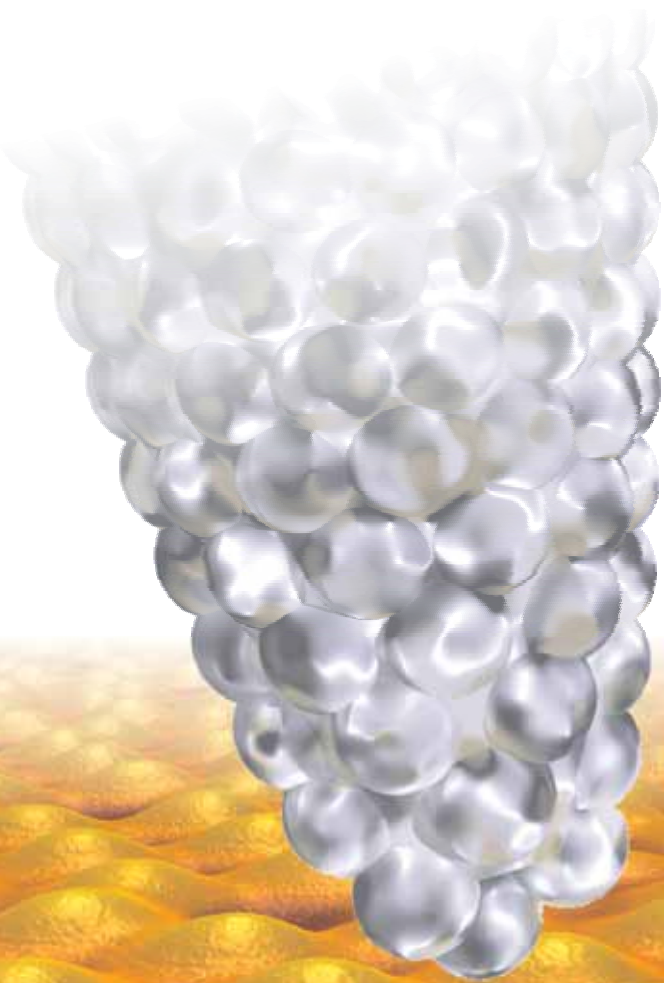


Wer nicht sehen kann, muss fühlen



Inhalt

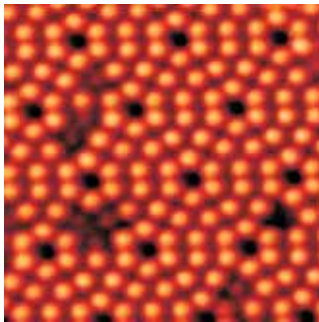
Der Nanokosmos - eine fremde Welt	1
Rastersondenmikroskopie	2
Nicht sehen sondern fühlen	
"Spitzel" im Nanokosmos	
Steuerung mit atomarer Präzision	
Der Walker	
Der Röhrenscanner	
Schwingungsisololation	
Rastertunnelmikroskopie (STM)	4
Der Tunnelstrom	
Meßmethoden mit Rastertunnelmikroskopen	
Was "sieht" ein Rastertunnelmikroskop?	
Messen von Materialeigenschaften	
Das Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskop	
Spintronik	
Rastertunnelmikroskope als Werkzeug	
Atomare Chemie mit dem Rastertunnelmikroskop	
Rasterkraftmikroskopie (AFM)	8
Die vielen Tastsinne eines Rasterkraftmikroskops	
Ertasten einzelner Atome im "Nicht-Kontakt-Modus"	
Tapping-Mode	
Magnetkraftmikroskop (MFM)	
Rasterkapazitätsmikroskop (SCM)	
Rasterkraftmikroskope als Werkzeug	
Licht im Nanokosmos - Nahfeldoptische Methoden (SNOM)	12
Rastersondenmikroskopie - ein Ausblick	13
Impressum	

Der Nanokosmos - eine fremde Welt

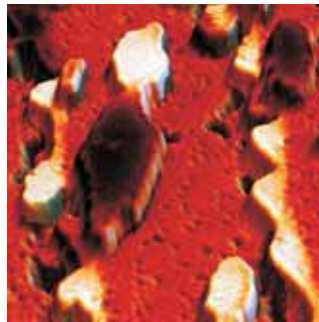
Nanotechnologie ist doch nichts neues, mögen viele denken, es ist einfach ein Fortschritt in der Miniaturisierung - aber das ist ein Irrtum. Es gibt zwei Eigenschaften, durch die sich der Nanokosmos, die Welt unterhalb 100 Nanometer (ein Nanometer = ein millionstel Millimeter), grundsätzlich von der uns bekannten makroskopischen Welt unterscheidet: Im Nanokosmos herrschen andere physikalische Gesetze als in der "großen" Welt. Hier regiert die Quantenphysik, die das Verhalten von so unvorstellbar kleinen Dingen wie Atomen und Molekülen beschreibt.

Würde die Quantenphysik auch unsere Alltagswelt beherrschen, wäre das eine Katastrophe für alle Fußballfans. Ein Ball, der dem Torwart direkt in die Arme fliegt, könnte durch diesen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einfach "hindurch tunneln". Der arme Mann im Tor würde davon zwar vermutlich nichts merken, aber der Leistungssport wäre einmal mehr zum Glücksspiel geworden.

