

Wie Georg Christoph Lichtenberg (1742 bis 1790) sich Atome vorgestellt hat, wissen wir heute nicht mehr genau. Sicher kannte der älteste Ahne der Göttinger Physik die scharfsinnigen Gedanken des griechischen Philosophen Demokrit (460 v. Chr.–371 v. Chr.) über

die kleinsten, unteilbaren Bestandteile der festen Körper. Und er hatte wohl selbst ein ungefähres Bild von den atomaren Bausteinen unserer Welt. Wenn ein Würfel von einem Zentimeter Kantenlänge in acht kleinere Würfel zerlegt wird, und dieses Verkleinern

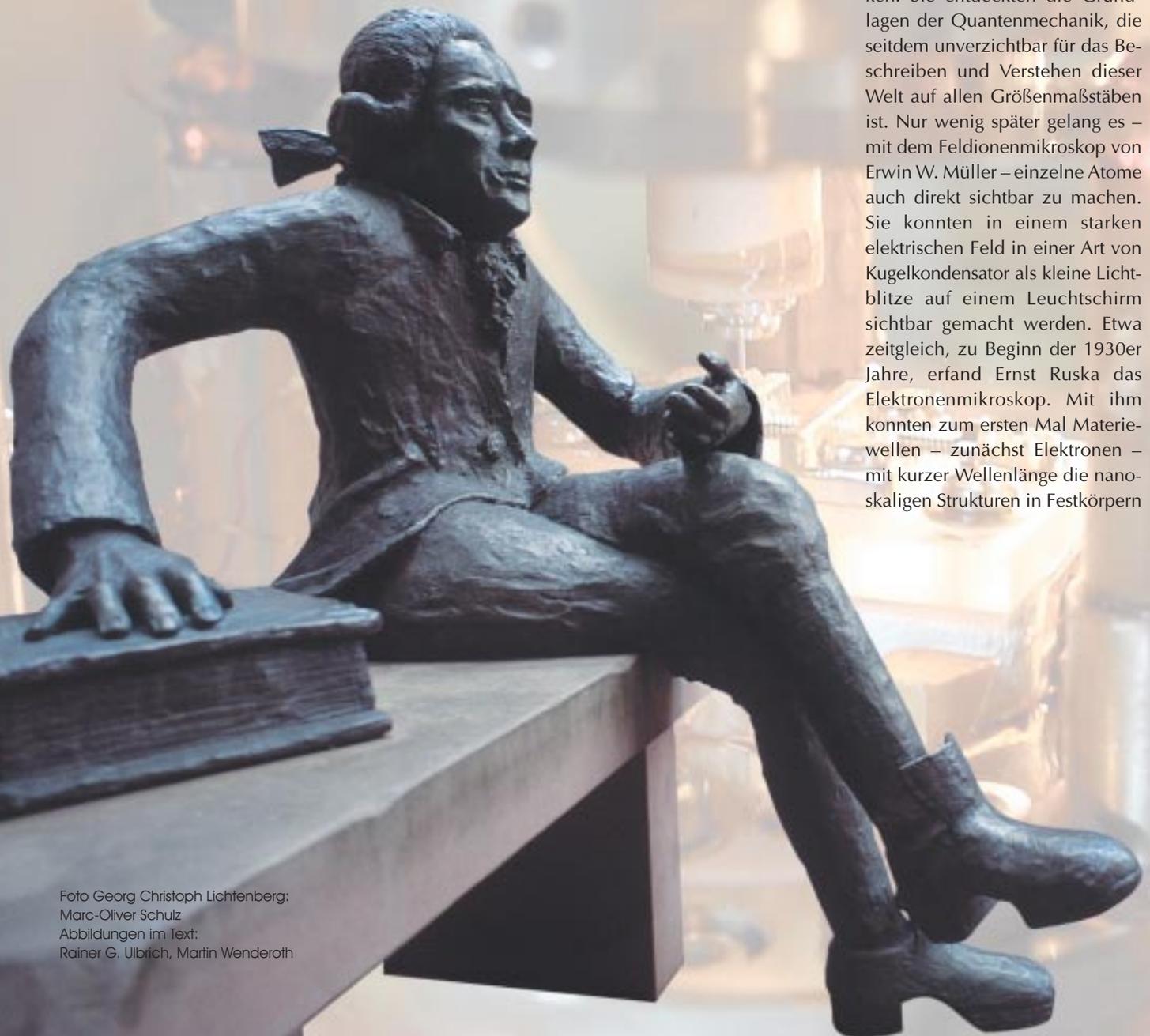
N-mal wiederholt wird, so endet es bereits nach  $N = 24$  Schritten. Der Würfel wäre in einzelne Atome zerlegt, jedes nur etwa ein Zehntel Nanometer im Durchmesser ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), und mit einfachen Mitteln, das heißt alltäglich »chemischem« Energieaufwand, nicht mehr weiter zu teilen.

