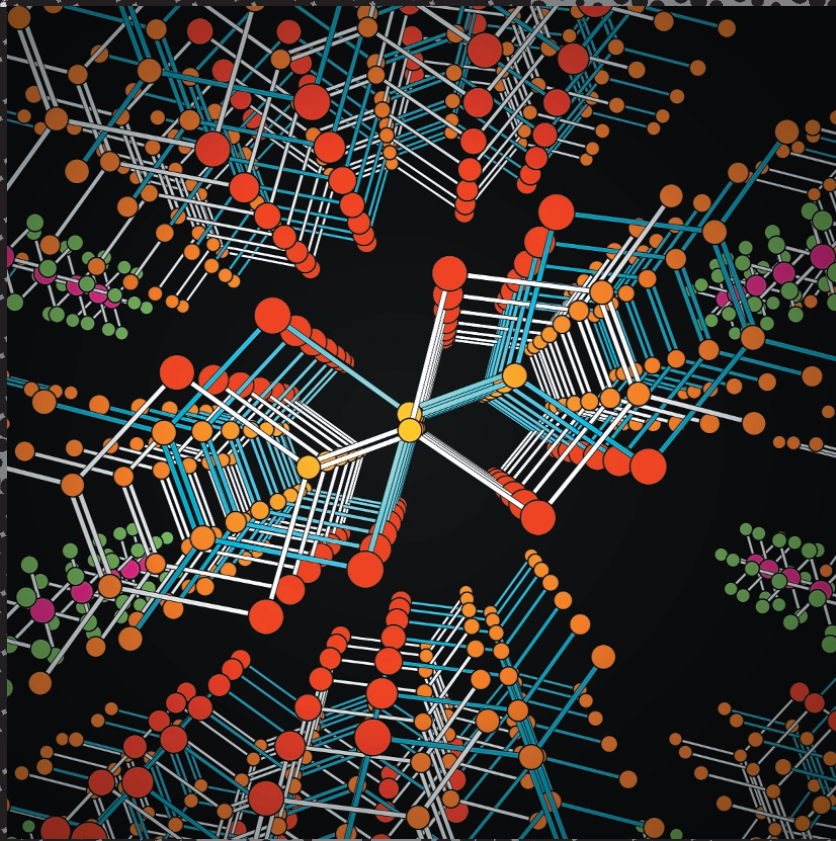


Martin Dressel
Christine Kuntscher

Kleine Bausteine für große Aufgaben





Die Errungenschaften der Nanotechnologie sind aus vielen Bereichen des täglichen Lebens nicht mehr wegzudenken. Die fortschreitende Miniaturisierung der Bauelemente dringt in atomare Größen vor, wobei Wissenschaft und Forschung vor neue Herausforderungen gestellt werden. Kann man einen Draht so dünn fabrizieren, dass er nur noch eine „Perlenkette“ aus Atomen ist? Leitet eine Kette aus Kupferatomen den Strom ähnlich wie ein normaler Draht oder gibt es Phänomene, die nur mit Hilfe der Quantenmechanik zu verstehen sind? So dünne Strukturen sind effektiv nur ein- oder zweidimensional. In diesem Artikel werden wesentliche Eigenschaften der Materie in niedriger Dimension erklärt und ein Einblick in diese faszinierende Welt gegeben.

Mit der Einladung *There's plenty of room at the bottom* gab der Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman (1918 – 1988) auf dem Jahrestreffen der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft in Pasadena, Kalifornien, zum Jahreswechsel 1959/60 den Startschuss für ein Gebiet, das seitdem als Nanotechnologie (von dem griechischen $\nu\alpha\nu\omicron\xi$ = Zwerg) bekannt geworden ist. Haben wir nach 50 Jahren den Boden erreicht?

Seit Jahren versucht die Nanotechnologie, immer kleinere Strukturen durch gezieltes Ätzen und raffiniertes Bearbeiten von Halbleitern herzustellen und so dichte Packungen einer Vielzahl von mechanischen und elektronischen Bausteinen für komplexe Aufgaben zu erhalten. Typischerweise wird dafür die Photolithographie verwendet, die mit dem klassischen Steindruck allerdings nur noch den Namen (griechisch $\lambda\upsilon\theta\omicron\sigma$ = Stein) gemein hat. Ein photographischer Film wird auf eine Siliziumscheibe aufgebracht und mit dem Bild der gewünschten Struktur belichtet. Die so gezeichneten Flächen werden durch eine geeignete Säure weggeätzt. Diese Technik wird sein Jahrzehn-

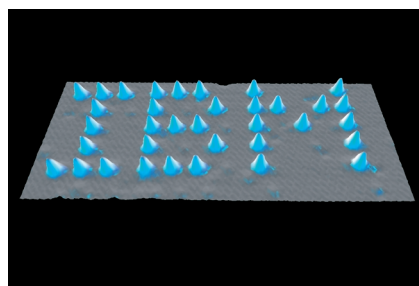
ten immer mehr verfeinert und hat heute eine kaum vermutete Präzision in der industriellen Produktion erreicht. Im umgekehrten Verfahren kann man in diese Größen weiteres Halbleitermaterial oder isolierende Oxidschichten aufwachsen. Mit atomarer Genauigkeit werden äußerst komplizierte viellagige Schichtstrukturen hergestellt. Diese für die Chipfabrikation so wichtigen photolithographischen Prozesse sind physikalisch durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts begrenzt auf ca. 100 Nanometer (1 Nanometer = 10^{-9} m = 0,000.000.001 m = 1 Millionstel Millimeter). Immer wieder gelingt es zwar, durch technische Tricks die physikalischen Grenzen ein wenig hinauszuschieben. So können etwa Strukturen von wenigen zehn Nanometern erzielt werden, wenn man zur „Belichtung“ einen Elektronenstrahl anstelle eines Lichtstrahls verwendet. Doch das Ende dieses erfolgreichen Wegs ist abzusehen.

Martin Dressel / Christine Kuntscher ■
Kleine Bausteine für große Aufgaben ■

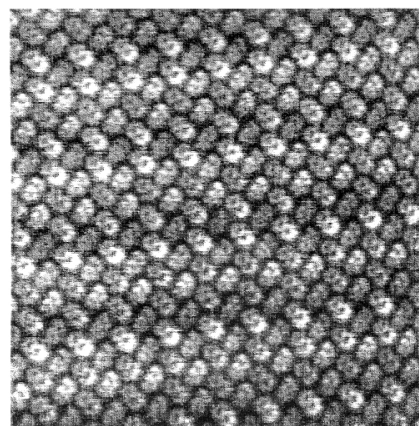
Die Natur selbst zeigt uns einen Ausweg aus diesem Dilemma: Überall entstehen mehr oder weniger komplizierte Strukturen, symmetrische und unsymmetrische, sozusagen von selbst. Atome gehen Bindungen ein zu linearen, ebenen, tetragonalen, schraubenförmigen oder sonst wie geformten Molekülen. Diese können aus nur wenigen, aber auch vielen Hunderten von Atomen bestehen und stellen faszinierende Objekte der Chemie dar. Sie sind die Grundlage aller biologischen Organismen, und die DNS (Desoxyribonukleinsäure), worin das menschliche Erbgut kodiert ist, ist das komplexeste aller Makromoleküle. Nicht nur einzelne Atome, sondern auch sehr komplexe Moleküle haben die Tendenz, sich in regelmäßiger Form aneinander zu lagern. Auf der Ebene der Partikel kennt man die relativ regelmäßige Tröpfchenanordnung auf dem Kochtopfdeckel oder die wellige Struktur von Sanddünen oder Wolken.

Damit dies aber nicht das Ende der Nanotechnologie bedeutet, muss die Richtung gewechselt werden. Anstatt große Blöcke immer feiner zu strukturieren, das heißt von oben nach unten zu bauen (so genannter *top-down*-Ansatz), kann man versuchen, die gewünschten Strukturen aus einzelnen molekularen Bausteinen zusammenzufügen. Dieser so genannte *bottom-up*-Ansatz, der seit einigen Jahren intensiv verfolgt wird, entspricht dem Konstruktionsprinzip der Natur, bei dem komplexe Moleküle als Funktionsträger von Lebensprozessen aus Untereinheiten zusammengesetzt werden. In dieser konstruktiven Materialwissenschaft werden die Atome und Moleküle, als Bausteine der Materie, so in die gewünschte Anordnung gebracht, dass Strukturen mit maßgeschneiderten Eigenschaften entstehen. Der Weg dorthin gliedert sich in zwei Etappen: Zunächst müssen wir die geeigneten Bausteine, also die Atome oder Moleküle, finden beziehungsweise präparieren und sodann diese Bausteine in optimaler Weise anordnen. Dies kann beispielsweise mit der sehr feinen Spitze eines Tunnelmikroskops bewerkstelligt werden.

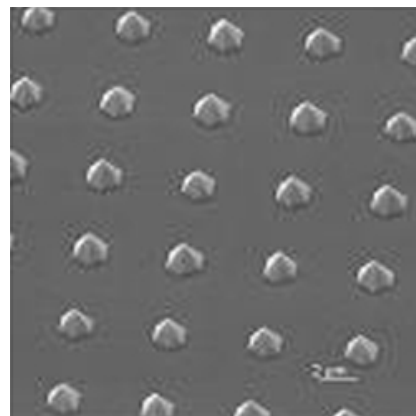
Hiermit können einzelne Atome wie Murmeln im Sand bewegt werden, man kann sie in Ketten und Ringen anordnen oder mit ihnen Buchstaben formen. Dies ist jedoch äußerst mühsam und langwierig, da immer nur jeweils ein Atom in einer bestimmten Weise bewegt werden kann. Bedenkt man, dass ein Wasserstoffatom nur ein Zehntel eines Nanometers groß ist, so erkennt man gleich, dass dieses Verfahren zur Herstellung einer großen Anzahl dicht gepackter elektronischer Schaltkreise sicherlich ungeeignet ist. Für nur einen Millimeter benötigt man so viele Atome, wie Fußbälle nebeneinandergelegt einmal um die Erde passen.



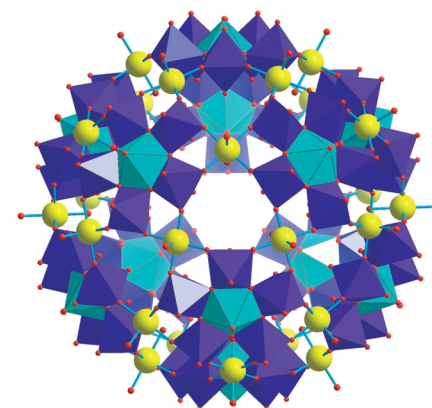
Rastertunnelmikroskop-Bild der Buchstaben IBM, geformt durch Xenon-Atome auf einer Nickel-Oberfläche [2]. Mit Hilfe der Spitze des Rastertunnelmikroskops können die Atome an die gewünschte Position gebracht werden.



Monoatomarer Film des organischen Moleküls PTCDA (Perylen-tetracarbonsäuredianhydrid, $C_{24}H_{10}O_5$) auf einer Graphit-Oberfläche. Das linke Bild ist mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops aufgenommen; deutlich ist die fischgrätenartige Anordnung der Moleküle gezeigt. Rechts ein Modell für die molekulare Ordnung des PTCDA-Films. Die planaren Moleküle ordnen sich beim Aufdampfen von selbst in dieser Struktur an [4].