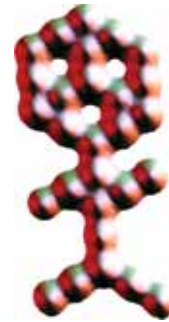
Zum anderen ist der Nanokosmos unsichtbar. Alles, was in dieser Welt existiert, ist viel kleiner als die kleinsten Wellenlängen des sichtbaren Lichtes und bleibt damit unseren Augen für immer verborgen. Selbst unter Zuhilfenahme des besten optischen Mikroskops.



Die einzelnen Atome auf der Oberfläche eines Siliziumkristalls.



Magnetische Eiseninseln, ein Atom hoch und wenige Atome breit und lang. Die dunklen und die hellen Flächen markieren, ob der magnetische Nord- oder Südpol nach oben weist.



Dieser wohl kleinste Zwerg der Welt wurde mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops aus 28 Kohlenmonoxid-Molekülen auf einer Platinfläche erzeugt. Abb.: IBM

Die seit über 400 Jahren bekannten optischen Mikroskope nutzen die Welleneigenschaft des Lichtes. Sind diese Wellen für den Nanokosmos zu groß, dann liegt die Idee nahe, eine Strahlung mit kleineren Wellenlängen zu benutzen. Genau das wird bei der Röntgen- und bei der Elektronenmikroskopie getan. Insbesondere die Elektronenmikroskopie ist zu einem Standardwerkzeug der Nanotechnologie geworden.

Doch man muss sich dem Nanokosmos nicht mit Wellen - nach dem Prinzip "Auge" - nähern, man kann ihn auch fühlen. Das hat sogar Vorteile. Nur der Fühlende stellt fest, ob etwas glatt ist oder rau, klebrig, weich oder hart oder elektrisch geladen. Genau das ist die Strategie der Rastersondenmikroskope: Sie ertasten Oberflächen und deren Materialeigenschaften - in einigen Fällen sogar bis aufs einzelne Atom genau.

Rastersondenmikroskopie

"Spitzel" im Nanokosmos

Die Erfindung des Rastertunnelmikroskopes 1981 war der wichtigste Meilenstein bei der Erforschung des Nanokosmos. Gerd Binnig und Heinrich Rohrer bekamen dafür 1986 den Nobelpreis für Physik. Mit Rastertunnelmikroskopen können aber nur elektrisch leitende Materialien untersucht werden. 1986 gelang es Gerd Binnig und seinen Kollegen Calvin F. Quate und Christoph Gerber, auch ein Rastersondenmikroskop für nichtleitende Materialien zu entwickeln, das Rasterkraftmikroskop. Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskope sind die beiden Grundtypen, aus denen sich in der Folgezeit alle anderen Rastersondenmikroskope entwickelt haben.

Steuerung mit atomarer Präzision

Allen Rastersondenmethoden ist gemeinsam, dass sie die Messsonde mit atomarer Präzision auf der Probe positionieren können. Dieses kleine Wunder gelingt mit Motoren aus **Piezokristallen**. Solche Kristalle lassen sich mit einer elektrischen Spannung kontrolliert verformen. In den meisten Rastersondenmikroskopen gibt es zwei Sorten solcher Nanomotoren: Sogenannte "Walker" zur Grobjustierung und "Röhrenscanner" für kleinere, noch präzisere Bewegungen.



Ein Piezokristall verformt sich, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird.

Der Walker

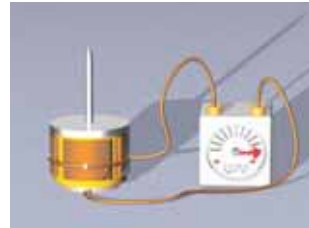
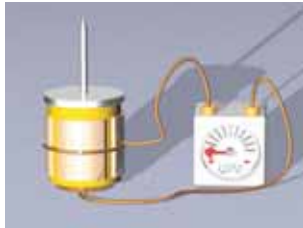
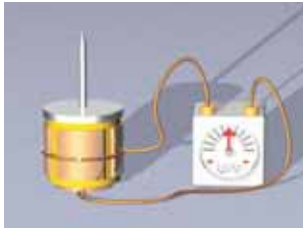
Ein "Walker" ist eine Röhre, in der kleine Piezo-Beinchen befestigt sind. Diese Beinchen halten einen Saphirstab mit dreieckigem Querschnitt fest. Für jeden Schritt, den der Motor macht, werden zuerst alle Piezo-Beinchen nacheinander ausgelenkt. Anschließend kehren sie alle gleichzeitig in ihre Ruhelage zurück und tragen den Saphir so ein Stück voran.



Für die Grobannäherung "kriecht" der Saphirstab, von den Piezobeinchen getragen, Schritt für Schritt nach oben bzw. unten. Je nach Konstruktion des Mikroskops ist am Ende des Saphirstabes die Probe oder die Sonde befestigt.