Fünf Generationen später, in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts, erkannten Werner Heisenberg (1901–1976), Max Born (1882–1970) und Pascual Jordan (1902–1980) als erste die fundamentale Gesetzmäßigkeit, der die Atome ihre Stabilität und genaue räumliche Größe verdanken. Sie entdeckten die Grundlagen der Quantenmechanik, die seitdem unverzichtbar für das Beschreiben und Verstehen dieser Welt auf allen Größenmaßstäben ist. Nur wenig später gelang es – mit dem Feldionenmikroskop von Erwin W. Müller – einzelne Atome auch direkt sichtbar zu machen. Sie konnten in einem starken elektrischen Feld in einer Art von Kugelkondensator als kleine Lichtblitze auf einem Leuchtschirm sichtbar gemacht werden. Etwa zeitgleich, zu Beginn der 1930er Jahre, erfand Ernst Ruska das Elektronenmikroskop. Mit ihm konnten zum ersten Mal Materiewellen – zunächst Elektronen – mit kurzer Wellenlänge die nanoskaligen Strukturen in Festkörpern

# Mit Atomen »auf Du«

Von Demokrit zur modernen Nanowissenschaft

Rainer G. Ulbrich, Martin Wenderoth



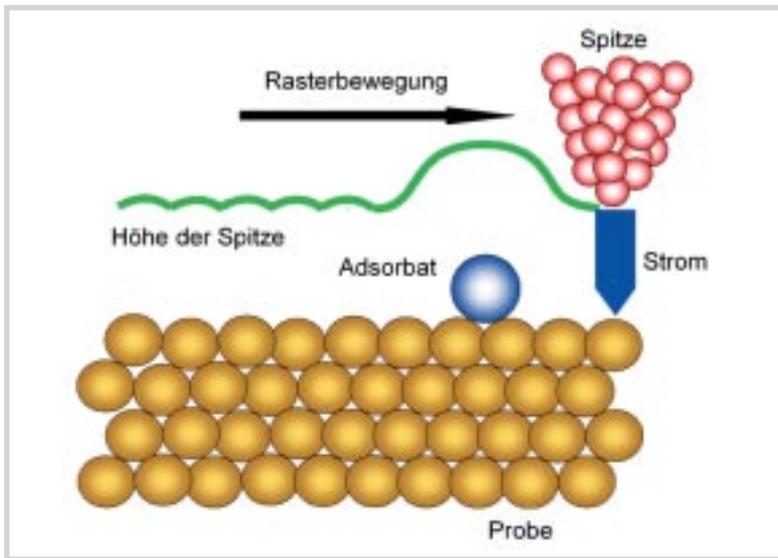


Abbildung 1: Das Grundprinzip des Rastertunnelmikroskops ist sehr einfach: zwischen einer sehr nah an die Oberfläche heran gebrachten Spitze und der Probenoberfläche fließt ein elektrischer Strom, der so genannte Tunnelstrom. Beim Abtasten der Probe wird der Abstand zur Oberfläche so geregelt, dass der Tunnelstrom immer gleich bleibt. Trägt man die Spitzenhöhe als Funktion der seitlichen Position auf, ergibt sich das Relief der Oberfläche. Dieses Relief wird Topographie genannt und entweder als 3D- oder als Farbstufenbild dargestellt. Das rechte Foto zeigt den »Messkopf« eines an der Universität Göttingen gebauten Rastertunnelmikroskops.

extrem vergrößert abbilden. Erst sehr viel später und mit großem Aufwand wurden wirklich einzelne Atome mit dem Elektronenmikroskop individuell abgebildet. Denn die von Heisenberg treffend mit »Unschärferelation« bezeichnete Verknüpfung von Orts- und Impulsunschärfe aller Teilchen – wie Photonen, Elektronen, etc. – setzt jeglichen im Fernfeld operierenden Abbildungsmethoden eine unüberwindliche Schranke: kein Auflösungsvermögen, das besser ist als etwa die halbe Wellenlänge.

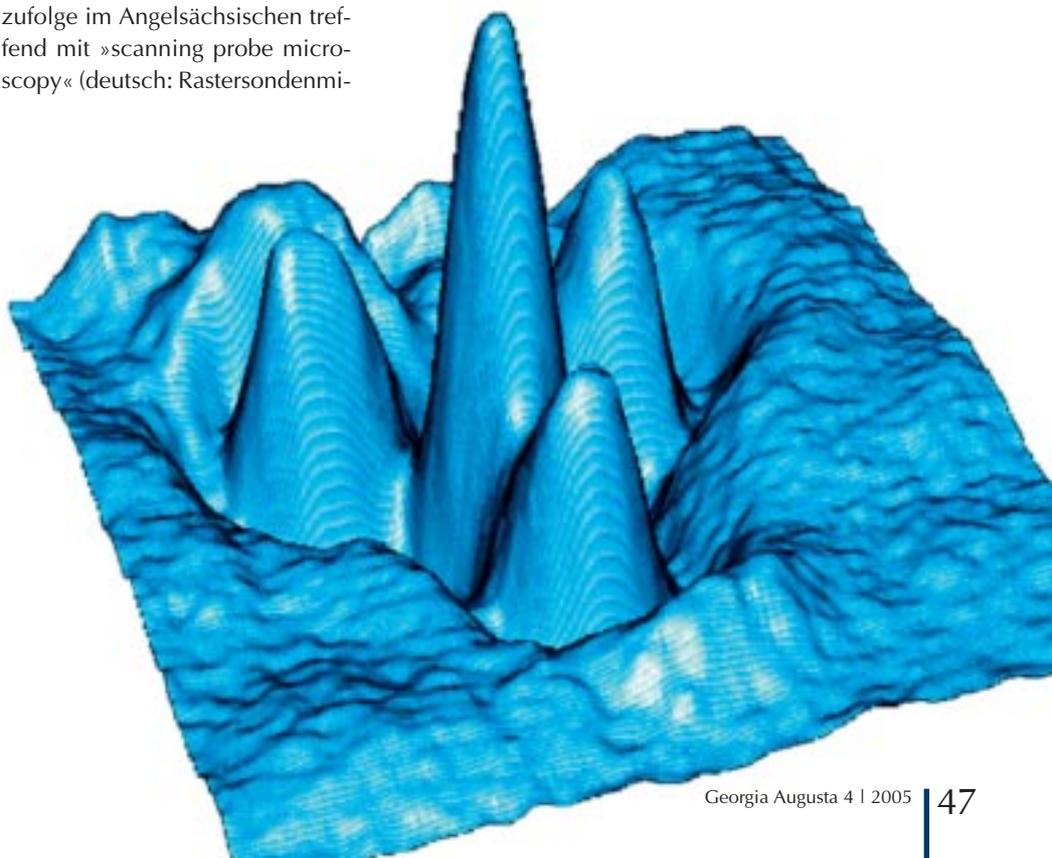
Vor rund 25 Jahren erzielten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer aber einen epochalen Durchbruch. Sie entwickelten das Rastertunnelmikroskop (RTM), mit dem zum ersten Mal – recht schonend mit ganz niedrigen Energien – die Elektronenhüllen von Atomen an der Oberfläche fester Körper abgebildet und einzelne Atome sogar gezielt manipuliert werden konnten (Abbildung 1). Diese Erfindung brachte beiden den Nobelpreis für Physik, den übrigen Experimentatoren ungeahnte neue Möglichkeiten für

1. das Verständnis des Aufbaus und des Zusammenhalts von Atomen in Molekülen und Festkörpern, und
2. die Untersuchung von Transportvorgängen auf atomarer Skala.

Wie war das Unterlaufen der Heisenbergschen Relation möglich? Es war das gezielte Eindringen in das »Nahfeld«, den räumlichen Bereich in der Umgebung des untersuchten Objekts, mit Abständen, die deutlich kleiner als die Wellenlänge des verwendeten Lichtes oder der Elektronen sind. So wie mit einem Stock in der Hand die Struktur einer Oberfläche im Großen ertastet werden kann, erkundeten nun winzige Sonden das atomare Relief im Kleinen. Die Methode wird demzufolge im Angelsächsischen treffend mit »scanning probe microscopy« (deutsch: Rastersondenmi-

kroskopie) bezeichnet. Die Quantenmechanik stellt alle Werkzeuge bereit, um mit der Messung des Elektronenstroms zwischen Spitze (englisch: probe) und Objekt – die genaue Kenntnis der atomaren Struktur der Spitze vorausgesetzt – sowohl die Topographie, das ist die Höheninformation, als auch die elektronische Struktur, das ist die »Chemie« der Oberfläche, abzutasten und in Form einprägsamer Bilder darzustellen.

Abbildung 2: Rastertunnelmikroskopische Darstellung von vier Kobalt-Atomen in einer Kupfer-Oberfläche.



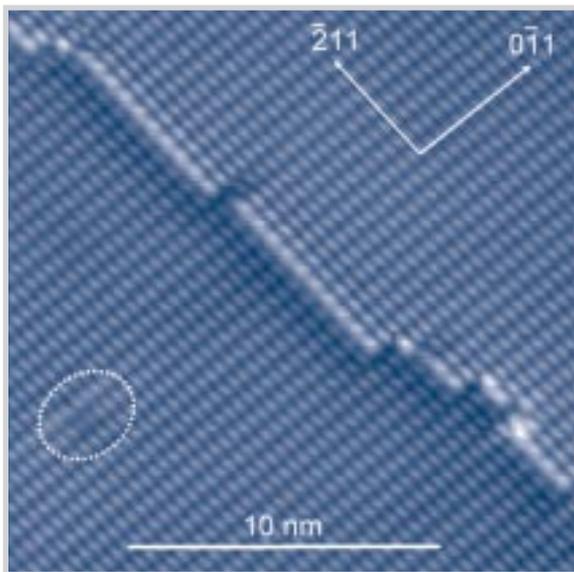


Abbildung 3: Das Rastertunnelmikroskop liefert eindrucksvolle Bilder vom atomaren Aufbau (kleine helle Punkte) einer Festkörperoberfläche. Hier ist es die Topographie der Silizium-(111) 2x1 Oberfläche. Die Daten wurden mit einem im IV. Physikalischen Institut der Universität Göttingen entwickelten Mikroskop, das bei acht Kelvin arbeitet, aufgenommen. Neben einer monatomaren Stufe (diagonal verlaufend) ist ein einzelnes Phosphor-Atom (im Kreis) zu sehen. Solche »Atomkarten« sind Grundlage des Verständnisses der Struktur und der elektronischen Eigenschaften künftiger Bauelemente.

Strukturen aufzuzeigen, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind, war immer Anreiz sowohl für die Wissenschaft wie auch die Kunst – bereits seit der Antike. Der griechische Atomismus und die platonischen Körper waren Vorläufer solcher Überlegungen, gewissermaßen ästhetische Spekulation nach Maßgabe von Schönheit und Geometrie. Heute spielt die Visualisierung in den Naturwissenschaften die zentrale Rolle. Winzige »Nano-Maschinen« in Form der Sondenspitze, der Piezokeramik und der Halbleiter-Bauelemente im Rastersondenmikroskop leisten genau diese Übertragung vom Kleinen ins greifbar Makroskopische. Atome »sehen« können – dies war noch vor hundert Jahren Gegenstand ernster philosophischer Debatten zwischen Ernst Mach (1838–1916) und Albert Einstein (1879–1955), die heute als beigelegt angesehen werden können (Abbildung 2). Es gibt dennoch weitreichende Fragen, die im Nanoskaligen wurzeln und deren Beantwortung offen ist.

## Nanowissenschaften

Die geometrischen Abmessungen von elektronischen Bauelementen »schrumpfen« in dieser Dekade zielstrebig in den Bereich von etwa zehn Nanometern und sogar darunter. Grenzen für weitere Verkleinerung sind die elementaren Bausteine der Festkörper, die Atome sowie – zunächst weniger offensichtlich – der notwendige Paradigmenwechsel in der Beschreibung physikalischer Prozesse auf atomarer Skala. Denn wenn die Zahl der Atome eines Bauelementes auf eine überschaubare Größe schrumpft, kann die Funktionsweise eines Elementes entscheidend durch ein einzelnes Atom beziehungsweise seine Position im Bauelement beeinflusst oder völlig verändert werden (Abbildung 3). Ebenso wesentlich ist es, dass die Funktionalität der Bauelemente nicht mehr nur mit »klassischen« physikalischen Gesetzen beschreibbar ist, sondern maßgeblich auf denen der Quantenmechanik basieren wird. Fundamentale Änderungen der physikalischen Konzepte beim Design

der Bauelemente sind die notwendige Folge.

## Charakterisierung von Halbleitern auf atomarer Skala

Halbleiter sind die Grundlage aller heute genutzten Informations- und Kommunikationstechnologien. Die elektrischen Eigenschaften von Halbleitern werden durch gezielte Verunreinigung mit so genannten Dotieratomen den Anforderungen der Bauelemente angepasst. Der Einbau der Fremdatome ist gegenwärtig noch ein prinzipiell unkontrollierter, das heißt statistischer Prozess: die Fremdatome werden zufällig im dotierten Material verteilt. Mit Hilfe der Rastertunnelmikroskopie lässt sich erstmals genau sehen, wo sich einzelne Dotieratome im Halbleiterkristall befinden, sogar dann, wenn sie mehrere Atomlagen tief unter der Oberfläche vergraben sind. Die atomar genaue Bestimmung eines solchen »Dotierprofils« wird umso wichtiger, je kleiner elektronische Bauteile werden (Abbildung 4). Aus diesen Daten lässt sich die Vertei-

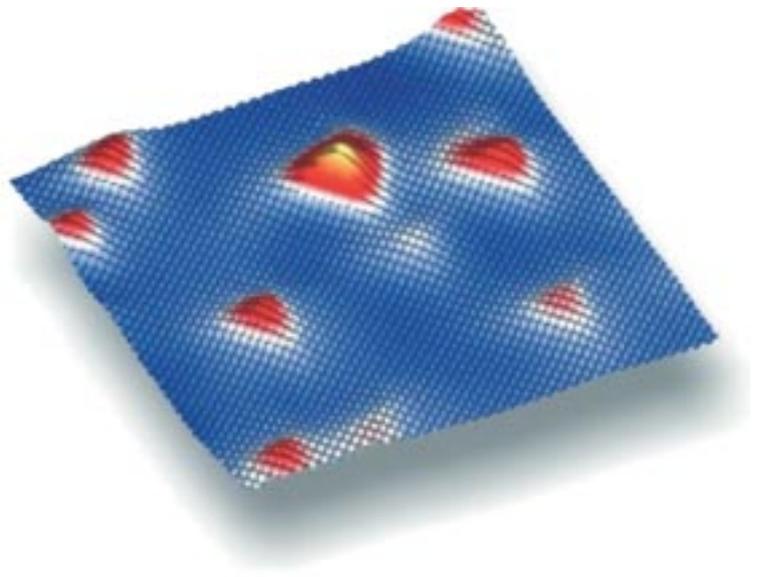


Abbildung 4: Topographie einer Gallium-Arsenid (110) Oberfläche. Der Bildbereich beträgt 40 x 40 Quadratnanometer, der Atomabstand 0,5 Nanometer. Auf Gallium-Plätzen eingebaute Kohlenstoff-Atome verändern lokal die elektronischen Eigenschaften der Oberfläche, sichtbar am Farbwechsel von blau zu rot/gelb. Man erkennt deutlich, dass dieser Einfluss stark davon abhängt, wie tief die Kohlenstoff-Atome unter der Oberfläche eingebaut sind. Dieses Bild zeigt deutlich, dass die Funktionsweise eines Bauelementes, welches nur zehn Prozent der dargestellten Fläche hat, empfindlich davon abhängen wird, wie die Dotieratome angeordnet sind.

lung der Dotieratome bestimmen, es können dabei sowohl ihr Einfluss auf die elektronischen Eigenschaften der umgebenden Wirtsatome als auch die Wechselwirkung untereinander bestimmt werden.

**Das Elektronengas unter der Lupe**

Auf der Nanometer-Skala werden Quanteneffekte sichtbar, die den Wellencharakter der Elektronen im Festkörper und an dessen Oberfläche widerspiegeln. Es treten Interferenzeffekte auf, die sich genauso wie bei Licht im Doppelspaltexperiment zeigen. Für künftige Anwendungen sind solche quantenelektronischen Eigenschaften eines Materials meist wichtiger als die Details seiner atomaren Topographie. Hier spielt das RTM seine wahre Stärke aus: es »sieht« die elektronischen Zustände der untersuchten Probe, welche wiederum im direkten Zusammenhang mit relevanten Materialeigenschaften, wie elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, chemische Aktivität und Magnetismus stehen (Abbildung 5).

**Manipulation von Atomen**

Neben der reinen Abbildung atomarer Strukturen können mit dem RTM auch gezielt einzelne Atome und Atomkomplexe kontrolliert bewegt werden. Die Gruppe von Donald Eigler hat gezeigt, dass einzelne Atome gezielt auf Oberflächen verschoben und abgebildet werden können. Durch Atommanipulation lässt sich so »Schreiben« und »Lesen« auf kleinstem Raum, mit einzelnen Atomen verwirklichen. Ein Beispiel auf der Gallium-Arsenid-Oberfläche ist in der folgenden Sequenz zu sehen. Hier wurden von uns Defektkomplexe durch Wahl der geeigneten Spannung zwischen Probe und Spitze gezielt bewegt (Abbildung 6).

**Ausblick**

Materie auf molekularer und atomarer Skala untersuchen und gezielt verändern zu können, war



Abbildung 5: Interferenzmuster stehender Elektronenwellen auf einer Kupfer (111) Oberfläche. Zwei monatomare Stufen von je zwei Angström Höhe bilden Terrassen, die atomar glatt sind. Auf den Terrassen erkennt man ein Wellenmuster, welches durch Streuung der Elektronen an den Stufenkanten entsteht. Die Punktdefekte in den Terrassen sind durch gezielt eingebrachte magnetische Verunreinigungen (Kobalt) hervorgerufen

lange nur ein Traum. Physik und Chemie sind auf qualitativ verschiedenen Wegen der Verwirklichung dieses Traums ein gutes Stück näher gekommen. Das moderne, interdisziplinäre Feld der Nanowissenschaften prägt heute die künftige Entwicklung. In der Physik ist die Realisierung von Quantenbauelementen als langfristiges Ziel erkennbar. Gegenwärtig steht die hier die Grund-

lagenforschung im Vordergrund. Die Ergebnisse der laufenden Arbeiten werden einem allmählichen Wandel, möglicherweise sogar einen Paradigmenwechsel im Entwurf von Bauelementen für die Informationstechnologie, mit sich bringen. Dieser hat die Welt nachhaltig verändert, und sie wird uns voraussichtlich noch weitaus mehr Wandel bringen, als bisher schon erkennbar ist. ◀

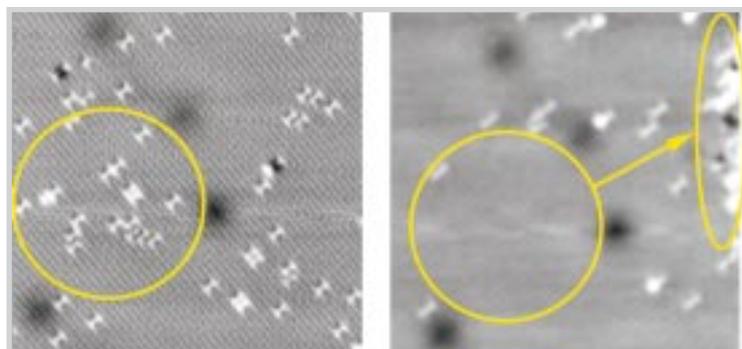


Abbildung 6: Durch gezielte Bewegung der Sondenspitze über die Oberfläche können Defektkomplexe quantitativ verschoben werden. Dabei kann durch die Wahl der Spannung zwischen Probe und Spitze entschieden werden, ob die Oberfläche abgebildet oder die Komplexe verschoben werden sollen. Die dunkleren Kontraste, die in beiden Bildern identisch sind, rühren von Dotieratomen unter der Oberfläche her. Sie dienen als Landmarke und zeigen, dass hier derselbe Bereich der Oberfläche vor und nach der Manipulation aufgenommen wurde

Simple shrinking of electronic devices works for now, but the geometric dimensions have already reached the nanometer scale and further reduction in size will meet the limit of every solid state device, the atoms. It is for sure that this natural border will lead to a paradigm shift in the way future electronic devices have to be described: if the number of atoms within a single device is finite the question as to whether it works or not can be determined by a single atom. Just as important as the knowledge of the structure on all length scales is the departure from description taking a classical perspective to that based on concepts of quantum mechanics. The development of scanning probe techniques has opened the way to studying both structural and electronic properties on the atomic scale. The basics and concepts of this technique as well as recent developments are presented in this paper.



