

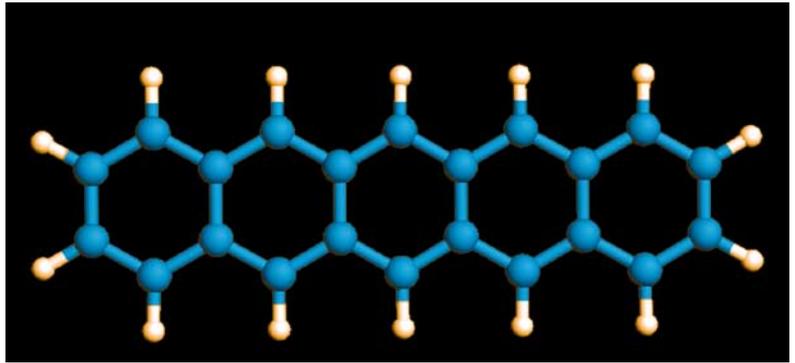
■ Auf die Spitze getrieben

Die Rasterkraftmikroskopie erlaubt es, ein Pentacen-Molekül atomar aufzulösen.

1) Genauer gesagt geht es um die Energie, die um die angelegte Tunnelspannung mal der elektrischen Elementarladung gegenüber der Fermi-Energie verschoben ist.

Eine Hand, deren ausgestreckter Zeigefinger über eine etwa 30-millionenfach vergrößerte Oberfläche tastet und die einzelnen Atome erspürt – mit diesem Bild veranschaulichten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer, die Erfinder des Rastertunnelmikroskops (RTM), das Prinzip der Rastersondenmikroskopie [1]. Die Realität ist jedoch komplizierter. Im Wesentlichen bildet das Rastertunnelmikroskop diejenigen Elektronen ab, deren Energie nahe bei der Fermi-Energie liegt.¹⁾ Beim Rasterkraftmikroskop (RKM) hängt das Bild einer Oberfläche stark davon ab, in welchem Abstand es aufgenommen wird: Bei größeren Abständen gibt das RKM-Bild die Bereiche der Probe als Hügel wieder, in denen eine besonders starke Anziehung existiert (attraktiver Abbildungsmodus). Bei sehr kleinem Abstand, im repulsiven Modus, zeigt das RKM dagegen annähernd ein Bild der absoluten Ladungsdichte, weil sich die Elektronenwolken von Spitze und Proben dann stark abstoßen. Im Prinzip sollte es das RKM also im repulsiven Modus ermöglichen, jegliche Festkörperoberflächen atomar abzubilden. Allerdings ist es

Prof. Dr. Franz J. Gießibl, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Regensburg, Universitätsstraße 31, 93053 Regensburg



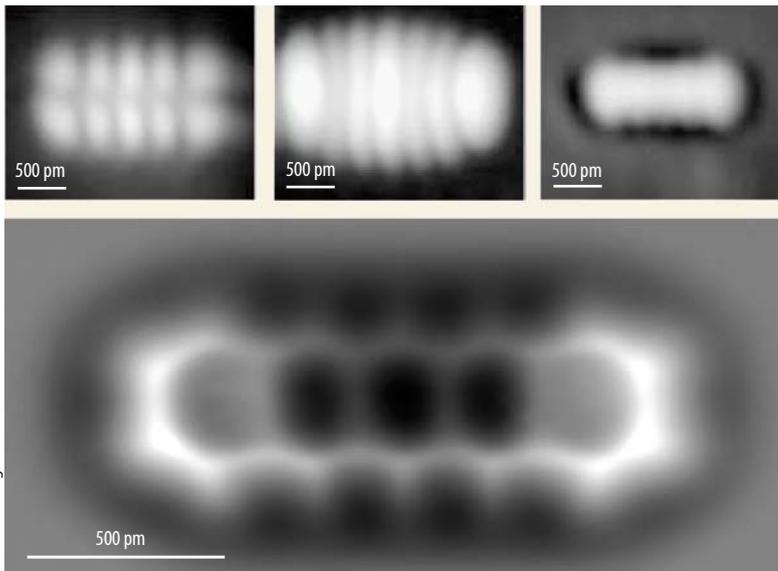
IBM Forschungslaboratorium Rüschiikon

Abb. 1 Pentacen besteht aus fünf verbundenen Kohlenstoff-Sechsecken (blau) und Wasserstoffatomen (gelb).

nicht einfach herauszufinden, wann das vorderste Spitzenatom nah genug an der Probe ist. In der Realität wirken auf die Abtastspitze des RKM nicht nur die vom Spitzenatom ausgehenden Kräfte, sondern auch langreichweitige Hintergrundkräfte (van-der-Waals-Kräfte). Das einfache Bild des Zeigefingers trifft daher für das atomar auflösende RKM nicht mehr zu. Die van-der-Waals-Kräfte sind zwischen zwei einzelnen Atomen zwar schwach, addieren sich aber bei nur wenige Nanometer entfernten Milliarden von Spitzen- und Probenatomen zu beträchtlichen Kräften, die sogar weit über der chemischen Bindungskraft des Spitzenatoms und

seinem nächsten Probenatom liegen können. Bei atomar flachen Proben sind diese Kräfte konstant und deshalb leicht zu berücksichtigen, bei erhabenen Objekten wie auf Oberflächen adsorbierten Molekülen dagegen ist es schwierig, diesen Anteil zu subtrahieren. Leo Gross und Kollegen aus der Forschungsgruppe um Gerhard Meyer im IBM Forschungslaboratorium Zürich haben dieses Problem nun gelöst und die Struktur eines Pentacen-Moleküls mit kombinierter Kraft- und Tunnelmikroskopie aufgelöst [2].

Pentacen ist ein organischer Halbleiter aus fünf verbundenen Kohlenstoff-Hexagonen, deren außen liegende Kohlenstoffatome mit einem Wasserstoffatom verbunden sind (Abb. 1). Vor einigen Jahren haben Jascha Repp et al. bereits dieses Molekül bei IBM in Zürich mit dem RTM untersucht [3]. Sie erzeugten damals faszinierende Bilder des energetisch höchsten besetzten bzw. niedrigsten unbesetzten Elektronenzustands sowie der vom Substrat stammenden Zustände in der Energielücke (Abb. 2 oben), die exakt der von der Dichtefunktionaltheorie vorhergesagten Struktur entsprechen. Allerdings erlaubt es keine dieser Abbildungen, auf die Strukturformel von Pentacen zu schließen. Mithilfe der Kraftmikroskopie sollte es jedoch möglich sein, die „wahre“ Struktur von Pentacen abzubilden. Dazu verwendeten Leo Gross und Kollegen einen auf einer Quarz-Stimmgabel basierten Kraftsensor („qPlus-Sensor“), an dessen



IBM Forschungslaboratorium Rüschiikon

Abb. 2 Die RTM-Bilder des höchsten besetzten bzw. niedrigsten unbesetzten Molekülorbitals sowie der Substratzustände in der Energielücke erlauben keinen Rückschluss auf die Pentacen-

Struktur (oben, von links). In der kraftmikroskopischen Abbildung sind die Kohlenstoffatome und die außen befindlichen Wasserstoffatome hingegen deutlich zu erkennen (unten).

Spitze sich ein Kohlenmonoxid-Molekül befindet. Dieses bindet mit dem Kohlenstoff an das metallische Spitzenatom, wobei der Sauerstoff von der Spitze weg zeigt. Während ein Metallatom so groß ist wie ein Kohlenstoff-Hexagon (ca. 250 pm) und daher keine scharfe Abbildung möglich ist, schafft es das schlanke CO-Molekül an der Spitze mühelos, in die Zwischenräume der Kohlenstoff-Hexagone einzudringen und ein getreues Bild des Moleküls zu erzeugen (Abb. 2 unten). Außerdem ist das CO-Molekül mit dem Kohlenstoffatom stark an die Metallspitze gebunden, das an das C-Atom gebundene Sauerstoffatom dagegen ist relativ inert. Deshalb wirken beim Annähern der CO-terminierten Spitze an das Pentacen-Molekül keine starken attraktiven Kräfte, bevor der repulsive Bereich erreicht wird – im Gegensatz zu einer reinen Metallspitze.

Die Vorteile von Abtastspitzen aus leichten Elementen hatten sich bereits in einem Experiment gezeigt, in dem – in Umkehrung der gewöhnlichen Anordnung – eine Metallspitze mit den Kohlenstoffatomen einer flachen Graphitoberfläche abgetastet wurde [4]. Kürzlich fanden Temirov et al., dass sich die Ortsauflösung bei einer Abbildung organischer Moleküle mit dem Tunnelmikroskop dramatisch erhöhen lässt, wenn molekularer Wasserstoff im Tunnelspalt vorhanden ist [5]. Dessen noch ungeklärter Einfluss auf den Tunnelwiderstand wäre demnach für die verbesserte Ortsauflösung verant-

wortlich. Der Effekt verschwand bei 25 Kelvin – der Temperatur, bei der molekularer Wasserstoff von der Oberfläche verdampft. Wieder war also ein leichtes chemisches Element für die bessere Auflösung verantwortlich.

Das Besondere an der Arbeit von Gross et al. ist die simultane Messung kleinster Kräfte (Piko-Newton) vor dem Hintergrund starker van-der-Waals-Kräfte und kleiner Ströme. In Verbindung mit der kürzlich gezeigten Möglichkeit, den Ladungszustand einzelner Atome zu messen [6], ist damit ein wichtiges Werkzeug für die molekulare Elektronik entstanden. Deren Ziel besteht darin, elektronische Schaltungen mithilfe vernetzter Moleküle zu realisieren. Gross et al. haben gezeigt, dass man organische Moleküle auf isolierenden Oberflächen atomar abtasten und den Ladungszustand einzelner Atome messen kann. Dies ist ein wichtiger Schritt, um z. B. den Ladungstransport bei der Photosynthese zu untersuchen.

Franz Gießibl

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, *Rev. Mod. Phys.* **71**, 324 (1999)
- [2] L. Gross, F. Mohn, N. Moll, P. Liljeroth und G. Meyer, *Science* **325**, 1110 (2009); www.youtube.com/watch?v=jnLRL_74BZs
- [3] J. Repp, G. Meyer, S. Stojković, A. Gourdon und Ch. Joachim, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 026803 (2005)
- [4] S. Hembacher, F. J. Giessibl und J. Mannhart, *Science* **305**, 380 (2004)
- [5] R. Temirov, S. Soubatch, O. Neucheval, A. C. Lassise und F. S. Tautz, *New Journal of Physics* **10**, 053012 (2008)
- [6] L. Gross et al., *Science* **324**, 1428 (2009)

KURZGEFASST

■ Calcium in der Falle

Physikern der PTB ist es gelungen, das erste Bose-Einstein-Kondensat (BEC) aus Calcium-Atomen herzustellen. Dazu wurden die Atome in einer magneto-optischen Falle vorgekühlt und anschließend in eine Dipolfalle geladen. Durch das Verdampfen heißer Atome kühlen die übrigen auf 170 nK ab. Das ist die kritische Temperatur für den BEC-Übergang. BECs aus Erdalkaliatomen eröffnen dank ihrer schmalen optischen Übergänge neue Möglichkeiten für Präzisionsmessungen, z. B. um Gravitationsfelder zu bestimmen. S. Kraft et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**, 130401 (2009)

■ Starke Linse

Bei der Analyse von Bildern eines Galaxienhaufens, die das Hubble-Weltraumteleskop aufgenommen hat, haben Forscher aus Israel die bislang stärkste Gravitationslinse entdeckt: Ein Galaxienhaufen verstärkt das Licht einer Spiralgalaxie im Hintergrund um den Faktor 200. Zudem erscheint ihr Bild nahezu unverzerrt, was auf eine fast gleichmäßige Massenverteilung im Zentrum des Galaxienhaufens deutet. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zum bisherigen Verständnis für die Entstehung galaktischer Strukturen. A. Zitrin et al., *Astrophys. J.* **703**, L132 (2009)