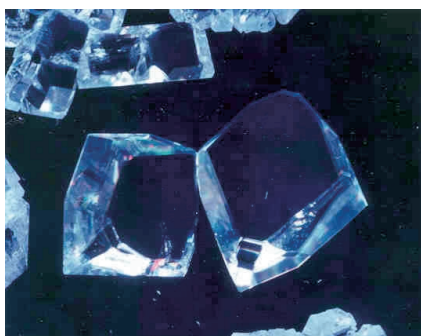
Auf der Spitze der GaN Pyramiden sitzen Quantenpunkte aus InGaN, die einen Durchmesser von nur 30 Nanometern haben und als winzige Laser arbeiten. Das Rasterelektronenmikroskop-Bild zeigt die in einer vorgefertigten Struktur von selbst gewachsenen Halbleiterpyramiden; die Quantenpunktlaser sind nicht zu erkennen [1].



Ein Beispiel für Selbstorganisation in der Natur: Keplert-Riesenkugel $Fe_{30}Mo_{72}$ ($[Mo_{72}Fe_{30}O_{252}(CH_3COO)_{12}(H_2Mo_2O_8(H_2O)(H_2O)_6)_4] \cdot ca. 150 H_2O$), in der die magnetisch gekoppelten Metallatome durch Liganden in einer Ikosaedersymmetrie gehalten werden [3].

Dies wurde gegen Ende des 19., Anfang des 20. Jahrhunderts von Ernst Haeckel (1834 – 1919) und vor allem von D'Arcy W. Thompson (1860 – 1948) in dem berühmten Werk *Über Wachstum und Form* aus dem Jahre 1917 sowohl in der belebten wie in der unbelebten Natur ausführlich dokumentiert. Heute bezeichnet man diese eigenständige Strukturbildung als Selbstorganisation. Die Balance unterschiedlicher Kräfte und Wechselwirkungen führt dazu, dass die Atome oder Moleküle sich in einer mehr oder weniger regelmäßigen Weise anordnen; vielleicht nicht ganz perfekt, doch relativ gut. Der große Vorteil ist, dass zwischen allen Molekülen die gleiche Wechselwirkung herrscht und man so im Prinzip unbegrenzt viele Einheiten gleichzeitig und in gleicher Weise anordnen kann.

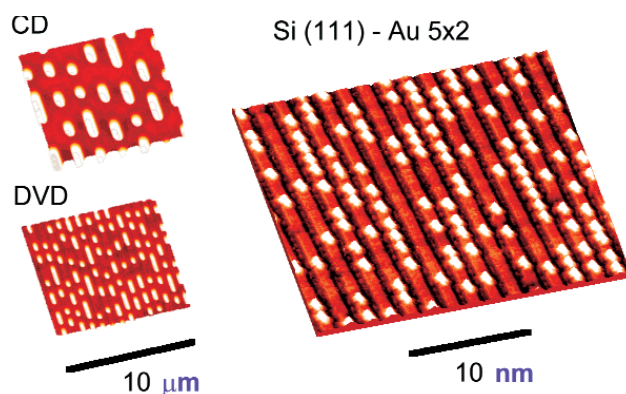
Kristalle (und nicht nur die Edelsteine unter ihnen) haben durch ihre perfekten Oberflächen, scharfen Kanten und faszinierenden Formen seit Jahrhunderten die Menschen begeistert; sie entstehen durch Selbstorganisation, und ihre Perfektion ist unnachahmlich. Heute wachsen in den Laboratorien in aller Welt eine Vielzahl von Kristallen, die so in der Natur nicht vorkommen. Durch geschickte Wahl der Randbedingungen können auf diese Weise Materialien mit besonderen Eigenschaften hergestellt werden. Hat man das Zusammenspiel der verschiedenen Einflüsse verstanden, kann man es sich zunutze machen, um maßgeschneiderte Materialien herzustellen: *tailored materials*.



Die atomare Perfektion der Kristalle entsteht von selbst. Das Bild zeigt durchsichtige Einkristalle aus dem organischen Molekül Pyren ($C_{16}H_{10}$), die eine Größe von mehreren Millimetern erreichen [5].

Vor uns tut sich eine Spielwiese auf, welche der Phantasie fast keine Grenzen mehr setzt. *Molecular engineering* nutzt das enorme Potenzial der modernen Chemie, um die Atome in Molekülen so anzuordnen, dass sie die erforderlichen Eigen-

schaften haben. Die Moleküle werden dann gezielt in einer regelmäßigen Weise aneinandergereiht und formen einen Festkörper mit dem gewünschten Verhalten: elektrisch, optisch oder magnetisch. Die Visionen reichen von stromleitenden Atomketten, über Schalter auf molekularer Basis bis hin zu molekularen Magneten, die als Datenspeicher von übermorgen ein Bit pro Molekül speichern. Das größte Problem ist die Verbindung zur makroskopischen Welt: wie beschreibe ich genau ein Atom oder lese die gespeicherte Information aus?



Ketten von Goldatomen auf einer Silizium(111)-Oberfläche, beobachtet mit einem Rastertunnelmikroskop (rechts). Diese Anordnung ist der Struktur einer CD oder DVD (links, Kraftmikroskop-Aufnahme) ähnlich, wobei allerdings die Bit-Dichte eine Millionen mal höher ist (zu beachten ist die Nanometer-Skala im Vergleich zur Mikrometer-Skala) [6].

Man kann diese selbsterzeugten Systeme jedoch auch als Modell nutzen, um an ihnen physikalische Phänomene zu studieren, die ansonsten nicht so gut zugänglich sind. Physiker wollen nämlich zunächst die Natur verstehen und erst in zweiter Linie die Welt verbessern. Seit Galileo Galilei (1564 – 1642) beschränken sie sich allerdings nicht mehr darauf, die Welt nur zu beobachten, sondern sie führen gezielte Experimente aus, um die Natur zu verstehen. Hierbei haben sie es zu einer bewundernswerten Kunst gebracht. Nicht nur experimentell, auch theoretisch basteln sie sich Modelle, die oft verblüffend einfach sind, aber die relevanten Fragen in unverfälschter Klarheit zeigen. An diesen Modellen kann untersucht werden, welchen Einfluss bestimmte Veränderungen haben. Man kann den einen oder anderen Baustein austauschen, und dann betrachtet man, wie sich die Eigenschaften des Modells im Vergleich zu dem ursprünglichen ändern. Bei theoretischen Simulationen ist dies in der Regel sehr einfach, in der Praxis jedoch nicht immer möglich. Festkörperphysiker beispielsweise untersuchen die Eigenschaften der Materie, der festen Stoffe. Hier ist es schon schwieriger, ge-

eignete Modellsysteme zu finden, denn es handelt sich ja um tatsächlich existierende Materialien. Oft sind die Verbindungen nicht stabil oder reaktiv, die Moleküle ziehen eine andere als die angestrebte Konfiguration vor.

Selbstorganisierte Strukturen stellen oft exzellente Modelle für eine Reihe von grundlegenden Problemen dar. Unsere Ausgangsfrage nach einem atomar dünnen Draht können wir an Goldatomen studieren, die wie eine Perlenkette angeordnet sind. Oder an stark anisotropen Kristallen, deren Moleküle in einer Richtung

so nahe sind, dass ihre Elektronenhüllen überlappen und die dadurch den Strom entlang des Stapels transportieren, in den anderen Richtungen aber nicht. Bevor diese Beispiele näher erläutert werden, wollen wir der Frage nachgehen, warum reduzierte Dimensionen so sinnvoll und spannend sind.

schränkt. Der Apfel fällt vom Baum senkrecht nach unten; wollen wir seine Geschwindigkeit studieren, so brauchen wir uns um die beiden anderen Richtungen nicht zu kümmern; eine dreidimensionale Beschreibung ist gar nicht nötig, um die Situation vollständig zu erfassen. Interessieren wir uns für die Stöße von Billardkugeln, so spielt sich in der Regel alles auf der Tischebene ab: das Problem ist ein zweidimensionales.

Physik in reduzierter Dimension

Die Welt hat drei räumliche Dimensionen: Länge, Breite und Höhe. Warum müssen wir uns eigentlich mit anderen Dimensionen beschäftigen? Zunächst einmal, weil es oft einfacher ist: viele physikalische Probleme lassen sich beispielsweise mathematisch exakt in einer Dimension lösen, jedoch nicht in zwei oder drei Dimensionen. Dort müssen teilweise drastische Näherungen eingeführt oder komplizierte und zeitraubende numerische Verfahren verwendet werden. Oft ist die wesentliche Physik schon in dem eindimensionalen Modell erkennbar und in der Regel einfacher zu verstehen. Häufig lässt sich das Problem auf ein eindimensionales oder zweidimensionales ohne wesentlichen Verlust reduzieren. Ein Zug auf einer Schiene kann nun mal nicht nach oben/unten oder links/rechts ausweichen; die Bewegung ist durch Zwangskräfte auf eine Richtung be-

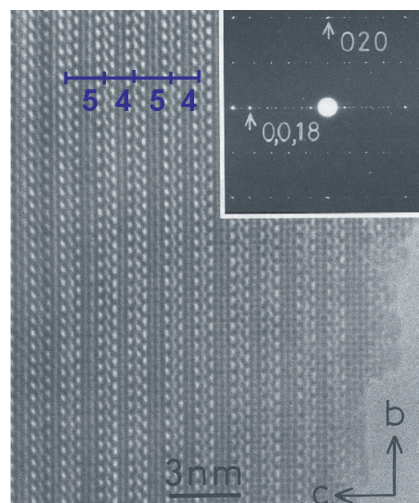


Das Billardspiel lässt sich als Stoßexperiment in zwei Dimensionen verstehen. Die Kunst ist der richtige Umgang mit Energie und Impuls. Der gute Spieler nutzt allerdings den Effekt (Drehimpuls), und so bekommt das Problem eine zusätzliche Dimension, ähnlich dem Spin der Elektronen.

Außerdem gibt es eine Reihe interessanter und technologisch relevanter Phänomene, die überhaupt nur in einer oder in zwei Dimensionen beobachtet werden. Von besonderer Bedeutung ist sicherlich der Quanten-Hall-Effekt in einem zweidimensionalen Elektronensystem, für dessen Entdeckung der Direktor am Stuttgarter Max-Planck-Institut Klaus von Klitzing 1985 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Heute spielen elektronisch zweidimensionale Strukturen in den modernen Computerchips eine große Rolle, da sich die Elektronen darin fast reibungslos bewegen können. Allgemein wird die Beweglichkeit der Ladungsträger einerseits durch das zugrundeliegende Gitter begrenzt, da die Atome aufgrund von thermischen Schwingungen nicht an ihren Plätzen ruhen und die Kristalle auch ansonsten nicht ganz perfekt sind; die Streuung der Ladungsträger an solchen Störstellen führt zu Energieverlusten. Andererseits darf die Wechselwirkung der Elektronen untereinander nicht vernachlässigt werden.

