

Einschluß neutraler Teilchen mit Laserstrahlen

Elektrisch neutrale Partikel wie Atome oder Makromoleküle lassen sich mittels Laserlicht nahezu vollständig zur Ruhe bringen und gezielt beeinflussen. Damit eröffnen sich neue Anwendungen in Physik und Biochemie. So kann man etwa Gase bis fast auf den absoluten Nullpunkt kühlen, präzisere Atomuhren entwickeln oder einzelne DNA-Moleküle strecken.

Von Steven Chu

Wie sind Sie wohl auf diesen Artikel gestoßen? Nun gut, Sie haben geblättert. Aber was ist dabei eigentlich geschehen? Jedesmal, wenn Sie eine Seite fassen wollen, müssen Sie sie so zwischen Daumen und Zeigefinger einklemmen, daß der Abstand zwischen Papier und Haut etwa dem Durchmesser eines Atoms entspricht. Dabei stoßen sich die Elektronenhüllen der Atome an Ihrer Hautoberfläche und derjenigen an Ober- und Unterseite des Papiers gegenseitig ab. Diese geringe Ladungsverteilung erzeugt ein so starkes elektrisches Feld, daß Sie das Papier festhalten können. Bemerkenswert dabei ist, daß man durch Anwendung elektrischer Kräfte über atomare Distanzen hinweg Gegenstände festhalten kann, die als Ganzes elektrisch neutral sind.

Demgegenüber ist es eine gewaltige technische Herausforderung, wenn man neutrale Objekte handhaben will, die selbst nur von atomarer Größe sind. Mit geladenen Teilchen ist viel leichter umzugehen, weil sich über elektrische und magnetische Felder weit stärkere Kräfte auf sie ausüben lassen. Wissenschaftler machen sich dies schon seit mehr als hundert Jahren zunutze, indem sie die Bewegung geladener Teilchen wie Elektronen oder Ionen mit elektromagnetischen Feldern beeinflussen. Aber erst seit wenigen Jahren vermag man das gleiche relativ mühelos mit neutralen Teilchen zu tun.

Dies ist insbesondere der Entwicklung von Geräten zu verdanken, die mit La-

serlicht Atome und mikroskopische Teilchen mit erstaunlicher Präzision einfangen und manipulieren können. Diese Innovationen haben sich rasch in zahlreiche Anwendungen umsetzen lassen: Mehrere Forschungsgruppen, darunter auch unsere, haben einzelne Atome in der Dampfphase bis nahe an den absoluten Nullpunkt, der bei $-273,16$ Grad Celsius oder null Kelvin liegt, abgekühlt; solche Temperaturen ermöglichen es, Quantenzustände der Materie und ungewöhnliche Wechselwirkungen zwischen Licht und ultrakalten Atomen zu untersuchen. Wir haben bereits begonnen, Atomuhren und äußerst empfindliche Beschleunigungsmesser zu entwickeln. Auch nutzt man unsere Verfahren, um einzelne große Moleküle zu handhaben. Des weiteren haben wir eine Art optische Pinzette ersonnen, die mit Hilfe von Laserstrahlen Organellen ergreifen und innerhalb einer Zelle bewegen kann, ohne die Zellmembran zu durchstechen. (Organellen sind Strukturen in einzelligen, die in ihrer Funktion Organen bei Vielzellern entsprechen.)

Magnetische und optische Fallen

Etwa zehn Jahre, bevor man neutrale Teilchen erstmals mittels Laserlicht einschließen und gezielt beeinflussen konnte und sich den immensen Möglichkeiten dieses Verfahrens zuwandte, war es bereits gelungen, solche Teilchen mit magnetischen Feldern in Strahlen zu bündeln und einzufangen.

Die erste Neutralteilchen-Falle entwickelte Wolfgang Paul von der Universität Bonn. Er und seine Mitarbeiter hatten 1978 mit dem Versuch Erfolg, Neutronen in einem Magnetfeld einzuschließen. Sieben Jahre später gelang es William D. Phillips und seinen Mitarbeitern am amerikanischen National Bureau of Standards in Gaithersburg (Maryland), nach demselben Prinzip neutrale Atome einzufangen.

Die magnetische Falle vermag Teilchen festzuhalten oder zu speichern, die ein schwaches magnetisches Dipolmoment aufweisen und sich folglich wie ein winziger Stabmagnet verhalten. Denn wird ein solches Teilchen einem inhomogenen Magnetfeld ausgesetzt, wandert es je nach seiner Orientierung entweder in den Bereich mit der höchsten oder in den mit der niedrigsten Feldstärke (Bild 2). Falls man nun ein Magnetfeld erzeugt, das ein lokales Minimum der Feldstärke aufweist, und der magnetische Dipol anfangs so orientiert ist, daß er diesem Minimum zustrebt, wird er – so erkannte

Bild 1: Diese Vakuumkammer birgt eine Art Springbrunnen für Atome: Laserstrahlen (gelb) werden im Innern der Kammer fokussiert, wo sie einzelne Atome in einem kleinen Raumbereich einfangen und kühlen. Anschließend werden die Atome wie Bälle aufwärts gestoßen und nur durch die Schwerkraft abgebremst (vergleiche Bild 3). Im Scheitelpunkt ihrer Flugbahn kann man ihre Energiezustände präzise messen. Die blauen Punkte rechts im Bild sind Pulse ultravioletter Lichts, mit denen man die Atome analysiert.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir
Ihnen dieses Bild leider nicht online zeigen

Paul – in dieser Orientierung verweilen (siehe „Kühlen und Einfangen von Atomen“, Spektrum der Wissenschaft, Mai 1987, Seite 64).

Atome können aber auch durch Laserlicht eingefangen werden. Licht vermag auf Atome und andere neutrale Teilchen Kräfte auszuüben, weil die Lichtquanten oder Photonen einen Impuls haben.

Bestrahlt man ein Atom mit Licht einer bestimmten Frequenz, wird es fortwährend Photonen absorbieren und wieder aussenden. Bei der Absorption eines jeden Photons erfährt das Atom einen Kraftstoß in Richtung der Lichtausbreitung; die einzelnen Stöße summieren sich zu einer Kraft auf, die der Anzahl der pro Sekunde absorbierten Photonen und ihrem Impuls proportional ist. Für jedes absorbierte Photon muß das Atom auch wieder eines aussenden. Da die Emission jedoch ohne Vorzugsrichtung erfolgt, heben sich die dabei auftretenden Rückstoßkräfte im Mittel auf. Folglich wird das Atom insgesamt gesehen durch den Impulsübertrag des absorbierten Lichtes in dessen Ausbreitungsrichtung gestoßen.