*Prof. Dr. Rainer G. Ulbrich, Jahrgang 1944, studierte Physik an der Universität Frankfurt am Main, an der er 1969 sein Diplom ablegte und 1972 promoviert wurde. Anschließend war er zwei Jahre lang als Postdoctoral Fellow bei der Firma IBM in Yorktown Heights, New York (USA), tätig. Nach seiner Assistentenzeit (1974 bis 1976) und der Habilitation 1976 erhielt Prof. Ulbrich im selben Jahr den Ruf an die Universität Dortmund. Es folgten Gastaufenthalte an der Ecole Polytechnique in Palaiseau (Frankreich) sowie in den USA bei den Bell Laboratories Murray Hill, IBM Yorktown Heights und am Lawrence Berkeley National Laboratory. Im Jahr 1987 wurde er auf die Professur für Halbleiterforschung an die Georg-August-Universität Göttingen berufen, an der er seither lehrt und forscht. Seine Arbeitsgebiete sind die Festkörperspektroskopie und die Rastersondenmikroskopie, hochauflösende Emissionsspektroskopie, inelastische Lichtstreuung sowie die Elektronenmikroskopie von Nanostrukturen. Seit 2005 leitet Prof. Ulbrich die Göttinger Fakultät für Physik als Dekan. Er ist Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen.*



*Dr. Martin Wenderoth, Jahrgang 1961, studierte Physik an den Universitäten Dortmund und Göttingen. Mit einer Arbeit über »Lichtemission aus dem Rastertunnelmikroskop« wurde er im Jahr 1992 an der Universität Göttingen promoviert. Nach seiner Promotion wurde er zum Akademischen Oberrat ernannt. Im Mittelpunkt seiner wissenschaftlichen Tätigkeiten in der Arbeitsgruppe von Prof. Ulbrich sowie als Projektleiter im Rahmen von Sonderforschungsbereichen steht die Untersuchung unterschiedlicher Systeme auf atomarer Skala mit Hilfe von Rastersondentechniken, darunter unter anderem der Querschnittsrastertunnelmikroskopie. Sein Hauptinteresse gilt den Korrelationen in elektronischen und magnetischen Systemen.*

**World Vision**

**Hilfe, die weiter geht!**

Hilfe – nicht nur für heute, sondern auch für morgen! Mit einer Patenschaft für 30 Euro im Monat helfen Sie einem Kind in der Dritten Welt und seinem ganzen Umfeld langfristig und gezielt.

**01803 102030\***  
\*9 Ct./Min. a. d. Festnetz d. Dt. Telekom

**www.worldvision.de**



## Willkommen im Netzwerk

Alumni Göttingen e.V. verbindet weltweit ehemalige und aktive Studierende, Absolventen und Angehörige der Georg-August-Universität sowie Wissenschaftler, Bürger und kooperierende Unternehmen zu lebendigem Austausch und wechselseitigem Nutzen.

## Ziele · Aufgaben · Angebote

- ▶ **Friendraising**  
Wir finden weltweit Ihre ehemaligen Kommilitonen
- ▶ **Kontaktpflege**  
Wir lassen Verbindungen nicht abreißen
- ▶ **Brainraising**  
Wir vernetzen Wissen und Fähigkeiten
- ▶ **Synergien**  
Wir sorgen dafür, dass im Alumni-Netzwerk alle voneinander profitieren
- ▶ **Information**  
Wir informieren regelmäßig über unsere Universität, unsere Aktivitäten und die Stadt
- ▶ **Veranstaltungen**  
Wir machen Begegnungen möglich
- ▶ **Dienstleistung**  
Wir unterstützen, beraten und helfen

Alumni Göttingen e. V. –  
Ehemalige für die Zukunft gewinnen

### Kontakt

Alumnibüro  
der Georg-August-Universität Göttingen  
Nikolausberger Weg 17  
37073 Göttingen

Tel. +49 (0)551/39-13277

Fax +49 (0)551/39-12452

[alumni@uni-goettingen.de](mailto:alumni@uni-goettingen.de)

[www.uni-goettingen.de/alumni](http://www.uni-goettingen.de/alumni)