

Moleküle in Zeitlupe

Langsamkeit bedeutet in der Mikrowelt Kälte. Die Forschung an abgebremsten, ultrakalten Atomen hat jüngst spektakuläre Resultate erbracht. Dazu zählt das Bose-Einstein-Kondensat, das für die Quantenphysik schon unverzichtbar geworden ist. Kalte Moleküle sollten also ein ähnliches Potenzial haben, doch leider lassen sie sich nur schwer erzeugen. Die Gruppe um **GERARD MEIJER**, Direktor am **FRITZ-HABER-INSTITUT DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT** in Berlin, hat eine effiziente Molekül-Bremsanlage entwickelt und berichtet darüber im folgenden Beitrag.

Physiker scheinen Vollgas besonders zu lieben: Mit großen Teilchenbeschleunigern schleudern sie Materiebausteine aller Art auf möglichst hohe Geschwindigkeiten, um sie dann aufeinanderprallen zu lassen. Die subatomaren Spuren solcher Kollisionen liefern tatsächlich seit Jahrzehnten wertvolle Information über die Bausteine unseres Kosmos. Doch auch extreme Langsamkeit fasziniert viele Physiker. Wir arbeiten am Fritz-Haber-Institut der Max-

Planck-Gesellschaft etwa an Techniken, mit denen wir Moleküle effizient abbremsen können.

Unsere Moleküle kommen dabei aus einem Strahl stark verdünnten Gases. In einem „normal“ warmen Gas rasen die meisten Moleküle so schnell herum, dass nur ein Überschalljet mithalten könnte. Mit unserer Anlage gelingt es, sie abzubremsen und regelrecht in den Griff zu bekommen. Technisch ist das gar nicht so einfach. Die Mühe lohnt

sich aber, weil wir an den langsamen Molekülen faszinierende Grundlagenforschung betreiben können.

Für die Bremsstechnik benutzen wir die Methoden aus der Beschleunigerphysik. Wir setzen sie mit umgekehrter Wirkung ein, verwandeln also eine Schleuder in einen Fangkorb. Die langsamen Moleküle lassen sich speichern und sehr genau studieren, etwa die Quanteneigenschaften ihrer komplexen Elektronenhüllen. Oder wir machen mit ihnen weiterfüh-



Hightech im edlen Design: Der Berliner Stark-Verzögerer (gegenüberliegende Seite) bremst Moleküle ab. Danach erreichen sie die Falle, an der gerade Bas van de Meerakker schraubt (oben).

de Experimente, zum Beispiel sanfte Kollisionen in Zeitlupe.

In der Physik ist Langsamkeit nichts anderes als Kälte, sobald es um kleine Teilchen geht. Hohe Temperaturen entstehen, wenn die Atome oder Moleküle in Gasen oder Flüssigkeiten sich schnell bewegen – oder in fester Materie heftig hin und her schwingen. Bei Raumtemperatur flitzen etwa Stickstoff-Moleküle mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 500 Meter pro Se-

kunde durch die Luft und sind damit schneller als der Schall mit 340 Meter pro Sekunde. Wärme ist also Bewegungsenergie. Entziehen wir diese den Molekülen durch eine kräftige Vollbremsung, dann kühlen wir sie automatisch ab.

Bei Atomen in verdünnten Gasen beherrschen Physiker solche Bremsstechniken mittlerweile sehr erfolgreich. Routinemäßig erreichen sie im Labor extrem niedrige Temperaturen, die vor 20 Jahren noch reine Science-

Fiction gewesen wären. Diese liegen nur wenige Millionstel über dem absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273,15 Grad Celsius. Die Konsequenzen dieses Fortschritts sind wissenschaftlich sehr aufregend und manchmal völlig unvorhergesehen.