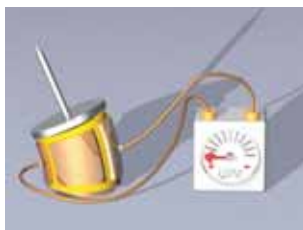
Der Röhrenscanner

Das Herz eines Rastersondenmikroskops ist der Röhrenscanner. Das ist ein Piezo-Kristall in Form einer Röhre, mit einer Innenelektrode und einer in vier Quadranten aufgeteilten Außenelektrode. Durch eine elektrische Spannung zwischen der Innen- und den Außenelektroden wird die Röhre gestreckt oder gestaucht.



Längenänderung des Scanners durch elektrische Spannung (siehe Text)

Die vier Außenelektroden können aber auch unterschiedliche Spannungen zur Innenelektrode haben. So kann eine Seite des Scanners gedehnt und die andere Seite gestaucht werden, wodurch sich der Scanner verbiegt. Auf diese Weise von elektrischen Spannungen gesteuert, können die Messsonde oder die Probe auf den Bruchteil eines Atomdurchmessers genau positioniert werden, und zwar in allen drei Raumrichtungen.



Durch geschickt eingestellte Spannungsdifferenzen zwischen den vier Außenelektroden und der Innenelektrode lässt sich der Röhrenscanner in alle Raumrichtungen auf Bruchteile eines Atomdurchmessers genau positionieren (siehe Text).



Schwingungsisolation

Messungen mit atomarer Präzision sind natürlich nur möglich, wenn die Mikroskope absolut erschütterungsfrei gelagert sind. Ohne Schwingungsisolation würden schon die Schritte des Experimentators oder ein vor dem Haus vorbeifahrendes Auto eine Messung stören.

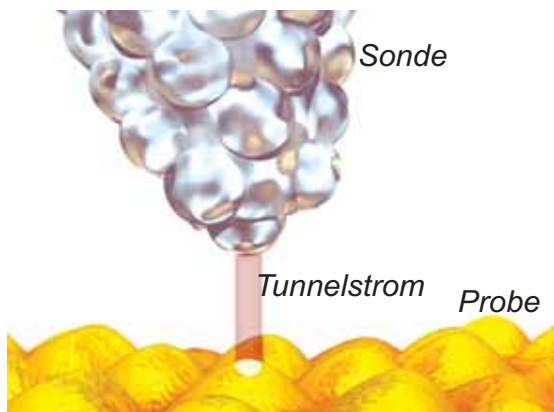
Je nach Anwendung reichen die Maßnahmen zur Schwingungsisolierung von gefederten Aufhängungen und Füßen bis hin zu Messplätzen mit separaten Fundamenten.

Messplatz an der Universität Hamburg für Rastertunnelmikroskopie im Ultrahochvakuum, bei tiefen Temperaturen und in hohen Magnetfeldern. Das Mikroskop hat ein eigenes Fundament.

Rastertunnelmikroskopie (STM, engl.: scanning tunneling microscope)

Der Tunnelstrom

Das Rastertunnelmikroskop eignet sich zur Mikroskopie von elektrisch leitfähigen Materialien, also hauptsächlich von Metallen und Halbleitern. Eine spitze Nadel, die Sonde, rastert in einem Abstand von wenigen Atomdurchmessern die Oberflächen ab. Nach Anlegen einer Spannung fließt ein schwacher Strom zwischen Sonde und Probe, obwohl sie sich nicht berühren. Diesen sogenannten Tunnelstrom dürfte es nach den Gesetzen der klassischen Physik gar nicht geben, weil sich zwischen Sonde und Probe kein stromleitendes



Material befindet. Anders im Nanokosmos. Hier geht es um atomare Längen und Abstände, hier gelten die Gesetze der Quantenphysik. Das Besondere am Tunnelstrom: Er reagiert äußerst sensibel auch auf kleinste Abstandsänderungen zwischen der Sonde des Mikroskops und der Probe. Der Tunnelstrom wird daher fast ausschließlich vom Abstand des äußersten Sondenatoms zum nächstgelegenen Atom oder Molekül der Probe bestimmt.

Messmethoden mit Rastertunnelmikroskopen

Rastertunnelmikroskope können in Vakuum, an Luft und sogar in Flüssigkeiten betrieben werden. Bei Messungen an Luft wird die Probe allerdings schnell von einer Oxidschicht, einem Wasserfilm oder anderen störenden Atomen und Molekülen bedeckt. Die einzelnen Atome einer Probe sind daher in der Regel nur zu sehen, wenn die Messungen im Vakuum erfolgen. Um auch sogenannte thermische Schwingungen von Sonde und Probe zu unterdrücken, wird außerdem oft bei tiefen Temperaturen mikroskopiert. Einige Rastertunnelmikroskope sind auch mit starken Magneten ausgestattet, um die elektronischen Eigenschaften einer Probe in äußeren Magnetfeldern zu untersuchen.

Bei Rastertunnelmikroskopen werden drei Messmodi unterschieden: Im "Konstant-Höhen-Modus" rastert die Sonde in gleich bleibender Höhe über eine Probe, während die Änderung des Tunnelstroms gemessen wird. Diese Methode ist jedoch in vielen Fällen problematisch, da insbesondere bei unbekannten Oberflächen die Gefahr eines Zusammenstoßes von Spitze und Probe besteht.