Die auf das Atom wirkende Kraft ist freilich ziemlich klein. Durch die Absorption eines einzelnen Photons ändert sich die mittlere Geschwindigkeit des Atoms – rund 500 Meter pro Sekunde in Gasen bei Raumtemperatur – nur um ungefähr einen Zentimeter pro Sekunde. (Dies ist so, als würde ein Überschallflugzeug seine Geschwindigkeit um die einer Ameise ändern.)

Die Ablenkung durch den Impulsübertrag des Lichtes hatte erstmals der österreichische Physiker Otto R. Frisch 1933 an einem Strahl aus Natriumatomen beobachtet. Er verdampfte Natrium in einem Behälter, aus dem die Atome durch ein kleines Loch und mehrere danach angeordnete Schlitzen austreten konnten. Diesen Strahl setzte er dem Licht einer Natriumdampflampe aus. Wenngleich jedes Natriumatom im Mittel nur ein einziges Photon absorbierte, konnte Frisch eine geringe Ablenkung des Atomstrahles nachweisen.

Die von einer solch geringen Photonenstrahlrate erzeugte Kraft ist für den Einfang von Atomen viel zu schwach. Erst Jahrzehnte später erkannte man, daß sich mit Hilfe von Lasern Atome mit mehr als 10 Millionen Photonen pro Sekunde gleichsam bombardieren lassen – wobei auf die Atome eine Kraft wirkt, die dem 100 000fachen der Erdschwerkraft entspricht. Die erste dramatische Demonstration dieser Art gelang 1985 am National Bureau of Standards: Zwei voneinander unabhängig arbeitende Gruppen – die eine von Phillips, die

andere von John L. Hall geleitet – konnten einen Atomstrahl abbremsen und dabei die Temperatur der Atome von Raumtemperatur (ungefähr 300 Kelvin) auf 0,1 Kelvin absenken. (Durch das Abbremsen wird den Atomen kinetische Energie entzogen, was einer Abkühlung entspricht.)

Damit war es möglich geworden, mit Lasern ein kaltes Gas aus nahezu unbeweglichen Atomen zu erzeugen. Nun hoffte man, als nächstes solche Atome in einem kleinen Raumvolumen einschließen zu können. Aber alle Versuche, mit einer aus mehreren Laserstrahlen bestehenden Vorrichtung Atome zu sammeln und einzusperrern, schienen zum Scheitern verurteilt. Nach einem als optisches Earnshaw-Theorem bekannten Prinzip ist es nämlich unmöglich, eine aus mehreren Laserstrahlen bestehende Atomfalle zu bauen, wenn der Strahlungsdruck der Lichtintensität proportional ist – wie man die Strahlen auch anordnet, es läßt sich nie erreichen, daß nur nach innen gerichtete Kräfte entstehen. Denn jeder in den Speicherbereich eindringende Lichtstrahl gelangt letztlich wieder aus ihm heraus, so daß unweigerlich auch Kräfte nach außen gerichtet sind.

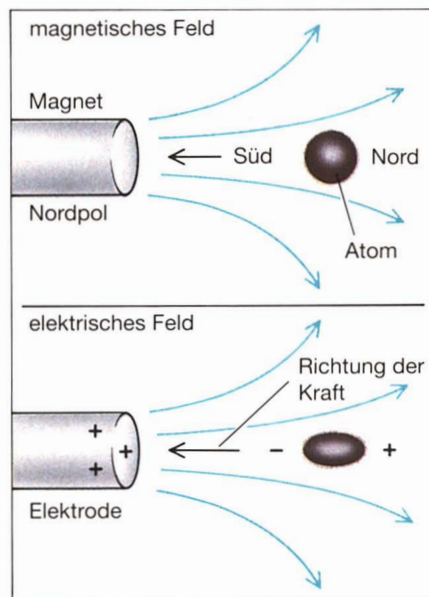


Bild 2: Atome können auch dann, wenn sie nur schwach magnetisch oder elektrisch neutral sind, durch Felder beeinflusst werden. In einem Magnetfeld (oben) wird ein Atom in den Bereich der maximalen Feldstärke gezogen, wenn zum Beispiel der Südpol des Atoms auf den Nordpol des Feldes weist. Ein elektrisches Feld induziert im Atom ein Dipolmoment; hier werden von der positiven Elektrode die negativen Ladungen im Atom angezogen, die positiven dagegen abgestoßen. Insgesamt wirkt auf den Dipol eine Kraft, die ihn in Richtung der Elektrode zieht.

Laserkühlung und optischer Sirup

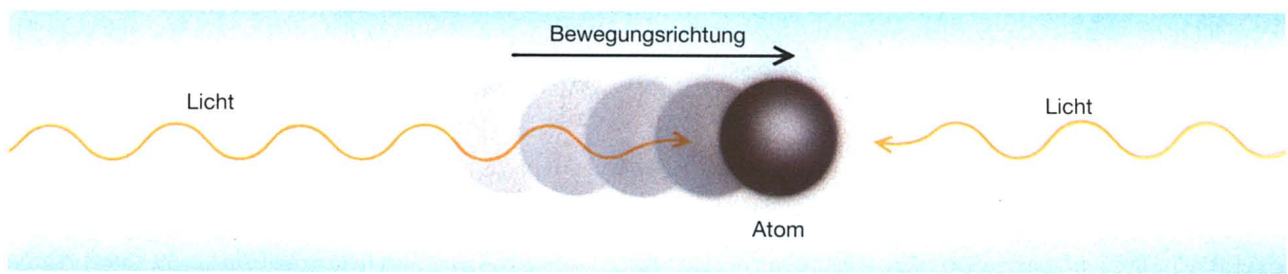
Mit Hilfe einer anderen Kraft, die Licht auf Atome ausübt, ließ sich aber schließlich doch eine Atomfalle realisieren. Um zu verstehen, um welche Kraft es sich dabei handelt, wollen wir zunächst betrachten, wie kleine Teilchen durch einen positiv geladenen Gegenstand angezogen werden können – beispielsweise durch einen Glasstab, den man zuvor mit einem Katzenfell gerieben hat.

