

Strukturen, Schmelzen, Polymere

Highlights aus dem Programm des Arbeitskreises Festkörperphysik

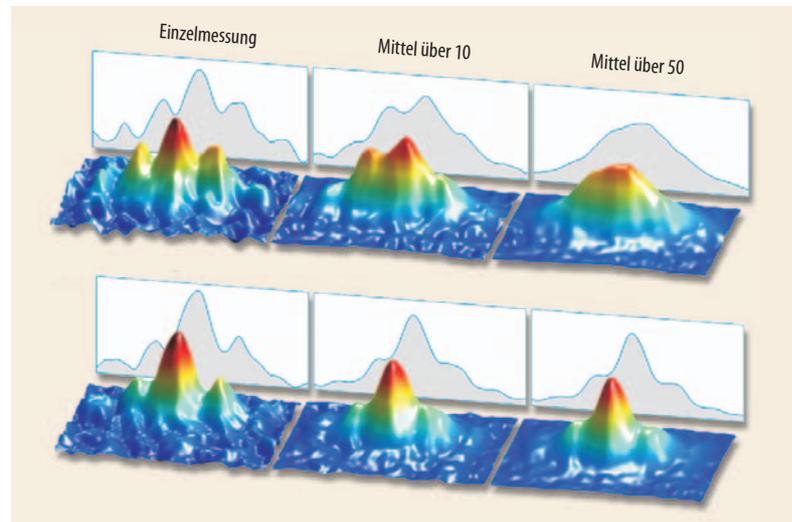
Rainer Scharf

Der Arbeitskreis Festkörperphysik (AKF) hatte zu seiner diesjährigen Frühjahrstagung nach Regensburg eingeladen. Rund 4900 Physikerinnen und Physiker nahmen an der Tagung teil. Insgesamt wurden 2640 Vorträge gehalten und 1480 Poster präsentiert. Hier folgt eine kleine Auswahl aus der enormen Themenvielfalt, die diese Tagung zu bieten hatte.

Bose-Einstein und Josephson

Der Josephson-Effekt ist an Supraleitern zu beobachten, die durch eine dünne Isolatorschicht getrennt sind. Dabei kann auch ohne angelegte Spannung ein Gleichstrom durch die Schicht fließen, während eine konstante Spannung einen Wechselstrom erzeugt. Ganz allgemein tritt dieser Effekt auf, wenn zwischen zwei makroskopischen Quantensystemen eine schwache Verbindung besteht, z. B. wenn zwei Supraflüssigkeiten durch eine Kapillare verbunden sind oder wenn zwei atomare Bose-Einstein-Kondensate durch eine dünne „Lichtbarriere“ getrennt sind, durch welche die Atome tunneln können. Gerade die Kondensate ermöglichen völlig neuartige Einblicke in den Josephson-Effekt, wie der Bericht von Markus Oberthaler über Experimente an der Universität Heidelberg zeigte.

Dazu hatten er und seine Kollegen zwei Bose-Einstein-Kondensate aus Rubidium-87-Atomen in ein Doppelmuldenpotential gebracht, das aus einem harmonischen Potenzial und einer stehenden Lichtwelle gebildet wurde. Ihnen gelang es, die Höhe der Barriere zwischen den Mulden zu variieren. Durch Lichtabsorption ließ sich bestimmen, wie sich die Verteilung der Atome auf die beiden Mulden im



R. Gadi et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 130404 (2006)

Aufgrund von Kopplung mit der thermischen Umgebung geht die Kohärenz der bosonischen Josephson-Barriere beim Übergang von der Einzelmessung hin zur Mittelung über das Ensemble

verloren (oben). Bei gleicher Temperatur, aber höherer Tunnelkopplung (unten) bleibt die Kohärenz bei der Mittelung dagegen bestehen.