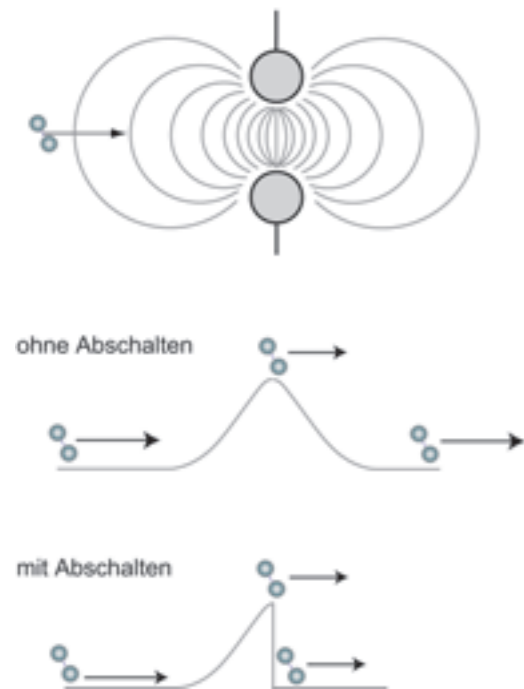
Um ultrakalte Atomwolken herzustellen, kombinieren die Experimentatoren die bremsende Wirkung, die Laserlicht auf Atome entfalten kann, mit Magnetfeldern. Diese halten die kalten Atome fest. Mit solchen magneto-optischen Fallen gelingt es seit gut zehn Jahren zum Beispiel, die berühmten Bose-Einstein-Kondensate herzustellen. Ein Bose-Einstein-Kondensat ist ein kollektiver Quantenzustand, in den eine Wolke aus bestimmten Atomsorten „kondensiert“, wenn sie extrem abgekühlt wird. An diesem gefangenen Quantenkollektiv fasziniert Physiker die Eigenschaft, dass es von praktisch allen Seiten völlig offen zugänglich und manipulierbar ist.

GOLDGRÄBER IM QUANTENLAND

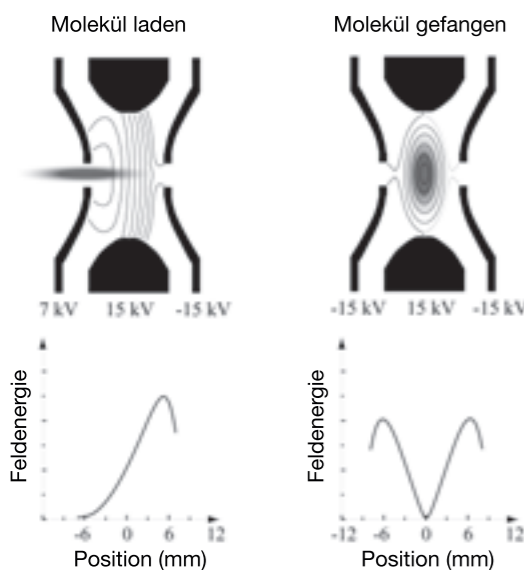
Aus diesem Grund lässt es sich viel einfacher erforschen als andere Vielteilchen-Quantenzustände: Die Supraleitung etwa versteckt sich im nur schwer zugänglichen Inneren von Metallen. Die erste gelungene Herstellung von Bose-Einstein-Kondensaten 1995 löste deshalb eine regelrechte Goldgräberstimmung aus. Die Pioniere Eric Cornell, Carl Wieman und Wolfgang Ketterle erhielten dafür schon 2001 den Nobelpreis für Physik (MAXPLANCKFORSCHUNG 4/2001, Seite 62ff.).

Es überrascht also nicht, dass Physiker dieses spannende Spiel nicht mehr allein mit Atomen treiben wollen. Ultrakalte Moleküle versprechen vielleicht noch aufregendere Entdeckungen. Doch das extreme Abkühlen von Molekülen gestaltet sich viel schwieriger als bei Atomen. Leider versagt meist die Laserkühlung, die sich bei Atomen so wunderbar bewährt hat. Einfach gesagt schlucken die Atome mit ihren Elektronenhüllen die Lichtquanten (Photo-

Bremselement und sein elektrisches Feld



Zunächst trifft das Molekül auf das elektrische Feld eines Bremselements (oben). Dann muss es einen Energieberg erklimmen und bremst bis zum Gipfel (Mitte). Hinunter würde es wieder beschleunigen, doch das wird durch rechtzeitiges Abschalten des Bergs verhindert (unten).