In der Regel findet der "Konstant-Strom-Modus" Anwendung. Hier wird der Abstand der Sonde zur Oberfläche Punkt für Punkt auf den gleichen Tunnelstrom eingestellt. Als Messwert dient die Strecke, die sich die Sonde an die Probe annähern oder von ihr entfernen muss, um den konstanten Tunnelstrom einzustellen.

Im "Spektroskopie-Modus" wird an jedem Messpunkt aufgezeichnet, wie der Tunnelstrom mit der angelegten Spannung variiert (Strom-Spannungs-Kennlinie). Der Spektroskopie-Modus ermöglicht einen tieferen Einblick in die elektronischen Eigenschaften einer Probe.

Was "sieht" ein Rastertunnelmikroskop?

Obwohl es ohne weiteres möglich ist, mit dem Rastertunnelmikroskop sogar einzelne Atome abzubilden, muss sich der Experimentator jedes Mal fragen, was er auf seinem mikroskopierten Bild wirklich sieht. Genaugenommen misst ein Rastertunnelmikroskop, wie viel Elektronen einer bestimmten Energie auf einem winzigen Ausschnitt der Probenoberfläche zu finden sind - die sogenannte lokale Zustandsdichte (LDOS, engl.: local density of states). Das Rastertunnelmikroskop erfasst daher keine atomaren Berg- und Tallandschaften (Topographie), sondern die elektronischen Eigenschaften einer Probenfläche. Ein einzelnes Sauerstoffatom auf der Oberfläche eines Wolframkristalls wird unter dem Rastertunnelmikroskop zum Beispiel nicht als "Berg", sondern als "Tal" sichtbar.

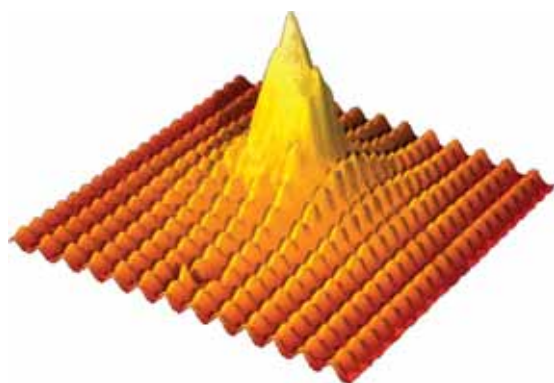
In vielen Fällen gibt die Abbildung eines Rastertunnelmikroskops die Topographie der Probe allerdings recht gut wieder. Das gilt insbesondere dann, wenn sie aus nur einer Sorte von Atomen oder Molekülen besteht.



"Nanolandschaft" auf einer mit Stickstoff behandelten Kupferoberfläche

Messen von Materialeigenschaften

Für viele Anwendungen sind die Eigenschaften eines Materials wichtiger als seine Topographie. Ein Rastertunnelmikroskop "sieht" die elektronischen Zustände der untersuchten Probe und diese stehen in direktem Zusammenhang mit diversen Materialeigenschaften, wie elektrischer Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, chemischer Aktivität und dem Magnetismus.



Das elektronische Signal eines Dotieratoms unter der Oberfläche eines Halbleiterkristalls

In der Elektronik werden zum Beispiel Halbleitermaterialien gezielt mit Fremdatomen "verschmutzt". Diese sogenannte Dotierung ist ein statistischer Prozess, das heißt die Fremdatome sind zufällig im Material verteilt. Mit Hilfe der Rastertunnelmikroskopie lässt sich erstmals genau sehen, wo sich einzelne Dotieratome im Halbleiterkristall befinden, sogar dann, wenn sie mehrere Atomlagen unter der

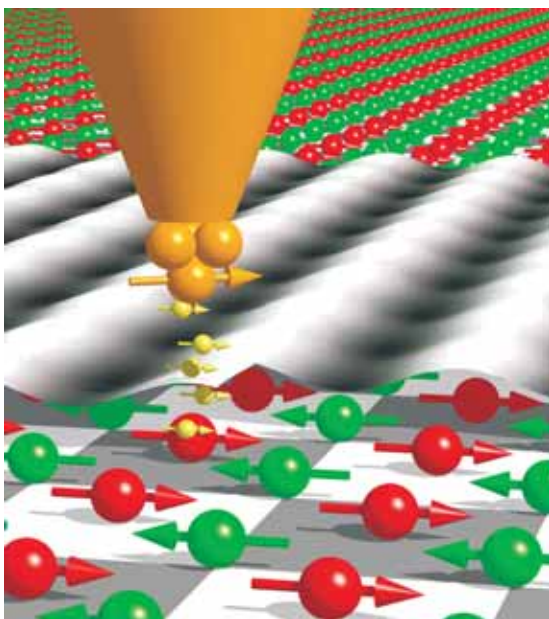
Oberfläche liegen. Die atomar genaue Bestimmung eines solchen "Dotierprofils" wird um so wichtiger, je kleiner elektronische Bauteile werden.

Das Spinpolarisierte Rastertunnelmikroskop (SP-STM, engl.: spin polarised scanning tunneling microscope)

Mit einem kleinen Trick kann ein Rastertunnelmikroskop auch magnetische Eigenschaften einer Probe ertasten - und zwar aufs Atom genau: Mit einer magnetischen Sonde.