Der Stab erzeugt ein elektrisches Feld, wodurch das Teilchen polarisiert wird: Die negativen Ladungen des Teilchens werden etwas in Richtung des Stabes gezogen, die positiven von ihm weggedrückt, so daß ein elektrischer Dipol mit einem Dipolmoment entsteht. Der unterschiedliche Abstand der Ladungen vom Stab bewirkt, daß die anziehende Kraft auf die negativen Ladungen stärker ist als die abstoßende auf die positiven. Infolgedessen wird das Teilchen in die Bereiche mit der größten elektrischen Feldstärke gezogen. (Der Vorgang ist völlig analog zur Wirkung auf einen magnetischen Dipol, die man anfangs nutzte, um Neutronen und Atome einzufangen.) Wäre der Glasstab negativ geladen, würde das zugehörige elektrische Feld ein Dipolmoment umgekehrter Polarität im Teilchen induzieren, so daß es auch dann wieder in die Bereiche hoher Feldstärke hineingezogen würde.

Wegen der Kraft auf einen Dipol können selbst neutrale Atome in einem elektrischen Feld eingefangen werden, und zwar in einem Raumpunkt, in dem das Feld ein lokales Maximum aufweist. Sind solche Felder durch eine raffinierte Anordnung elektrischer Ladungen zu erzeugen? Solange die Ladungen ortsfest sind, nicht – gleich, wie die Ladungen verteilt sind. In einem dynamischen System hingegen ist es möglich.

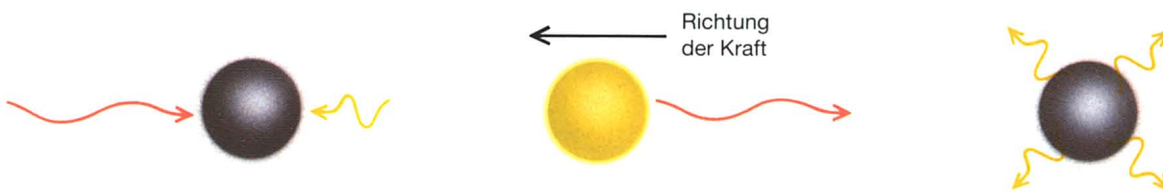
Realisieren läßt sich das insbesondere mit einem fokussierten Laserstrahl: Da Licht als ein rasch oszillierendes elektromagnetisches Feld aufgefaßt werden kann, erzeugt man durch die Bündelung ein inhomogenes Feld mit einem Maximum der Feldstärke im Brennpunkt. Das Feld induziert im Atom ein elektrisches Dipolmoment, dessen Polarität sich im Rhythmus der Feldoszillation umkehrt, so daß es beständig in den Fokus des Laserstrahls hineingezogen wird. Voraussetzung ist lediglich, daß die Oszillationsfrequenz des Feldes kleiner ist als die Frequenz der Eigenschwingungen des Atoms, denn sonst könnte das Dipolmoment nicht dem Wechsel des Feldes folgen.

Wie Licht Atome abbremsen kann



1. Zwei Lichtstrahlen gleicher Frequenz treffen aus entgegengesetzten Richtungen auf das sich bewegende Atom; dabei muß

ihre Frequenz etwas kleiner sein als die Resonanzfrequenz, bei der das Licht vom Atom absorbiert würde.



2. Vom Atom aus erscheint die Frequenz des Lichts, das sich in der gleichen Richtung wie es selbst bewegt, infolge des Doppler-Effekts erniedrigt; die Frequenz des anderen Strahlenbündels erscheint dagegen erhöht.

3. Das zu höherer Frequenz verschobene Licht wird vom Atom absorbiert, das zu kleinerer Frequenz verschobene jedoch nicht. Durch den Impulsübertrag der absorbierten Photonen wird das Atom abgebremst.

4. Das Atom strahlt die Energie des absorbierten Photons in irgendeiner Richtung wieder ab, wodurch es einen Rückstoß erfährt. Wiederholt sich dieser Vorgang mehrmals, heben sich diese Rückstoßkräfte insgesamt auf.

Wladilen S. Letokow vom Moskauer Institut für Spektroskopie regte 1968 als erster an, mit Hilfe der Anziehungskraft auf einen Dipol Atome in einem kleinen Raumbereich einzuschließen. Zehn Jahre später schlug Arthur Ashkin von den Bell-Laboratorien in den USA vor, eine Atomfalle mit Hilfe fokussierter Laserstrahlen zu realisieren.

Wenngleich eine solche Konzeption sehr elegant ist, gibt es doch praktische Schwierigkeiten. Damit die Atome nicht durch den Druck der absorbierten Photonen aus der Falle ausgetrieben werden können, muß man das Laserlicht auf eine Frequenz abstimmen, die deutlich kleiner ist als die Resonanzfrequenz, also diejenige, bei der die Photonen mit der größten Wahrscheinlichkeit absorbiert werden. Bei derart großen Verstimmungen sind allerdings die einschließenden Kräfte so schwach, daß selbst Atome mit einer Temperatur von 0,01 Kelvin nicht in der Falle zu halten sind, weil ihre kinetische Energie noch zu hoch ist. Selbst wenn man noch kältere Atome in die Falle einbrächte, würden sie innerhalb weniger tausendstel Sekunden infolge der stets stattfindenden Photonenstreuung aus der Falle gleichsam herausgekocht werden. Zudem würde das Volumen der Falle nur 0,001 Kubik-

millimeter betragen, so daß man sich anfangs wenig Hoffnung machte, überhaupt Atome in einen solch kleinen Raumbereich injizieren zu können.

Im Jahre 1985 schließlich zeichnete sich eine Lösung ab, nachdem es mit Hilfe von gegenläufigen Laserstrahlen gelungen war, Atome in allen drei Raumrichtungen zu kühlen, und zwar auf weit niedrigere Temperaturen, als es bei den gebremsten Atomstrahlen möglich gewesen war. Theodor Hänsch und Arthur Schawlow von der Universität Stanford (Kalifornien) hatten 1975 eine solche Laserkühlung vorgeschlagen. Im selben Jahr beschrieben David J. Wineland und Hans G. Dehmelt von der Universität von Washington in Seattle ein ähnliches Verfahren zum Kühlen von eingefangenen Ionen mit Lasern.

Die Forscher sagten voraus, daß ein aus entgegengesetzten Richtungen mit Laserlicht bestrahltes Atom gekühlt werden kann, wenn die Frequenz des Lichts gerade etwas kleiner ist als die Resonanzfrequenz, bei der die Absorption maximal ist. Bewegt sich nämlich das Atom einem der beiden Lichtstrahlen entgegen, erhöht sich von ihm aus gesehen die Frequenz infolge des Dopplereffektes, so daß es nun Photonen absorbieren kann. Der dadurch übertragene

Impuls bremst das Atom ab. Umgekehrt erscheint vom Atom aus die Frequenz des Lichts, das sich in gleicher Richtung wie es selbst bewegt, erniedrigt, so daß die Wahrscheinlichkeit für eine Absorption geringer ist (siehe Kasten auf dieser Seite). Insgesamt überwiegt also die Bremskraft, die der entgegenkommende Strahl auf das Atom ausübt.