Die Falle hält das gebremste Molekül (graue Wolke) mit ihrem elektrischen Feld wie ein Kissen auf (links). Jetzt ist das Molekül gefangen, wobei das Feld wie ein Trichter wirkt (rechts).

nen) aus dem entgegenkommenden Laserstrahl. Später strahlen sie diese Photonen wieder ab, und zwar meist zufällig in irgendeine Richtung. In der Bilanz bremst der Laserstrahl das Atom wie ein Boxer mit gezielten Treffern seinen anrennenden Gegner, während dieser – das Atom – nur wirkungslos um sich schlägt.

Leider funktioniert dieser physikalische Brems-Boxkampf bei Molekülen in der Regel nicht. Diese bestehen aus mehreren Atomen und haben viel komplexere Elektronenhüllen. Darin wandeln sie die Impulse der auftreffenden Laser-Photonen anders als Atome um und werden kaum langsamer.

Wir mussten also einen anderen Weg gehen, um eine wirkungsvolle Molekülbremse zu entwickeln. Dazu taugen gegenwärtig nur wenige Techniken. In Berlin benutzen wir einen kleinen Teilchenbeschleuniger, den wir umgekehrt als Teilchenbremse betreiben. Inzwischen schaffen wir es damit, Moleküle auf wenige Tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt zu kühlen. Unser Gerät heißt „Stark-Decelerator“, was man mit Stark-Verzögerer übersetzen kann. Seinen Namen verdankt es nicht etwa einer besonders starken Wirkung, sondern er erinnert an Johannes Stark. Der deutsche Physik-Nobelpreisträger von 1919 hatte einen Effekt entdeckt, den unser Antischleuniger ausnutzt, um elegant ein weiteres Problem zu lösen: Beschleuniger wirken nämlich nur auf elektrisch geladene Teilchen. Und das gilt im Prinzip auch für die von ihnen abgeleiteten Verzögerer. Wir wollen aber elektrisch neutrale Moleküle bremsen, weil diese uns mehr interessieren. Und hier hilft der Stark-Effekt.

ELEKTRISIERENDE BREMSANLAGE

Normalerweise füttern Physiker ihre Beschleuniger mit Atomen, deren unvollständige Elektronenausstattung für eine elektrische Ladung sorgt, oder mit elektrisch nicht neutralen Elementarteilchen. Wegen ih-

rer Ladung spüren diese das elektrische Feld des Beschleunigers. Auf diesem Feld surfen sie wie auf einer Welle mit, während es in der Vakuumröhre immer schneller wird – oder im Verzögerer immer langsamer. Der Stark-Effekt erlaubt es uns jedoch, auch neutrale Moleküle mit kräftigen elektrischen Feldern mitzureißen. Denn in vielen Molekülen sind die elektrischen Ladungen räumlich etwas ungleichmäßig verteilt. Diese „polaren“ Moleküle verhalten sich wie winzig kleine Antennen, die auf das elektrische Feld des Stark-Verzögerers reagieren.

RITT AUF DER NANOKANONENKUGEL

Allerdings ist diese Wechselwirkung mit dem elektrischen Feld sehr viel schwächer als bei elektrisch geladenen Teilchen. Abhängig vom Molekül kann sie nur ein Zehntausendstel des normalen Werts betragen. Trotzdem gelingt es uns, mit unserem Stark-Verzögerer die Moleküle voll unter Kontrolle zu bekommen. Die eigentliche Molekülbremse ist dabei nur etwas über einen Meter lang. Im Vergleich zu den oft riesigen Teilchenbeschleunigern, die allerdings auf einem viel höheren Energieniveau arbeiten, ist unser Experiment also sehr handlich. Entwickelt haben wir es noch am FOM-Institut für Plasmaphysik Rijnhuizen, das im niederländischen Nieuwegein steht. Seit Ende 2003 setzen wir diese Arbeit am Fritz-Haber-Institut fort, das uns optimale Forschungsbedingungen bietet.

