

## **'Draht' aus einem einzigen Atom**

**Was geschieht, wenn eine elektrische Verbindung auf wenige oder gar ein Atom schrumpft? Welche Gesetze beherrschen den Stromtransport? Eine Brücke aus nur einem Atom hilft, diese Fragen zu klären.**

Von Elke Scheer

Leitungsbahnen bilden die Infrastruktur moderner Elektronik. Sie versorgen Transistoren und Schaltungen mit Energie und lenken elektrische Signale zu ihren Zielen. Mit zunehmender Miniaturisierung schrumpfen diese Verbindungen. Metallische Leiterbahnen, wie man sie auf den in Massen produzierten Speicherchips verwendet, sind gerade noch bis zu 0,2 Mikrometer (tausendstel Millimeter) schmal und hoch. Zum Vergleich: Ein menschliches Haar ist im Durchschnitt ungefähr fünfzigtausendmal dicker.

Bei weiterer Verkleinerung müßten funktionale Elemente nur noch aus wenigen Atomen bestehen. Das erfordert allerdings einen prinzipiellen Wechsel sowohl in der Technologie als auch in der physikalischen Beschreibungsweise: Die bisher übliche Strukturierung "von oben", also die sukzessive Verkleinerung einer größeren Ausgangsstruktur, wird möglicherweise einem Aufbau "von unten" Platz machen, bei dem man die gewünschte elektronische Komponente Atom für Atom zusammensetzt. Die Grundlagen dafür werden derzeit entwickelt: Mit einem modifizierten Raster-Tunnelmikroskop (Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1985, S. 62) gelang es erstmals Don Eigler und seinen Mitarbeitern 1990 bei IBM am Almaden Research Center in San Jose (Kalifornien), Atome mit einer feinen Metallspitze auf einer atomar glatten Unterlage gezielt zu verschieben (Spektrum der Wissenschaft, Juli 1990, S. 36).

Die Fragestellung "Welche Gesetze der klassischen, makroskopischen Elektrizitätslehre gelten noch, wenn die Strukturen immer kleiner werden?" entwickelt sich somit zu: "Welche atomaren physikalischen und chemischen Eigenschaften bestimmen den Stromtransport, wenn man Atome zu leitfähigen Strukturen zusammensetzt?" und "Welche Atome muß man wie zusammenfügen, um die gewünschten elektronischen Eigenschaften zu erzielen?"

Um diese Frage zu klären, untersuchen wir die einfachste vorstellbare elektrische Verbindung, den einatomaren Kontakt - eine Einschnürung zwischen zwei metallischen Zuleitungen, die an ihrer engsten Stelle nur ein Atom "dick" ist. Weil sich deren atomare Konfiguration natürlich über einen längeren Zeitraum nicht ändern darf, verwenden wir mechanisch kontrollierbare Bruchkontakte, die erstmals von den Physikern John Moreland und Paul Hansma 1983 an der University of California in Santa Barbara realisiert und später von Chris Muller und Mitarbeitern der Universität Leiden weiterentwickelt wurden.

Das Prinzip erscheint recht einfach: Die Wissenschaftler nahmen einen etwa ein zehntel Millimeter dicken Metalldraht, klebten ihn an zwei Punkten auf eine biegsame Unterlage und schnitten eine Kerbe hinein. Durch Biegen der Unterlage wurde der Draht an der Kerbstelle gedehnt, bis er brach. Mittels Piezokristallen, also Materialien, deren Länge sich durch Anlegen einer Steuerspannung sehr präzise einstellen läßt, konnten die Forscher die Biegung der Unterlage so einregeln, daß sich die beiden Hälften wieder berührten, und zwar mit eben nur einem Atom; zudem konnten sie diesen einatomaren Kontakt für Stunden stabil halten.