Elektronen haben nicht nur eine elektrische Ladung, sie haben auch einen Spin. Anschaulich und stark vereinfacht kann der Elektronenspin als Rotation des Teilchens um seine eigene Achse beschrieben werden. Der Elektronenspin ist die eigentliche Ursache des Magnetismus. Bei einem Magnet zeigt der Elektronenspin vieler benachbarter Atome in die gleiche Richtung. Ist die magnetische Ausrichtung der Sondenspitze parallel oder antiparallel zur Magnetisierungsrichtung der Probe, dann fließen eine unterschiedliche Zahl von Elektronen. Der Tunnelstrom ist daher auch von den Magnetisierungsrichtungen an Probe und Spitze abhängig.

Auf diese Weise können Rastertunnelmikroskope tatsächlich Atom für Atom den Magnetismus einer Probe fühlen. Besonders interessant ist die Erforschung der Domänengrenzen,



Die magnetische Sonde eines Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskops ertastet die magnetischen Eigenschaften einzelner Atome.

an denen sich die Richtung des Magnetfeldes ändert. Diese Übergänge sind in der Regel kontinuierlich und erstrecken sich über viele Atome. Mit dem Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop konnten aber auch schon atomar scharfe magnetische Domänengrenzen gefunden werden.

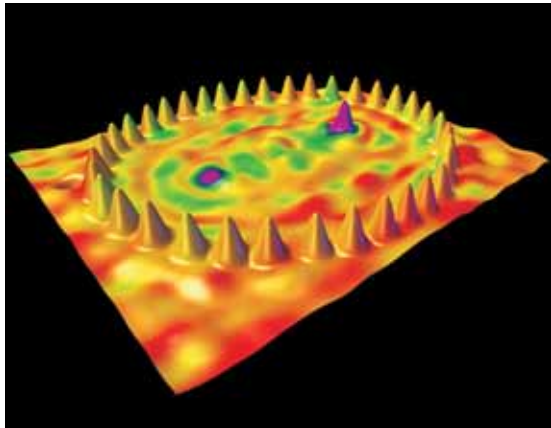
Aufsehenerregende Messungen erfolgten auch an antiferromagnetischen Proben. Bei Antiferromagneten zeigt der Elektronenspin benachbarter Atome in die jeweils entgegengesetzte Richtung. Mit einem Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskop ist es Wissenschaftlern am Hamburger Zentrum für Mikrostrukturforschung gelungen, diese von Atom zu Atom wechselnden Spinrichtungen erstmals sichtbar zu machen (siehe Abb.).

Spintronik

Ein wichtiges Anwendungsgebiet der Spinpolarisierten Rastertunnelmikroskopie ist die Untersuchung der spinabhängigen elektronischen Struktur sowie des spinabhängigen Elektronentransports in Halbleiter-Ferromagnet-Hybridsystemen, welche eine zentrale Rolle im Bereich der Spintronik spielen. Erst die detaillierte Analyse und gezielte Kontrolle spinabhängiger Phänomene auf der atomaren Skala wird die Effizienz zukünftiger Bauelemente der Spintronik wesentlich verbessern können.

Rastertunnelmikroskope als Werkzeug

Rastertunnelmikroskope können einzelne Atome und Moleküle nicht nur abbilden, sie können sie auch bewegen. Dabei gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Atome lassen

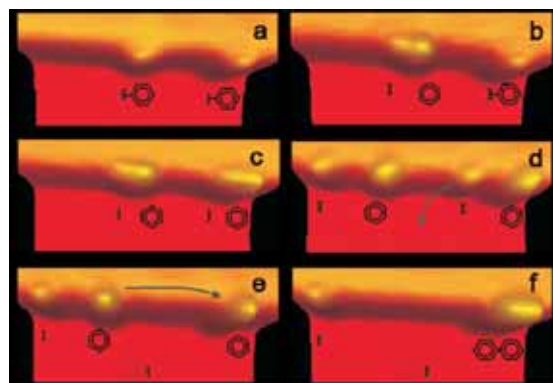
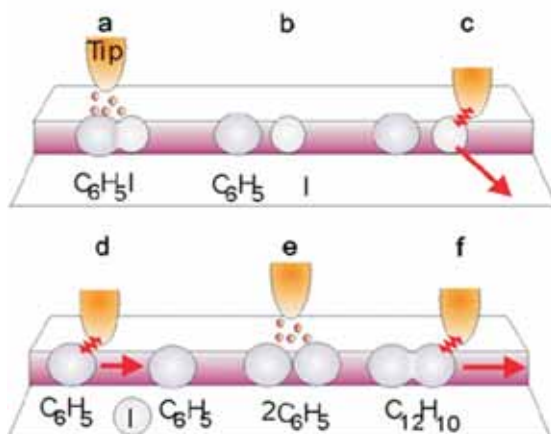
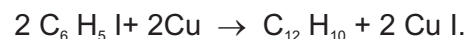


Ein atomarer Zaun aus Kobaltatomen. Abb.: IBM

sich verschieben oder auch aufheben und absetzen, wie von einem Kran. Die aufsehenserregendsten Experimente gelangen hier dem amerikanischen Physiker Don Eigler. Schon 1991 verblüffte er die Weltöffentlichkeit, als er mit 35 Xenonatomen den Schriftzug "IBM" erzeugte. In späteren Experimenten baute er unter anderem geschlossene atomare Zäune (engl.: quantum corral). In diesen "Käfigen" lassen sich elektronische Zustände "einsperren" und erforschen.