In einem typischen Metall wie Kupfer ist die Dichte der beweglichen Ladungsträger, das heißt der Leitungselektronen, so gering, dass sie sich gegenseitig nicht spüren. Bei sehr niedrigen Temperaturen, nahe dem absoluten Nullpunkt von $0\text{ K} = -273^\circ\text{C}$ ($\text{K}=\text{Kelvin}$), vor allem aber in Strukturen mit nur einer oder zwei Dimensionen werden hingegen die elektronischen Wechselwirkungen sehr wichtig: Die Elektronen können nicht mehr weiträumig ausweichen, sie spüren sich also gegenseitig und stoßen sich ab. In der Festkörperphysik wird die Elektron-Elektron-Wechselwirkung typischerweise durch eine Renormierung derjenigen Teilcheneigenschaften beschrieben, die für den Transport relevant sind, also der Masse des Teilchens und der Zeit zwischen zwei Stößen, auch Relaxationszeit genannt. Die Elektronen bewegen sich so, als seien sie aufgrund der elektronischen Wechselwirkung deutlich schwerer. In

der Renormierung wird die tatsächliche Masse der Elektronen durch eine sehr viel größere ersetzt, womit man der Wechselwirkung vollständig Rechnung trägt. Diesen Trick schlug Mitte der fünfziger Jahre der russische Physiker Lev Landau (1908–1968) vor, und diese so genannte Fermi-Flüssigkeitstheorie (benannt nach dem italienischen Nobelpreisträger Enrico Fermi (1901–1954)) gilt seither als ein Paradigma der Festkörperphysik. Man kennt dieses Phänomen auch von dem Einkaufsbummel durch die Fußgängerzone. Am Samstagvormittag (noch schlimmer beim Weihnachtsmarkt) kommt man kaum voran, da man sich ständig zwischen anderen Menschen durchzwängen muss; man läuft letztendlich so langsam, als würde man ein Vielfaches seines Körpergewichts bewegen. In einer besonderen Klasse von Metallverbindungen, die deshalb anschaulich als Schwere Fermionen bezeichnet werden, beobachtet man durch diesen Effekt eine Elektronenmasse, die tausendmal größer ist, als vom freien Elektron gewohnt. Während bei diesen dreidimensionalen Systemen die Elektron-Elektron-Wechselwirkung aufgrund sehr schmaler elektronischer Bänder und hoher Zustandsdichten wichtig wird, ist es in zwei Dimensionen und noch mehr in einer Dimension die fehlende Möglichkeit auszuweichen. Wer ärgerte sich nicht schon auf einer einspurigen Straße, dass er am Vordermann, oft ein langsamer Lkw oder gar ein Traktor, nicht vorbeikommt. In der Fläche, wie bei Schiffen auf einem See,



Beispiel für ein zweidimensionales System: Schichtstruktur eines $\text{SrNbO}_{3,45}$ Einkristalls, aufgenommen mit einem Transmissions-Elektronenmikroskop: Entlang der c -Richtung ordnen sich die Atome in einer regelmäßigen Abfolge von vier und fünf NbO_6 -Oktaeder breiten Schichten an [7]. Gezeigt ist auch das zugehörige Beugungsbild.

ist der Kontakt zu anderen Fahrzeugen schon weniger kritisch und gar in drei Dimensionen fast kein Problem mehr: Vögel und Flugzeuge kollidieren sehr selten, denn es gibt fast immer die Möglichkeit, nach oben/unten oder links/rechts auszuweichen. Doch in einer Dimension geht dies eben nicht.

Schon 1964 wurde von Shin'ichirō Tomonaga (1906 – 1979) und Joaquin Luttinger (1924 – 1997) erkannt, dass Landaus Modell der Fermi-Flüssigkeit in einer Dimension nicht angewandt werden kann: Man kann die elektronische Wechselwirkung nicht einfach durch den Renormierungstrick mit einer effektiven Masse und Streuraten ausdrücken und ansonsten die für freie Elektronen ausgearbeiteten Theorien übernehmen. Diese theoretischen Überlegungen wurden in den siebziger Jahren von mehreren Physikern weiter ausgebaut und verfeinert. Ein wesentlicher Punkt dieser knapp Luttinger-Flüssigkeit genannten Theorie ist die Tatsache, dass die Teilchen sich nicht mehr einzeln bewegen können. Stattdessen gibt es kollektive Anregungen, ähnlich der Zuschauer-Welle in einem Fußballstadion: die Welle bewegt sich durch das Stadion, ohne dass sich ein einziger Zuschauer von seinem Platz entfernt. Die Auswirkungen von Luttingers Theorie zeigen sich in fast allen physikalischen Phänomenen. Man erwartet beispielsweise Potenzgesetze im thermodynamischen und magnetischen Verhalten, in der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands, in den optischen Eigenschaften usw. Und während ansonsten die magnetischen Eigenschaften (der Spin) und die elektrischen Eigenschaften (die Ladung) im Elektron immer vereint sind, ist dies in einer Dimension nicht der Fall: Spin- und Ladungsanregungen bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, sie trennen sich also.

Diese Theorie hatte zunächst keine große Bedeutung, denn es gibt in unserer dreidimensionalen Welt keine wirklich eindimensionalen Metalle. Man kann die Richtigkeit der Vorhersagen nicht anhand von Experimenten an realen Materialien, die im mathematischen Sinne eindimensional sind, verifizieren. Wir können aber versuchen, Modelle zu bauen, die eindimensionalen Metallen so ähnlich wie möglich sind. Beispielsweise, indem Goldatome auf einer stufenförmigen Oberfläche so angeordnet werden, dass sie sich wie Perlen an einer Kette aufreihen.



Ähnlich wie das Fortbewegen der Autos in einem Stau kann man sich die Bewegung von Elektronen in einem eindimensionalen Metall vorstellen: Sie müssen hintereinander herfahren und können nicht seitlich ausweichen [8].

Auf diese Weise erhält man einen mehr oder weniger langen Golddraht, der nur ein Atom dick ist. Dies ist ein gutes Modell eines fast perfekten, eindimensionalen Metalls. Ein anderes Modell besteht aus Stapeln von Molekülen, die sich nur entlang der Stapelrichtung berühren und entlang den Stapeln den Strom leiten. Die einzelnen Stapel sind mehr oder weniger weit voneinander getrennt, sodass sie sich nicht spüren. Eine eindimensionale Struktur kann man auch aus einer Graphitschicht bauen, die zu einem langen Röhrchen aufgewickelt ist, ein so genanntes Kohlenstoff-Nanoröhrchen.

In all diesen Beispielen ist wichtig, dass die Kette der Atome oder Moleküle nicht viel breiter ist als der Bereich, in dem sich das Elektron üblicherweise aufhält, die so genannte Wellenlänge des Elektrons. Dies ist die Voraussetzung, im Sinne der Quantenmechanik von einer Dimension reden zu können.

Realisierung

Anhand von vier Beispielen wollen wir im Folgenden darstellen, wie man durch die gezielte Anordnung von atomaren Bausteinen schließlich interessante Strukturen erreichen kann. Einzelne Atome können Drähte auf einer Unterlage formen, doch ist diese Methode sehr aufwendig und nur unter extrem sauberen Bedingungen erfolgreich. Besser geeignet sind deshalb reale Materialien, bevorzugt Einkristalle. Organische Moleküle lassen sich in Stapeln schichten, um eindimensionale Metalle zu realisieren. Mit Kohlenstoff werden winzig dünne Röhrchen hergestellt, die ein unglaubliches Anwendungspotenzial haben. Die magnetischen Eigenschaften von großen Molekülen können genutzt werden, um Quantenphänomene zu erforschen und Daten zu speichern.

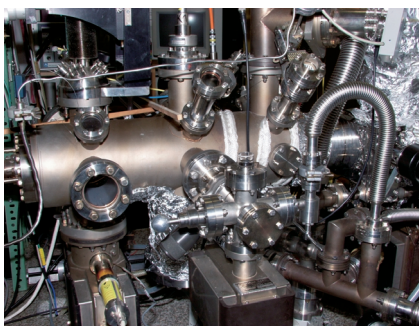
Künstliche Drähte

In Kristallen können selbst komplexe Moleküle Stapel bilden, die sehr anisotrope Eigenschaften besitzen. Möchten wir jedoch einen atomar dünnen Draht aus Goldatomen erhalten, so müssen wir etwas nachhelfen, damit die Atome sich nicht in einem Klumpen, einem so genannten Cluster, vereinen. Dies erreicht man beispielsweise, indem die Atome auf ein strukturiertes Substrat aufgebracht werden. Wie wird eine periodische Anordnung von atomaren Drähten auf einer Oberfläche hergestellt? Ausgangspunkt ist ein möglichst perfekter Silizium-Wafer, das heißt eine sehr dünne Silizium-Scheibe, die im Idealfall wirklich atomar glatt ist. Dies gehört heute in der Halbleiterindustrie zum Standard. Im ultrahohen Vakuum von 10^{-11} Millibar wird das Silizium auf sehr hohe Temperaturen (ca. 1000°C) erwärmt, um verbliebene Schäden auszuheilen und damit die Atome der Oberfläche in die energetisch günstigste Lage relaxieren. Dies ist eine 7×7 Überstruktur, auf der sich Furchen im Abstand von sieben atomaren Reihen befinden, was 2,3 Nanometern entspricht. Hat man zuvor den Silizium-Wafer leicht schräg angeschnitten, so erhält man Stufen von einem Atom Höhe. Nun wird weniger als eine Monolage Gold aufgedampft, das sich bei geeigneter hoher Temperatur in Form von eindimensionalen Drähten auf den einzelnen Stufen ablagert. Der Abstand dieser monoatomaren Golddrähte ist ein Vielfaches von 2,3 Nanometern und kann durch den Schnittwinkel (1° bis 10°) variiert werden.

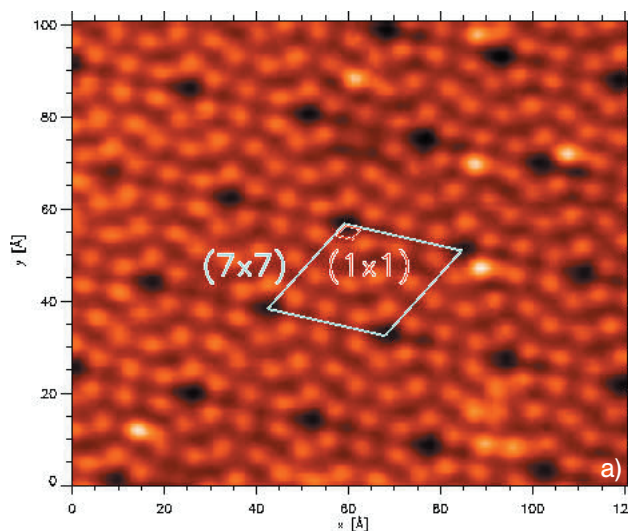
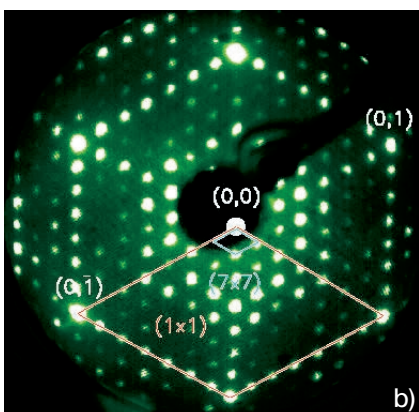
In Wirklichkeit sind die im Experiment entstandenen künstlichen Drähte nicht perfekt: hin und wieder (nach vielleicht hundert oder tausend Atomen) sind sie unterbrochen, haben Stufen oder Defekte. Der Vorteil der selbstorganisierten Herstellung der Drähte ist, dass auf einem Schlag eine große Fläche mit Millionen von Drähten gleichmäßig bedeckt werden kann; dies ist durch das sukzessive Bewegen einzelner Atome niemals zu erreichen. Für die Untersuchung der physikalischen Eigenschaften verwendet man entweder lokale Methoden, wie Rastertunnel-Spektroskopie, womit man die elektronische Zustandsdichte vermisst, oder man setzt integrierende Methoden ein, die kleine Defekte nur summarisch registrieren, wie Elektronenbeugung (*low-energy electron diffraction*, LEED) und optische Spektroskopie.