Laufe der Zeit änderte. Der jeweilige Phasenunterschied zwischen den Wellenfunktionen der beiden Kondensate ergab sich anhand ihres Interferenzmusters, das auftrat, wenn das Potential abgeschaltet wurde und sich die Kondensate überlagerten. Wenn die Differenz der Atomzahlen der beiden Kondensate nicht zu groß war, traten Josephson-Oszillationen auf: Die Atome tunnelten periodisch zwischen den Mulden hin und her. Die Wechselwirkung zwischen den Atomen beeinflusste allerdings das Tunneln – anders als beim Josephson-Effekt für Supraleiter oder Supraflüssigkeiten. Sobald die Differenz der Atomzahlen einen kritischen Wert überschritt, führte die Wechselwirkung der Atome zu ihrer Selbstlokalisierung. Dann tunnelte nur noch ein kleiner Teil der Atome, während die übrigen in ihrer jeweiligen Mulde blieben.

Wie hängt die Phasendifferenz der Wellenfunktionen der beiden Kondensate von ihrer Temperatur

und von der Barrierenhöhe ab? Bei sehr hoher Barriere wurde das Tunneln weitgehend unterdrückt, und die Atomzahlen der Kondensate schwankten kaum. In diesem Fall blieb die Phasendifferenz φ völlig unbestimmt. Bei niedriger Barriere hingegen blieben die Atomzahlen unbestimmt, und φ schwankte nur geringfügig um 0. Wenn bei festgehaltener Barrierenhöhe schrittweise die Temperatur angehoben wurde, nahmen die Schwankungen der Phasendifferenz zu, bis diese völlig unbestimmt war. Oberthaler und seine Kollegen konnten zeigen, dass der Mittelwert von $\cos \varphi$ nur vom Verhältnis der thermischen Energie zur Barrierenhöhe abhing. Bei bekannter Barrierenhöhe ließ sich die Temperatur der Kondensate anhand der Schwankungen von φ ermitteln. Mit diesem „Thermometer“ gelang es den Forschern, Temperaturen weit unterhalb der Kondensationstemperatur zu messen, wo andere Verfahren bisher noch versagen.

Von Natur aus strukturiert

Übergangsmetalloxide weisen eine erstaunliche Vielfalt von Eigenschaften auf. Zu ihnen gehören die supraleitenden Cuprate, die Manganite mit ihrem kolossalen Magnetowiderstand sowie die ferroelektrischen Perovskite. In all diesen Materialien kommt es zu einem komplizierten Wechselspiel zwischen Ladungs-, Spin- und Gitterfreiheitsgraden, sodass es sehr schwierig ist, ihre Eigenschaften zu erklären oder gar vorherzusagen. Experimentelle Untersuchungen förderten eine unerwartete Modulation der Ladungs- und Spindichten sowie der elektrischen Polarisation und der mechanischen Spannung in Einkristallen zutage. Dabei treten tropfen-, streifen- oder fischgrätenförmige Muster auf, die sich über hunderte von Gitterplätzen erstrecken. Wieso diese Texturen spontan auftreten, erläuterte Alan Bishop vom Los Alamos National Laboratory am Beispiel der ferroelektrischen Übergangsmetalloxide.

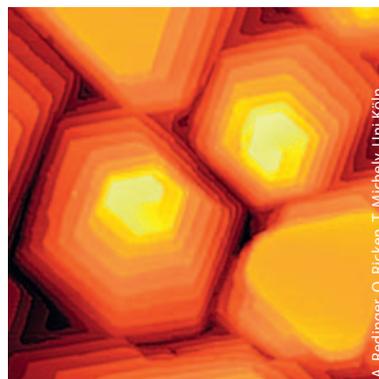
Bei den Ferroelektrika ist es das Zusammenspiel von Elastizität und elektrischer Polarisation, das der Musterbildung zugrunde liegt. Die d-Orbitale der Übergangsmetallatome sind stark lokalisiert und hochgradig ausgerichtet. Das führt zu einer starken Kopplung der d-Elektronen mit lokalen Verzerrungen des Kristallgitters (und gegebenenfalls auch der umgebenden Spin- und Ladungsverteilung), die die Kristallsymmetrie verringern. Dabei verschieben sich der positive und der negative Ladungsschwerpunkt gegeneinander, sodass ein elektrisches Dipolmoment entsteht. Die starke Ausrichtung der lokalisierten Orbitale und damit auch der chemischen Bindungen zwischen den Atomen führt dazu, dass sich die zunächst lokalen Gitterverzerrungen über große Entfernungen ausbreiten. Wie Modellrechnungen ergeben haben, entstehen durch Selbstorganisation hierarchische mesoskopische Muster aus Bereichen mit unterschiedlicher Verzerrungsrichtung.

