

Schrödingers Katze kitzeln

Wenn ein Molekül gleichzeitig auseinanderfliegt
und gebunden bleibt

von Dirk Eidemüller

In Erwin Schrödingers Gedankenexperiment ist eine Katze in einer Kiste zugleich tot und lebendig. Was es in unserer Welt nicht geben kann, ist im Mikrokosmos der Quantenphysik durchaus möglich: Dinge, die eigentlich einander ausschließen, geschehen gleichzeitig. Mit einem Reaktionsmikroskop wie COLTRIMS – eine Frankfurter Entwicklung – lässt sich die geheimnisvolle Quantendynamik wie auf einem Präsentierteller betrachten.

Keine andere wissenschaftliche Theorie ist zugleich so erfolgreich in ihren Vorhersagen und dennoch so umstritten in ihrer Interpretation wie die Quantenphysik. Seit ihrer Begründung vor rund 100 Jahren durch Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger und einige weitere Kollegen haben die eigentümlichen Konsequenzen der Quantentheorie Generationen von Physikern und Philosophen in Verwirrung gestürzt.

Kann die Natur wirklich so eigenartig sein, wie die Quantenphysik das behauptet? Sind Teilchen zugleich Wellen? Geschehen Dinge aus blankem Zufall, ohne kausale Wirkung? Kann es sein, dass weit voneinander getrennte Teilchen trotzdem ein eng verbundenes System bilden, obwohl sie keine physikalische Wirkung miteinander austauschen können?

Diese revolutionären Behauptungen müssen nach heutigem Stand der Wissenschaft allesamt mit ja beantwortet werden. Dabei erschienen sie sogar Albert Einstein, der mit seinen frühen Arbeiten selbst wichtige Grundlagen der späteren Quantentheorie gelegt hat, so widersinnig, dass er sie zeit seines Lebens ablehnte, ja sogar bekämpfte und viele Jahre vergeblich nach einer alternativen Theorie suchte. Heute wissen wir: Hier war Einstein auf dem Holzweg. Die Quantenphysik – so eigenartig sie sein mag – funktioniert, auch wenn sie unser Alltagsver-

ständnis von Realität arg strapaziert. Es gibt allerdings inzwischen neuartige Instrumente, mit denen sich das mysteriöse Geschehen im Mikrokosmos eindrucksvoll in Vergrößerung beobachten lässt. Ein solches Gerät heißt COLTRIMS (engl. für »Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy«).

»Wir bezeichnen diese Apparatur auch als »Reaktionsmikroskop«, weil sie es erlaubt, blitzschnelle chemische Reaktionen zu beobachten und dabei die Veränderungen von Atomen und Molekülen auf der fundamentalen quantenphysikalischen Ebene zu untersuchen«, erklärt Reinhard Dörner, der an der Universität Frankfurt eine Arbeitsgruppe für Atomphysik leitet.

Ein Mikroskop für atomare Dynamik

Die Funktionsweise eines Reaktionsmikroskops ist im Prinzip nicht allzu kompliziert: In einer Vakuumkammer schießt man einen sehr starken Laserstrahl oder Röntgenstrahlung auf das zu untersuchende Molekül, das daraufhin zerbricht. Die auseinanderfliegenden Bruchstücke werden mit elektromagnetischen Feldern zu empfindlichen Detektoren geleitet und dort registriert. »Kurz gesagt, machen wir Atome und Moleküle kaputt, um etwas über ihre Struktur herauszufinden«, so Dörner. Da man alle Parameter kennt, lässt sich aus dem Bild am Detektor rückschließen auf das ursprüngliche

Das Herzstück des COLTRIMS-Reaktionsmikroskops: Mit den vielen Kupferplatten, die im Inneren kreisförmig ausgeschnitten sind, werden elektrische Felder erzeugt. Wenn per Laserblitz etwa in der Mitte der Apparatur ein Gasmolekül zertrümmert wird, lenken die Felder die Elektronen nach oben und die positiv geladenen Ionen nach unten.