Die erzeugten Goldketten liefern uns ein Modell, das für Untersuchungen der

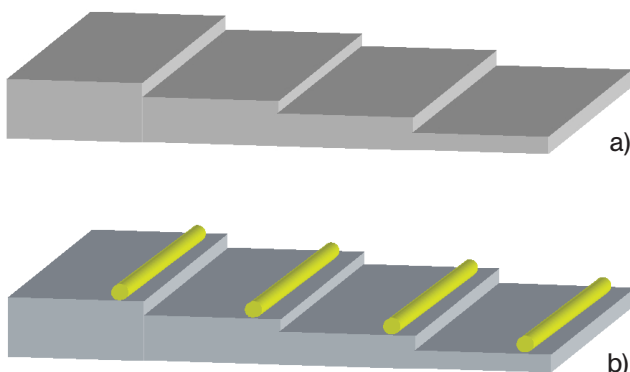
physikalischen Eigenschaften von eindimensionalen Metallen geeignet ist. Zudem kann durch Variation des Schnittwinkels der Abstand der Ketten und somit der Einfluss der Zwischenketten-Wechselwirkung und folglich der Dimensionalität kontinuierlich variiert werden. Erste Photoemissionsspektren liefern Hinweise auf die Trennung von Spin und Ladung, doch sind weiterführende Untersuchungen nötig, um die seitdem bestehende Kontroverse zu beenden. Eine sehr aussagekräftige Methode ist die optische Spektroskopie im fernen infraroten Spektralbereich, wie sie derzeit am 1. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart angewandt wird. Es wird erwartet, dass die optische Leitfähigkeit einem Potenzgesetz folgt, wobei der Exponent von der Wechselwirkung und der Bandfüllung abhängt. Diese Potenz muss mit der Temperaturabhängigkeit des Widerstands korrelieren.



In der atomaren Welt muss man sehr sauber arbeiten: nicht nur Staubkörner, auch Sauerstoff zerstören die Strukturen. Für die Herstellung atomarer Drähte auf einer Silizium-Oberfläche muss der Druck sehr gering, um 10^{-11} Millibar, sein. Dies wird mit Ultrahochvakuum-Kammern erreicht, wie der am 1. Physikalischen Institut.



Silizium (111)-Oberfläche mit der typischen sechszähligen Symmetrie und einer (7x7)-Überstruktur: (a) in dem Rastertunnelmikroskop-Bild sind eine (1x1)-Einheitszelle und eine (7x7)-Zelle eingezeichnet. (b) Entsprechendes Bild der Si(111)-Oberfläche im reziproken Raum, das aufgrund der Beugung niederenergetischer Elektronen (LEED) an den Silizium-Oberflächenatomen entsteht. Im LEED befinden sich jeweils sechs Reflexe zwischen den starken, mit (0,1), (0,0) und (0,1) bezeichneten Reflexen ganzzahliger Ordnung [9].



Erzeugung von atomarer dünnen Metalldrähten: (a) eine Silizium-Oberfläche wird schräg in einem Winkel angeschnitten, wodurch sich Stufen bilden, die genau ein Atom hoch sind und deren Breite vom Winkel abhängt. (b) Aufgedampftes Gold ordnet sich selbständig so an, dass sich atomare Drähte auf den Stufen bilden. Es ist dabei energetisch günstiger, wenn sich die Golddrähte nicht direkt an der Stufe, sondern in einem definierten Abstand zwischen zwei Stufen bilden.

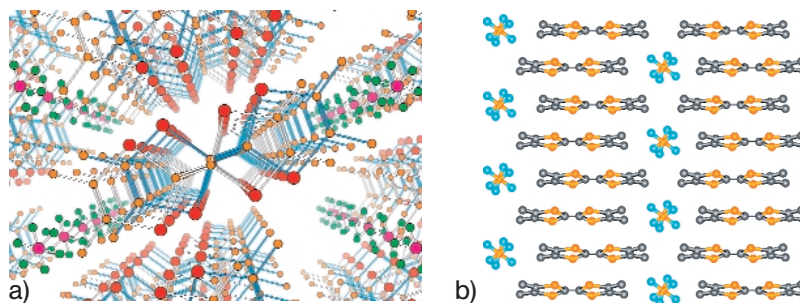
Organische Materialien

Organische Substanzen basieren auf Verbindungen von Kohlenstoff mit Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Schwefel und einigen anderen Elementen. Obwohl man sie erst seit Mitte des 19. Jahrhunderts im Laboratorium synthetisieren kann, machen organische Substanzen weit über 90 Prozent aller heute bekannten Verbindungen aus. Die enormen Möglichkeiten der organischen Chemie, Moleküle und Materialien mit gewünschten Eigenschaften herzustellen, wurden bisher nur in sehr geringem Maße genutzt. Hier ver-

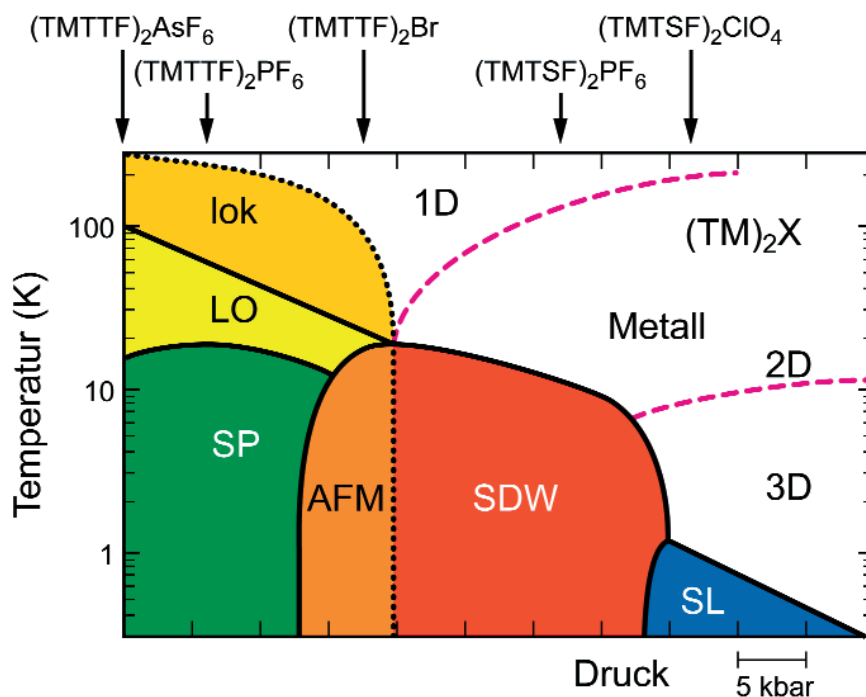
birgt sich noch ein enormes Potenzial für die Materialwissenschaften der Zukunft, das zu erschließen man erst in den letzten Jahren begonnen hat. Neben den lebenden Organismen und ihren Produkten haben wir im täglichen Leben mit organischen Festkörpern vor allem in Form von Kunststoffen zu tun. Diese Polymere sind in der Regel mechanisch weiche und elektrisch isolierende Materialien. Mit Beginn der 1960er Jahre wurden weltweit systematische Anstrengungen unternommen, organische Materialien auch elektrisch leitfähig zu machen. Alan Heeger, Alan MacDiarmid und Hideki Shirakawa gelang schließlich die Herstellung von leitfähigem Plastik durch die Joddotierung von Polyacetylen, wofür sie im Jahre 2000 den Chemie-Nobelpreis erhielten. In jüngster Zeit wird besonders intensiv an Leuchtdioden aus organischen Materialien gearbeitet, die schon ihren Einsatz in verschiedenen Produkten finden. Hier liegt ein großer Markt der Zukunft.

Für die Grundlagenforschung des Physiklers sehr viel interessanter und vielversprechender ist es, anstelle von ungeordneten Polymeren organische Kristalle herzustellen; diesen Weg geht die Universität Stuttgart seit Jahrzehnten mit sehr großem Erfolg. Um elektrischen Strom gut zu leiten, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: die Anzahl der Ladungsträger, Elektronen oder Löcher, muss hoch genug sein und sie müssen eine gute Beweglichkeit erzielen. Einen deutlichen Fortschritt machte man in den 1970er Jahren mit der Synthese von Ladungstransfersalzen: Hierbei werden zwei Sorten von Molekülen zusammengebracht, von denen die eine gerne ein Elektron abgibt, die andere ein zusätzliches Elektron aufnimmt. Man erhält einen Ionenkristall ähnlich dem Kochsalz, das ja aus positiven Natrium-Ionen und negativ geladenen Chlor-Ionen besteht. Der Durchbruch zu einem organischen Metall war erreicht, als es gelang, die Ladungsträger mehr oder weniger frei beweglich zu machen.

Von besonderem Interesse für unsere Fragestellungen sind die von Klaus Bechgaard synthetisierten organischen Moleküle wie Tetramethyltetraselenafulvalen (TMTSF). Dies sind relativ große, aber flache Moleküle mit einem ausgedehnten π -Elektronensystem, die so in Stapeln angeordnet sind, dass sich die Molekülorbitale entlang der Stapelachse überlappen. Da man hierdurch die erforderliche Be-



Die Kristalle aus dem organischen Molekül TMTSF (Tetramethyltetraselenafulvalen) stellen die am besten studierte Realisierung eines eindimensionalen Metalls dar: (a) Blick entlang der Molekülstapel; (b) in der Seitenansicht erkennt man die Trennung der Stapel durch die Anionen.