Lokale Störungen, z. B. durch Dotierung, haben demnach weitrei-

chende Auswirkungen auf die entstehenden Texturen und damit auch auf die Materialeigenschaften. Werden zusätzlich noch Spins und Leitungselektronen in das Wechselspiel aus elastischen und dielektrischen Eigenschaften einbezogen, so treten auch mesoskopische Muster aus unterschiedlich magnetisch geordneten bzw. elektrisch leitenden oder nichtleitenden Bereichen auf. Dadurch gewinnen diese Materialien multifunktionale Eigenschaften auf verschiedenen Größenskalen, die sich vielfältig technisch nutzen lassen. Um diese Eigenschaften zu verstehen, muss mit entsprechend großem Computereinsatz systematisch berechnet werden, welche Texturen sich aus den lokalen Gegebenheiten entwickeln und wie sie auf äußere Einflüsse reagieren. Dies geschieht u. a. in Los Alamos. Der traditionelle Weg, eine periodische Gitterstruktur vorauszusetzen und ihre Anregungen zu untersuchen, versagt hingegen bei den Übergangsmetalloxiden völlig, da sie schon von Beginn an inhomogen strukturiert sind.

Inseln, Hügel und Atome

Wenn eine perfekte Kristalloberfläche gleichmäßig mit Atomen bedampft wird, können auf ihr erstaunlich vielfältige mikroskopische Strukturen entstehen. Das Rastertunnelmikroskop macht einfache



Die Rastertunnelmikroskopieaufnahme einer Platinoberfläche¹⁾ zeigt drei Platinberge, von denen sich die beiden mittleren jeweils um eine zentrale Schraubenversetzung winden. Sie haben steile Flanken und ein flaches Plateau. Der normal gewachsene Berg (unten rechts) ist im Mittel 1,5 Atomlagen niedriger.

oder bizarr geformte Inseln sichtbar, die im Laufe der Zeit miteinander verschmelzen und zu Hügeln mit deutlicher Terrassenbildung heranwachsen, die wiederum durch tiefe Canyons voneinander getrennt sind. Joachim Krug von der Universität zu Köln erklärte, wie einfache Modelle die Form und Entwicklung dieser Nichtgleichgewichtsstrukturen beim homoepitaktischen Schichtwachstum beschreiben können.

Bei der Homoepitaxie bestehen das kristalline Substrat und die aufwachsende Schicht aus demselben Material. Ein Modellsystem, das Thomas Michely und seine Mitarbeiter in Köln experimentell untersuchen, ist Platin auf Pt(111). Die von der Oberfläche absorbierten Atome diffundieren auf den atomar glatten Terrassenflächen. Treffen sie auf eine aufsteigende Stufe, so lassen sie sich dort einbauen. Gelangen sie hingegen zu einer absteigenden Stufe, werden sie meist reflektiert. Dieser Ehrlich-Schwoebel-Effekt beruht darauf, dass das adsorbierte Atom an einer absteigenden Stufe weniger Nachbaratome hat, die es anziehen, als auf einer Terrasse. Dadurch erhöht sich die potentielle Energie des Atoms an der absteigenden Stufe. Dass die sich anlagernden Atome die aufsteigenden Stufen bevorzugen, führt zu einer Wachstumsinstabilität: Kleine Erhebungen, die sich zufällig auf der glatten Oberfläche gebildet haben, wachsen schneller als die Bereiche zwischen ihnen. Dabei entstehen hohe Hügel mit steilen Flanken, zwischen denen tiefe Einschnitte liegen.