Das Besteckende an dieser Idee ist, daß auch ein in entgegengesetzter Richtung sich bewegendes Atom eine Bremskraft erfährt. Setzt man das Atom gar drei senkrecht zueinander stehenden Paaren gegenläufiger Strahlen aus, kann man es in allen drei Raumrichtungen abbremsen. Damit ist die Laserkühlung unabhängig von der Bewegungsrichtung der Atome.

In den Bell-Laboratorien gelang es 1985 meinen Kollegen Ashkin, Leo Hollberg, John E. Bjorkholm, Alex Cable und mir erstmals, mit einer solchen Anordnung Natriumatome auf 240 Mikrokkelvin (millionstel Kelvin) zu kühlen. Weil das Licht ähnlich wie eine zähe Masse die Bewegung der Atome dämpft, nannten wir diese Strahlkonfiguration einen optischen Sirup.

Auch wenn dieser noch keine wirkliche Falle darstellte, konnten wir die Atome doch so weit bremsen, daß sie bis

zu einer halben Sekunde im Bereich der kühlenden Strahlen verblieben, bevor sie ihnen schließlich doch entwichen.

Der optische Sirup gestattete uns, die drei größten Probleme beim Bau einer Atomfalle mit Lasern zu lösen. Zum einen konnten wir durch Abkühlen der Atome auf extrem niedrige Temperaturen ihre thermische Bewegung so weit reduzieren, daß sie sich leicht einfangen lassen sollten. Des weiteren konnten wir die Atome leicht in die Falle laden: Indem wir den zum Einfangen dienenden Laserstrahl einfach auf das Zentrum des optischen Sirups fokussierten, blieben die Atome sozusagen darin kleben, wenn sie zufällig in den Strahl gerieten. Schließlich konnten wir die aufheizende Wirkung des einfangenden Strahles reduzieren, indem wir in stetem Wechsel einmal das einfangende und einmal das kühlende Licht auf die Atome wirken ließen. Ein Jahr nach der Vervollkommnung des optischen Sirups vermochten wir schließlich Atome mittels Laserlicht einzuschließen.

Obleich wir bei unserer ersten Falle die neuartige Ladetechnik verwenden

konnten, war ein größeres Einschlußvolumen wünschenswert. Dies sollte sich mit einer optischen Falle realisieren lassen, bei der man den Impulsübertrag der absorbierten Photonen nutzt, wobei zugleich eine weit geringere Lichtintensität erforderlich wäre. Dazu mußte man aber die durch das optische Earnshaw-Theorem auferlegten Zwänge irgendwie umgehen. Der entscheidende Hinweis für den Entwurf einer solchen Falle kam von David E. Pritchard vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge sowie von Carl E. Wieman und seinen Kollegen von der Universität von Colorado in Boulder. Sie erkannten, daß beim Einwirken von ortsveränderlichen magnetischen oder elektrischen Feldern auf Atome der vom Laserlicht verursachte Strahlungsdruck nicht notwendigerweise proportional zur Lichtintensität ist.

Dieser Ansatz brachte Jean Dalibard von der École Normale Supérieure in Paris auf die Idee einer magnetooptischen Falle, bei der man ein schwaches Magnetfeld und zirkular polarisiertes Licht nutzt. Im Jahre 1987 tat Pritchards Gruppe sich mit meiner bei den Bell-

Laboratorien zusammen, um eine solche Falle zu bauen. Drei Jahre später konnten Wieman und seine Mitarbeiter zeigen, daß sich auf der Basis dieser Technik mit preiswerten Diodenlasern Atome sogar in einer Glaszelle einfangen lassen; ihr Verfahren kam ohne Vorkühlung aus, die wir in unseren ersten Einschlußexperimenten noch benötigt hatten. Die Tatsache, daß man Atome nun innerhalb einer versiegelten Zelle in einem winzigen Raumgebiet einschließen konnte, bedeutete zugleich, daß sich etwa auch radioaktive Isotope optisch manipulieren ließen. Die magnetooptische ist heute die am meisten genutzte optische Neutralteilchenfalle.

Weiterentwicklungen

Mittlerweile wurden bei der Laserkühlung große Fortschritte erzielt. Phillips und seine Kollegen entdeckten, daß ein optischer Sirup unter bestimmten Voraussetzungen Atome auf weit niedrigere Temperaturen zu kühlen vermag, als nach der bis dahin gängigen Theorie zu

