Dach des „Heidelberger Zentrums für Quantendynamik“, innerhalb dessen wir auch eng mit Gruppen der theoretischen Physik in Heidelberg zusammenarbeiten.

Quantenmechanische Überlagerungen in der Natur

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit sich die Natur quantenmechanische Überlagerungszustände im Sinne von Schrödingers Katze zunutze macht, um biologische Prozesse zu optimieren. Derzeit wird intensiv untersucht, ob auch in biologisch relevanten Systemen – trotz der Einbettung in eine Umgebung bei Zimmertemperatur – Signaturen für quantenmechanische Überlagerungen zu finden sind. Ein möglicher Kandidat für derartige Systeme sind die Lichtsammelkomplexe der Photosynthese. Sie setzen die primäre Lichtenergie mit einem Effizienzgrad von nahezu 100 Prozent in chemische Energie um. Die Physik von Lichtsammelkomplexen, insbesondere auf ultrakurzen Zeitskalen (im Femtosekundenbereich, das heißt innerhalb von 10^{-15} Sekunden), wird in Heidelberg von der Gruppe um Markus Motzkus am Institut für Physikalische Chemie und dem Heidelberger Zentrum für Quantendynamik untersucht.

Wie eine derartig hohe Effizienz von der Natur erreicht werden kann, ist derzeit noch unverstanden. Verschiedene Hypothesen, teilweise basierend auf makroskopischer Überlagerung von elektronischen Zuständen, werden diskutiert, und es wurden Szenarien entwickelt, die sich experimentell prüfen lassen. Ein vertieftes Verständnis des Energietransports in natürlichen Systemen und der Rolle der Umgebung auf diesen Prozess hätte weitgehende Konsequenzen, zum Beispiel für die Entwicklung von hocheffizienten Photovoltaiksystemen.

Aus einer gänzlich anderen Richtung kommend, aber inspiriert durch die Diskussionen mit unseren Kollegen aus der Physikalischen Chemie, konnte meine Gruppe kürzlich einen Beitrag zur Klärung dieser Frage leisten. Ausgehend von einem ultrakalten atomaren Gas nahe des absoluten Temperatur-Nullpunkts konnten wir die Wechselwirkungen nachstellen, die für den Energietransport

THE LIMITS OF DELIMITATION

THE SYSTEM AND THE REST

MATTHIAS WEIDEMÜLLER

Understanding presumes that we are able to differentiate the object of our investigations (system) from the rest (environment), whose influence on the system we can describe only in the vaguest terms. On closer inspection, however, we find that even in the natural sciences the line between system and environment is hardly ever sharply drawn. Nevertheless it is perceived, often implicitly, as being well defined. Think of the exploration of our universe, for instance, or of modern brain research. Where is the end of the system, which is described and mapped with models, and where the beginning of the rest, which can no longer be integrated into these models?

This blurred line – and the impossibility of extending the system to include everything that is conceivable – relegates all speculations about a ‘Theory of Everything’ to the realm of metaphysics. Instead, we must attempt to better understand the interaction between environment and system in order to detect and avoid inconsistencies that are due exclusively to imperfect differentiation. That is exactly what modern quantum physics, with its methods for precise control of objects such as atoms, molecules and photons (light particles), allows us to do. Because in the world of quantum mechanics, everything is different: Atoms and molecules or light particles can assume a state of superposition that makes simple differentiation impossible. Meanwhile, physicists have proved that such superposition is also possible in the ‘classical’ world surrounding us. Under the roof of the Center for Quantum Dynamics, Heidelberg scientists are investigating complex quantum mechanical systems and the boundaries between such systems and their environment. ●

PROF. DR MATTHIAS WEIDEMÜLLER joined Heidelberg University in 2008 as professor of experimental physics and became founding director of the Heidelberg Center for Quantum Dynamics in 2010. He previously held positions at the Institute for Physics of the University of Freiburg (2003–2008) and at the Max Planck Institute for Nuclear Physics in Heidelberg (1997–2003). He completed research stays in Paris, Amsterdam, São Paulo and Innsbruck. He is currently setting up a research laboratory at the University of Science and Technology of China in Shanghai as part of the Chinese “1000 Talent Plan” programme. Matthias Weidemüller is chairman of the section ‘Atoms, Molecules, Quantum Optics and Plasmas’ of the German Physical Society (Deutsche Physikalische Gesellschaft) and a fellow of the American Physical Society.

Contact: weidemueller@uni-heidelberg.de

“Many apparent contradictions in the natural sciences are due to an imperfect differentiation between the object of our investigation – the system – and its environment.”

in Lichtsammelkomplexen verantwortlich sind. Die präzise Kontrolle der Wechselwirkungen zwischen den Atomen wie auch der Ankopplung an die Umgebung erlaubte es uns, ein reduziertes Modellsystem auf nahezu makroskopischer Skala (in diesem Falle im Mikrometerbereich) zu realisieren. Dieses Modell erlaubt es, zu studieren, wie ein probabilistischer Energietransport zu einem vollständig quantenmechanisch determinierten Energietransport übergeht.

Unsere ersten Studien zeigten quantitativ, unter welchen Bedingungen der Transport klassisch im Sinne eines diffusiven Verhaltens verläuft. Derzeit arbeiten wir intensiv an einer Erweiterung unseres Systems, mit dem sich auch der vollständig quantenmechanische Grenzfall erreichen lässt. Dann würde es möglich, im Detail zu untersuchen, wie die Umgebung, zum Beispiel über die Bewegung der Atome, das Verhalten des Systems, in diesem Falle das reduzierte Modell des Lichtsammelkomplexes, beeinflusst. Es wäre dann auch möglich, zu prüfen, ob sich Szenarien realisieren lassen, in denen quantenmechanische Überlagerungen die Effizienz des Energietransports erhöhen.

Ein erweiterter Blick auf die Welt

Viele der sogenannten Gedankenexperimente aus der Frühzeit der Quantenmechanik sind inzwischen in die Realität umgesetzt worden. Am Beispiel von Schrödingers Katze offenbart sich ein mittlerweile vertieftes Verständnis der Quantenmechanik und der Bedeutung der Abgrenzung zwischen dem beobachteten System und seiner Umgebung. Dabei gibt es offensichtlich keine scharfe Grenzlinie zwischen „klassischer“ und „quantenmechanischer“ Welt. Vielmehr bestimmt die genaue Art, in der das System an seine Umgebung koppelt, den Übergang von quantenmechanischen Überlagerungszuständen, beschrieben durch eine durchaus makroskopische Wellenfunktion, zum Auftreten von klassischen Zuständen mit wohlbestimmter Wahrscheinlichkeit.

Die Herausforderung besteht nun darin, diese Grenzlinie für komplexe Systeme quantitativ zu beschreiben und zu erweitern, ähnlich den Ansätzen, die für einfache Systeme (zum Beispiel ein Atom und ein Lichtfeld wie in den Haroche'schen Experimenten) erfolgreich erprobt wurden. Unter dem Dach des Heidelberger Zentrums für Quantendynamik erforschen wir intensiv solche quantenmechanischen Vielteilchensysteme. Spannend wird diese Forschung durch die Tatsache, dass – wie in allen Systemen zunehmender Komplexität – neue, unvorhergesehene Phänomene auftreten können, die unseren Blick auf die Natur radikal erweitern. ●

„Viele der sogenannten Gedankenexperimente aus der Frühzeit der Quantenmechanik sind inzwischen in die Realität umgesetzt worden.“