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_n(t)\rangle = \hat{H} |\psi_n(t)\rangle \Psi$$



In unserer Welt kann eine Katze nicht gleichzeitig tot und lebendig sein. In der Quantenwelt, so berechnete Erwin Schrödinger, wäre dies jedoch möglich. Quantenteilchen können mehrere Werte zugleich einnehmen.

Molekül, also auf die Position der einzelnen Atome im Molekül sowie die Orientierung des Moleküls im Raum.

Damit lässt sich nicht nur die allgemeine Struktur von Molekülen ermitteln, sondern sogar seine Händigkeit – also ob es in einer linksdrehenden oder rechtsdrehenden Variante vorliegt. Das ist vor allem bei Arzneistoffen relevant, denn Biomoleküle mit der falschen Händigkeit können im Extremfall stark toxisch sein. Diese Analyse funktioniert bereits bei einfachen Molekülen aus bis zu 20 Atomen.

Dabei ist die Technik noch relativ jung und erst seit rund 20 Jahren etabliert. »COLTRIMS ist eine Frankfurter Entwicklung, die von Professor Horst Schmidt-Böcking vorangetrieben wurde«, erzählt Dörner. »Noch vor zehn Jahren gab es weltweit nur rund zwei Dutzend dieser Reaktionsmikroskope, heute sind es schon deutlich über 100, und es werden immer mehr.« Attraktiv



an diesen Geräten ist, dass man mit ihnen quantenphysikalische Prozesse auf winzigen räumlichen und zeitlichen Skalen sichtbar machen kann.

Denn Quantenteilchen verhalten sich nicht nur wie Wellen. Sie können auch – solange sie nicht beobachtet werden – eigenartige Überlagerungszustände einnehmen, bei denen sie zwei oder mehr Werte zugleich annehmen. Erwin Schrödinger war von dieser Konsequenz seiner eigenen Theorie derart befremdet, dass er sich später von der Quantentheorie ab- und ganz neuen Betätigungsfeldern zuwandte. Er illustrierte diese Überlagerungszustände mit seinem berühmten Paradoxon von »Schrödingers Katze«. In diesem Gedankenexperiment ist eine Katze in einer Kiste mit einem quantenphysikalischen Tötungsmechanismus eingesperrt, der sie mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit umbringt. Schrödinger zufolge ist der Zustand der armseligen Katze zur Hälfte tot und zur Hälfte lebendig, solange die Kiste nicht geöffnet wird. Der Zustand der tot-lebendigen Katze ist quasi über die Kiste »verschmiert«.

ZUR PERSON



Reinhard Dörner, Jahrgang 1961, studierte Physik und Philosophie in Frankfurt und Aachen und promovierte in Physik an der Universität Frankfurt. Es folgte ein Aufenthalt am Lawrence Berkeley National Laboratory in den USA, bevor er nach Frankfurt zurückkehrte. Seit 2002 ist er dort Professor am Institut für Kernphysik und war seitdem auch wiederholt Studiendekan für Physik. Von 2010 bis 2017 war er geschäftsführender Direktor des Instituts für Kernphysik. 2016 gewann er den Helmholtz-Preis, die höchste Auszeichnung für Metrologie in Deutschland, die für besondere Leistungen bei der Entwicklung von Präzisionsmessungen vergeben wird. Seit 2016 ist er außerdem Mitglied des Editorial Board von Physics Review Letters, der wichtigsten physikalischen Fachzeitschrift..

