

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 99 (2008)
Heft: 9

Artikel: Molekulare Elektronik
Autor: Lörtscher, Emanuel / Riel, Heike
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855854>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Molekulare Elektronik

Moleküle als zukünftige elektronische Bauteile

Der Fortschritt der letzten 50 Jahre in der Informations- und Halbleitertechnologie kann auf die kontinuierliche Steigerung der Integrationsdichten von immer mehr und immer kleineren Bauteilen zurückgeführt werden. Diese Miniaturisierung wird in absehbarer Zukunft aber an fundamentale physikalische und ökonomische Grenzen stossen. Deshalb beschäftigt sich die aktuelle Forschung mit den ultimativ kleinsten elektronischen Bauteilen, den Molekülen und Atomen. Dabei besteht die Herausforderung in der Kontaktierung und Adressierung dieser nanometergrossen Objekte als Voraussetzung für deren Integration in komplexe Schaltkreise. Der Beitrag zeigt anhand eines Schalter- und Speicherelements, das auf einem einzelnen Molekül basiert, dass Moleküle über intrinsische Funktionen verfügen, die den Einsatz als logische, elektronische Bauelemente ermöglichen.

1947 wurde der Punktkontakt-Transistor, ein Vorgänger des Feldeffekttransistors, des Grundbausteins der heutigen Mikroprozessoren, von Walter Brattain, John Bardeen und William Shockley erfunden [1]. In diesem Bauelement wird der elektrische Stromfluss zwischen zwei Kontakten, dem

Emanuel Lörtscher, Heike Riel

Source- (dt.: Quelle) und dem Drain-Kontakt (dt.: Abfluss) über ein drittes Terminal, das Gate, mittels elektrischem Feldeffekt gesteuert. Dadurch können elektrische Eingangssignale geschaltet und verstärkt werden. Der Transistor bildet die Basis für den integrierten Schaltkreis (IC), der vor 50 Jahren von Jack Kilby erfunden wurde [2]. Damals umfasste ein IC nur etwa 10 Transistoren.

Durch Fortschritte in den lithografischen Strukturierungs- und Herstellungsmethoden sowie Innovationen in den Bauelement- und Schaltkreisarchitekturen hat sich bis zum heutigen Zeitpunkt die Integrationsdichte ungefähr alle zwei Jahre verdoppelt. Dieser Trend wird beschrieben im bekannten Gesetz von Gordon Moore [3]. So verfügt mittlerweile ein moderner Prozessor (mit einer Strukturgrösse von 65 nm und einem resultierenden Abstand von 35 nm zwischen Source und Drain) über mehr als 100 Millionen Transistoren (z.B.

IBM Cell Processor [4]: 234 Millionen Transistoren).

Als eine Konsequenz dieser Miniaturisierung skalieren bei der Herstellung der Prozessoren mittlerweile die Fertigungstoleran-

zen nicht mehr linear mit der Verkleinerung und tragen so massgeblich zu wachsender Variabilität und Fluktuation der Eigenschaften der nominal identischen Bauelemente bei. Ebenso steigt, beispielsweise durch Zunahme von Leckströmen durch das Gate, die passive Leistungsdichte, und somit die erzeugte Wärme – über einen ökonomischen Rahmen hinaus. Diese Vielfalt von Problemen, mit der die Halbleiterindustrie heute konfrontiert ist, ist eine grosse Motivation zur Erforschung von neuen Ansätzen. Ziel ist zum einen die weitere Miniaturisierung hin zur 1-nm-Grenze und eventuell gar darüber hinaus, zum anderen aber auch, sich anderer physikalischer Effekte, wie z.B. der Polarisation des Elektronenspins, zu bedienen.

Moleküle als funktionelle Bausteine

Die molekulare Elektronik ist ein aktuelles Forschungsgebiet mit dem Ziel, wenige oder sogar einzelne Moleküle als funktionelle Bauelemente in elektronischen Schaltkreisen einzusetzen. Aufgrund ihres Potenzials zur Herstellung von hochintegrierten

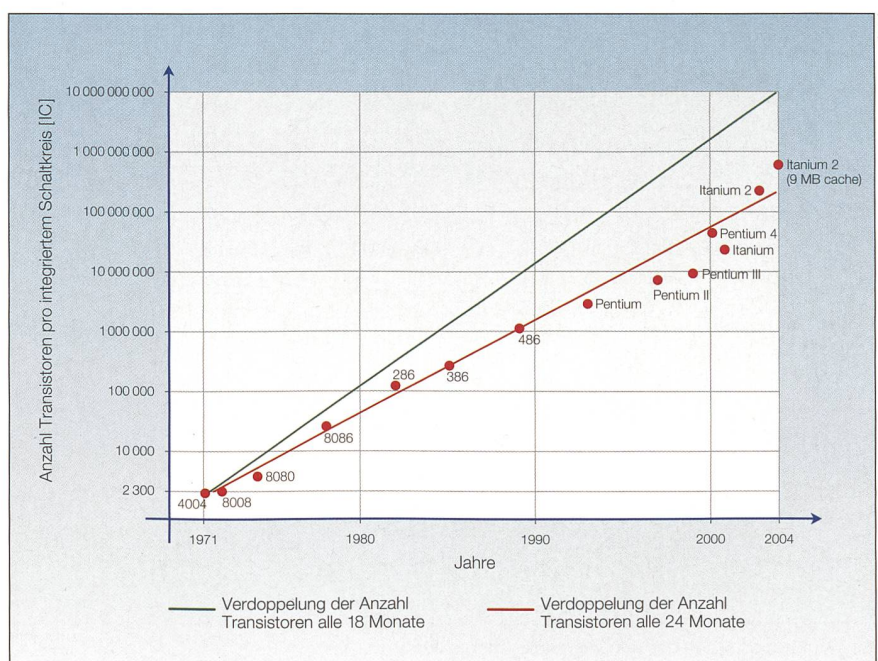


Bild 1 Das Moore'sche Gesetz.

Dargestellt ist die zeitliche Zunahme der Anzahl Transistoren pro integriertem Schaltkreis. Die Anzahl verdoppelte sich ungefähr alle 24 Monate und erreicht mittlerweile annähernd 1 Milliarde Transistoren pro integriertem Schaltkreis (Itanium 2, 9 MB cache).

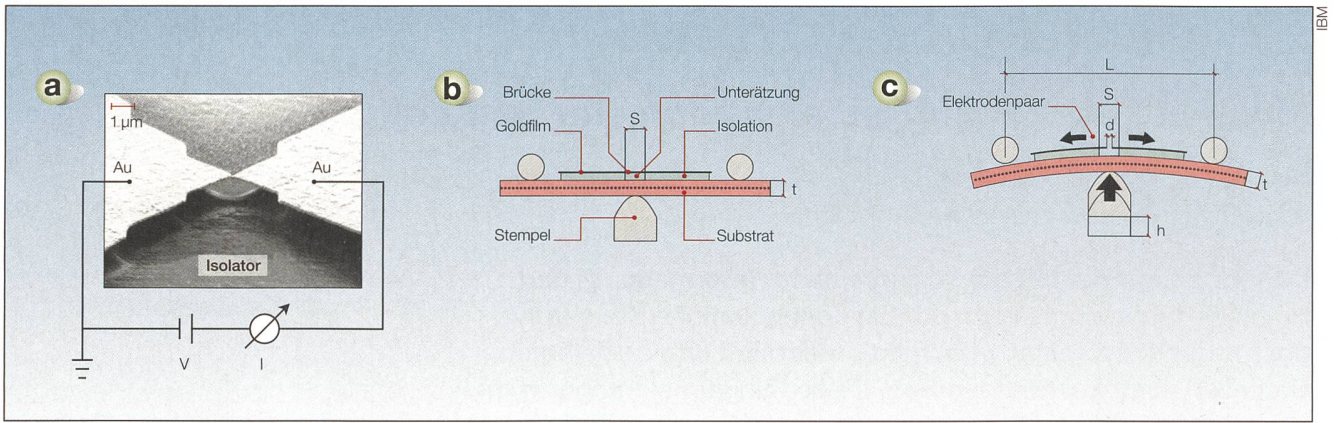


Bild 2 Prinzip der mechanisch kontrollierbaren Bruchkontakte (MCBJ).

2a: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Bruchkontakts, bestehend aus einer freitragenden Brücke mit einer zentralen Verjüngung (ca. $100 \times 100\text{-nm}^2$ -Querschnitt). 2b: Die Probe wird in eine 3-Punkt-Biegeeinrichtung eingebaut. 2c: Durch Biegen des Substrats wird die Metallbrücke ausgedehnt, verjüngt sich und bricht schliesslich an der schmalsten Stelle, wodurch ein sich gegenüberstehendes Elektrodenpaar mit atomar feinen Spitzen entsteht.

Schaltungen mit niedrigem Energieverbrauch und schnellen Schaltzeiten stellen Einzel-Molekül-Bausteine ideale Kandidaten für die zukünftige Nanoelektronik dar. Die Vision ist es, Moleküle sowohl als passive Elemente, wie elektrisch leitfähige oder isolierende Verbindungen, als auch als aktive Elemente, wie Dioden, Schalter oder Speicherelemente, einzusetzen. Darüber hinaus ist es denkbar, dass Moleküle wegen ihrer strukturellen Freiheitsgrade neuartige

chemische und physikalische Funktionalitäten zur Verfügung stellen, die heute in der siliziumbasierten Halbleitertechnologie noch nicht bekannt sind. Könnte man noch die molekulare Selbstorganisation in der Herstellung ausnutzen, so wären molekulare Bausteine eventuell auch mit signifikant günstigeren Herstellungskosten verbunden.

Während Bauelemente aus einzelnen Molekülen als ultimatives Limit bezüglich

Miniaturisierung bezeichnet werden, stellt die Integration von Molekülen in elektrische Schaltkreise eine grosse technische Herausforderung dar. Das Verständnis der zugrunde liegenden Physik ist die Basis für die Herstellung und Verwendung von molekularen Bausteinen und Schaltkreisen. Ein Schwerpunkt unserer Forschungsaktivität liegt deshalb auf der Untersuchung von Ladungstransport durch *einzelne* Moleküle, mit dem Ziel, die Beziehung zwischen chemischer Struktur und elektrischer Funktionalität zu verstehen. Eine wichtige Voraussetzung für die Kontaktierung einzelner Moleküle ist ein geeignetes Elektrodenpaar, das über atomar feine Spitzen verfügt und das mit subatomarer Genauigkeit positioniert und stabil gehalten werden kann.

Mechanisch kontrollierbare Bruchkontakte

Die typische Grösse von organischen Molekülen beträgt 1 bis 3 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$). Um diese kleinen Objekte zu kontaktieren, reichen konventionelle Strukturierungsmethoden wie Elektronenstrahlolithografie nicht aus. Mit dieser Technik können bestenfalls Abstände zwischen Metallbahnen von 8 bis 20 nm hergestellt werden. Um kleinere, am besten variable Abstände zwischen zwei Elektroden zu erzielen, werden in der aktuellen Forschung Kontaktierungsmethoden wie das Scanning Tunneling Microscope (STM) verwendet [5]. Eine weitere, elegante Methode ist die der mechanisch kontrollierbaren Bruchkontakte (engl.: mechanically controllable break-junction, MCBJ [6]), die ein winziges, sich gegenüberstehendes Elektrodenpaar mit variablem Abstand bilden.

Zur Herstellung solcher Bruchkontakte wird auf einem flexiblen Substrat mittels Foto- und Elektronenstrahlolithografie eine

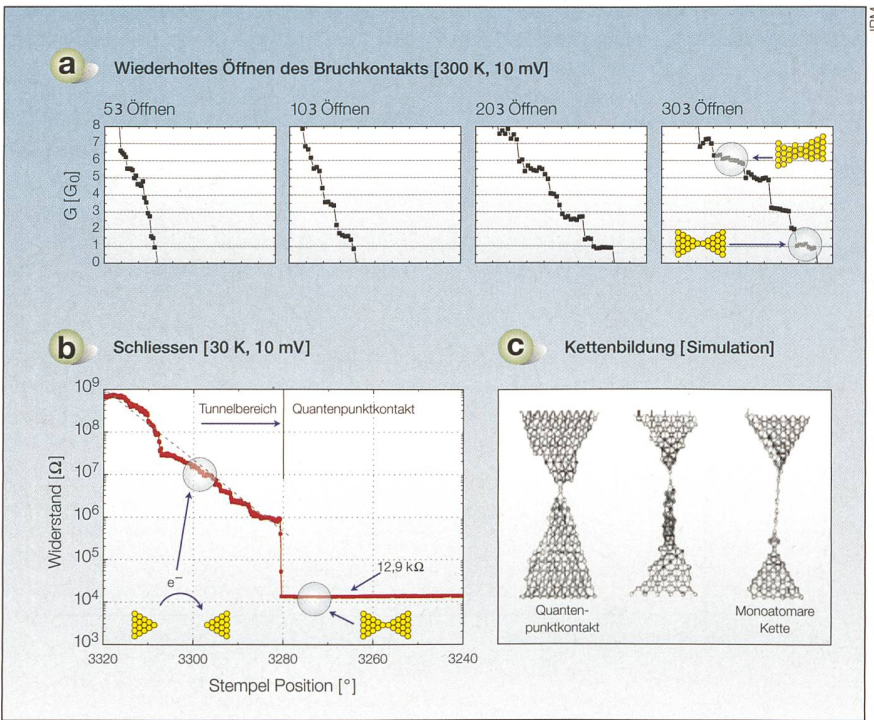


Bild 3 Elastische Eigenschaften eines Bruchkontakts.

3a: Wiederholtes Öffnen (und Schliessen) eines Bruchkontakts. Mit zunehmender Anzahl Zyklen werden diskrete Stufen des Leitwertquants G_0 beobachtet (Messung bei $T = 300\text{ K}$, 10 mV angelegte Spannung). 3b: Schliessen eines Kontakts: Aus dem Tunnel-Bereich kommend, schliesst der Kontakt bei exakt $1 \times G_0$ (Messung bei $T = 30\text{ K}$), was für Gold der Bildung eines Einzel-Atom-Kontakts entspricht. 3c: Simulation der Kettenbildung eines Gold-Bruchkontakts, reproduziert aus [7].