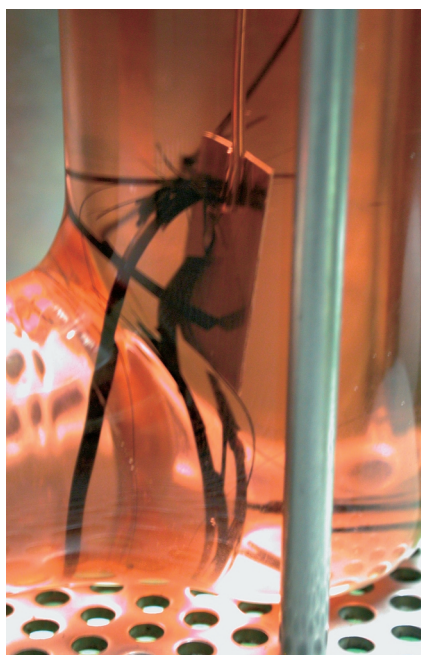
Temperatur-Druck Phasendiagramm der quasi-eindimensionalen Bechgaard-Salze. Je nach Parameterkombination zeigen die Kristalle unterschiedliche elektrische und magnetische Eigenschaften: ladungslokalisierte Isolatoren (lok), Ladungsordnung (LO), Spin-Peierls-Zustand (SP), antiferromagnetischer Zustand (AFM), Spindichtewelle (SDW), Supraleitung (SL) oder aber ein metallischer Zustand, der eher ein-, zwei- oder dreidimensional ist. Legt man an $(\text{TMTTF})_2\text{AsF}_6$ einen entsprechenden äußeren Druck an, so erhält man die verschiedenen Grundzustände. Allerdings kann man auch durch chemische Substitution den Ausgangspunkt des Phasendiagramms entsprechend der oberen Achse verschieben. $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ wird beispielsweise schon ohne äußeren Druck bei 1,2 K supraleitend.

weglichkeit der positiven Ladungsträger erzielt, zeigen die Kristalle in dieser Richtung eine sehr gute metallische Leitfähigkeit, ja werden sogar supraleitend, wie Denis Jérôme im Jahre 1979 entdeckte. In den beiden anderen Richtungen sind die elektrischen Eigenschaften sehr viel schlechter, teilweise isolierend. Diese nach ihrem Entdecker benannten Bechgaard-Salze haben sich als das beste Modell etabliert, um die Physik in einer Dimension zu studieren. Sie zeigen je nach Temperatur und Druck eine große Vielfalt verschiedener Phasen. Am 1. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart werden hiervon große Einkristalle in vielen Variationen hergestellt, um gezielt

Supraleitung, magnetische Ordnung, Ladungsordnung und niedrigdimensionale Eigenschaften mittels einer Reihe von Methoden (Elektron-Spin-Resonanz ESR, elektrische Transportmessungen, Mikrowelleneigenschaften, niederenergetische optische Spektroskopie, Photoemissionspektroskopie, thermische Leitfähigkeit) zu studieren.

getrennte Dispersionszweige (das heißt impulsabhängige Energie) für Spin- und Ladungsanregungen. Temperatur- und frequenzabhängige Leitfähigkeitsmessungen entlang eindimensionaler Molekülketten zeigen das für eine Luttinger-Flüssigkeit vorhergesagte Potenzverhalten mit guter Übereinstimmung der Exponenten. Die Eigenschaften, welche wir senkrecht zu den Ketten beobachten, lassen sich noch nicht konsistent in dieses Bild einfügen. Unsere jüngsten Fortschritte bei den Experimenten machen deutlich, dass die theoretische Beschreibung hier noch unvollständig ist [10].

Natürlich sind die wirklichen Kristalle dreidimensional; und die Molekülstapel können noch so weit voneinander entfernt sein, einen gewissen Einfluss üben sie doch aufeinander aus – das System ist also nur *quasi*-eindimensional. Es ist nun möglich, den Abstand Schritt für Schritt zu verkleinern, beispielsweise durch äußeren Druck oder durch chemische Tricks. Die Wechselwirkung wird stärker, und wir können so allmählich von einer zu zwei oder drei Dimensionen schreiten. Vor allem die Anwendung von äußerem Druck ermöglicht die *kontinuierliche* Änderung des Abstands zwischen den Molekülstapeln. Wir haben sozusagen einen Knopf, mit dem die Dimension variiert werden kann. Erhöhen wir die Dimension graduell, so zeigen unsere Messungen, dass die Metalle ihre Eigenschaften allmählich ändern. Dies ist eine Herausforderung für die Theorie, denn ihre Modelle ergaben ja völlig unterschiedliche Ergebnisse in einer und in zwei oder drei Dimensionen.

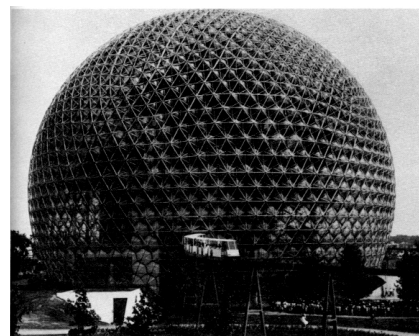


Die organischen Bechgaard-Salze werden am 1. Physikalischen Institut elektrochemisch hergestellt: In eine (leicht rötliche) Lösung werden zwei Platin-Elektroden gebracht, zwischen denen eine definierte Spannung anliegt. Mit dem Stromfluss setzt das Wachstum der nadelförmigen, schwarzen Einkristalle an einer Flächenelektrode ein.

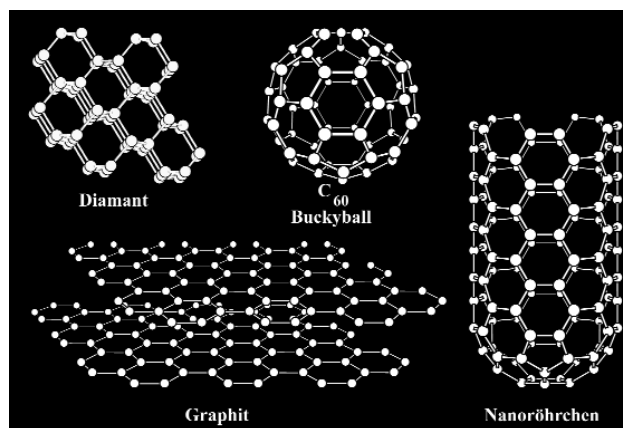
Durch eine Kooperation von mehreren Gruppen konnte überzeugend nachgewiesen werden, dass diese eindimensionalen Metalle das Verhalten einer Luttinger-Flüssigkeit zeigen; beispielsweise durch Potenzgesetze im temperaturabhängigen Widerstand und in der dynamischen Leitfähigkeit sowie durch den Nachweis der Trennung von Spin- und Ladungsfreiheitsgraden. Es wurde gefunden, dass sich die Wärmeleitfähigkeit dieser Systeme im wesentlichen gleich verhält, egal ob die Kristalle gute oder schlechte elektrische Leiter sind; Grund dafür ist der Wärmetransport durch magnetische Anregungen. Die Schlussfolgerung ist, dass sich der Spin unabhängig von der Ladung der Elektronen bewegt. Deutliche Hinweise darauf fanden sich schon bei winkelabhängigen Photoemissionsmessungen; dabei beobachtet man

Kohlenstoff-Nanoröhrchen

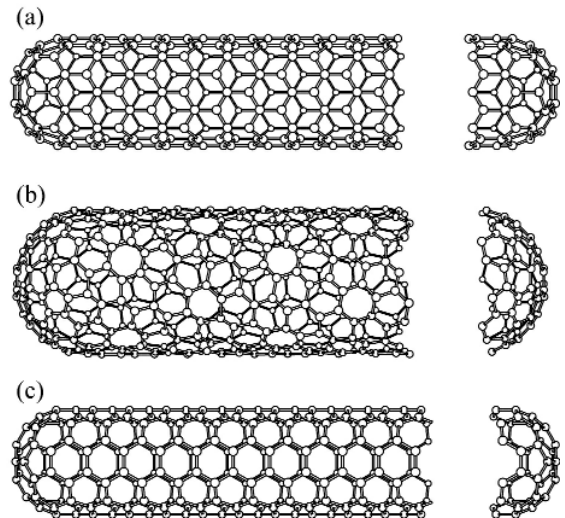
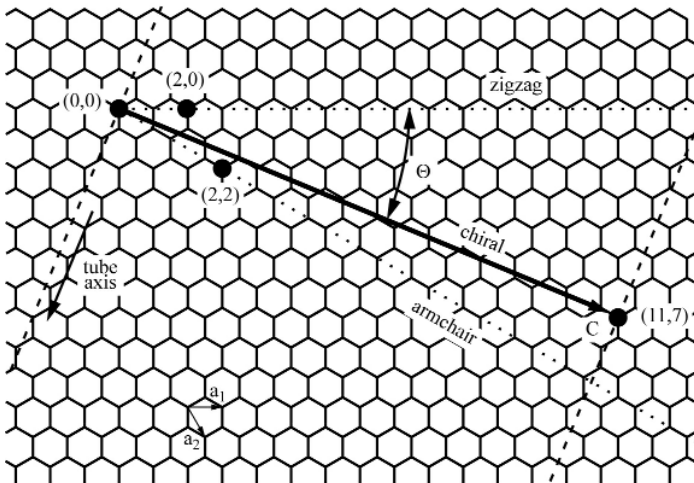
Kohlenstoff ist wohl das vielfältigste chemische Element der Natur. Es kann nicht nur eine ungeheure Vielzahl von Verbindungen mit anderen Elementen eingehen, sondern bildet auch untereinander große Ringe, Netzwerke oder Ketten. Sicherlich die bekannteste und attraktivste Form, in welcher reiner Kohlenstoff als Kristall vorkommt, ist der Diamant. Auch wenn seine Eigenschaften in Bezug auf Härte, elektrische Isolation und thermische Leitfähigkeit unübertroffen sind, so ist der Diamant chemisch und physikalisch relativ uninteressant. Eine andere Konfiguration des Kohlenstoffs ist Graphit, der uns als Ruß bekannt ist und in jeder schwarzen Farbe enthalten ist. Obwohl aus den optischen Spektren der Astronomen schon lange bekannt, überraschte 1985 Harold Kroto und Richard Smalley (Chemie-Nobelpreis 1996) die Welt mit einer dritten stabilen Form des Kohlenstoffs, dem fußballförmigen Molekül C_{60} , das auch als Bucky-Ball oder Fulleren bekannt wurde, da es an die



US-Pavillon des Architekten Buckminster Fuller bei der Weltausstellung 1967 in Montreal, Kanada [11]. Durch das Betreten der Kuppel sollte der Gesellschaft der Zugang zur geheimnisvoll-verschlossenen Welt der Wissenschaft ermöglicht werden. Bezugnehmend auf die Werke von Buckminster Fuller wurde das 1985 gefundene C_{60} -Molekül „Bucky-Ball“ beziehungsweise „Fulleren“ genannt.



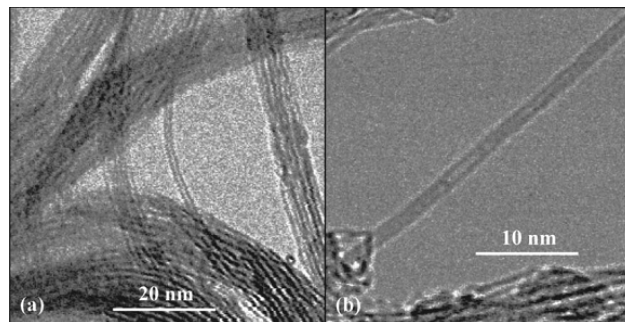
Verschiedene Formen von Kohlenstoff: Diamant mit seiner typischen wabenförmigen dreidimensionalen Struktur, Graphit mit seinen nur über relativ schwache van-der-Waals-Kräfte verbundenen Ebenen, das Fulleren C_{60} in Form eines Fußballs und die sehr dünnen und langen Nanoröhrchen.