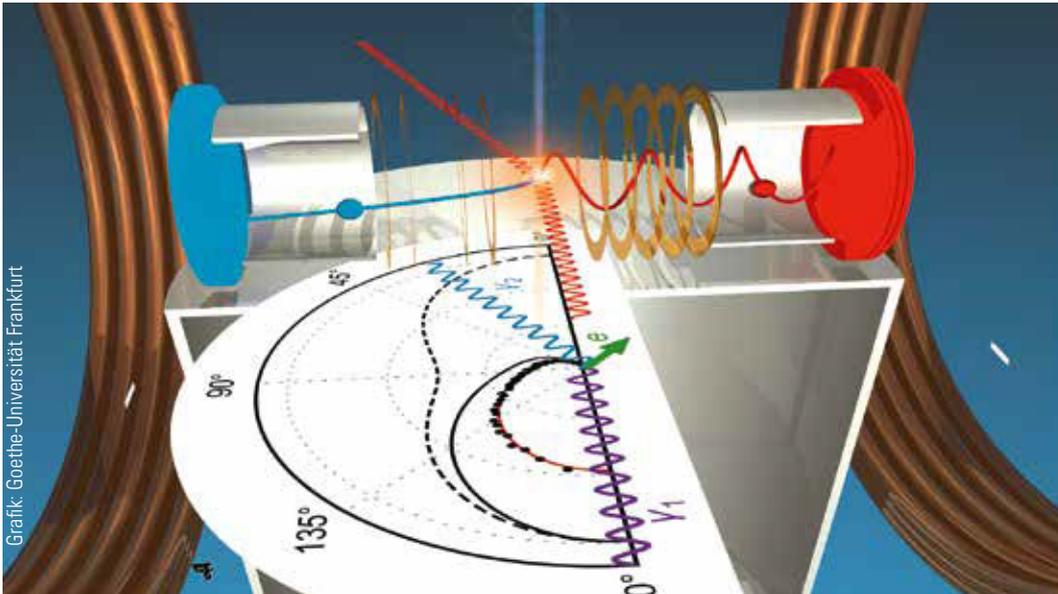
doerner@atom.uni-frankfurt.de

Ein katzenhaftes Helium-Molekül

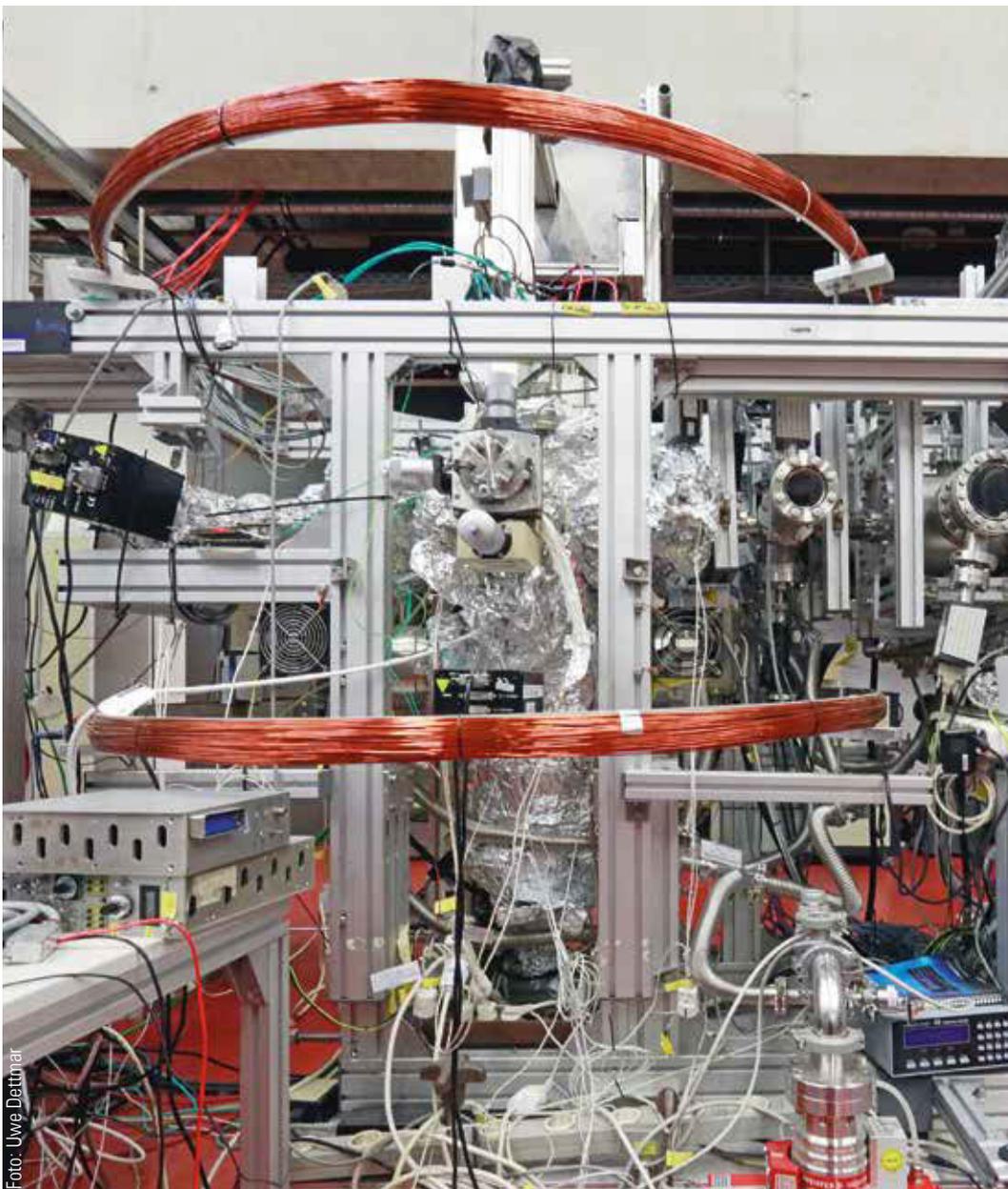
»Was bei Katzen und anderen großen Objekten unmöglich ist, lässt sich mit Molekülen aber durchaus bewerkstelligen«, erläutert Dörner. Die Frankfurter Arbeitsgruppe hat ein Experiment ausgeklügelt, bei dem genau dieser Effekt sichtbar wird. Dazu haben die Forscher Helium-Atome extrem heruntergekühlt. Eigentlich geht das Edelgas keine Bindungen ein. Bei sehr tiefen Temperaturen können sich dennoch zwei Helium-Atome zu einem sehr locker gebundenen Molekül zusammenschließen.