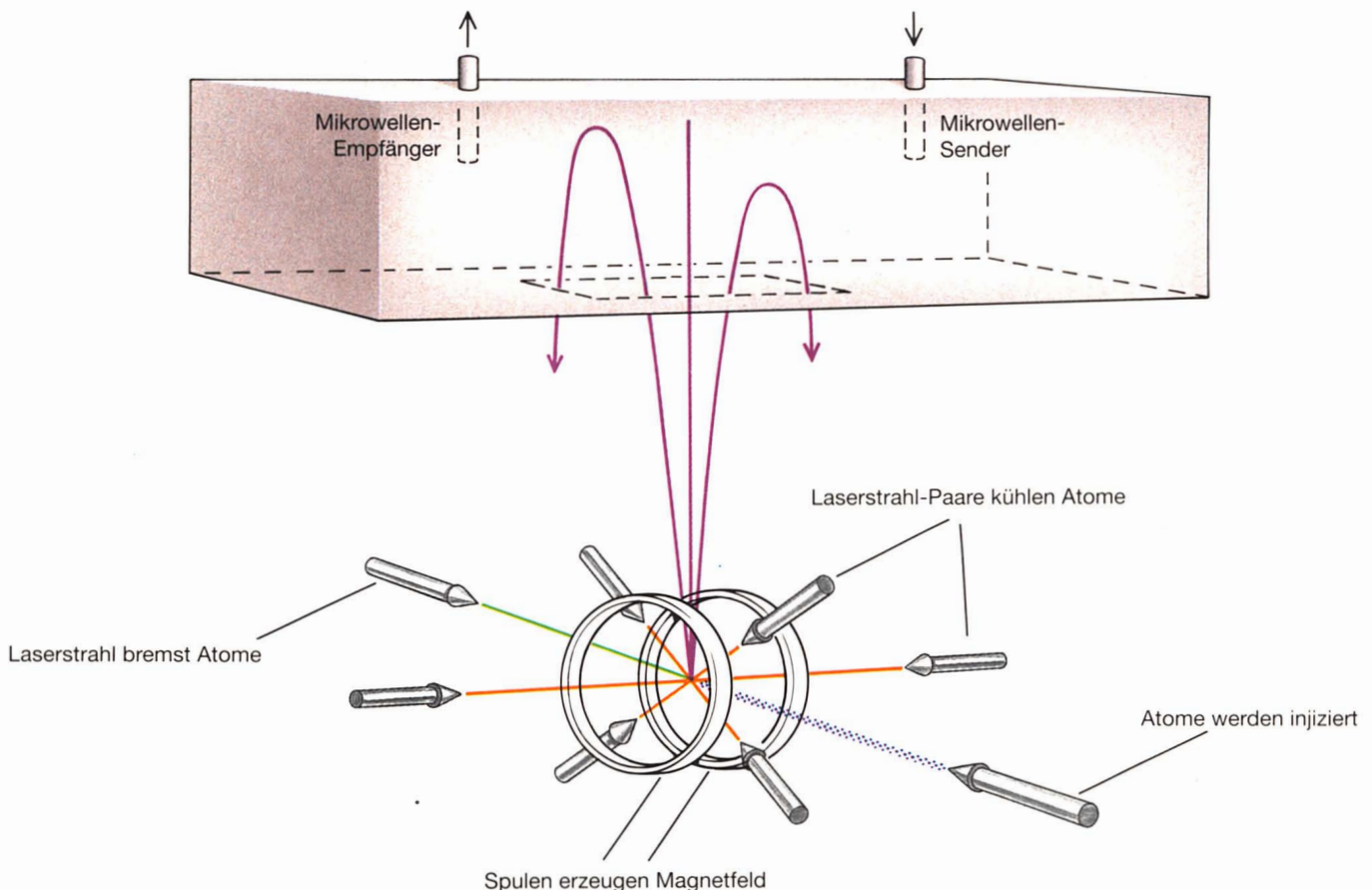


Bild 3: Ein atomarer Springbrunnen ermöglicht präzise Messungen der Energiezustände von Atomen. Ein Laserstrahl (grün) bremst die in die Apparatur injizierten Atome (violette Punkte). Durch das Zusammenwirken eines Magnetfeldes mit sechs weiteren Laserstrahlen (orange) werden die Atome eingefangen und

gekühlt. Nachdem sich ungefähr 10 Millionen Atome in der Falle angesammelt haben, werden sie zusammen aufwärts gestoßen. Die Wirkung der Schwerkraft läßt die Teilchen wieder nach unten sinken. Im Scheitelpunkt der Flugbahnen (violette Linien) regen Mikrowellenpulse die Atome in einen höheren Energiezustand an.

erwarten war. Diese Entdeckung hat Dalibard und Claude Cohen-Tannoudji vom Collège de France und der École Normale sowie meine Gruppe in Stanford dazu veranlaßt, eine neue Theorie des Laserkühlens zu entwickeln. Sie beruht auf einem komplexen, faszinierenden Wechselspiel zwischen den Atomen und deren Wechselwirkung mit den Lichtfeldern.

Gegenwärtig können Atome auf Temperaturen gekühlt werden, bei denen ihre kinetische Energie im Mittel einem Wert entspricht, der infolge des Impulsübertrags von dreieinhalb absorbierten Photonen erreicht würde. Für Cäsiumatome bedeutet dies eine Temperatur unter drei Mikrokkelvin.

Cohen-Tannoudji, Alain Aspect, Enio Arimondo, Robin Kaiser und Nathalie Vansteenkiste entwickelten an der École Normale eine ingenieure Anlage, mit der man Heliumatome sogar so weit abzukühlen vermag, daß ihre Energie geringer ist als diejenige, die ihnen durch ein einziges Photon übertragen wird. So wurden Heliumatome entlang einer einzigen Raumrichtung auf zwei Mikrokkelvin abgekühlt. Gegenwärtig versucht man diese Technik auf zwei und drei Raumdimensionen zu erweitern.

Mit dieser Kühlmethode fängt man ein Atom in einem wohldefinierten Geschwindigkeitszustand ein, ungefähr so, wie wir in unserer ersten Falle Atome in einem begrenzten Raumvolumen eingeschlossen haben. Infolge der Photonenstreuung ändert sich die Geschwindigkeit des Atoms in zufälliger Weise. In dem französischen Experiment sind nun Bedingungen verwirklicht, durch die ein Atom bei einem Rückstoß in einen besonderen Energiezustand gelangen kann, der einer Kombination aus zwei Zuständen mit jeweils einer bestimmten Geschwindigkeit nahe null entspricht. Ist das Atom erst einmal in diesem Zustand, ist die Wahrscheinlichkeit weiterer Photonenstreuungen erheblich vermindert. Mithin werden zusätzliche Photonen vom Atom so gut wie nicht mehr gestreut, so daß sich seine Geschwindigkeit kaum wieder erhöhen kann.

Irgendwann gelangt jedes Atom nach der Streuung eines Photons in diesen Quantenzustand niedriger Geschwindigkeit. Die Atome werden also dadurch gekühlt, daß sie zufallsbedingt in einen Quantenzustand fixierter Geschwindigkeit geraten.

Außer dem Kühlen und Einfangen von Atomen sind auch andere Anwendungen demonstriert worden – etwa Linsen, Spiegel und Beugungsgitter für Atome. Auch hat man Geräte entwickelt, die kein Gegenstück in der herkömmlichen