Reale Kristalle enthalten häufig Schraubenversetzungen. Wenn eine solche Versetzung die Oberfläche schneidet, entsteht eine Stufe, die mit einem Ende am Schnittpunkt festgehalten wird. Beim Wachstum führt das zur Bildung einer Spirale, die sich um die Schraubenversetzung herum dreht. Auch dabei macht sich bemerkbar, dass sich Atome bevorzugt an aufsteigende Stufen anlagern: Während die Spirale im Zentrum relativ flach ist, fallen ihre Flanken immer steiler ab, je weiter sie vom Zentrum der Spirale entfernt sind. Hier ähneln

1) Zunächst wurde die glatte Platinoberfläche mit Heliumionen einer Energie von 4,5 keV beschossen. Diese Vorbereitung übersäte das Substrat mit Schraubenversetzungen. Darauf wurden bei 450 K zehn Lagen atomares Platin aufgedampft.

sich die Flankenprofile der Spiralen und Hügel. Im Zentrum wachsen Hügel und Spirale jedoch unterschiedlich. Während auf der obersten Terrasse die Bewegung der Atome durch den Ehrlich-Schwoebel-Effekt eingeschränkt ist, können sie um das Zentrum der Spirale herum unbeschränkt diffundieren. Das Experiment zeigt jedoch, dass die Spiralberge auf Pt(111) höher wachsen als die umgebenden „normalen“ Hügel ohne Schraubenversetzung. Ähnlich geformte Spiralberge treten oft beim Wachstum von dünnen organischen Schichten auf. Der Vergleich mit dem gut verstandenen Modellsystem Pt(111) lässt nun Rückschlüsse darauf zu, inwieweit auch die organischen Moleküle daran gehindert werden, von einer Terrasse auf eine darunter liegende zu gelangen.

Metallisches Glas

Metallische Gläser sind nichtkristalline Materialien, die hauptsächlich aus metallischen Elementen bestehen. Anfangs ließen sich diese „amorphen Legierungen“ nur durch sehr schnelles Abkühlen von Metallschmelzen und deshalb auch nur in dünnen Schichten herstellen. Doch in den letzten Jahren gelang es, die nötigen Abkühlungsraten enorm zu verringern, sodass sich inzwischen aus vielen Legierungen massive metallische Gläser gießen lassen, ohne dass es zur Kristallisation kommt. Bei den dünnen Schichten standen die multifunktionalen Eigenschaften dieser amorphen Materialien – wie große mechanische Härte und Korrosionsfestigkeit bei hoher magnetischer Permeabilität – im Vordergrund. Doch massive metallische Gläser können auch als Strukturmaterialien dienen, wie Lindsay Greer von der Universität Cambridge erklärte.

Metallische Gläser besitzen hervorragende mechanische Eigenschaften. Sie haben eine extrem hohe Fließspannung von 5 MPa und mehr, einen hohen Young-Modul, eine große Härte und Verschleißfestigkeit. Außerdem

sind sie sehr korrosionsbeständig. Aufgrund ihrer hohen Härte eignen sich metallische Gläser für Präzisionsinstrumente. Da sie zudem keine mikrokristalline Struktur aufweisen, lassen sich aus ihnen extrem scharfe Schneiden, z. B. für Skalpelle, herstellen. Große Härte und kornlose Mikrostruktur ermöglichen auch einen Einsatz dieser Materialien für digitale Speichermedien. Die metallischen Gläser können mehr elastische Energie aufnehmen und aufgrund der geringen Dämpfung auch wieder zurückgeben als alle anderen metallischen Materialien. Deshalb eignen sie sich für elastische Federn oder für Golfschlägerköpfe und Tennisschläger. Da sie extrem glatt zu polieren sowie kratz- und korrosionsfest sind, lassen sich aus ihnen auch modische Accessoires wie Brillengestelle oder Gehäuse für Mobiltelefone fertigen.