Atomare Chemie mit dem Rastertunnelmikroskop

Wenn es gelingt, einzelne Atome hin- und herzuschieben, was liegt dann näher, als sich auf diese Weise Atom für Atom neue Moleküle zu bauen? Tatsächlich ist es in Experimenten bereits gelungen, mit einem Rastertunnelmikroskop eine komplette chemische Reaktion durchzuführen, die sogenannte Ullmann-Reaktion:



Die Abbildung links zeigt das Prinzip, wie mit einem Rastertunnelmikroskop eine chemische Reaktion durchgeführt werden kann. Das Bild rechts zeigt die Reaktion noch einmal so, wie sie unter dem Rastertunnelmikroskop aussieht. (Hla et al., Physical Review Letters, 25 September 2000)

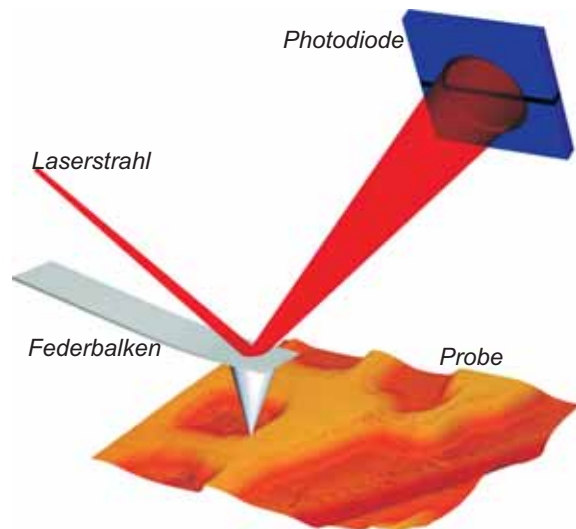
Abb.: S.-W. Hla, Freie Universität Berlin

Rasterkraftmikroskopie (AFM, engl.: atomic force microscope)

Tasten statt sehen

Rastertunnelmikroskope können nur elektrisch leitfähige Materialien abbilden. Diese Einschränkung gilt nicht für Rasterkraftmikroskope. Die Kraftmikroskopie eignet sich prinzipiell zur Untersuchung jedes festen Materials, sogar in diversen Umgebungen, wie Luft, Gasen oder sogar Flüssigkeiten. Messungen können bei unterschiedlichen Temperaturen oder in äußeren Magnetfeldern durchgeführt werden, den Möglichkeiten sind kaum Grenzen gesetzt. Ein großer Vorteil ist das vor allem für Anwendungen aus der Biologie: Biologische Proben können im Wasser mikroskopiert werden, also in einer naturähnlichen Umgebung.

Das Prinzip eines Rasterkraftmikroskops ist denkbar einfach. Die Sonde liegt auf der Probe wie die Nadel eines Schallplattenpielers auf einer Langspielplatte. Die Sonde ist am Ende eines Federbalkens befestigt. Wenn sie über das Oberflächenrelief einer Probe rastert, werden die winzigen Auslenkungen des Federbalkens mit einem Laserstrahl detektiert. Aus der Auslenkung des Federbalkens werden die mikroskopischen Bilder rekonstruiert.



Die vielen Tastsinne eines Rasterkraftmikroskops

Im oben beschriebenen "Kontaktmodus" eines AFM liegt die Sonde direkt auf der Oberfläche auf. In diesem Messmodus ist es unter anderem möglich, auf kleinster Skala das Phänomen der Reibung zu studieren. Es ist noch längst nicht geklärt, was auf atomarer und molekularer Ebene passiert, wenn zum Beispiel ein Autoreifen auf der Straße rutscht.

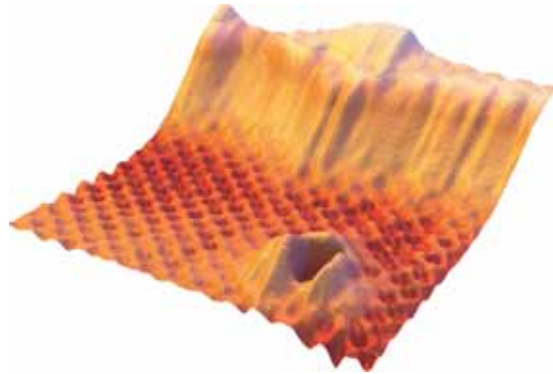
Der Kontaktmodus hat allerdings auch Nachteile: Sowohl die Sonde als auch die Probe können dabei beschädigt werden. Außerdem ist es auf diese Weise unmöglich, einzelne Atome zu ertasten, weil die Kontaktfläche von Probe und Sonde in der Regel aus vielen Atomen besteht.