Um die Wirkungsweise des Stark-Verzögerers besser zu verstehen, machen wir ein kleines Gedankenexperiment. Wir suchen uns ein Molekül aus dem Gasstrahl und setzen uns darauf wie einst Baron Münchhausen auf seine Kanonenkugel. Auf unserem Nanogeschoss rasen wir nun mit einigen hundert Metern pro Sekunde auf den Eingang des Stark-Verzögerers zu. Wir sehen ihn von vorne als eine Art metallenes Doppelkreuz, in dessen zentrale Öffnung wir hineinschießen. Dabei bremst ei-

ne wachsende Kraft unsere molekulare Kanonenkugel sanft ab.

Im Inneren des Kreuzes erkennen wir, dass seine Metallstäbe hintereinander angeordnet sind. In diesem Moment schaltet die Bremse plötzlich ab. Unser Kanonenkugeltacho teilt uns mit, dass wir ungefähr ein Prozent unserer Geschwindigkeit verloren haben. Schon rast das nächste Metallkreuz auf uns zu, wo sich dieses Spiel wiederholt. Nach gut hundert solcher Kreuze stehen wir am Ende fast still.

Um das Molekül immer im richtigen Moment beim Durchflug durch das nächste Bremsselement zu erwischen, jagt die Steuerung des Stark-Verzögerers kurze Pulse elektrischer Hochspannung nacheinander durch alle Elemente. Die Pulse springen diese Kaskade wie ein Lauflicht entlang, das immer langsamer wird. Trifft nun ein polares Molekül im richtigen Moment auf ein Bremsselement, dann wirkt das kurz anschwelende elektrische Feld wie ein kleiner Hügel aus reiner Energie. Das Molekül wird langsamer – so als ob es einen virtuellen Berghang hinaufklettern müsste, bis es im Zentrum des Elements den „Energiegipfel“ erreicht. Allerdings würde es nun beim Herausfliegen den virtuellen Hügel auf der Rückseite wieder herunterrutschen. Am Ende wäre es genauso schnell wie anfangs, nichts wäre gewonnen. Um das zu verhindern, schaltet das Feld ab, sobald das Molekül den Energiegipfel erreicht. Der Berg verschwindet sozusagen unter den Füßen des Moleküls, und es kann nicht wieder beschleunigen.

Nun ist noch die Frage offen, wie wir ein Molekül dazu bringen, genau auf einen gerade anliegenden Puls am Eingang des Stark-Verzögerers zu treffen. Ganz einfach: Unser Gasstrahl ist ebenfalls gepulst. Er besteht aus Molekülpaketen, deren Ankunft wir mit den Spannungspulsen des Verzögerers koordinieren. Folglich erhalten wir am Ende eines Bremszyklus auch nicht nur ein Molekül, sondern gleich eine ganze Gruppe von Molekülen in der erwünschten Geschwindigkeit.

Foto: NOBERT MICHAEL



Molekülphysiker in Aktion: Während Steven Hoekstra, Bas van de Meerakker (rechts vorn) und Joop Gilijamse (Mitte) am Experiment arbeiten, beschäftigt sich Ludwig Scharfberg (links) mit dem Bau der zwei neuen, miteinander gekreuzten Stark-Verzögerer.

Diese Endgeschwindigkeit können wir je nach Anforderung stufenlos zwischen etwa 700 und wenigen Metern pro Sekunde einstellen.

Die niedrigste derzeit erreichbare Geschwindigkeit entspricht einer Temperatur von etwa zehn Tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt. Mit unserer Technik konnten wir verschiedene Molekülsorten erfolgreich bremsen: Kohlenmonoxid (CO), das zweiatomige Hydroxyl (OH) und ND₃, das aus Stickstoff (N) und drei schweren Wasserstoffatomen (Deuterium, D) besteht.