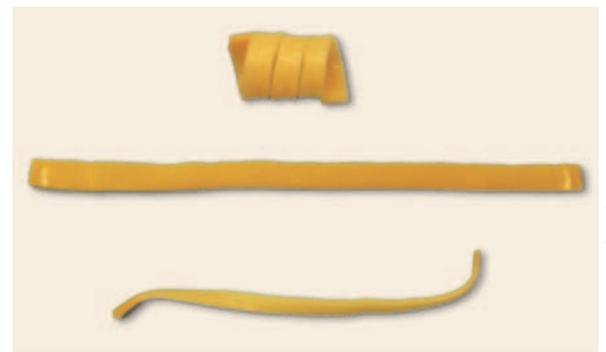
Ein Nachteil der metallischen Gläser ist allerdings, dass sie jenseits des elastischen Bereichs nur eine geringe Verformbarkeit zeigen und brechen. Die plastische Verformung beginnt damit, dass zunächst Schertransformationszonen auftreten, in denen sich atomare Cluster unter der angewandten Spannung umordnen, erklärte Lindsay Greer. Die Zonen schließen sich zu 10 nm dicken Scherbändern zusammen, in denen die atomare Struktur auflockert und hohe Temperaturen auftreten. Dabei kommt es zum „strain softening“ und schließlich zum Materialversagen an einigen dominierenden Scherbändern. Die Verformbarkeit von metallischen Gläsern verbessert sich jedoch erheblich, wenn in ihnen Nanokristalle eingebettet werden. Dazu haben Greer und seine Kollegen Gläser auf Kupfer-Zirkon-Basis solange erhitzt, bis im Röntgenbeugungsbild die ersten Anzeichen kristalliner Strukturen auftraten. Diese Gläser hielten eine fünfmal größere plastische Verformung aus als unbehandelte Gläser, ohne dass darunter ihre Härte litt. Dies liegt vermutlich daran, dass die Nanokristalle in den „verflüssigten“ Scherbändern wachsen können und so deren Viskosität erhöhen. Dadurch erzwingen sie,

dass die Deformationen auf zuvor unbeeinflusste Bereiche übergehen und mehr Scherbänder auftreten. Die Deformation wird dadurch homogener und hält länger an, bevor es zum Materialversagen kommt.

Polymere mit Gedächtnis

Formgedächtniskunststoffe oder Shape-Memory-Polymere können sich dauerhaft an eine ursprüngliche Form „erinnern“, die sich erheblich von ihrer aktuellen Gestalt unterscheiden kann. Wird solch ein Polymer auf eine hinreichend hohe Temperatur erwärmt, so nimmt es die ursprüngliche Form wieder an. Solch ein Verhalten ist von metallischen Legierungen bekannt, bei denen es auf einem martensitischen Phasenübergang beruht. Bei den Polymeren hat das Formgedächtnis eine andere Ursache, wie Andreas Lendlein vom Institut für Polymerforschung in Teltow-Seehof erklärte. Diese Polymere enthalten meist zwei Komponenten: Die eine Komponente sind Netzpunkte, die die permanente Gestalt des Kunststoffes festlegen. Wird der Kunststoff verformt und dann weiter abgekühlt, so bildet die zweite Komponente Verknüpfungen, die diese Verformung temporär stabilisieren. Wenn der Kunststoff erwärmt wird, lösen sich diese Verknüpfungen und der Kunststoff kehrt in seine ursprüngliche Form zurück.

Das thermische Formgedächtnis von Polymeren nützt z. B. der minimalinvasiven Chirurgie. Lendlein und seine Mitarbeiter haben



Die Fotoserie zeigt den Formgedächtniseffekt eines lichtsensitiven Polymers. Der Übergang von der temporären Form (Spirale) zur zurückgestellten Form wurde durch die Bestrahlung mit UV-Licht erreicht.

Nature 434, 879 (2005)

biologisch abbaubare Polymere entwickelt, die dazu dienen, Implantate in komprimierter temporärer Form herzustellen, die sich durch eine kleine Operationsöffnung in den Körper einführen lassen. Im Körper erwärmt sich das Polymer, und das Implantat nimmt seine ursprüngliche, funktionale aber sperrige Form an. Auch in Situationen, in denen Formgedächtnispolymere nicht durch direkte Wärmeübertragung erwärmt werden können, lassen sich ihre vorteilhaften Eigenschaften weiterhin ausnutzen. Um dies zu erreichen, haben Lendlein und seine Kollegen magnetische Nanopartikel gleichmäßig verteilt in die Polymermatrix eingebettet. In einem magnetischen Wechselfeld mit einer Frequenz von 258 kHz heizten sich die Partikel mittels Induktion auf. Dadurch erwärmte sich das Polymer und sein Formgedächtniseffekt war zu beobachten.