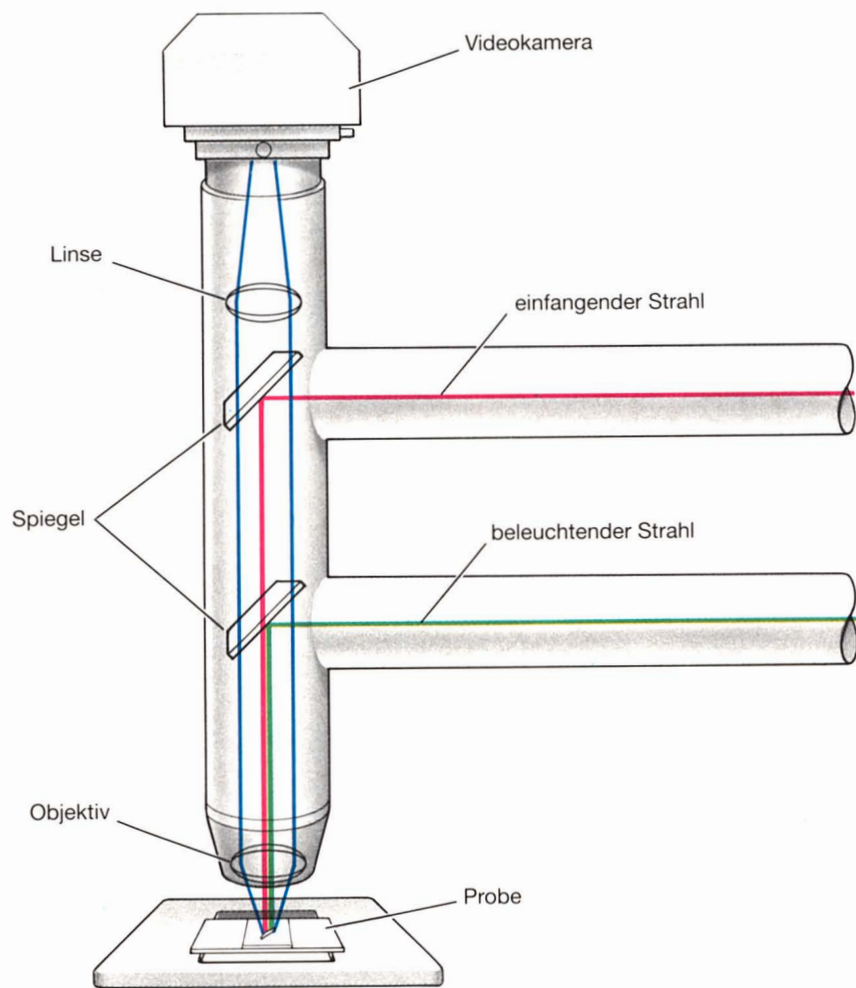


Bild 4: Mittels Laserstrahlen läßt sich eine optische Pinzette konstruieren, mit der man mikroskopische Objekte – beispielsweise lebende Zellen, Zellorganellen oder Festkörperpartikel – beeinflussen kann.

Das Mikroskop ist so konstruiert, daß es gleichzeitig grünes und infrarotes Laserlicht durchläßt. Das grüne Licht beleuchtet die Probe auf dem Objektträger, während die infrarote Strahlung sie örtlich fixiert.

Optik haben: Wissenschaftler von den Universitäten Stanford und Bonn haben eine Art Trichter gebaut, der eine Wolke heißer Atome in einen Strahl kalter Atome mit gut kontrollierbaren Eigenschaften umwandelt; und die Stanford-Gruppe hat ein optisches Trampolin hergestellt, bei dem Atome von einer Lichtwand abspringen, die aus einer Glasoberfläche herausragt. Krümmt man die Glasoberfläche, läßt sich eine Atomfalle realisieren, die auf den Wirkungen von Schwerkraft und Licht beruht.

Anwendungen

Ohne Zweifel haben wir gelernt, Atome unseren Wünschen gemäß mit erstaunlicher Geschicklichkeit herumzudirigieren. Aber was kann man damit anfangen?

Beispielsweise läßt sich an sehr kalten Atomen in dampfförmiger Phase studie-

ren, wie sie miteinander wechselwirken. Der Quantenmechanik zufolge verhält sich ein Atom wie eine Welle, deren Länge durch den Quotienten aus dem Planckschen Wirkungsquantum und dem Teilchenimpuls gegeben ist. Wird das Atom gekühlt, vermindert sich sein Impuls; mithin nimmt seine Wellenlänge zu. Bei genügend niedrigen Temperaturen wird die durchschnittliche Wellenlänge gleich dem mittleren Abstand zwischen den Atomen. Bei solch niedrigen Temperaturen und zugleich hohen Dichten sollte nach den quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten ein erheblicher Teil aller Atome in einen einzigen Grundzustand kondensieren. Dieses ungewöhnliche Phänomen, auch Bose-Einstein-Kondensation genannt, ist zwar vorausgesagt, aber bisher noch nie in einem Atomdampf beobachtet worden. Thomas J. Greytak und Daniel Kleppner vom MIT und Jook T. M. Walraven von der Universität Amsterdam versuchen

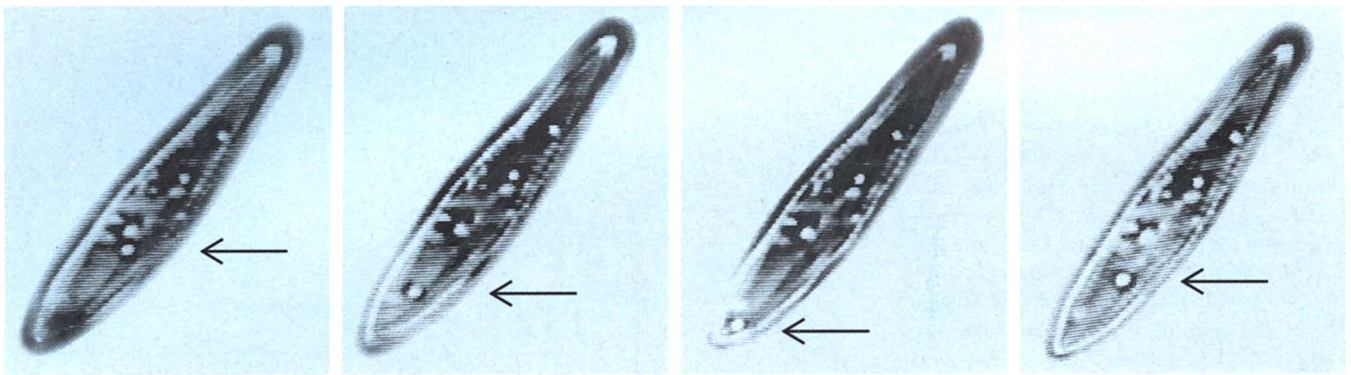


Bild 5: Optische Pinzetten eröffnen verblüffende Möglichkeiten in der Biochemie. Hier wurde eine Organelle in einem Urtierchen (Protozoon) mit diesem Gerät an das eine Ende der Zelle ge-

schoben, ohne die Zellmembran zu beschädigen. Die linken drei Aufnahmen zeigen diesen Vorgang. Rechts ist die Position der Organelle gezeigt, die sie nach Abschalten der Pinzette einnimmt.

gegenwärtig, eine solche Kondensation mit Wasserstoffatomen in einer magnetischen Falle zu verwirklichen. Andere Gruppen probieren das gleiche mit lasergekühlten Alkaliatomen wie Cäsium oder Lithium.

Verfahren, mit denen sich einzelne Atome beeinflussen lassen, eröffnen des weiteren neue Möglichkeiten in der hochauflösenden Spektroskopie. So hat etwa die Stanforder Gruppe durch Kombination mehrerer solcher Techniken ein Gerät entwickelt, mit dem man die spektralen Merkmale von Atomen mit extremer Genauigkeit zu messen vermag.

Wir wiederum haben einen Neutralteilchen-Springbrunnen erschossen, der ultrakalte Atome so sanft hochsteigen läßt, daß die Schwerkraft ihre Bewegungsrichtung umkehren kann (Bilder 1 und 3). Dazu sammeln wir die Atome etwa eine halbe Sekunde lang in einer magneto-optischen Falle und schleudern dann ungefähr 10 Millionen Atome mit einer Geschwindigkeit von nur etwa 2 Metern pro Sekunde aufwärts. Im höchsten Punkt ihrer Flugbahn werden sie mit zwei aufeinander folgenden Mikrowellenpulsen analysiert. Hat die Frequenz dieser Strahlung den geeigneten Wert, können die Atome von einem Quantenzustand in einen anderen übergehen. (Für die Erfindung und Anwendung dieser Methode bekam Norman Ramsey 1989 den Nobelpreis in Physik; er teilte ihn sich mit Hans Dehmelt und Wolfgang Paul, die für Einführung, Entwicklung und Anwendungen der Ionenfallen geehrt wurden). In unseren ersten Experimenten haben wir die Energiedifferenz zwischen zwei benachbarten Zuständen eines Atoms mit einer Genauigkeit von 2 : 100 Milliarden gemessen.

Wieso lassen sich an einem derartigen Springbrunnen solch präzise Messungen ausführen? Erstens befinden sich die Atome im freien Fall und sind daher

leicht gegen jede Art von Störfeldern abzuschirmen, die ihre Energieniveaus verändern könnten; und zweitens ist die Genauigkeit solcher Messungen nur durch die Heisenbergsche Unschärferelation begrenzt. Sie besagt, daß die Schärfe einer Energiemessung durch den Quotienten aus dem Planckschen Wirkungsquantum und der für die Messung benötigten Zeit gegeben ist; und diese Dauer entspricht in unserem Fall der Zeitspanne zwischen den beiden Mikrowellenpulsen. Sie kann, weil die Atome so lange ungestört sind, bis zu einer Sekunde betragen, was bei Raumtemperatur unmöglich ist.

Weil der Atom-Springbrunnen extrem genaue Messungen atomarer Energiezustände ermöglicht, könnte man ihn vielleicht so modifizieren, daß er als verbesserte Atomuhr dienen kann. Der gegenwärtige Weltzeitstandard ist durch die Energiedifferenz zweier bestimmter Grundzustände des Cäsiumatoms definiert. Zwei Jahre nach dem ersten Atom-Springbrunnen bestimmte die Gruppe an der École Normale mit einem solchen Gerät den Übergang zwischen diesen Niveaus im Cäsiumatom mit hoher Präzision. Aus diesen Experimenten ist zu schließen, daß sich mit einem entsprechend konstruierten Instrument die absolute Frequenz dieses Cäsiumüberganges mit einer Genauigkeit von 1 : 10^{16} messen lassen sollte – tausendfach genauer als mit den derzeit besten Atomuhren. Mittlerweile konzentrieren sich weltweit mehr als acht Forschungsgruppen darauf, den Cäsium-Zeitstandard mit Hilfe des Atom-Springbrunnens zu verbessern.

Eine andere gegenwärtig intensiv verfolgte Anwendung ist die Interferometrie. Die ersten Atominterferometer wurden 1991 an der Universität Konstanz, am MIT, an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig und der Universität Stanford gebaut.

Ein Atominterferometer zerteilt ein Atom quasi in zwei räumlich getrennte Wellen. Führt man anschließend beide Atomhälften wieder zusammen, interferieren sie miteinander. Das einfachste Beispiel einer solchen Aufteilung ist der erzwungene Durchgang eines Atoms durch einen Doppelspalt. Wenn das Atom auf der anderen Seite rekombiniert, sind Interferenzstreifen ähnlich denen von Wellen zu beobachten. Diese verblüffende Erscheinung macht auf dramatische Weise deutlich, daß man das Verhalten von Atomen sowohl im Wellen- wie auch im Teilchenbild beschreiben muß.

Noch wichtiger ist jedoch die Möglichkeit, mit Atominterferometern physikalische Phänomene mit hoher Empfindlichkeit zu analysieren. Bei der ersten Demonstration der erreichbaren Meßgenauigkeit haben Mark Kasevich und ich ein Interferometer mit langsamen Atomen gebaut. Die Atome wurden geteilt und in einem Springbrunnen wieder vereinigt. Bereits mit diesem Instrument konnten wir zeigen, daß sich die Erdbeschleunigung mit einer Genauigkeit von mindestens 3 : 100 Millionen bestimmen läßt; eine weitere hundertfache Verbesserung sollte in Kürze erreichbar sein. Zuvor konnte die Wirkung der Schwerkraft auf ein Atom lediglich mit einer Genauigkeit von ungefähr 1 : 100 gemessen werden.

Optische Pinzetten

In den letzten Jahren haben die Arbeiten zum Einschließen von Atomen das Interesse an der Beeinflussung anderer neutraler Teilchen geweckt. Die grundlegenden Prinzipien der Atomspeicherung lassen sich auf Partikel im Mikrometerbereich, beispielsweise Polystyrol-Kügelchen, übertragen. Das intensive elek-

trische Feld im Fokus eines Laserstrahls polarisiert neutrale Partikel, geradeso wie es ein Atom polarisieren würde; und sie absorbieren auch ähnlich wie ein Atom Licht bestimmter Frequenzen – Glas beispielsweise absorbiert ultraviolette Strahlung besonders stark. Aber solange die Lichtfrequenz kleiner als die Absorptionsfrequenz ist, wird das Teilchen in die Zone der höchsten Laserintensität hineingezogen.

Im Jahre 1986 haben Ashkin, Bjorkholm, J. B. Dziedzic und ich gezeigt, daß man 0,02 bis 10 Mikrometer große Partikel in einem einzigen fokussierten Laserstrahl festhalten kann. Zwar war es Ashkin bereits 1970 gelungen, in Wasser schwebende Latex-Kügelchen von Mikrometer-Größe zwischen zwei fokussierten, gegenläufigen Laserstrahlen einzufangen; aber erst viel später wurde klar, daß ein einziger Laserstrahl genügt, wenn man ihn hinreichend stark fokussiert: Dann nämlich überwiegt die anziehende Kraft des Feldes den störenden Lichtdruck, der auch solche Partikel in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls stößt.

Der große Vorteil eines einzigen Laserstrahles liegt darin, daß er sich gleichsam als optische Pinzette zur Beeinflussung kleiner Festkörperteilchen verwenden läßt. Dieses Werkzeug kann man leicht in ein konventionelles Mikroskop integrieren, indem man den Laserstrahl in dessen Tubus einführt und mit dem Objektiv fokussiert. Auf diese Weise vermag man ein Präparat auf dem Objektträger zu beobachten und gleichzeitig durch Verschieben des fokussierten Laserstrahls zu beeinflussen (Bild 4).

Eine von Ashkin und Dziedzic ersonnene Anwendung optischer Pinzetten hat inzwischen Biologen interessiert: Sie fanden, daß sich damit lebende Bakterien und andere Organismen ohne erkennbare Beschädigung umherbewegen lassen. Es überrascht, daß dies so schonend möglich ist, denn die typische Strahldichte im Fokus einer optischen Pinzette beträgt immerhin etwa 10 Millionen Watt pro Quadratcentimeter. Solange jedoch der Organismus für Licht der verwendeten Wellenlänge nahezu vollkommen transparent ist, kühlt ihn das umgebende Wasser hinreichend; wenn nicht, wird er von dem Strahl regelrecht zerschnitten.

Die optischen Pinzetten haben mittlerweile viele Anwendungen gefunden. So zeigte Ashkin, daß sogar Objekte innerhalb einer lebenden Zelle ohne Verletzung der Zellwand beeinflusst werden können (Bild 5). Steven M. Block und seine Kollegen am Rowland-Institut in Cambridge (Massachusetts) sowie an der

Harvard-Universität haben auf diese Weise die mechanischen Eigenschaften von Bakteriengeißeln untersucht. An der Universität von Kalifornien in Irvine haben Michael W. Berns und seine Mitarbeiter Chromosomen innerhalb eines Zellkerns manipuliert.

Optische Pinzetten greifen so behutsam und präzise, daß sich auch noch kleinere biologische Systeme untersuchen lassen. Wir und Kollegen von der Duke-Universität in Durham (North-Carolina) sind dabei, die molekularen Vorgänge bei der Kontraktion von Muskeln zu erforschen. Bei diesem Vorgang greift das hakenförmige, verdickte Ende eines Myosinmoleküls seitlich an ein frei bewegliches Aktinfilament an, um es durch ständiges Nachfassen an sich vorbeizuziehen. Wir wollen nun unter anderem die Kraft messen, mit der das Myosin an dem Aktin zieht. Wir untersuchen diesen molekularen Bewegungsapparat, indem wir an das Aktinfilament ein Polystyrolkügelchen heften und mit der optischen Pinzette danach greifen. Eine am Objektiv angebrachte Photodiode registriert die Bewegung des Myosinköpfchens gegen das Aktinfilament, und eine Rückkopplungsschaltung dirigiert die optische Pinzette derart, daß sie dem Zug des Myosin am Aktin exakt entgegenwirkt. Auf diese Weise haben wir die Stärke des Myosin-Zugvermögens gemessen für den Fall, daß das Aktin an seiner gleitenden Bewegung gehindert wird und folglich unter Zugspannung steht.

Selbst mit einzelnen Molekülen der Erbsubstanz DNA (Desoxyribonucleinsäure) experimentieren wir inzwischen,

indem wir an die Strangenden je eine Polystyrolkugel heften und sie mit zwei optischen Pinzetten fassen. Das Molekül ist mit einem Farbstoff markiert, der im grünen Licht eines Argon-Ionenlasers fluoresziert, so daß wir es mit einer empfindlichen Videokamera beobachten können. In unseren ersten Experimenten haben wir die elastischen Eigenschaften der DNA untersucht, indem wir das Molekül gänzlich streckten und dann ein Ende losließen. An dem beobachteten Rücksprungverhalten lassen sich grundlegende Vorstellungen der Polymerphysik in extremen Nicht-Gleichgewichtszuständen überprüfen.

Es gelang uns auch, DNA-Moleküle längere Zeit in gestrecktem Zustand zu halten. Dazu hatten wir die Polystyrolkügelchen an ihren Enden mit stärkerem Laserlicht auf dem Objektträger des Mikroskops festgeschweißt. Womöglich läßt sich so die Bewegung von Enzymen entlang eines DNA-Strangs verfolgen und eingehender klären, wie Gene exprimiert, also die von ihnen codierten Proteine hergestellt, oder wie Schäden an der DNA repariert werden.

Gerade sechs Jahre ist es her, daß es gelungen ist, Atome abzubremsen und in einem optischen Sirup einzufangen. Mit optischen Fallen vermögen wir nun, kleinste Partikel im Wortsinne zu begreifen, selbst wenn Membranen ein mechanisches Hindernis bilden. Für mich war es ein besonderes Vergnügen, eine utopisch anmutende Vorstellung Wirklichkeit werden zu sehen: die Entwicklung superfeiner neuartiger Werkzeuge für Physik, Chemie und Biologie.

Steven Chu ist Dekan des Physik-Departments der Universität Stanford (Kalifornien) und hat dort den Theodore-und-Frances-Geballe-Lehrstuhl für Geistes- und Naturwissenschaften inne. Er promovierte 1976 in Physik an der Universität von Kalifornien in Berkeley. Zwei Jahre später ging er zu den AT&T-Bell-Laboratorien, wo er 1983 die Leitung der Forschungsabteilung für Quantenelektronik übernahm. Vier Jahre später nahm er den Ruf auf eine Professur für Physik und Angewandte Physik an der Universität Stanford an.

Literaturhinweise

Laser Spectroscopy of Trapped Atomic Ions. Von Wayne M. Itano, J. C. Bergquist und D. J. Wineland in: Science, Band 237, Seiten 612 bis 617, 7. August 1987.

Cooling, Stopping, and Trapping Atoms. Von William D. Phillips, Phillip L. Gould und Paul D. Lett in: Science, Band 239, Seiten 877 bis 883, 19. Februar 1988.

New Mechanisms for Laser Cooling. Von C. N. Cohen-Tannoudji und W. D. Phillips in: Physics Today, Band 43, Heft 10, Seiten 33 bis 40, Oktober 1990.

Laser Manipulation of Atoms and Particles. Von Steven Chu in: Science, Band 253, Seiten 861 bis 866, 23. August 1991.

Mikroplasmen. Von John J. Bollinger und David J. Wineland in: Spektrum der Wissenschaft, Seiten 100 bis 108, März 1990.

Felder, Phasen, Fallen. Von Peter E. Toschek in: Physikalische Blätter, Band 45, Seiten 465 bis 470, Dezember 1989.

Atominterferometrie. Von O. Carnal und J. Mlynek in: Physikalische Blätter, Band 47, Seiten 379 bis 385, Mai 1991.