GEFANGEN IM ENERGIETRICHTER

Um mit den langsamen Molekülen weiter zu experimentieren, besitzt unser Labor verschiedene Einrichtungen, die wir hinter den Stark-Verzögerer schalten können. Eines ist ein kleiner Speicherring, also ebenfalls ein aus der Teilchenphysik entlehntes Gerät. In diesem Ring können wir die präparierten Moleküle in einer Kreisbahn parken, bevor wir sie weiteren Experimenten zuführen. Anders als in der Teilchenphysik ist unser Speicherring nicht kilometergroß, sondern misst nur 80 Zentimeter im Umfang.

Leider haben die Moleküle eines Pakets nie exakt die gleiche Ge-

schwindigkeit. Deshalb fließt es mit jedem Umlauf im Ring immer weiter auseinander. Um die „Parkzeit“ zu verlängern, haben wir ein Segment in den Ring eingebaut, das mit speziell geformten Feldern das Molekülpaket bei jedem Umlauf wieder zusammenschiebt. Das funktioniert so gut, dass wir nun auch mehrere Pakete hintereinander im Ring speichern können. Allerdings brauchen die Moleküle immer noch eine gewisse, nicht zu niedrige Restgeschwindigkeit, um in der Kreisbahn zu bleiben. Bei ND₃ etwa sind es rund hundert Meter pro Sekunde.

Wenn wir sehr langsame, kalte Moleküle speichern wollen, brauchen wir also eine andere Technik. Für diesen Zweck setzen wir eine spezielle Molekülfalle ein. Sie fängt das gebremste Molekül mit einem elektrischen Feld wie in einem Kissen auf. Sobald das Molekül richtig in der Falle steckt, schaltet diese ihr Feld so um, dass es die Form eines Energietrichters bekommt. In ihm ist das Molekül gefangen, es kann nur noch mit wenigen Metern pro Sekunde hin und her wackeln. Dabei kann seine Temperatur auf etwa ein Fünfzigtausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt sinken.

Bislang haben wir mit der Falle ND₃ und das OH-Radikal eingefan-

GRAPHIK: FRITZ-HABER-INSTITUT



FOTO: NORBERT MICHALKE

Am Anfangsstück der Vakuummaschine, das den Strahl der OH-Moleküle produziert, hantiert Steven Hoekstra.

gen. Das OH interessiert uns besonders: Im Prinzip ist es ein Wassermolekül (H_2O), dem ein Wasserstoffatom (H) abhanden gekommen ist. Das macht es chemisch sehr reaktionsfreudig. In der Natur spielt OH eine wichtige Rolle, zum Beispiel in kosmischen Gaswolken oder in der Chemie der Erdatmosphäre, aber auch in Verbrennungsprozessen.

Mit OH gelang uns kürzlich ein anderes, grundlegendes Experiment (J. Gilijamse et al., SCIENCE 2006, Vol. 313, 1617). Dazu kreuzten wir den Weg der gebremsten OH-Moleküle nach dem Verlassen des Stark-Verzögerers mit einem Strahl aus Xenon-Atomen. Die OH-Moleküle sehen grob wie Hanteln mit Schlagseite aus. Sie können deshalb mit verschiedenen Geschwindigkeiten rotie-

ren. Dabei darf sich die Drehgeschwindigkeit nur stufenweise ändern, denn sie ist nach den Gesetzen der Quantenphysik quantisiert. Für Physiker ist das zwar altbekannt, doch ihren Experimenten waren bislang nur Molekülkollisionen bei hohen Energien zugänglich. Solche brutalen Stöße verdecken subtilere Prozesse während der gegenseitigen Annäherung der Moleküle.

Mit unseren gebremsten Molekülen konnten wir nun gefühlvoll wie ein Billardmeister spielen. Während unserer Versuche blieben die Xenon-Atome immer gleich schnell. Dafür variierten wir mit dem Stark-Verzögerer die Geschwindigkeit der OH-Moleküle zwischen 30 und 700 Meter pro Sekunde. Wir beobachteten nun, dass die OH-Moleküle bei bestimmten Schwellenwerten ihrer Geschwindigkeit anders auf die Kollisionen mit den Xenon-Atomen reagierten: Sie prallten nicht mehr elastisch wie Billardkugeln ab, sondern schluckten einen Teil der Stoßenergie weg.

MOLEKÜLBILLARD MIT VIEL GEFÜHL

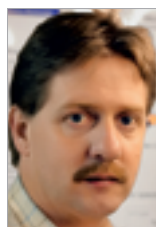
Das hatte der theoretische Chemiker Gerrit Groenenboom aus Nijmegen vorausgesagt. Nach seinen quantentheoretischen Berechnungen reicht bei diesen Schwellenwerten die gesamte Energie des Zusammenpralls gerade aus, damit das stoßende Xenon das nächsthöhere Energiequantum der OH-Rotation ankurbeln kann. Wir konnten Groenenbooms

Vorhersagen exzellent bestätigen. Offensichtlich verstehen wir die Physik solcher Stöße schon recht gut.

Allerdings war bei diesem Kollisionsexperiment einer der Stoßpartner noch ein Atom, zudem ein heißes. In Zukunft wollen wir zwei Moleküle, die beide wirklich kalt sind, sanft aufeinandertreffen lassen. Dazu müssen wir auch den kreuzenden Molekülstrahl durch einen zweiten Stark-Verzögerer schicken. Wir erhoffen uns, dass diese Molekül-Kollisionen in Slow Motion Informationen über feine Details der Quantenstruktur ihrer Elektronenhüllen liefern werden. Wir wollen so zum Beispiel lernen, wie langlebige Molekülkomplexe entstehen, die in der Natur eine wichtige Rolle spielen.

Mit zwei Stark-Verzögerern können wir auch studieren, wie chemische Reaktionen zwischen den kalten Molekülen ablaufen. Wir wissen, dass ihre geringe Energie dann gerade noch so für eine Reaktion reichen wird. Die physikalische Chemie sagt uns voraus, dass in diesem Fall Quanteneffekte das Verhalten der Reaktionspartner dominieren sollten. Was aber genau passieren wird, kann noch niemand voraussagen. Vielleicht winkt für die jahrelange Entwicklungsarbeit ein Lohn, der so spektakulär wie die Entdeckungen an ultrakalten Atomgasen sein wird. Wohin uns die Entdeckung der molekularen Langsamkeit führen wird, lässt sich aber noch nicht voraussagen. Wir brechen gerade erst in diese unbekannt Welt auf. ●

FOTO: PRIVAT



PROF. DR. GERARD MEIJER, 44, ist einer der Pioniere der Technik der Stark-Verzögerung. 1995 wurde er Professor in Nijmegen und 2000 Direktor des FOM-Instituts für Plasmaphysik Rijnhuizen in Nieuwegein. Dort initiierte er das Forschungsprogramm über kalte Moleküle und machte mit dem Freie-Elektronen-Laser FELIX physikalische Experimente an Molekülen in der Gasphase. Seit 2003 ist er Direktor des Bereichs Molekülphysik am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft.

FOTO: PRIVAT



DR. BAS VAN DE MEERAKKER, 29, ist Gruppenleiter am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin. Er erforscht kalte freie Radikale und experimentiert mit Stark-verzögerten Molekularstrahlen. Er promovierte an der Universität von Nijmegen in den Niederlanden und war Gastwissenschaftler an den Sandia National Laboratories in Livermore, USA.

FOTO: PRIVAT



ROLAND WENGENMAYR, 45, ist Physiker, Wissenschaftsjournalist und Redakteur von PHYSIK IN UNSERER ZEIT. Forschung ist für ihn Abenteuer und wichtigster Kulturmotor der Moderne. Daran, findet er, sollten über populärwissenschaftliche Texte möglichst viele Menschen teilhaben können. Dafür greift er auch gern als Illustrator zum Zeichenstift.