In Kooperation mit Jan van Ruitenbeek von der Universität Leiden entstand dann am Forschungszentrum Saclay des Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) bei Paris 1995 die von uns verwendete Technik. Ihr großer Vorteil: sie nutzt in der Halbleiterchip-Industrie übliche lithographische Verfahren, um einen dünnen Draht des zu untersuchenden Metalls herzustellen. Dazu schleudern wir zunächst eine Plastikschiicht und dann einen elektronenempfindlichen Lack auf eine biegsame Unterlage auf; erstere ist etwa drei, die zweite maximal etwa einen Mikrometer dick. Den Lack haben wir mit der Elektronenstrahl-Lithographie strukturiert und dann eine dünne Schicht des zu untersuchenden Metalls aufgedampft. Unbelichteter Lack läßt sich anschließend chemisch ablösen. Für Bruchkontakte erzeugt man mit dieser Technik eine etwa zehn Mikrometer breite Leiterbahn, die eine an ihrer engsten Stelle nur etwa 0,1 Mikrometer schmale und zwei Mikrometer lange Einschnürung besitzt. Zum Schluß wird die unter dem Metall noch liegende Plastikschiicht so weit weggeätzt, daß eine etwa zwei Mikrometer lange und sozusagen freitragende "Nanobrücke" entsteht.

Diese besitzt aber noch immer etwa einhunderttausend Atome im Querschnitt der Engstelle. Deshalb spannen wir sie in einen Dreipunkt-Biegemechanismus ein: Ein Schieber wird weniger als einen zehntel Mikrometer genau vor- und zurückbewegt und dehnt beziehungsweise staucht die Brücke, wobei sie reißt - sich also öffnet -

und sich wieder zu einem einatomaren Kontakt schließen läßt. Aufgrund der Geometrie erreichen wir mit dieser Vorrichtung ein Untersetzungsverhältnis von etwa 1:5000. Das gilt aber nicht nur für die Einwirkung des Schiebers, sondern auch für andere mechanische Einflüsse. Schwingungen oder Stöße an die Apparatur werden somit stark gedämpft, und auf diese Art und Weise hergestellte einatomare Kontakte können über Tage stabil bleiben.

Elektrische Anschlüsse an den Zuleitungen der Brücke erlauben, ihren elektrischen Widerstand beziehungsweise seinen Kehrwert, den Leitwert, beim Öffnen und Schließen zu messen. Durch das Dehnen wird die Brücke dünner, und ihr Leitwert fällt sprunghaft, da die Atome sich abrupt umordnen. Es stellt sich dabei heraus, daß - fährt man den Schieber vor und zurück - der Leitwert vor dem Öffnen stets etwa gleich bleibt. Im offenen Zustand ist er fast gleich Null, Strom kann kaum transportiert werden. Nach erneutem Schließen ändert sich wohl die Atomanordnung - bei einem neuen Zyklus ergibt sich ein etwas anderer Stufenverlauf. Der Leitwert beim einatomaren Kontakt ist für verschiedene Proben eines Materials immer sehr ähnlich und variiert von etwa 125 Mikrosiemens (entsprechend einem Widerstand von 8000 Ohm) bei Blei, 77 Mikrosiemens (13000 Ohm) bei Gold bis zu 66 Mikrosiemens (15000 Ohm) bei Aluminium.

In diesen Fällen fließen über die Kontakte bis zu zehn Mikroampère, mehr als in manchen heutigen Halbleiterchips. Würde ein Kupferkabel mit eineinhalb Millimetern Durchmesser ebensoviel Strom pro Fläche transportieren, entspräche das nicht weniger als vierhundert Millionen Ampère! Verglichen mit ihrer winzigen Größe sind Atome also durchaus ganz hervorragende Leiter, doch gehorcht der Stromfluß auf atomarer Skala zwangsläufig anderen Gesetzen als der durch einen makroskopischen Festkörper.

Das belegt auch folgendes Phänomen: Schon in der Schule lernt man, daß Metalle wie Kupfer, Gold oder Aluminium Strom sehr gut leiten, daß Blei, Zink oder Zinn hingegen einen zehn bis zwanzigfach höheren spezifischen Widerstand haben. Das ist richtig in makroskopischen Drähten. Denn den elektrischen Widerstand erzeugen Stöße der Leitungselektronen an Kristallfehlern oder - wegen der Wellennatur der Ladungsträger - auch an thermischen Schwingungen des Kristallgitters. Ein perfekt geordneter Kristall am absoluten Temperaturnullpunkt - also ohne thermische Schwingungen - wäre demnach ein idealer Leiter "ohne" elektrischen Widerstand.