Auch das Licht kann Formänderungen in Kunststoffen auslösen. Zahlreiche Polymere und Gele krümmen sich, ziehen sich zusammen oder verändern ihr Volumen bei der richtigen Belichtung. Sobald die Belichtung aufhört, zeigt sich, dass dieses Verhalten reversibel und auf einfache Formänderungen beschränkt ist. Lendlein berichtete über Formgedächtnispolymere, die mit einer irreversiblen Formänderung auf UV-Licht reagieren und ohne Erwärmung aus einer komplizierten temporären Form in ihre ursprüngliche Gestalt zurückkehren. Die Polymere haben lichtempfindliche funktionale Gruppen. Um ein Stück eines solchen Kunststoffes zu „programmieren“, wird es zunächst verformt. Anschließend fixiert langwelliges UV-Licht eines bestimmten Wellenlängenbereichs die neue Gestalt, indem es die funktionalen Gruppen miteinander vernetzt. Mit kurzwelligem UV-Licht lassen sich diese Vernetzungen wieder lösen. Dies ermöglicht es dem Kunststoff, in seine Ursprungsgestalt zurückzukehren. Auch für lichtempfindliche Formgedächtnispolymere gibt es zahlreiche mögliche Anwendungen z. B. als Sensoren, Aktuatoren oder in medizinischen Geräten.

Sinn fürs Magnetfeld

Zahlreiche Tiere können Magnetfelder spüren. Am besten ist dies für Vögel belegt, die sich mithilfe des Erdmagnetfeldes orientieren. Dazu benötigen sie allerdings kurzwelliges Licht, wie es selbst der Nachthimmel liefert. In rotem Licht oder bei völliger Dunkelheit versagt ihr Magnetkompass. Die Information für ihren magnetischen Sinn nehmen die Tiere mit den Augen auf. Vermutlich spielt das Eiweiß Cryptochrom, das in der Netzhaut der Vögel vorkommt, die Rolle des Magnetsensors. Das scheinen nun Experimente an einer Pflanze, der Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*), zu bestätigen, über die Margaret Ahmad von der Universität Paris berichtete.

Auch *Arabidopsis* enthält Cryptochrom – ein Photorezeptor für blaues Licht, der die Entwicklung der Pflanze steuert. Beispielsweise bremsst es das Wachstum des Hypokotyls, eines Teils des Pflanzenstengels. Margaret Ahmad und ihre Kollegen haben untersucht, ob das Hypokotyl-Wachstum von der Stärke des umgebenden Magnetfeldes abhängt. Dabei zeigte sich, dass das Hypokotyl in einem starken Magnetfeld (500 μT) deutlich langsamer wächst als im lokalen Erdmagnetfeld (40 μT) – allerdings nur, wenn es zugleich mit blauem Licht bestrahlt wird. Bei rotem Licht oder in Dunkelheit beeinflusst das Magnetfeld das Wachstum nicht. Im Laufe der Evolution hat das Cryptochrom für einige Tierarten, die diesen Photorezeptor ebenfalls besitzen, aufgrund seiner



Auch Pflanzen verfügen über Cryptochrom, wie am Beispiel der Ackerschmalwand untersucht wurde.

magnetfeldabhängigen Wirkung einen zusätzlichen Nutzen gewinnen: als Magnetfeldsensor.

Den Einfluss von Magnetfeldern auf die Wirkung von Cryptochrom lässt sich durch den „Radikalpaar-Mechanismus“ erklären. Regt blaues oder ultraviolettes Licht das Cryptochrom an, so findet im Molekül der Transfer eines Elektrons statt. Dabei bilden sich zwei Radikale: ein positiver Donor und ein negativer Akzeptor, die zunächst in einem gemeinsamen Singulettzustand vorliegen. Aufgrund der Hyperfeinwechselwirkung wandeln sich das Singulett (S_0) und die drei Triplettzustände (T_{-1} , T_0 , T_{+1}) ineinander um. Seine biologische Wirkung entfaltet das Cryptochrom aber nur von S_0 aus. Je stärker das äußere Magnetfeld ist, umso mehr entkoppeln T_{-1} und T_{+1} von S_0 und fallen schließlich ganz aus der Umwandlung heraus. Damit nimmt der Anteil dieser beiden biologisch wirkungslosen Triplettzustände ab. Cryptochrom wirkt also umso besser, je stärker das Magnetfeld ist. Die Vögel wissen das zu nutzen.