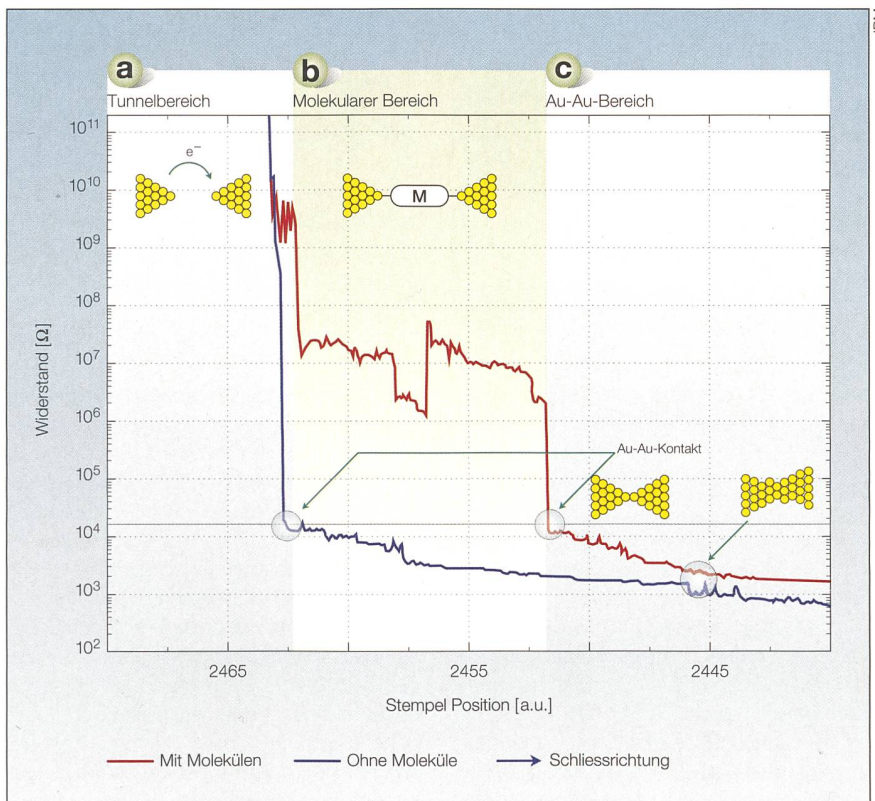


Bild 4 Kontaktierung von Molekülen.

Während des Schliessens der Elektroden mit aufgebracht Molekülen unter gleichzeitigem Messen des Widerstands (konstante Spannung von 5 mV angelegt) tritt ein Zwischenbereich zwischen 1 und 10 MΩ auf (rote Kurve). Dieser Zwischenbereich tritt ohne Molekül nicht auf (blaue Kurve) und signalisiert damit eindeutig die Bildung eines Metall-Molekül-Metall-Kontakts.

freitragende Metallbrücke mit einer zentralen Verjüngung von ca. $100 \times 100 \text{ nm}^2$ hergestellt (meist aus Gold, siehe Bild 2a). Diese Probe wird in eine 3-Punkt-Biege-mechanik eingespannt, wo durch Bewegung eines Stempels das Substrat kontrolliert gebogen werden kann (Bilder 2b und 2c). Aufgrund des duktilen Verhaltens von Gold bei Dehnung verkleinert sich während des Biegens der Durchmesser der Verjüngung kontinuierlich. Übersteigt die Dehnung die Elastizitätsgrenze, reißt die Brücke auseinander und es entsteht ein sich gegenüberstehendes Elektrodenpaar, dessen Abstand durch Variation der Stempelposition mit hoher Präzision eingestellt werden kann. Zwischen der Stempelbewegung, Δh , und der daraus resultierenden Distanzänderung zwischen den Elektroden, Δs , besteht die folgende Beziehung:

$$\Delta s = \frac{6 \cdot t \cdot s}{L^2} \Delta h$$

wobei t die Dicke des Metallsubstrats, s die Länge der Metallbrücke und L der Abstand zwischen den Halterungen bedeutet. Das Verhältnis $r = \Delta s / \Delta h$ beträgt in der von uns verwendeten Geometrie zirka $r = 1:80\,000$. Dadurch kann die Distanz zwischen den Elektroden sowohl in Öffnungs- wie auch in

Schliessrichtung mit Pikometer-Genauigkeit ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$) variiert werden. Das hohe mechanische Übersetzungsverhältnis bedeutet ferner, dass externe Vibrationen entsprechend stark gedämpft werden und deshalb keinen messbaren Einfluss auf die Stabilität der Elektroden haben. Zusammen mit der kleinen Ausdehnung der Brücke ($s = 1 \text{ }\mu\text{m}$), entsteht eine beispiellose mechanische und thermische Stabilität. Somit sind die Grundvoraussetzungen für die elektrische Charakterisierung von einzelnen Molekülen erfüllt.

Quantenpunktkontakte

Eine weitere Voraussetzung für die Kontaktierung von einzelnen Molekülen ist die Herstellung von atomar feinen Elektroden. Dies ist mit der MCBJ-Technik möglich: In Bild 3 ist dargestellt, wie sich der elektrische Widerstand der Metallbrücke, R , beim «Brechen» der Brücke verändert. Im geschlossenen Zustand, d.h. noch ohne Biegen, beträgt R etwa $100 \text{ }\Omega$. Während des Biegens nimmt der Widerstand aufgrund einer Verkleinerung des Querschnitts langsam zu, bis ungefähr $10 \text{ k}\Omega$, und steigt dann abrupt in den $G\Omega$ -Bereich ($10^9 \text{ }\Omega$) an. Dies bedeutet, dass der Kontakt aufgebros-

chen ist und zwei sich gegenüberliegende Elektroden entstanden sind. Schliesst man durch Zurückbiegen des Substrats den Kontakt wieder und wiederholt diesen Prozess, so stellt man fest, dass kurz vor dem Aufbrechen im $10\text{-k}\Omega$ -Bereich Stufen bei diskreten Leitwerten auftreten (Leitwert $G = 1/R$). Diese Diskretisierung wird mit zunehmender Anzahl von Öffnungs- und Schliesszyklen ausgeprägter (Bild 3a). Die letzten Stufen befinden sich bei ungefähr $(1-3) \times G_0$, wobei G_0 das quantenmechanische Leitwertquant ($1 G_0 = 2e^2/h \sim 1/12,9 \text{ k}\Omega$) darstellt.