Besteht ein "Draht" aber nur mehr aus einem Atom, hat also gar kein Kristallgitter mehr, ändern sich die Verhältnisse. Nun tritt die Wellennatur der Elektronen direkt in Erscheinung, wie sie durch die Quantenmechanik beschrieben wird. In diesem Grenzfall betrachtet man den elektronischen Transport als Wellenstreuung: Ähnlich einer Wasser- oder Lichtwelle, die auf ein Hindernis aufläuft, wird die Elektronenwelle am weiterleitenden Atom teilweise zurückgestreut, teilweise weitertransportiert. Diese Idee entwickelte der Physi-ker Rolf Landauer am IBM Thomas J. Watson Research Center in Yorktown Heights (New York) - bereits vor über vierzig Jahren - zu einer Theorie des elektronischen Transports. Das zunächst erstaunliche Ergebnis ist, daß ein perfekt geordneter, aber an einer Stelle eingeschnürter Kristall nicht den Widerstand Null haben kann. Der Strom wird vielmehr durch sogenannte Kanäle transportiert, die einen endlichen Widerstand besitzen und deren Anzahl und Eigenschaften von der Einschnürung abhängen.

Wird diese durch ein Atom gebildet, das an die Nachbaratome der Zuleitungen anknüpft, liegt es nahe, daß die Kanäle durch die chemischen und elektrischen Eigenschaften aller beteiligten Atome bestimmt werden. Insbesondere machen Aufbau und Zustand der jeweiligen äußersten Schale der Elektronenhülle ihren Einfluß geltend. Beispielsweise ist beim Goldatom diese Schale nicht weiter unterteilt, während die Elemente Blei und Aluminium Elektronen in vier verschiedenen sogenannten Orbitalen aufnehmen können. Alfredo Levy Yeyati und seine Kollegen von der Universidad Autónoma de Madrid haben ausgerechnet, daß ein Goldatom deshalb nur einen Transportkanal für Elektronen ausbildet, Blei und Aluminium hingegen bis zu vier.

Bei der Bildung solcher Kanäle aus den Orbitalen der äußeren Elektronenschale eines jeden Atoms kommt es aber auch darauf an, wie sie an die der Nachbaratome anknüpfen. Eine quantenmechanische Rechnung zeigt: Gold transportiert den Strom durch einen vollständig geöffneten Kanal, Blei und Aluminium hingegen durch drei nur teilweise geöffnete. Trotzdem ergibt sich in der Summe, daß die makroskopisch meßbaren Transporteigenschaften der Metalle auf atomarer Skala umgekehrt sind: Ein Bleiatom leitet den Strom besser als ein Goldatom.

Solche Experimente sind ein wichtiger Schritt hin zu einer künftigen Elektronik mit Bauelementen aus nur wenigen Atomen. Denn noch fehlen geeignete Modelle, den Stromfluß in solchen Strukturen zu beschreiben. Interessant dabei ist, daß letztlich ein einziges Atom die Eigenschaften eines makroskopischen Stromkreises

bestimmt.

Bevor man über konkrete Einsatzmöglichkeiten von Ein-Atom-Kontakten spekulieren kann, müssen grundlegende Probleme gelöst werden. So haben wir gelernt, daß der Stromtransport von der Position der einzelnen Atome abhängt. Umgekehrt bedeutet dies, daß man diese Orte genau kontrollieren muß, um die Eigenschaften solcher Kontakte gezielt einzustellen. Hier würde die Strukturierung "von unten" zum Einsatz kommen. Ein weiteres Problem betrifft die Langlebigkeit einatomarer Kontakte. Fast alle Metalle reagieren mit dem Luftsauerstoff zu Oxiden. In der Tat wurden entsprechende Messungen im Vakuum durchgeführt.

Die naheliegende Anwendung für lithographisch hergestellte Bruchkontakte sind Schalter, denn durch Öffnen und Schließen der Brücke läßt sich ihr Widerstand einstellen. Die beschriebene Herstellung läßt sich in bestehende Fertigungslinien der Chip-Industrie integrieren. Es ist leicht vorstellbar, solche Schalter mit anderen Bauelementen auf einem Chip zu verknüpfen. Allerdings ist die Gesamtgröße eines kontrollierbaren Bruchkontaktes wegen der mechanischen Einregelung noch erheblich. An der Yale-Universität (USA) wurde in der Arbeitsgruppe von Mark Reed eine Methode entwickelt, Bruchkontakte elektrostatisch einzuregeln, was platzsparender ist und damit die Integrationsfähigkeit in elektronische Schaltkreise vereinfacht

Aus: Spektrum der Wissenschaft 6 / 1999, Seite 95

© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH