

NANOPHYSIK

Strommessung an einzelnen molekularen Drähten

Molekulare „Drähte“ aus einem einzigen linearen Molekül besitzen ein enormes Potenzial für zukünftige Anwendungen in der Nanotechnologie. Dabei stellt der Ladungstransport ein entscheidendes Kriterium für ihre Verwendung in dieser molekularen Elektronik dar. Unserer Gruppe an der Freien Universität Berlin ist es erstmals gelungen, einen einzelnen molekularen Draht von einer Oberfläche hochzuziehen und den dabei durch den Draht fließenden Strom in Abhängigkeit von der Länge zu messen. Dies liefert ein tieferes Verständnis der elektrischen, aber auch der mechanischen Eigenschaften solcher molekularen Drähte.

Durch die extrem geringen Abmessungen und die damit verbundenen Vorteile wie höhere Arbeitsgeschwindigkeit, niedrigere Kosten und geringerer Energieverbrauch könnten zukünftige technische Umsetzungen der Nanotechnologie eine Reihe von Anwendungen revolutionieren. Eine zentrale Vision ist der Aufbau elektronischer Schaltkreise auf der Nanometerskala. Die Entwicklung solcher faszinierenden Bauteile erfordert extrem dünne „Kabel“ – im Idealfall aus einem einzigen Molekül bestehend – und ein grundlegendes Verständnis des elektrischen Transports durch solche dünnen Drähte. Dafür ist es notwendig, elektrischen

Strom durch einzelne molekulare Drähte zu leiten, die an zwei Elektroden kontaktiert werden, und für verschiedene Drahtlängen zu charakterisieren.

Um die molekularen Drähte herzustellen, haben wir eine Methode entwickelt, mit der sich einzelne Moleküle auf einer Goldoberfläche zu einer konjugierten Polymerkette verknüpfen lassen [1]. Die Eigenschaften der einzelnen Bausteine, die Stefan Hecht und Mitarbeiter an der Humboldt-Universität zu Berlin hergestellt haben, wurden dabei so gewählt, dass die Polymerketten erstens durch chemische Seitengruppen von der Oberfläche angehoben

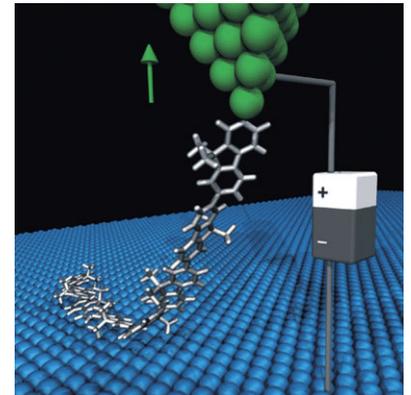


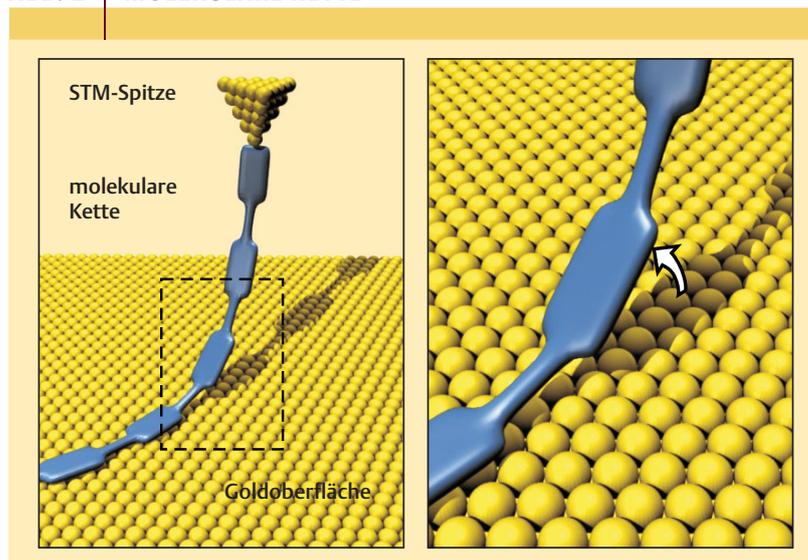
ABB. 1 Ein an der Spitze (Grün) eines Rastertunnelmikroskops kontaktierter molekulare Draht (Grau) wird von der Goldoberfläche (Blau) hochgezogen. Dabei wird, wie durch eine Batterie symbolisch dargestellt, eine Spannung angelegt, die zu einem elektrischen Stromfluss durch ein einzelnes Polymer führt.

werden (und daher eine hohe Mobilität besitzen) und zweitens (ähnlich einem Seil) flexibel sind. Diese beiden Eigenschaften sind für die Experimente zum Ladungstransport (Abbildung 1) nötig.