Beim langsamen Schliessen der Brücke (insbesondere bei tiefen Temperaturen) zeigt sich ebenfalls, dass der Kontakt nach Durchlaufen des Tunnelbereichs (exponentieller Abfall des Widerstands mit abnehmendem Elektrodenabstand) bei einem Widerstandswert von $12,9 \text{ k}\Omega$ schliesst (Bild 3b). Diese im Leitwert auftretende Quantisierung kann physikalisch mit dem Landauer-Büttiker-Ansatz erklärt werden [8]. Er besagt, dass ein Leitwert von $1 \times G_0$ für Gold die Bildung eines Einzel-Atom-Kontakts bedeutet. Mit anderen Worten wird durch elastische Deformation der metallische Kanal so weit verjüngt, bis dessen Querschnitt nur noch aus einem einzelnen Atom besteht (Bild 3c, [7,9]). Durch das Aufbrechen des Kontakts entsteht folglich ein atomar feines Elektrodenpaar; eine Grundvoraussetzung für die Kontaktierung einzelner Moleküle.

Kontaktieren einzelner Moleküle

Eine weitere Anforderung, um Moleküle mittels Metallelektroden kontaktieren zu können, sind chemische Ankergruppen am Molekül (z.B. Thiole). Diese gewährleisten die chemische und somit elektrische Anbindung des Moleküls an die beiden Elektroden. Solche Moleküle werden beispielsweise aus einer stark verdünnten Lösung auf die geöffneten Elektroden eines Bruchkontakts gebracht. Bild 4 zeigt, wie sich der Widerstand R der Elektroden nach dem Aufbringen von Molekülen aus der Lösung auf eine zuvor geöffnete Brücke während des Schliessens der Elektroden ändert (bei konstanter angelegter Spannung von 5 mV). Zuerst können keine Moleküle den Kontakt überbrücken, und R beträgt mehr als $1 \text{ T}\Omega$ ($10^{12} \text{ }\Omega$, rote Kurve in Bild 4a). Beim weiteren Zusammenfahren der Elektroden tritt ein Bereich auf, der sich mit Werten von 1 bis $10 \text{ M}\Omega$ für R klar vom offenen Fall unterscheidet. Beim weiteren Schliessen fällt R dann auf Werte unterhalb von R_0 ab, der Kontakt ist folglich wieder metallisch geschlossen (Bild 4c). Vergleicht man dieses Verhalten mit dem Schliessen des Kontakts in Abwesenheit von Molekü-

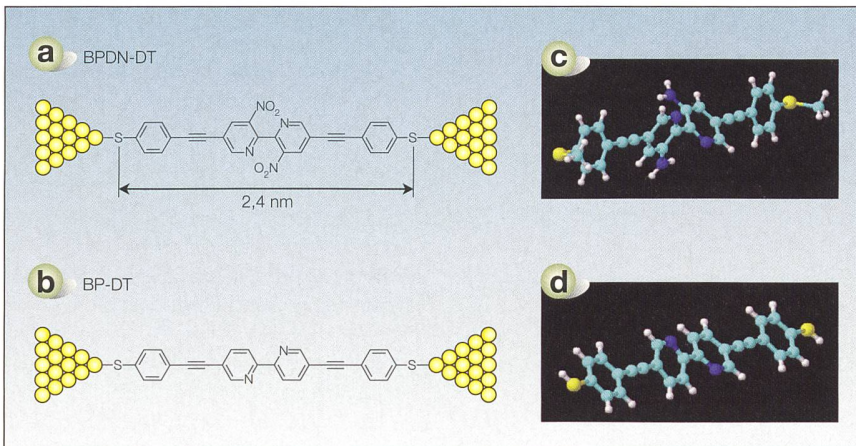


Bild 5 Untersuchte Moleküle.

5a: Bipyridyl-dinitro oligophenylene-ethynylene dithiol (BPDN-DT); 5b: Bipyridyl oligophenylene-ethynylene dithiol (BP-DT). Die Distanz zwischen den zwei Schwefelatomen beträgt 2,4 nm. 5c: Die sterische Abstoßung bewirkt eine Verdrehung der beiden Molekülhälften, im Gegensatz zum planaren Referenzmolekül 5d.

len (blaue Kurve, gemessen vor dem Aufbringen von Molekülen) unter den gleichen Messbedingungen, zeigt sich, dass der erwähnte Zwischenbereich nicht auftritt und die Brücke abrupt vom offenen in den geschlossenen Bereich übergeht. Der in der roten Kurve auftretende Zwischenbereich signalisiert somit eindeutig die Bildung eines Metall-Molekül-Metall-Kontakts [10].

In diesem Zwischenbereich wird nun die elektrische Charakterisierung der Moleküle durchgeführt. Statistische Messungen, bei denen der oben beschriebene Öffnungs- und Schliessprozess mehrere hundert- bis tausendmal unter konstanter angelegter Spannung durchgeführt wird, liefern Aussagen über die Anzahl der kontaktierten Moleküle und die dabei am häufigsten auftretenden Leitwerte. Allerdings ist hier der Spannungsbereich stark limitiert ($|V| < 100$ mV), da bei elektrostatischen Feldern die Elektroden aufgrund des hohen Feldgradienten instabil werden. Zusätzliche Informationen liefern Strom-Spannungskurven, die Aufschluss über die energetische Situation des molekularen Systems geben und dadurch Spektroskopie auf Einzel-Molekül-Niveau erlauben.