Nanoantenne für Moleküle

Der Einsatz optischer Methoden zur Analyse immer kleinerer Objekte hat in den letzten beiden Jahrzehnten eine Renaissance erlebt, erklärte Vahid Sandoghdar von der ETH Zürich. Vor allem zwei Aufgaben treiben das junge Feld der Nanooptik voran: die ultrahochoflösende Mikroskopie sowie die Untersuchung und Nutzung optischer Eigenschaften von Nanoobjekten. Lange schien es, als ließen sich mit optischen Methoden zwei Lichtquellen nicht unterscheiden, deren Abstand kleiner ist als die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts. Doch die Ausnutzung der spektroskopischen Eigenschaften von Emittlern ermöglichte es, diese Beugungsgrenze zu umgehen. So hat die ETH-Gruppe vor fünf Jahren ein Verfahren entwickelt, das hochauflösende Laserspektroskopie und Rastersondenmikroskopie verbindet. Damit gelang es, zwei Moleküle optisch aufzulösen, die

im Abstand von nur 10 nm in einem Festkörper eingebettet waren. Sandoghdar berichtete von ebenso erstaunlichen Experimenten mit einzelnen Molekülen.

Dabei ging es um die Frage, ob ein einzelnes Molekül Laserlicht merklich abschwächen kann, wenn das Licht in einem Bereich von der Größe des molekularen Absorptionsquerschnitts konzentriert ist. Um dies zu klären, wurde das Licht eines abstimmbaren Farbstofflasers zu einer 100 nm großen Apertur an der Spitze eines Scanning Nearfield Optical Microscope (SNOM) geleitet. Die Spitze wurde auf einen Abstand von etwa 60 nm an die auf 1,4 K gekühlte Probe herangebracht, eine ca. 100 nm dicke, transparente Schicht aus para-Terphenyl, in die Dibenzanthanthren- oder DBATT-Moleküle eingebettet waren. Hochempfindliche Photodetektoren registrierten das Laserlicht, das die Schicht passiert hatte, sowie das langwelligere Fluoreszenzlicht des DBATT-Moleküls, über dem sich die SNOM-Spitze jeweils befand. Wenn die Wellenlänge des Anregungslichts resonant mit dem molekularen Übergang war, nahm die registrierte Laserintensität um 6 Prozent ab. Ein einzelnes Molekül schwächte somit das Laserlicht erheblich ab. Wie die Forscher nachwiesen, beruhte dieser Effekt auf der Interferenz zwischen dem Anregungslicht und dem kohärent vorwärts gestreuten Licht.

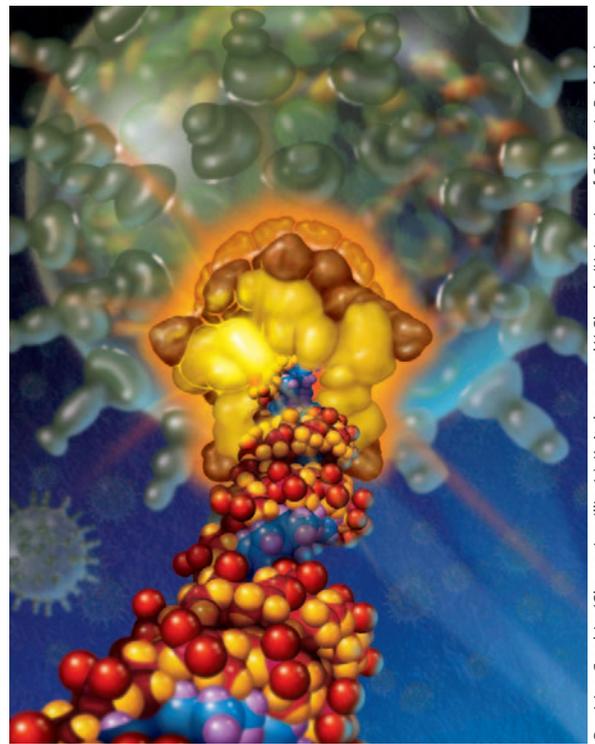
In einem weiteren Experiment befestigten die Forscher ein 100 nm großes Gold-Nanoteilchen an einer Glasfaser Spitze. Das Nanoteilchen wurde dadurch zu einer Antenne, die mithilfe einer Plasmonresonanz das Anregungslicht stark konzentrierte und die Fluoreszenz der in ihrem Nahfeld vorhandenen Moleküle beeinflusste. So nahm die Intensität der Fluoreszenzstrahlung einzelner angeregter Terrylenmoleküle, die in einer ca. 30 nm dicken Schicht aus para-Terphenyl eingebettet waren, auf das Zwanzigfache zu, wenn das Gold-Nanoteilchen auf 10 nm an ein solches Molekül herangebracht wurde. Zugleich