In unserem Experiment haben wir ein Ende eines solchen molekularen Drahtes mit der metallischen Spitze eines Rastertunnelmikroskops kontaktiert, während das andere Ende auf der Metalloberfläche verblieb und dort wie ein flexibles Seil nachgezogen wurde. Anschließend zogen wir die Spitze hoch und variierten dadurch den Abstand zwischen den beiden Elektroden (Spitze und Oberfläche) kontinuierlich (Abbildung 2). Durch Anlegen einer Spannung zwischen den beiden Elektroden lässt sich auf diese Weise der Ladungstransfer durch ein einzelnes Polymer für variable Längen bis zu mehr als 20 nm messen [2].

Dabei wird der elektrische Leitwert G (der Kehrwert des elektrischen Widerstands) in Abhängigkeit von der Länge des molekularen Drahtes (der Teil zwischen den beiden Kontaktpunkten an der Spitze und der Oberfläche) gemessen. Die Messkurven zeigen einen exponentiellen Abfall mit der effektiven

ABB. 2 MOLEKULARE KETTE



Die molekulare Kette lässt sich schrittweise von der Goldoberfläche abheben, wie der Ausschnitt rechts verdeutlicht.

Drahtlänge, mit deutlich unterschiedlicher Steigung als bei Tunnelstrom durch Vakuum (Abbildung 3).

Dieses Experiment zeigt den fundamentalen Unterschied von elektrischem Strom durch den molekularen Draht zu makroskopischem Ladungstransport, bei dem die lineare Abhängigkeit bei doppelter Länge zu doppeltem Widerstand führt. Diese Ergebnisse konnten Christian Joachim und Kollegen vom CEMES-CNRS in Toulouse mit theoretischen Rechnungen sehr gut bestätigen.

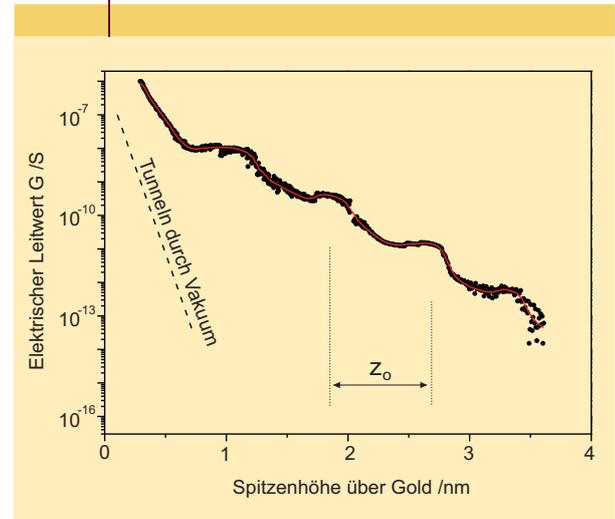
Neben der Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften geben diese Experimente auch Einblick in das mechanische Verhalten einzelner Polymere, die sich wie Ketten verhalten, da ein Glied nach dem anderen während des Hochziehens von der Oberfläche losgelöst wird. Dieses Verhalten drückt sich durch periodische Oszillationen in der Kurve des elektrischen Leitwertes aus (Abbildung 3). Dabei kommt es in regelmä-

ßigen Abständen z_0 zum Abfall des Leitwertes und darauffolgend zu einem Plateau. Im Moment des Ablöses (Abbildung 2) verlängert sich augenblicklich die effektive Länge des Drahtes. Dies macht sich natürlich als abrupter Abfall im Leitwert bemerkbar. Anschließend wird der nun etwas durchhängende Draht durch das kontinuierliche Hochziehen wieder gestrafft (in dieser Phase sinkt der Leitwert nur geringfügig), bis die Kraft ausreicht, um das nächste Glied von der Oberfläche abzulösen.