Herstellung von Kohlenstoff-Nanoröhren durch Aufrollen eines Ausschnitts einer zweidimensionalen Graphitschicht. Der Aufrollvektor $C_n = na_1 + ma_2 = (n,m)$ beziehungsweise der chirale Vektor θ definiert die Struktur des Nanoröhrens und seine physikalischen Eigenschaften. Rechts sind drei typische Kohlenstoff-Nanoröhren dargestellt: (a) $(n,0)$ zigzag-, (b) (n,m) chirales und (c) (n,n) armchair-Nanoröhren.

Konstruktionen des Architekten Richard Buckminster Fuller (1895 – 1983) erinnert, der durch seine geodätischen Kuppeln berühmt wurde. Die Fullerene besitzen hochinteressante chemische und physikalische Eigenschaften, erwähnt sei nur die Supraleitung bei ca. 40 Kelvin, die bei Dotierung mit Alkalimetall-Atomen beobachtet wird. Die Kohlenstoffkugeln kann man chemisch aneinander hängen, man kann andere Atome oder Moleküle außen anbinden oder ins Innere der Kugel befördern und so die Eigenschaften variieren. Seit einigen Jahren können lange Röhren aus Kohlenstoffatomen, so genannte Kohlenstoff-Nanoröhren, kontrolliert hergestellt werden.

Solch ein Nanoröhren kann man sich als einen Zylinder vorstellen, der durch Aufwickeln eines Ausschnitts aus einer Graphitschicht entsteht. Der Durchmesser dieser Nanoröhren beträgt nur einige Nanometer; sie können aber viele Mikrometer lang sein. Dies sind gute Beispiele von eindimensionalen Systemen. Die elektronischen Eigenschaften hängen davon ab, in welchem Winkel die Röhren gewickelt sind: Die Struktur eines Kohlenstoff-Nanoröhrens wird eindeutig charakterisiert durch den Aufrollvektor $C_n = na_1 + ma_2 = (n,m)$ (so genannter Hamada-Vektor), wobei a_1 und a_2 die Gittervektoren von Graphit sind. Mit (n,m) sind weitere strukturelle Parameter festgelegt, nämlich der Durchmesser und der chirale Winkel θ . Unter den vielen möglichen Vektoren C_n gibt es Richtungen hoher Symmetrie; diese werden – angelehnt an die Anordnung der Atome – als „zigzag“



Aufnahmen von Kohlenstoff-Nanoröhren mit einem Transmissionselektronenmikroskop: (a) Bündel von Nanoröhren; (b) Ausschnitt mit einem einzelnen Nanoröhren [12].

($\theta = 0^\circ$) und „armchair“ (im Deutschen: Lehnstuhl, $\theta = 30^\circ$) bezeichnet, und sind charakterisiert durch die Parameter $(n,0)$ und (n,n) . Der Aufrollvektor (n,m) bestimmt neben der Struktur auch die elektrischen Eigenschaften eines Nanoröhrens: Es wurde sowohl experimentell als auch theoretisch gezeigt, dass Nanoröhren mit $n=m$ metallisch sind; solche mit $n-m = 3i$, wobei i eine ganze Zahl ist, besitzen eine kleine elektronische Bandlücke von etwa zehn Millielektronenvolt (meV), die durch die Krümmung des Röhrens hervorgerufen wird, und solche mit $n-m = 3i$ sind halbleitend mit einer Bandlücke von einigen hundert meV. Schließlich hängen die elektrischen Eigenschaften auch davon ab, ob die Nanoröhren einzeln oder in Bündeln vorliegen.

Kohlenstoff-Nanoröhren werden beispielsweise durch Laserabtragung (*Laserablation*) oder Bogenentladung hergestellt, wobei der Kohlenstoff zunächst bei sehr hohe Temperaturen von mehreren 1000°C in die Gasphase gebracht wird. Auf diese Weise können vielwandige Kohlenstoff-Nanoröhren hergestellt

werden, also Zylinder mit mehreren konzentrisch ineinander liegenden Röhren. Um einwandige Nanoröhren (*single-wall carbon nanotubes*) zu erhalten, muss ein Katalysator-Metall wie beispielsweise Nickel, Kobalt oder Yttrium beigemischt werden. Die Kohlenstoff-Nanoröhren liegen in der Regel in Bündeln vor, wobei die einzelnen Nanoröhren durch starke van-der-Waals-Wechselwirkungen gebunden sind, das heißt zusammenkleben. Teilweise sind die Nanoröhren so ineinander verschlungen, dass es sehr schwierig ist, sie zu separieren und zu einer Struktur anzuordnen; hier sind spezielle Verfahren und Tricks gefragt, die in den letzten Jahren perfektioniert wurden. In den letzten Jahren hat die Materi-

lungsschild, im Kraftmikroskop (*atomic force microscope*, AFM) und Rastertunnelmikroskop (*scanning tunneling microscope*, STM), als Sensor für Kraft oder Druck, als Biosensor, als Speicher von Wasserstoff und viele mehr. Was die Grundlagenforschung betrifft, so stellen einwandige Kohlenstoff-Nanoröhrchen aufgrund ihres kleinen Durchmessers und ihrer großen Länge ideale Systeme dar, um die Physik in einer Dimension zu studieren. Durch Tunnelexperimente wurde gezeigt, dass sich einzelne metallische Nanoröhrchen wie Luttinger-Flüssigkeiten verhalten. Eine interessante Frage ist nun, wie sich die elektronischen Eigenschaften einer geordneten Struktur von Kohlenstoff-Nanoröhrchen ändern, wenn der Abstand zwischen den Nanoröhrchen gezielt verändert wird. Besitzen die einzelnen Nanoröhrchen einen relativ weiten Abstand voneinander, ist die Wechselwirkung zwischen ihnen also gering beziehungsweise vernachlässigbar, dann sollte sich das Material wie ein ideales eindimensionales System verhalten. Wir können nun in einem Gedankenexperiment den Abstand zwischen den Nanoröhrchen kontinuierlich verringern – dies könnte in der Praxis durch das Anlegen von äußerem Druck realisiert werden. Ändern sich die elektronischen Eigenschaften dabei kontinuierlich oder wird es zu einer abrupten Änderung kommen?

alabscheidung aus der Gasphase (*chemical vapor deposition*, CVD) immer mehr an Bedeutung gewonnen, da auf diese Weise defektfreie Kohlenstoff-Nanoröhrchen erhalten werden und außerdem ein kontrolliertes Wachstum auf Oberflächen ermöglicht wird. Durch Selbstorganisation konnten geordnete Strukturen aus Nanoröhrchen auf einem Substrat hergestellt werden, auf das zuvor in dem entsprechenden Muster ein Katalysator aufgebracht wurde.

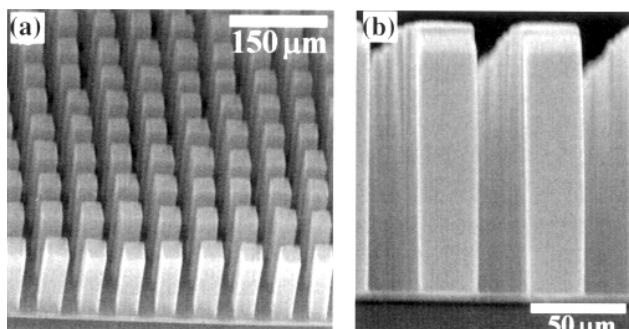
Zu den bemerkenswerten Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhrchen zählt ihre extrem hohe mechanische, thermische und chemische Stabilität. Diese beruht auf der Tatsache, dass alle chemischen Bindungen abgesättigt und außerdem sehr stark sind. Aufgrund ihrer Stabilität und ihrer interessanten elektronischen Eigenschaften haben die Kohlenstoff-Nanoröhrchen bereits zahlreiche Anwendungen im Labor gefunden; beispielsweise wurde gezeigt, dass sie in Feldeffekt-Transistoren eingesetzt werden können. Außerdem können sie als Elektronenemitter, zum Beispiel im Elektronenmikroskop oder Flachbildschirm, oder als Lichtemitter, beispielsweise im optischen Nahfeldmikroskop, verwendet werden. Es gibt zahlreiche weitere Einsatzmöglichkeiten von Kohlenstoff-Nanoröhrchen, wie etwa in der Datenspeicherung, als Wärmeaustauscher, als Strah-

Molekulare Magnete

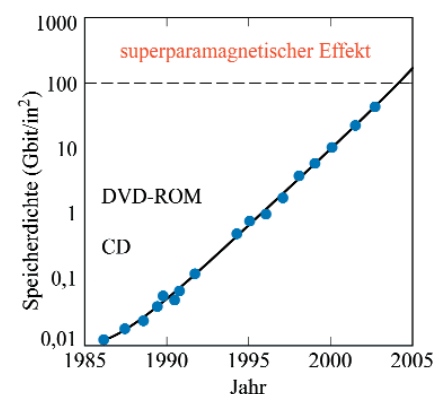
Die Programme der Computer werden immer umfangreicher, auf die Festplatten müssen ständig mehr Daten passen, auch die Bilder der digitalen Kameras haben Millionen Farben und Jahr für Jahr eine bessere Auflösung. Digitale Filme dürfen der traditionellen Analogtechnik nicht nachstehen. Folglich muss der Speicherplatz ständig vergrößert werden, und trotzdem sollen die Geräte immer kompakter werden. Überraschenderweise arbeiten die Speichermedien eines Kasset-

ten- oder Videorecorders, einer Diskette oder einer Festplatte, egal ob analog oder digital, seit hundert Jahren nach dem gleichen Prinzip. Körner aus Eisenoxid Fe_2O_3 oder Chromdioxid CrO_2 auf einer dünnen Plastikfolie werden mit Hilfe einer kleinen Spule in die eine oder andere Richtung magnetisiert. Die Speicherdichte hat sich dabei alle fünf Jahre verzehnfacht und wird in den nächsten Jahren 100 Gbit/in² (100 Mrd. digitale Informationseinheiten pro Quadratzoll) erreichen, das heißt pro Quadratmillimeter kann man 150 Mio. Bit speichern, was einer Textmenge von 3 000 Schreibmaschinenseiten entspricht. Doch damit ist eine physikalische Grenze erreicht. Die Qualität alter Tonbänder und Musikkassetten leidet mit jedem Jahr. Eine weitere Verdichtung würde dazu führen, dass die gespeicherte Information noch schneller verloren geht. Wird das superparamagnetische Limit überschritten, so hält die eingeschriebene Magnetisierung nur Bruchteile von Sekunden.

Sicherlich kann man mit ein paar technischen Tricks noch die ein oder andere Optimierung erreichen; dennoch nähert man sich dem Ende eines sehr erfolgreichen Weges. Doch vielleicht gibt es ganz andere Wege, um die diskutierten Limitationen zu umgehen? Wie wenig Platz braucht man, um ein Bit zu speichern? Momentan erreichen die magnetischen Körner eine Größe von ca. 100 Nanometern; der Wunsch ist, ein Bit pro Molekül zu speichern – auf einer Fläche also, die tausendmal kleiner ist als die heutigen magnetischen Domänen. Da traditionelle magnetische Materialien keinen Ausweg



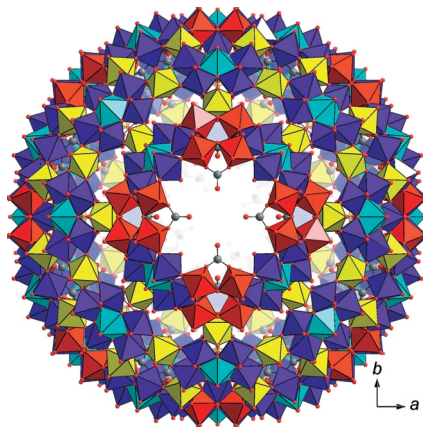
Selbstorganisierte Bündel von mehrwandigen Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die mit der CVD-Methode (Materialabscheidung aus der Gasphase) auf einem Silizium-Substrat gewachsen sind, auf das zuvor ein entsprechendes Muster des Metallkatalysators aufgebracht wurde [13].