verringerte sich die Lebensdauer des angeregten Zustands des Moleküls auf ein Zwanzigstel. Durch die Kopplung an ein Nanoteilchen, das als Antenne wirkt, könnten sich Moleküle, die normalerweise nur sehr schwach fluoreszieren, zu stärkerem Leuchten anregen und damit besser nachweisen lassen.

Molekulare Maschinen

Die belebte Natur hat eine Vielzahl von molekularen Maschinen hervorgebracht. Bekannteste Beispiele sind die ATPase, eine molekulare Kreiselpumpe, die einen Gradienten in der Protonenkonzentration zur Herstellung von energiereichem ATP nutzt, sowie das Motorprotein Myosin, das von ATP angetrieben lineare Bewegungen erzeugt und für die Muskelkontraktion verantwortlich ist. Aus dem Studium solcher Maschinen lässt sich viel für die Nanotechnologie lernen. Thorsten Hugel von der TU München berichtete über Untersuchungen an einer sehr effektiven molekularen Zugmaschine, deren kontrollierter Einsatz von großem Nutzen wäre.

Die Maschine steckt im Bakteriophagen $\phi 29$. Dieser Virus schleust seine 6,6 μm lange DNS in das Bakterium *Bacillus subtilis* ein, wo sie sich vervielfältigt und die Produktion von leeren, etwa 50 nm großen Virushüllen veranlasst. Anschließend nimmt eine solche Hülle durch einen kleinen Kanal einen Virus-DNS-Doppelstrang auf, der in der Hülle sehr dicht zusammengepackt wird. Dabei verringert sich seine Entropie, und seine elektrostatische und elastische Energie nehmen stark zu. Die DNS muss deshalb mit großer Kraft – es wurden bis zu 57 pN gemessen, was der zehnfachen Kraft eines konventionellen Kinesins entspricht – durch den Kanal gezogen werden, den ein Ring aus zwölf identischen Kanalproteinen bildet. Die Struktur des Kanals ließ vermuten, dass die zwölf Proteine kontinuierlich um die DNS rotieren, wenn sich die DNS durch den Kanal bewegt. Diese Annahme haben Thorsten



In der DNS-Verpackungsmaschine des Bakteriophagen $\phi 29$ wird der DNS-Doppelstrang von einem starken Molekularmotor in die Virushülle gezogen.

Hugel und seine Kollegen allerdings widerlegt.

Dazu haben die Forscher Virushüllen über spezifische Antikörper auf einer Glasunterlage fixiert. An einem der Kanalproteine einer solchen Hülle befestigten sie ein Farbstoffmolekül und regten es mit grünem Licht an. Das Fluoreszenzlicht des Moleküls teilten sie in orthogonale Polarisationen auf, deren Intensitäten gemessen wurden. Anhand dieser beiden Signale ließ sich erkennen, ob sich die Ausrichtung des Farbstoffmoleküls änderte, während die Virushülle einen DNS-Doppelstrang aufnimmt. Am freien Ende der DNS hatten die Forscher eine kleine Magnetkugel befestigt, sodass sie mit einem Magnetfeld die DNS strammziehen konnten. Das Mikroskop machte somit sichtbar, wie sich die Kugel auf das Virus zu bewegte und folglich die DNS in das Virus gezogen wurde. Die Fluoreszenzsignale des Farbstoffmoleküls änderten sich jedoch nur geringfügig, sodass eine gleichzeitige Rotation der Kanalproteine auszuschließen war. Wie die DNS in das Virus gezogen wird, ist indes noch immer unklar.