Fühlen einzelner Atome im "Nicht-Kontakt-Modus"

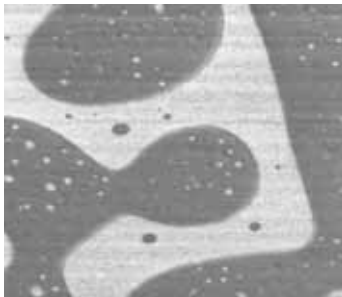
Eine Lösung dieses Problems war die Entwicklung des Dynamischen Rasterkraftmikroskops. Bei diesem Mikroskop wird der Federbalken mit der Sonde in Schwingungen versetzt. Wenn sich die schwingende Sonde der Probe annähert, ändert sich die Schwingungsfrequenz des Federbalkens. Dies geschieht sogar dann, wenn die Sonde noch über der Probe schwingt, sie also nicht berührt. Die Sonde wird an jedem Messpunkt wieder so weit von der Probenoberfläche entfernt, bis eine konstante Schwingungsfrequenz einge-

stellt ist. Mit diesem "Nicht-Kontakt-Modus" gelang es 1995 zum ersten Mal, auch mit einem Rasterkraftmikroskop einzelne Atome abzubilden - ein Wunder, wenn man sich die Größenordnungen vor Augen hält: Mit einer Nadel, von einem zehntel Millimeter Länge ein einzelnes Atom sichtbar zu machen, entspricht dem Versuch, mit der Spitze des Matterhorns einen Tennisball abzutasten.

Wie das Rastertunnel- ist auch das Rasterkraftmikroskop in der Lage, neben der Topografie einer Oberfläche auch diverse Materialeigenschaften zu vermessen: Magnetismus, elektrische Leitfähigkeit, mechanische Härte, Elastizität, Adhäsion ("Klebrigkeit") und einiges mehr.



Atomar aufgelöste Stufe auf einer Nickeloxid-Oberfläche. Aufnahme mit einem Rasterkraftmikroskop



Tapping-Mode

Der "Tapping-Mode" wird zur Untersuchung von Elastizität und Adhäsion eines Materials verwendet. Hier wird die Probenoberfläche von der schwingenden Sonde bei jeder Schwingung leicht berührt.

Das Bild zeigt die Elastizität eines dünnen Polymerfilms. Der Helligkeitsgrad gibt die lokale Elastizität der Probe wieder.

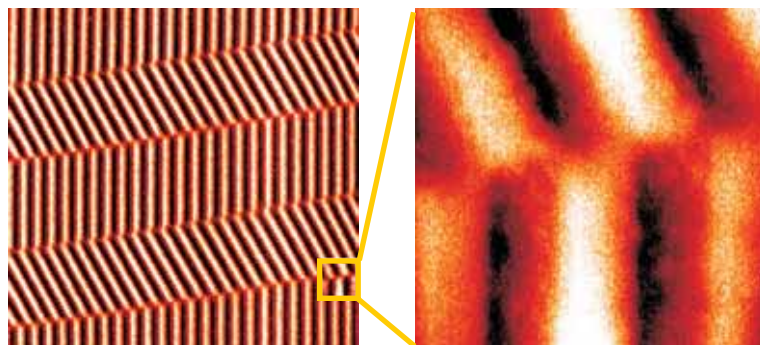
Magnetkraftmikroskop (MFM, engl.: magnetic force microscope)

Ein Magnetkraftmikroskop ist ein Rasterkraftmikroskop mit einer magnetischen Sonde. Mit dieser Anordnung werden Details von Magnetfeldern sichtbar, die kleiner sind als ein zehntausendstel Millimeter. Einzelne Atome sind mit dem Magnetkraftmikroskop nicht zu erkennen, da die magnetischen Kräfte eine zu große Reichweite haben. Die magnetische Sonde spürt deshalb grundsätzlich mehrere Atome gleichzeitig.

Da stromführende elektrische Leitungen von einem Magnetfeld umgeben sind, wird auch versucht, das Magnetkraftmikroskop zur Messung von Stromstärken auf den winzigen Leiterbahnen von Computern zu verwenden.

Aufnahme der Oberfläche eines magnetischen Datenspeichers mit einem MFM.

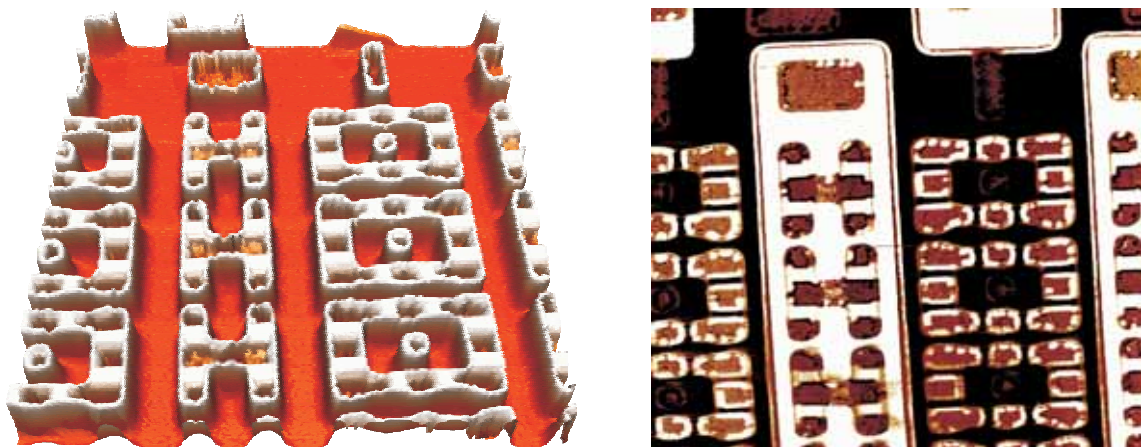
*Bildausschnitt:
links 50 x 50 Mikrometer,
rechts 5 x 5 Mikrometer.*



Rasterkapazitätsmikroskop (SCM, engl.: scanning capacitance microscope)

Das Rasterkapazitätsmikroskop misst elektrische Ladungsverteilungen. Es ist eigentlich selbst so etwas wie ein Kondensator. Die Elektroden des Kondensators sind einerseits die Sondenspitze und auf der anderen Seite die Probe.