»Auf dieses Helium-Molekül schießen wir dann hintereinander zwei Laserpulse, einen schwachen und einen starken«, sagt Dörner. Der erste Puls bringt das Molekül in einen der eigenartigen quantentypischen Überlagerungszustände. So wie Schrödingers Katze sowohl tot als auch lebendig ist, ist das Helium-Molekül nun halb intakt und halb auseinandergebrochen. Diese Überlagerung, die in der makro-

Grafik Katze: local doctor/shutterstock, Foto: IMAGNO/Votava/Süddeutsche Zeitung Photo



So funktioniert das COLTRIMS-Reaktionsmikroskop: Schlägt ein Laser oder Röntgenblitz (Photon, rote Wellenlinie) ein Elektron aus einem Molekül, so wird das Elektron durch elektrische Felder in einer schraubenförmigen Bewegung nach rechts abgelenkt. Das positiv geladene Ion hingegen wird in gerader Linie nach links dirigiert. An beiden Seiten messen Detektoren, wie lange die Teilchen nach Zerschlagung des Moleküls bis zum Auftreffen benötigen.



Viel Technik: das COLTRIMS-Reaktionsmikroskop in Frankfurt.

Grafik: Goethe-Universität Frankfurt

Foto: Uwe Dettmar

A close-up photograph of a circular copper mesh filter, likely used in a laboratory setting. The mesh is composed of fine, interwoven copper wires, creating a dense grid pattern. The filter is mounted on a white surface, and other parts of the apparatus are visible in the background. A yellow text box is overlaid on the left side of the image, containing text in German.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mit dem COLTRIMS-Reaktionsmikroskop lassen sich extrem schnelle chemische Reaktionen beobachten. So wurde der aktuelle Weltrekord in der Kurzzeitmessung (247 Zeptosekunden) mit einem solchen Reaktionsmikroskop aufgestellt.
- Das Instrument kann zum Beispiel die Überlagerung zweier Elektronenwellen sichtbar machen, die jeweils nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entstehen – ein Effekt aus der Quantenwelt.