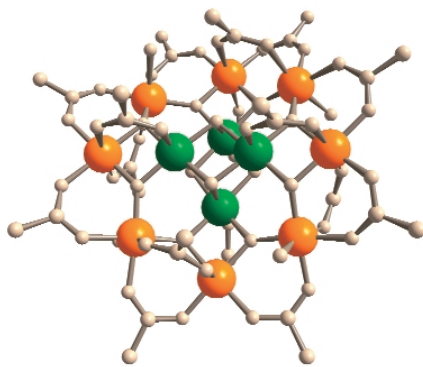
Zunahme der Speicherdichte magnetischer und optischer Medien in den letzten zwanzig Jahren. Zur Orientierung sind die derzeit üblichen Musik- und Daten-CDs beziehungsweise Video DVD-Formate angegeben. Oberhalb der paramagnetischen Grenze ändern thermische Fluktuationen die Magnetisierung der Körner, sodass die Information in Bruchteilen von Sekunden verloren geht.

aus diesem Dilemma bieten, begann vor einigen Jahren die Suche nach Alternativen. Die Idee ist wiederum, nicht Pulver immer feiner zu malen (*top-down*), sondern Atome so zu arrangieren (*bottom-up*), dass die resultierenden Moleküle die gewünschten Eigenschaften haben. In Eisen oder den gebräuchlichen ferromagnetischen Legierungen ist es die langreichweitige Ordnung aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Molekülen, die Weiß'sche Bezirke und Domänenwände ausbildet und die makroskopische Materialbeschaffenheit, das heißt die magnetischen Eigenschaften, erklärt. Anstelle der langreichweitigen Ordnung eines Ferromagneten versucht man, sich die magnetischen Eigenschaften von Molekülen selbst nutzbar zu machen. In der Chemie wurden in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte bei der Synthese von Riesenmolekülen gemacht, die aufgrund ihrer Symmetrie und Struktur die gewünschten Eigenschaften aufweisen. Dies sind hochsymmetrische Gebilde aus mehreren Dutzend Atomen, die eine Vorzugsrichtung der Magnetisierung haben. Der Elektronenspin des gesamten Moleküls, der die Magnetisierung bestimmt, kann entweder nach oben oder nach unten gerichtet sein, womit man Information (0 oder 1) speichern könnte.

Als Modell hierzu dient $[\text{Mn}_{12}\text{O}_{12}(\text{CH}_3\text{COO})_{16}(\text{H}_2\text{O})_4] \cdot 2\text{CH}_3\text{COOH} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ein Molekül, das im Kern aus zwölf Mangan-Atomen besteht, die in zwei Schalen mit unterschiedlicher Magnetisierung angeordnet sind und kurz als Mn_{12}ac bezeichnet wird. Eine größere Zahl von Sauerstoff-, Wasserstoff- und Kohlenstoff-Atomen stabilisieren die Struktur mit einer ausgeprägten Vorzugsrichtung. Das Molekül besitzt einen Gesamtspin von $S = 10$. Gemäß den Prinzipien der Quantentheorie gibt es hierfür exakt 21 diskrete Einstellungen: zehn in die eine (-10, -9, -8, ... -1) und zehn in die andere Richtung (+10, +9, +8, ... +1) nebst einer neutralen (0). Mittels spektroskopischer Methoden kann man die Übergänge zwischen diesen Stufen anregen und vermessen. Zirkular polarisiertes Licht erlaubt gezielt nur die rechten oder die linken Stufen hochzuklettern. In enger Zusammenarbeit zwischen Chemie und Physik, zwischen Theorie und Experiment wird diese Klasse von molekularen Magneten, die etwas exakter auch Einzelmolekülmagnete genannt werden, erforscht und erweitert. Einige Probleme sind dabei allerdings bis-



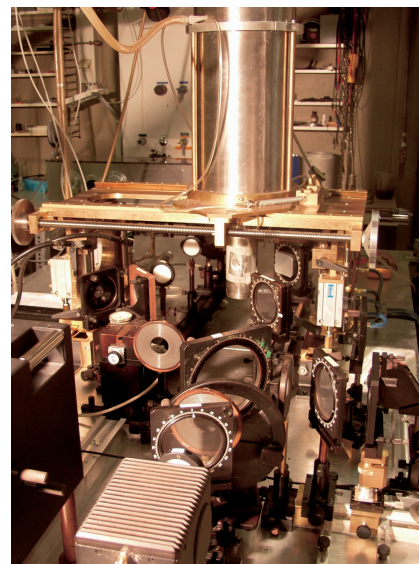
Polymolybdat-Cluster mit 368 Molybdän-Atomen: $\text{Na}_{48}[\text{H}_2\text{Mo}_{368}\text{O}_{1032}(\text{H}_2\text{O})_{240}(\text{SO}_4)_{48}] \cdot \text{ca. } 1000 \text{ H}_2\text{O} [14]$. Dieses hochsymmetrische Riesenmolekül bildet sich von selbst aufgrund der Selbstorganisation der einzelnen Atome.



Das Molekül Mn_{12}ac , eine Abkürzung für $[\text{Mn}_{12}\text{O}_{12}(\text{CH}_3\text{COO})_{16}(\text{H}_2\text{O})_4] \cdot 2\text{CH}_3\text{COOH} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, ist das bekannteste und best untersuchte Beispiel eines molekularen Magneten.

her noch nicht befriedigend gelöst: So sind extrem tiefe Temperaturen erforderlich, um die Magnetisierung in ihrer Vorzugsrichtung längere Zeit zu erhalten. Auch ist nicht klar, wie einzelne Moleküle beschrieben und gelesen werden können. Doch durch die enormen Fortschritte der Nanotechnologie wird die Adressierbarkeit einzelner Moleküle bald in Reichweite kommen.

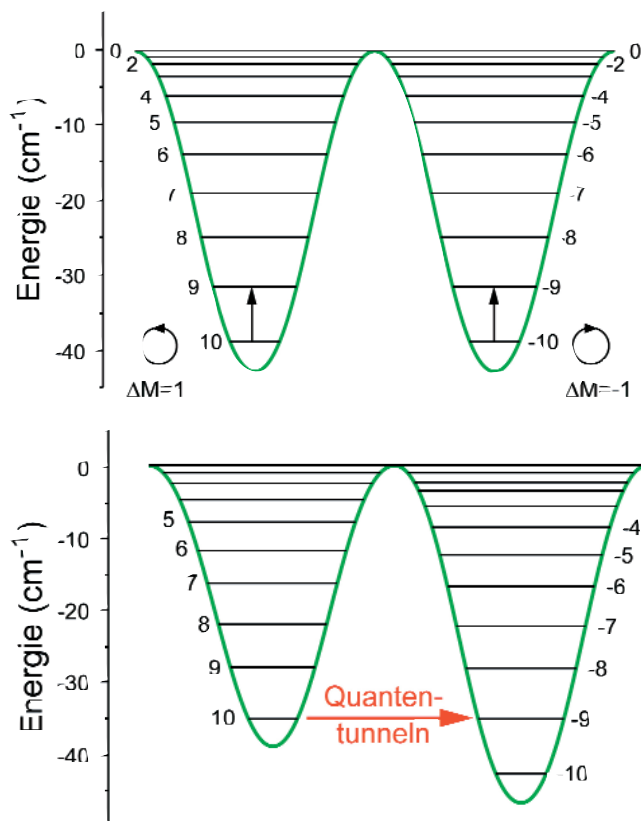
Vor gut fünf Jahren sorgten molekulare Nanomagnete für Schlagzeilen, als Phänomene beobachtet wurden, die nur mit Hilfe der Quantentheorie erklärt werden können. Seit dieser Zeit haben sich molekulare Magnete zu einem bevorzugten Modellsystem der Festkörperphysik entwickelt, um makroskopische Quantenphänomene zu untersuchen, die zum Teil schon vor Jahrzehnten vorhergesagt wurden, sich aber bisher der Beobachtung entzogen hatten. Die Wissenschaftler ge-



Hochfrequenz-ESR-Spektrometer am 1. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart zur Beobachtung der Übergänge zwischen den magnetischen Niveaus von molekularen Magneten. Dieses weltweit einmalige Instrument ermöglicht einen direkten Blick auf die einzelnen Spinzustände und ihr zeitliches Verhalten: man kann die Molekülspins beim Quantentunneln beobachten.

hen davon aus, dass diese Eigenschaften mittelfristig den Bau eines Quantencomputers möglich machen können.

Das Quantentunneln des Elektronenspins ist in Form von charakteristischen Stufen der Magnetisierung zu beobachten: Bei bestimmten Magnetfeldstärken müssen die Spins nicht mehr über eine Energiebarriere klettern, um ihre Richtung zu wechseln, sondern können durch den Berg hindurchtunneln, da auf der anderen Seite ein Zustand gleicher Energie liegt. Auch die Tatsache, dass Elektronen strenggenommen Wellen sind, kann man durch Interferenzphänomene in der Magnetisierung direkt sehen. Weitreichende Möglichkeiten eröffnet eine neue Art der magnetischen Spektroskopie, die in Stuttgart in den letzten Jahren entwickelt und angewandt wurde, um die Relaxations-



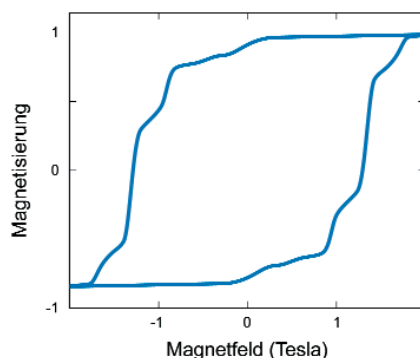
Energieschema eines molekularen Magneten: Die linke Seite entspricht der Ausrichtung des Elektronenspins nach oben, die rechte Seite der entgegengesetzten Orientierung. Zum Umklappen des Spins muss die Energiebarriere des Doppelmuldenpotenzials überwunden werden. Dies ist thermisch oder durch die Einstrahlung von elektromagnetischer Energie der geeigneten Wellenlänge möglich. Zirkular polarisiertes Licht erlaubt gezielt nur die rechten oder linken Stufen hochzuklettern. Durch Anlegen eines Magnetfeldes werden die rechten und linken Energiestufen gegeneinander verschoben; erreicht das Magnetfeld einen Wert, für den eine linke und eine rechte Energiestufe übereinstimmen, kann Quantentunneln stattfinden.

phänomene der molekularen Nanomagneten zu untersuchen. Hierbei werden die Übergänge zwischen magnetischen Niveaus direkt beobachtet. Vereinfacht gesprochen, kann man den Spins beim Durchtunneln der Barriere zusehen. Viele Aspekte sind inzwischen verstanden und entsprechen auch quantitativ den theoretischen Modellen, doch eine ganze Reihe von Tatsachen wartet noch auf ihre Erklärung.