Da der elektrische Transport durch einzelne molekulare Drähte von großer Bedeutung für jede elektronische Anwendung in der molekularen Nanotechnologie ist, könnten sich in Zukunft auf diese Weise molekulare Drähte hinsichtlich ihrer Eignung für Anwendungen überprüfen lassen.

- [1] L. Grill et al., Nature Nanotechnology **2007**, 2, 687.
[2] L. Lafferentz et al., Science **2009**, 323, 1193.

ABB. 3 ELEKTRISCHER LEITWERT



Der elektrische Leitwert fällt mit zunehmender Länge des molekularen Drahtes. Das schrittweise Ablösen der molekularen Einheiten von der Oberfläche führt dabei zu Oszillationen in der Messkurve. Der charakteristische Abstand z_0 ergibt sich aus der chemischen Struktur des Polymers.

Leif Lafferentz, Leonbard Grill,
Freie Universität Berlin

ATOMPHYSIK

Moleküle aus Rydberg-Atomen

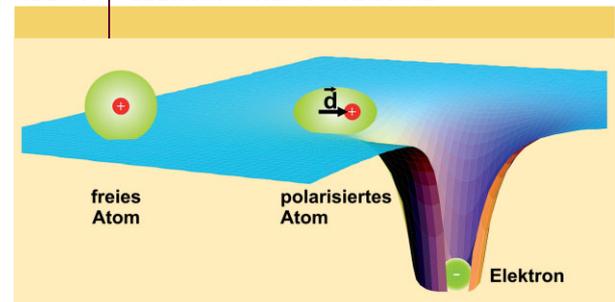
Die Eigenschaften und Wirkungsmechanismen der wichtigsten chemischen Bindungstypen wie kovalent oder ionisch sind seit langem bekannt. Unserer Gruppe an der Universität Stuttgart gelang es kürzlich erstmals, ein Molekül aus zwei Rubidiumatomen zu erzeugen, das mit 100 nm nicht nur außergewöhnlich groß ist, sondern darüber hinaus von einem neuartigen Bindungsmechanismus zusammengehalten wird [1].

Anziehung durch elektrische Polarisation ist ein gut verstandenes Gebiet der Physik: Durch ein äußeres elektrisches Feld werden in Materie die beweglichen Elektronen gegen die positiven Atomrümpfe verschoben (Abbildung 1). Es entsteht ein Dipolmoment d , durch das die Materie von einer elektrischen Ladung angezogen wird. Auf diesem Effekt basiert auch ein im Jahr 2000 von Chris Greene (JILA und Universität von Colorado, Boulder) theoretisch vorhergesagter molekularer Bindungsmechanismus

[2], der nun von uns experimentell nachgewiesen wurde.

Es war lange Zeit umstritten, ob der von Greene vorgeschlagene Bindungstyp überhaupt funktioniert, denn überraschenderweise kann ein einzelnes polarisiertes Atom, abhängig vom chemischen Element, von einem Elektron auch abgestoßen werden. Dies erkannte Enrico Fermi bereits 1934, als er mit der von ihm entwickelten Pseudopotential-Methode diese Wechselwirkung als quantenmechanische Streuung

ABB. 1 ELEKTRISCHES POTENTIAL



Für große Abstände zwischen Atom und Elektron ist die Ladungsverteilung des Atoms symmetrisch (links), für kleine Abstände wird es hingegen polarisiert: Es entsteht ein Dipolmoment d , und das Atom wird zum Elektron gezogen (rechts).

beschrieb. Doch wie kann ein kurzzeitiger Prozess wie eine Streuung eine lang anhaltende Molekülbinding begründen?

Streut man ein Elektron an einem Atom, so wird das Atom zwar vom Elektron angezogen, jedoch ist das Elektron viel zu schnell, als dass ihm das Atom folgen könnte. Die Lösung für eine Bindung ist verblüffend einfach: Durch einen sich ständig