Sehr energiereiche Röntgenblitze liefert die Röntgenstrahlungsquelle PETRA III am Beschleunigerzentrum DESY in Hamburg. Am Strahlrohr P04 in der Experimentierhalle »Max von Laue« (langes, gebogenes Gebäude auf dem Luftbild) steht ein COLTRIMS-Reaktionsmikroskop, eines von mittlerweile zahlreichen solcher Instrumente rund um den Globus. In Hamburg machen auch Physikerinnen und Physiker aus Frankfurt Experimente.

skopischen Welt nicht auftreten kann und deshalb unserer Anschauung widerspricht, hat aber sehr reale Effekte, wenn man sie mithilfe des Reaktionsmikroskops vergrößert.

Das geschieht mit dem zweiten, starken Laserpuls. Dieser schlägt die Elektronen aus dem System, sodass sich nun die »nackten«, positiv geladenen Helium-Ionen gegenseitig abstoßen. Das führt aufgrund des vorher induzierten Überlagerungszustands zu interessanten Interferenzeffekten, die sich am Detektor messen lassen. »Wir kitzeln sozusagen Schrödingers Katze und bringen sie dazu, sich zu bewegen«, erklärt Dörner. »Was wir dann am Detektor beobachten können, ist, wie die unbewegte, tote Katze und die lebendige, angetriebene Katze beide einen Einfluss auf das Messergebnis haben.« Solche Phänomene sichtbar machen zu können, die Koryphäen wie Einstein und Schrödinger zur Verzweiflung getrieben haben, ist aber nur eine der faszinierenden Möglichkeiten, die Reaktionsmikroskope eröffnen.

Die schnellste Zeitmessung

Da sie Dinge auf winzigen Skalen vergrößern, haben sie kürzlich sogar die schnellste Zeitmessung eines natürlichen Prozesses möglich gemacht. »Wir konnten bestimmen, wie lange ein Lichtpuls braucht, um durch ein Wasserstoffmolekül zu fliegen«, sagt Dörner. Dies dauert 247 Zeptosekunden – und ist um Größenordnungen kürzer, als das Licht für eine einzige Schwingung braucht. Eine Zeptosekunde ist eine billionstel milliardstel Sekunde. Nun gibt es kein Messgerät, das eine so unglaublich

kurze Zeitspanne direkt messen könnte. Stattdessen machten sich die Wissenschaftler die hochenergetische Röntgenstrahlung am Hamburger Beschleunigerzentrum DESY zunutze, die sie auf Wasserstoffmoleküle in einem dort installierten Reaktionsmikroskop lenkten. Der Röntgenstrahl schlug mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit ein Elektron am einen oder anderen Ende aus dem Molekül (das aus zwei Protonen und zwei Elektronen besteht).

Da Quantenteilchen zugleich Wellen sind, entstanden bei dieser Reaktion zwei überlagerte Elektronenwellen (wie bei Schrödingers Katze), die aber minimal zueinander versetzt waren – wie die Wasserwellen, die entstehen, wenn man einen flachen Stein über einen Teich hüpfen lässt. Im Gegensatz zu einer direkten Zeitmessung lässt sich die Interferenz zwischen diesen Wellen im Reaktionsmikroskop aber gut bestimmen – und daraus die Zeitspanne ermitteln, wie lange der Röntgenpuls gebraucht hat, um das Elektron auf der einen oder anderen Seite zu erreichen.

Diese Rekordmessung belegt eindrucksvoll, wie man mit Reaktionsmikroskopen extrem kurze Zeitskalen zugänglich machen kann. »Wir wollen umgekehrt bei größeren Molekülen auch untersuchen, wie die Ausbreitung von Informationen gebremst wird, wenn viele Elektronen beteiligt sind«, sagt Dörner. Was nun Einstein und Schrödinger zu diesen Quantentricks mit Zeitmessungen anhand von Teilchenwellen und halb-stillstehenden, halb-expandierenden Katzenmolekülen gesagt hätten, das steht allerdings in den Sternen. ●

Detail des COLTRIMS-Herzstücks: Der Elektronendetektor besteht aus feinen Kupferfäden. Trifft ein Elektron diese Fäden, so wird ein Signal ausgelöst.

Der Autor

Dirk Eidemüller
dirk.eidemuller@gmx.de

(siehe Seite 24)