Intrinsische Schaltfunktion eines Moleküls

Wie bereits erläutert, liegt die grundsätzliche Motivation der molekularen Elektronik in der Ausnutzung der intrinsischen Funktionalität von Molekülen. Da das Ankoppeln an metallische Elektroden aber eine grosse elektronische Störung für das Molekül bedeutet, ist es schwierig, aufgrund der Eigenschaften der einzelnen Komponenten wesentliche Vorhersagen über das Transportverhalten des gesamten Metall-Molekül-Metall-Systems zu machen. Um die

verschiedenen Aspekte des Transports auf der molekularen Ebene zu erforschen, werden darum gezielt organische Moleküle synthetisiert und elektrisch charakterisiert. Im folgenden Beispiel werden Moleküle vorgestellt, die sich nur in ihrer internen Struktur unterscheiden. Die elektrische Ankopplung an die Metallelektroden wurde bewusst nicht variiert.

Bild 5 zeigt zwei molekulare Systeme bestehend aus Bipyridyl-dinitro oligophenylene-ethynylene dithiol (BPDN-DT, Bild 5a) und Bipyridyl oligophenylene-ethynylene

dithiol (BP-DT, Bild 5b). Beide Moleküle besitzen ein identisches molekulares Grundgerüst und die gleiche Ankergruppe (Thiole) auf beiden Seiten. Die Gesamtlänge der Moleküle beträgt 2,4 nm (S-S-Abstand). Im Gegensatz zum planaren Referenzmolekül BP-DT (Bild 5d) besitzt das BPDN-DT-Molekül aber zusätzliche Nitro-Gruppen (NO_2), die den beiden zentralen Pyridyl-Einheiten angehängt sind. Ihre räumliche Abstoßung bewirkt dabei eine relative Verdrehung der beiden Molekülhälften um die Längsachse (Bild 5c).

Bild 6 zeigt die Strom-Spannungs-Charakteristik des Systems Au-BPDT-DT-Au, gemessen bei der Temperatur von 100 K. Für kleine Spannungen ($|V| < 0,5$ V) ist der Stromfluss unterdrückt, da im Molekül keine elektronischen Zustände im entsprechenden Energiebereich verfügbar sind, durch welche Ladungsträger tunneln könnten. Für höhere Spannungen stehen jedoch Zustände zur Verfügung, und der Strom steigt oberhalb von 0,4 V stark an. Bild 6 zeigt, dass mit zunehmender Spannung, ausgehend von 0 Volt, das System bei ca. +0,8 V einen Sprung im Strom aufweist und beim darauffolgenden Verringern der Spannung eine Hysterese beobachtet wird. Bei negativer Spannung tritt ebenfalls ein Schalten bei ca. -1,0 V auf. Im Gegensatz dazu wird im System Au-BP-DT-Au kein solches spannungsinduziertes Leitwert-schalten beobachtet [11]. Durch den direkten Vergleich von molekularer Struktur und

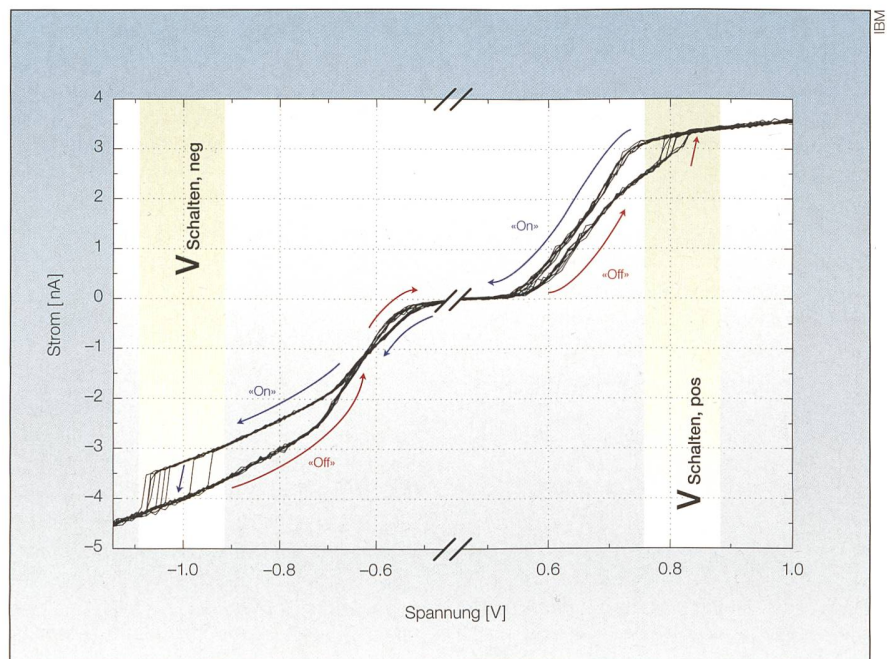


Bild 6 Spannungsinduziertes Schalten.

Bei einer Spannung von ca. +0,8 V und ca. -1,0 V schaltet das System vom Off-Zustand in den On-Zustand und umgekehrt. Durch gezielte Variation der Spannung kann folglich kontrolliert zwischen einem niedrig und einem höher leitenden Zustand hin und her geschaltet werden.