Ausblick

Jeder endliche Körper wird durch Flächen begrenzt; diese Oberfläche wird umso wichtiger, je kleiner man den Körper macht. In der Nanotechnologie hat man es folglich fast ausschließlich mit Rändern und Kanten zu tun. Schichten sind nur wenige Atome dick, Drähte werden nur wenige Atome stark. Aus diesem Grund wurde die Oberflächenphysik in den letzten Jahrzehnten zu einem wichtigen Teilgebiet der Physik und Technologie. Von theoretischen Modellen abgesehen, entwickelt sich die Physik der reduzierten Dimensionen erst allmählich. Experimentell befasst man sich überwiegend mit der Herstellung und Charakterisierung der ein- oder zweidimensionalen Eigenschaften, was sich oft als äußerst schwierig entpuppte. Es stellte sich heraus, dass niedrigdimensionale Strukturen sehr empfindlich für kleine Störungen sind, die aber in der Realität nicht zu vermeiden sind. Auch Fluktuationsphänomene werden mit abnehmender Dimension immer wichtiger, schon allein aufgrund der endlichen Temperaturen.

Als Leitmotiv unserer Bemühungen können wir die folgende Frage formulieren: Was sind die Eigenschaften von Systemen mit einer reduzierten Dimension?



Schematische Magnetisierungskurve des molekularen Magneten $Mn_{12}Ac$: Aufgrund des Quantentunnelns werden charakteristische Stufen der Magnetisierung beobachtet, denn auf einen Schlag können viele Moleküle die Magnetisierungsrichtung invertieren.

Da technologisch relevante Bausteine immer kleiner werden, wird sich bald die Informationsverarbeitung und -speicherung auf der Nanometerskala oder darunter abspielen, ja sogar auf atomarer Ebene, ist es wichtig, die Physik in reduzierter Dimension zu verstehen. Erst mit einem grundlegenden Verständnis ihrer Eigenschaften können niedrigdimensionale Strukturen gezielt für Anwendungen genutzt werden. Die Arbeiten am 1. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart mögen noch ausschließlich Grundlagenfragen betreffen, ihre baldige Relevanz für die Technologie von übermorgen ist jedoch sicher. Das tiefe Verständnis solcher quasiauflöslicher Strukturen ist von grundsätzlicher Bedeutung für die Weiterentwicklung der Nanotechnologie zu einer molekularen Elektronik.

Das Forschungsgebiet lebt in einem spannenden Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment; es braucht eine enge Zusammenarbeit zwischen Chemikern und Physikern. Es wurden deutliche Fortschritte beim Verständnis gemacht, doch bei weitem sind noch nicht alle Fragen beantwortet, noch sind viele rätselhafte Eigenschaften nicht erklärt. Auf dem Gebiet der eindimensionalen Metalle ist es zur Zeit noch fraglich, ob die theoretischen Ansätze einer Luttinger-Flüssigkeit auf reale Strukturen, wie Quantendrähte, Nanoröhren, Molekülketten oder stark anisotrope Kristalle, angewendet werden können. Die theoretische Beschreibung muss die Wechselwirkung mit der Umgebung berücksichtigen, um von idealisierten Modellen zu realen Systemen zu gelangen. Experimentell ist es

möglich, an Modellsystemen die Wechselwirkung und damit die Dimensionalität kontinuierlich und kontrolliert zu variieren, um so in enger Zusammenarbeit mit der Theorie die Anwendbarkeit und gegebenenfalls Weiterentwicklung der fundamentalen Konzepte zu studieren. Diese Thematik wird gegenwärtig sehr kontrovers diskutiert und ist weltweit Gegenstand von intensiver Forschung.

Vor fast zwanzig Jahren wurde in Stuttgart ein enorm innovativer und vorausblickender Sonderforschungsbereich aus der Taufe gehoben, der als *Molekulare Elektronik* bekannt wurde und für eine große Zahl von Forschungsaktivitäten, die man heute in Deutschland beobachtet, Vorreiterfunktion hatte. Neben der Herstellung von organischen Schichten und Kristallen ging es darum, wie Strom durch Moleküle geleitet werden kann und wie diese beispielsweise durch Licht geschaltet werden können. Die grundsätzlichen Fragen haben nichts von ihrer Aktualität verloren, sind vielmehr durch weitere Ansätze zu ergänzen. Eine inzwischen in der Industrie angesiedelte Aktivität gilt der schon angesprochenen Herstellung von organischen Leuchtdioden. Derzeit verfolgt man mit großem Engagement Bemühungen, mit Hilfe des Feldeffekts die elektronischen Eigenschaften von organischen Kristallen oder Filmen zu variieren.

Von besonderem Interesse ist die Wechselwirkung von elektronischen und magnetischen Eigenschaften. Können wir die magnetischen Eigenschaften elektrisch verändern oder schalten? Können wir umgekehrt die elektrischen Eigenschaften durch magnetische verändern? Man möchte durch die Einstrahlung von Licht die elektronischen Eigenschaften von Molekülen ändern. Doch auch die magnetischen Eigenschaften von Molekülen können schon heute mit Licht reversibel so variiert werden, dass sie als Schalter dienen. Sicherlich werden in den kommenden Jahren ganz neue Klassen von molekularen Systemen entwickelt, die uns eines Tages in Geräten des täglichen Lebens begegnen werden.

Literatur und Danksagung

- [1] Zur Verfügung gestellt von Heinz Schweizer, Mikrostrukturlabor des Physikalischen Instituts, Universität Stuttgart
- [2] D. M. Eigler und E. K. Schweizer, „Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope“, *Nature* 344, 524-526 (1990)
- [3] Zur Verfügung gestellt von Achim Müller, Anorganische Chemie, Universität Bielefeld
- [4] C. Ludwig, B. Gompf, J. Petersen, R. Strohmaier und W. Eisenmenger, „STM investigations of PTCDA and PTCDI on graphite and MoS₂. A systematic study of epitaxy and STM image contrast“, *Zeitschrift für Physik B* 93, 365 (1994)
- [5] Zur Verfügung gestellt von Norbert Karl, Kristalllabor des Physikalischen Instituts, Universität Stuttgart
- [6] F. J. Himpfel, A. Kirakosian, J. N. Crain, J.-L. Lin und D. Y. Petrovykh, „Selfassembly of onedimensional nanostructures at silicon surfaces“, *Solid State Communications* 117, 149 (2001)
- [7] Zur Verfügung gestellt von Frank Lichtenberg, Experimentalphysik VI, Universität Augsburg
- [8] Zur Verfügung gestellt von Wolfram Ressel, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart
- [9] <http://www.desy.de/~hasunihh/poster>
- [10] M. Dressel, „Spin-Charge Separation in Quasi One-Dimensional Organic Conductors“, *Naturwissenschaften* 90, 337 (2003)
- [11] Buckminster Fuller, herausgegeben von R. Snyder, St. Martin's Press, New York 1980
- [12] B.W. Reed und M. Sarikaya, „Electronic properties of carbon nanotubes by transmission electron energyloss spectroscopy“, *Physical Review B* 64, 195404 (2001)
- [13] M. Dresselhaus und P. Dresselhaus, *Carbon Nanotubes*, Springer-Verlag, Berlin (2001)
- [14] A. Müller, E. Beckmann, H. Bögge, M. Schmidtman und A. Dress, „Inorganic Chemistry Goes Protein Size: A Mo₃₆₈ Nano-Hedgehog Initiating Nanochemistry by Symmetry Breaking“, *Angewandte Chemie* 114, 1210 (2002)



Prof. Dr. rer. nat. Martin Dressel

wurde 1960 in Bayreuth geboren. Er studierte Physik, Philosophie und Rechtswissenschaften an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen und der Georg-August-Universität Göttingen. Nach der Diplomarbeit in einem Gebiet der Halbleiterphysik arbeitete er am Dritten Physikalischen Institut an seiner Dissertation zu Mikrowellen-Hall-Effekt in Supraleitern. 1989 wurde er zum Dr. rer. nat. promoviert. Bis 1991 leitete er die Aktivitäten des Laser-Laboratoriums Göttingen im Bereich der medizinischen Laseranwendungen. Daran schloss sich ein Postdoc-Aufenthalt an der University of British Columbia in Vancouver, Canada, an. Von 1992 bis 1995 arbeitete Martin Dressel an der University of California in Los Angeles, USA, als Stipendiat der Alexander von Humboldt Stiftung. Nach Deutschland zurückgekehrt, habilitierte er 1996 an der Technischen Hochschule Darmstadt, ehe er an das Zentrum für elektronische Korrelationen und Magnetismus der Universität Augsburg wechselte. Seit 1998 leitet Prof. Martin Dressel das 1. Physikalische Institut der Universität Stuttgart. Er wurde kürzlich mit dem Lan-

desforschungspreis 2003 ausgezeichnet. Seine Forschung befasst sich mit optischen, elektronischen und magnetischen Eigenschaften von niedrigdimensionalen und korrelierten Elektronensystemen mit dem besonderen Schwergewicht auf organische Leiter und Supraleiter.



Dr. Christine Kuntscher

Geboren am 8. Juli 1973 in Marktheidenfeld, studierte von Oktober 1992 bis Juli 1995 Physik an der Universität Würzburg. Es folgte ein Auslandsstudium der Physik an der State University of New York in Stony Brook in den USA mit einem Master-Abschluss über das Thema „Alkali Occupancies and Fullerene Orientation in K_3C_{60} and Rb_3C_{60} “ im Dezember 1996. Im Anschluss begann Christine Kuntscher ihre Promotionsarbeit über „Photoemissions- und Röntgenabsorptionsspektroskopie am quasi-eindimensionalen System $Sr_{1-x}La_xNbO_{3.5-x}$ “ am Institut für Festkörperphysik des Forschungszentrums Karlsruhe. Ihre Promotion schloss einen mehrmonatigen Forschungsaufenthalt an der Ecole Polytechnique Federale de Lausanne im Rahmen eines DAAD-Stipendiums ein. Nach der Promotion im Juni 2000 an der Universität Karlsruhe wechselte sie zur Universität Stuttgart und war von Juli 2000 bis Mai 2001 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am 1. Physikalischen Institut auf dem Gebiet der optischen

Spektroskopie tätig. Seit Juni 2001 ist Christine Kuntscher Stipendiatin des Emmy Noether-Programms der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Im Rahmen dieses Stipendiums hielt sie sich zunächst ein Jahr als Gastwissenschaftlerin am Laboratory of Optical Solid State Physics der Reiksuniversität Groningen, Niederlande, auf, wo sie an den optischen Eigenschaften niedrigdimensionaler Systeme forschte. Ein weiteres Jahr verbrachte sie am Clarendon Laboratory an der Oxford University, Großbritannien, und beschäftigte sich mit optischer Spektroskopie unter hohem Druck. Seit Juni 2003 leitet Dr. Christine Kuntscher eine Emmy Noether-Nachwuchsgruppe am 1. Physikalischen Institut der Universität Stuttgart. Ihr Forschungsgebiet ist die Untersuchung der elektronischen Eigenschaften niedrigdimensionaler Systeme, insbesondere die optische Spektroskopie unter hohem Druck.

