

Der Scientist of the Year und sein »Gemischtwarenladen«

Mit dem COLTRIMS-Reaktionsmikroskop hat Reinhard Dörner ein völlig neues Beobachtungsfenster für chemische Reaktionen und quantenmechanische Prozesse aufgestoßen

Wenn Reinhard Dörner über seine Forschung am Institut für Kernphysik spricht – die ihm eine große Anzahl Veröffentlichungen in den angesehensten Fachzeitschriften sowie kürzlich die Frankfurter Auszeichnung „Scientist of the Year“ eingetragen hat – dann sagt er mit einem Augenzwinkern: „Wir erforschen hier einen ziemlichen Gemischtwarenladen.“ Und fügt sofort hinzu: „Genauso gut könnte ich allerdings sagen, dass unsere Methode universell einsetzbar ist. Chemische Prozesse lassen sich damit ebenso untersuchen wie fundamentale Zusammenhänge der Quantenmechanik.“

So wie die untersuchten Vorgänge unterscheiden sich die Messaufbauten und die Orte, an denen Dörner und seine Mitarbeiter experimentieren: im Laserlabor an der Goethe-Uni oder an Großforschungsanlagen in den USA, Japan und Europa. Allen Experimenten ist jedoch gemein, dass sich die Forscher eines COLTRIMS bedienen. Das ist ein Reaktionsmikroskop, mit dem Wissenschaftler ins Innere von Atomen und Molekülen „blicken“ und beobachten, wie sich die Elektronen und Atomkerne extrem schnell bewegen und dabei gegenseitig beeinflussen.

Ein COLTRIMS darf man sich aber nicht wie ein gewöhnliches Lichtmikroskop vorstellen, das in medizinischen oder biologischen Labors steht. Auch von einem Elektronenmikroskop, das die Untersuchungsobjekte mit einem Elektronenstrahl „beleuchtet“, unterscheidet es sich wesentlich: Ein Strahl eines sehr kalten Gases kreuzt einen starken Laser-, Röntgen- oder Molekülstrahl, so dass die Atome beziehungsweise Moleküle gespalten werden. Ein Detektor registriert nach der Kollision, wann und wo die Bruchstücke („Fragmente“) auf seiner Oberfläche auftreffen.

Damit können die Wissenschaftler bestimmen, in welche Richtung die Fragmente auseinandergefliegen sind und wie schnell sie sich bewegt haben. Dörners Mitarbeiter Markus Schöffler erläutert: „Das können Sie sich vorstellen wie bei einem Feuerwerk. Wenn eine Leuchtrakete explodiert, werden die einzelnen leuchtenden Kügelchen entsprechend ihrer Anordnung in der Rakete in der Luft verteilt, und die bunten Bilder des Feuerwerks entstehen.“

Umgekehrt kann man aus einer Aufnahme kurz nach der Explosion darauf schließen, wie die Chemikalien in der Leuchtrakete angeordnet waren – beziehungsweise die Fragmente in dem Molekül, das mit COLTRIMS untersucht wird: Zusammen mit Wissenschaftlern

der TU Darmstadt haben Schöffler und Dörner die Struktur der Verbindung Bromchlorfluormethan abgebildet. Diese existiert in zwei verschiedenen Formen: Als Bild und Spiegelbild – das besteht zwar aus den gleichen Atomen, verhält sich zum „Original“ aber so wie ein rechter Handschuh zu seinem linken Gegenstück.

Wirkstoffe in links- und rechtshändiger Form

Prominentes Beispiel dieser so genannten Händigkeit ist die rechts- und linksdrehende Milchsäure, die

So können die Wissenschaftler den Verlauf von Reaktionen verfolgen, die so schnell ablaufen, dass sie bislang von keiner Kamera der Welt erfasst werden konnten. Die Uhr, die die Physiker dafür benutzen, tickt unglaublich schnell und unglaublich präzise; mit der COLTRIMS-Technik lesen sie die Zeiger ab. Als Uhrwerk, das diese antreibt, benutzen sie das Lichtfeld, mit dem die Moleküle zertrümmert werden. Es schwingt nämlich regelmäßig hin und her, und diese Schwingung beeinflusst, wo und wie die Fragmente auf dem Detek-

Helium-Moleküls demonstrierten sie, wie aus diesem nacheinander zwei Elektronen herausgeschlagen werden, und wie sich die Atome dabei bewegen.

„Mit diesen ersten Arbeiten haben wir gezeigt, dass man tatsächlich Filme von Atomen und Molekülen drehen kann“, sagt Jahnke. „Es gibt aber noch viele Prozesse, die wir betrachten wollen, weil wir bislang nur ihr Endergebnis und nicht den genauen Verlauf kennen, etwa wenn Elektronen aus Atomen herausgelöst werden, oder wenn sich Moleküle in chemischen Reak-

erläutert Schmidt. „zumindest solange man die Teilchen nicht beobachtet.“

Das Interferenzmuster sollte jedoch – gemäß Einsteins Argumentation – nie zu beobachten sein. Wenn die Teilchen durch den Doppelspalt gehen, geben sie diesem nämlich einen kleinen Stoß: Nach rechts, wenn sie durch den rechten Spalt gehen, und nach links, wenn sie durch die linke Öffnung gehen. Dass ein einziges Teilchen so wie eine Wasserwelle gleichzeitig durch beide Spalte geht, konnte Einstein sich nicht vorstellen. Sein wichtigster Gegner in dieser Debatte um die Quantenmechanik, der dänische Physiker Niels Bohr, konnte ihm damals nur theoretische Überlegungen entgegensetzen: Er wandte ein, dass die Regeln der Quantenmechanik nicht nur auf das Teilchen, sondern auch auf den Doppelspalt angewandt werden müssten. Insbesondere gelte für ihn die quantenmechanische Unschärferelation – der Doppelspalt erhalte beim Durchgang des Teilchen gleichzeitig einen Stoß nach rechts und links.

Schmidt und Dörner haben Bohrs Meinung und seine auch heute noch verrückt klingende Vermutung jetzt bestätigt. Anstelle des Laserstrahls, mit dem Moleküle gespalten werden, verwendet Schmidt positiv geladene Wasserstoff-Deuterium-Moleküle. Auch er kreuzt sie mit einem Gasstrahl, der bei diesem Experiment allerdings aus Helium-Atomen besteht. Die Wasserstoff-Deuterium-Moleküle wirken dann wie ein Doppelspalt; die Teilchen, die hindurchgehen, sind die Helium-Atome. Damit versetzen sie das Doppelspalt-Molekül in Rotation: rechts herum, wenn das Teilchen durch die rechte Öffnung geht, links herum, wenn es durch die linke Öffnung geht.

Und das können die Physiker mit COLTRIMS-Messungen sichtbar machen: Ein Teil der Doppelspalt-Moleküle bricht nämlich infolge des Stoßes mit den Helium-Atomen auseinander und wird vom Detektor registriert. „Dabei beobachten wir, dass der Doppelspalt in der Tat rechts und links herum rotiert – das Teilchen geht durch beide Öffnungen gleichzeitig“, berichtet Schmidt. Gleichzeitig haben die Forscher hinter dem Doppelspalt das Interferenzmuster beobachtet. „Was im Mikrokosmos passiert, widerspricht unserer Alltagserfahrung. Damit hatte Einstein Schwierigkeiten, und auch unser heutiges Hirn will das nicht akzeptieren“, fasst Schmidt zusammen. „Aber das Experiment untermauert einmal mehr die Grundlagen unseres physikalischen Weltbildes“, ergänzt Reinhard Dörner.

Stefanie Hense



Reinhard Dörner und sein Team. In der Hand hält er ein Teil eines COLTRIMS-Reaktionsmikroskops. Foto: Lecher

von Bakterienkulturen im Joghurt produziert wird. Aber auch für die Wirksamkeit von Medikamenten kann es entscheidend sein, ob der Wirkstoff in rechts- oder linkshändiger Form vorliegt; früher konnte das allenfalls auf indirektem Weg bestimmt werden. „Die Strukturbestimmung mittels COLTRIMS eröffnet ganz neue Perspektiven für die Untersuchung händiger Moleküle in Physik, Chemie und Pharmazie“, prognostiziert Markus Schöffler. Auch andere Industriezweige könnten davon profitieren – so riecht beispielsweise ein ätherisches Öl, das die Substanz Carvon enthält, nach Kümmel, wenn es sich um linkshändiges Carvon handelt. Liegt es hingegen in seiner rechtshändigen Form vor, so riecht das ätherische Öl nach Minze.

Dörner und seine Mitarbeiter begnügen sich aber nicht mit diesen Anwendungen, so technologisch bedeutsam sie auch sein mögen. Sie haben das COLTRIMS-Grundprinzip kürzlich um einen wichtigen Aspekt erweitert: Der Detektor registriert jetzt nicht nur die auseinanderfliegenden Fragmente, sondern auch, in welcher Reihenfolge die Bilder entstanden sind, so dass diese später entsprechend zusammengesetzt werden können.

tor landen. Weil man das Lichtfeld sehr genau kennt, kann man daher sehr genau den Zeitpunkt bestimmen, zu dem das Bild von dem Fragment entstanden ist.

„Wir können damit eine Art Film von einem atomaren oder molekularen Prozess aufnehmen. Betrachten wir zum Vergleich ein Fußballspiel: Mit der normalerweise eingesetzten Technik können wir ein einziges Standbild des gesamten Spiels aufnehmen“, erklärt Dörners Mitarbeiter Till Jahnke. „Man erfährt quasi nur das Endergebnis. Mit COLTRIMS sind wir in der Lage, zusätzliche Aufnahmen während des Spiels zu machen. So erfahren wir, wo sich Spieler und Ball als nächstes hinbewegen werden. So können wir den Spielverlauf mit allen Flanken und Doppelpässen direkt verfolgen.“ Jahnke und seine Kollegen haben „gefilmt“, wie sie mit Hilfe eines starken und sehr kurzen Laserblitzes ein Wasserstoff-Molekül und mit Hilfe von Synchrotronstrahlung ein – recht exotisches – Molekül aus zwei Helium-Atomen spalten. Für das Wasserstoff-Molekül fanden sie heraus, dass sie den genauen Ablauf des Spaltvorganges durch die Eigenschaften des Laserblitzes beeinflussen können. Im Fall des

tionen zu neuen Verbindungen zusammenschließen.“ In erster Linie sei das natürlich Grundlagenforschung, aber aus dem Verständnis für die mikroskopischen Vorgänge erwachse ja oftmals die Fähigkeit, die Reaktionen auch zu steuern. „Das wiederum ermöglicht eines Tages vielleicht technologisch bedeutsame Anwendungen, die man sich zuerst nicht hätte träumen lassen“, so Jahnke.

Und Nils Bohr hatte doch Recht ...

Andererseits konnten Dörner und sein Mitarbeiter Lothar Schmidt kürzlich mit Hilfe der COLTRIMS-Technik eine jahrzehntealte alte Debatte zwischen Theoretikern auch experimentell beenden: Albert Einstein, der Zeit seines Lebens der Quantenmechanik skeptisch gegenüberstand, schlug vor mehr als achtzig Jahren ein Gedankenexperiment vor, um die Widersprüchlichkeit der damals neu entwickelten Theorie zu beweisen: „Wenn Teilchen durch einen Doppelspalt gehen, also durch zwei nebeneinanderliegende Öffnungen in einer Wand, dann ist hinter diesem Spalt entsprechend der Quantenmechanik ein charakteristisches Interferenzbild zu beobachten, ähnlich einem Muster, das von Licht oder Wasserwellen erzeugt wird“,