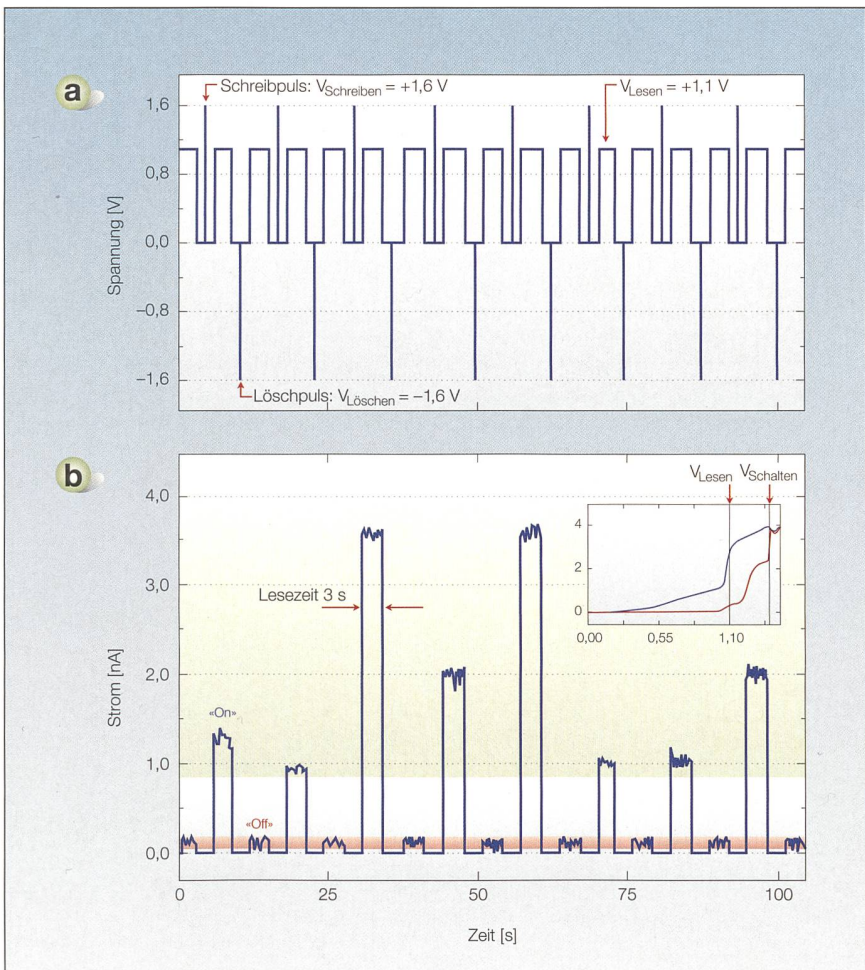


Bild 7 Speicher auf der Basis eines einzelnen Moleküls.

7a: Verwendetes Spannungsmuster mit positiven Schreibpulsen (50 ms, +1,6 V), negativen Löschpulsen (50 ms, -1,6 V) und dazwischenliegenden Auslesevorgängen (+1,1 V). 7b: Das molekulare System Au-BPDN-DT-Au reagiert mit reversiblen und kontrolliertem Schalten von Off zu On und umgekehrt. Während der Lesedauer von 3 s bleibt das Messsignal konstant ($T = 100$ K), d.h., es wird beim Auslesen nicht gelöscht.

Transportmessungen kann geschlossen werden, dass erstens das Schalten einen intrinsischen, molekularen Ursprung hat und zweitens die funktionalen Nitro-Gruppen Ursache für die Schaltfunktion sind.

Einzelnes Molekül als Speicherelement

Das in Bild 6 gezeigte spannungsinduzierte Widerstandsschalten kann in Verbindung mit der auftretenden Hysterese zur Speicherung von Information in einem einzelnen Molekül verwendet werden. Dabei wird durch Anlegen eines kurzen Schreibpulses mit $|IV_{\text{Schreiben}}| > |IV_{\text{Schalten}}|$ das Molekül vom schlechter leitenden, sogenannten Off-Zustand in den höher leitenden On-Zustand geschaltet (Bild 7b). Durch Anlegen einer Lesespannung im Bereich der Hysterese bei $|IV_{\text{Lesen}}| < |IV_{\text{Schalten}}|$ kann durch direktes Messen des Stroms der Speicherzustand ausgelesen werden. Mit einem

kurzen Löschpuls mit negativer Spannung, also $|IV_{\text{Löschen}}| > |IV_{\text{Schalten}}|$, kann der On-Zustand wieder gelöscht werden. Dies kann mit einem darauffolgenden Lesepuls überprüft werden. Um eine ausreichende Elektrodenstabilität bei diesen hohen elektri-

schen Feldern von 10^9 V/m zu gewährleisten, wurden alle Messungen bei einer Temperatur von 100 K durchgeführt.

Bild 7a zeigt das angelegte Spannungsmuster mit Schreibpulsen von 50 ms bei +1,6 V, einer Lesespannung von +1,1 V und Löschpulsen mit einer Dauer von 50 ms bei -1,6 V. Das molekulare System Au-BPDN-DT-Au reagiert mit reversiblen und kontrolliertem Schalten von Off- zu On-Zustand und umgekehrt [11]. Während der Lesedauer von 3 s bleibt das gemessene Stromsignal jeweils konstant, wohingegen die On-Ströme zwischen den einzelnen Zyklen zwischen 0,8 und 3,0 nA variieren. Das Speicherelement kann deshalb ausgelesen werden, ohne dass der gespeicherte Zustand dabei gelöscht wird. Das Verhältnis von On- zu Off-Strom, die sogenannte Bitseparation, beträgt damit zwischen 7 und 70. Dieser Wert ist für praktische Anwendungen ausreichend. Des Weiteren zeigte sich, dass über eine Messdauer von mehr als 100 min der On-Zustand erhalten bleibt, d.h. der Speicher ist auf dieser Zeitskala nicht flüchtig.

Schlussfolgerungen

Durch die grundlegenden und systematischen Experimente konnte erstmals in einer realistischen Bauelementegeometrie nachgewiesen werden, dass das beobachtete Widerstandsschalten auf einen intrinsischen, molekularen Ursprung zurückzuführen ist. Dies ist der Schlüssel zur Verwendung molekularer Funktionalität und zeigt das hohe Potenzial molekularer Bausteine für die zukünftige Nanoelektronik. Das reversible und kontrollierbare Schalten wurde weiter ausgenutzt, um die Speicherfunktion eines einzelnen Moleküls zu demonstrieren. Der Schaltvorgang in einem einzelnen Molekül in einer einfachen Zweikontaktgeometrie zeigt darüber hinaus, dass zukünftige molekulare Bauelemente keine dritte Elektrode für logische Operationen benötigen. Das Einzelmolekülsystem, das als

Résumé

Electronique moléculaire

Des molécules comme futurs composants électroniques. Les progrès réalisés ces 50 dernières années dans la technologie informatique et des semi-conducteurs sont dus à l'augmentation croissante de la densité d'intégration de composants toujours plus petits. Cette miniaturisation finira cependant bientôt par se heurter à des limites physiques et économiques fondamentales. C'est pourquoi la recherche s'occupe maintenant des composants électroniques ultimes que sont les molécules et atomes. Le défi réside ici dans le contactage et l'adressage de ces objets de quelques nanomètres, condition même de leur intégration à des circuits complexes. Sur la base d'un élément de commutation et de mémoire basé sur une unique molécule, l'article montre que les molécules possèdent des fonctions intrinsèques permettant leur utilisation comme composants électroniques logiques.

elektronisches Speicherelement funktioniert, ist ein wichtiger Schritt hin zur ultimativen Skalierung von Speicherelementen in der Nanoelektronik. Damit dies aber kein Zukunftstraum bleibt, müssen Technologien und Herstellungsprozesse gefunden werden, die es ermöglichen, nanometergrosse Strukturen mit atomarer Präzision reproduzierbar herzustellen.

Referenzen

[1] J. Bardeen, W. H. Brattain, Phys. Rev., 74, S. 230 (1948).
 [2] J. S. Kilby: Miniatuized Electronic Circuits, United States Patent 3138743, 6.02.1959.
 [3] G. E. Moore: Cramming more components onto integrated circuits, Electronics, Vol. 38 (1965).

[4] D. Pham et al.: The design and implementation of a first-generation CELL processor, International Solid-State Circuits Conference, S. 184–185 (2005).
 [5] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weiber: 7x7 Reconstruction on Si (111) Resolved in Real Space, Phys. Rev. Lett., Vol. 50, S. 120 (1982).
 [6] C. J. Muller, J. M. van Ruitenbeek, L. J. de Jongh: Experimental observation of the transition from weak link to tunnel junction, Physica C, Vol. 191, S. 485 (1992).
 [7] M. R. Sørensen, M. R. Brandbyge, K. W. Jacobsen: Mechanical deformation of atomic-scale metallic contacts: Structure and mechanisms, Phys. Rev. B., Vol. 57, S. 3283 (1998).
 [8] R. Landauer, IBM Journal of Research and Development, Vol. 1, S. 223 (1957).
 [9] N. Agrait, A. Yeyati, J. van Ruitenbeek: Quantum properties of atomic-sized conductors, Phys. Reports, Vol. 377, S. 81 (2003).
 [10] E. Lörtscher, H. B. Weber, H. Riel: Statistical Approach to Investigating Transport through

Single Molecules, Phys. Rev. Lett., Vol. 98, S. 176807-1 (2007).
 [11] E. Lörtscher, J. W. Ciszek, J. M. Tour, H. Riel: Reversible and Controllable Switching of a Single-Molecule Junction, Small, Vol. 2, S. 973 (2006).
 [12] <http://www.zurich.ibm.com/st/melectronics>.

Angaben zu den Autoren

Dr. **Emanuel Lörtscher** arbeitet als Post-Doktorand bei der IBM Research GmbH im Science and Technology Department.
 IBM Research GmbH, 8803 Rüschlikon,
 eml@zurich.ibm.com

Dr. **Heike Riel** arbeitet als Research Staff Member bei der IBM Research GmbH im Science and Technology Department.
 IBM Research GmbH, 8803 Rüschlikon,
 hei@zurich.ibm.com

fachbeiträge



Atel an den Powertagen, 3. – 5. Juni 2008

Als europaweit tätiges Schweizer Energieunternehmen kennen wir uns in Strommärkten aus. Holen Sie sich jetzt das nötige energiewirtschaftliche Wissen und machen Sie Ihr Unternehmen fit für den freien Markt. Denn die richtigen Lösungen sind entscheidend für den künftigen Erfolg.

Besuchen Sie uns am Stand A 06, Halle 5.

Energy is our business **atel**