Rasterkapazitätsmikroskope sind vor allem für die Chipindustrie von wachsender Bedeutung. Auf den Prozessoren heutiger Computer sind auf einer Fläche von etwa einem Quadratzentimeter mehrere Millionen Transistoren zu finden. Ein Rasterkapazitätsmikroskop macht diese winzigen elektronischen Bauelemente nicht nur sichtbar, es blickt auch in sie hinein. Ein Transistor besteht aus verschiedenen Bereichen mit unterschiedlichen elektronischen Eigenschaften. Das Rasterkapazitätsmikroskop kann diese Materialeigenschaften ertasten, mit einer Genauigkeit besser als einem 10 000stel Millimeter.



Mit einem Rasterkapazitätsmikroskop lassen sich sowohl die Oberflächenlandschaft (Topografie, linkes Bild), als auch die elektrischen Eigenschaften (Kapazität, rechtes Bild) des Computerchips ertasten.

Bildausschnitt: 20 mal 20 Mikrometer

Erforschen einzelner Biomoleküle

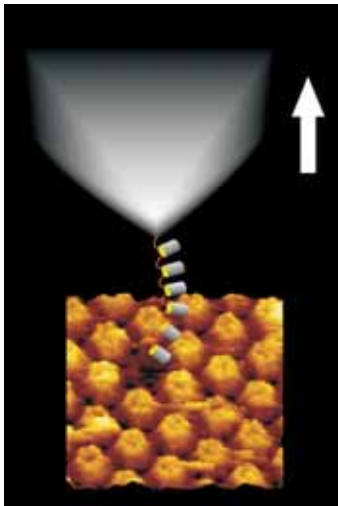
Ganz neue Möglichkeiten bietet das Rasterkraftmikroskop auch für Chemie und Biologie: Ein Rasterkraftmikroskop kann wie eine Angel einzelne Moleküle aus einer Oberfläche ziehen. Dazu wird an die Sonde des Rasterkraftmikroskops als "Angelhaken" ein Molekül befestigt, das mit dem zu entfernenden Molekül eine feste chemische Bindung eingeht. Mit einer geschickten Wahl des "Angelhakens" wird sichergestellt, dass sich nur ganz bestimmte Oberflächenmoleküle an die Sonde heften (siehe Abb. rechts).

Auf ähnliche Weise können einzelne Moleküle auch zwischen einer Oberfläche und der Sondenspitze eines Rasterkraftmikroskops eingespannt und auseinandergezogen

werden. So kann die Kraft bestimmt werden, die nötig ist, um komplexe Biomoleküle wie Eiweißmoleküle (Proteine) oder DNA zu entfalten bzw. zu dehnen. Mit solchen Experimenten können intra- und intermolekulare Bindungskräfte an einzelnen Molekülen erforscht werden.

Die Erforschung von Biomolekülen ist nicht nur für Biologie und Medizin, sondern auch für die Nanotechnologie von Interesse. Proteine sind für praktisch alle Stoffwechselvorgänge

im Körper zuständig und gelten als "biochemische Nanomaschinen". Das detaillierte Verständnis solcher Nanomaschinen könnte eines Tages dazu führen, die Strategien der Natur auch in der Nanotechnologie nutzbar zu machen.

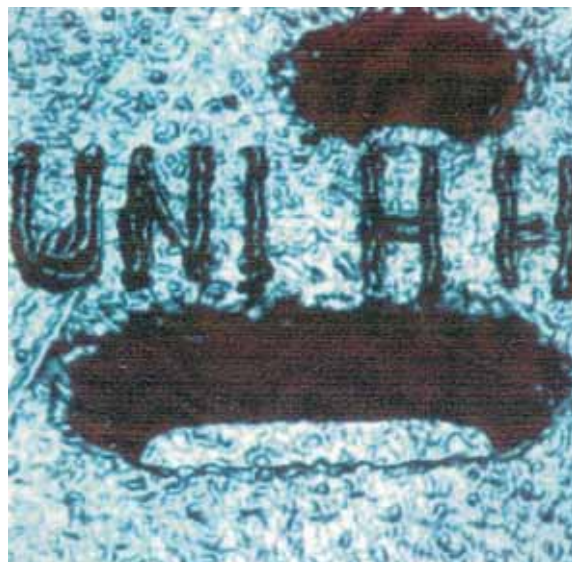


Die Spitze eines Rasterkraftmikroskops (grauer Keil, oben) wird mit einem Molekül als "Angelhaken" einer Oberfläche angenähert. Die kleinen gelben Hügel sind einzelne Proteinmoleküle eines Proteinkristalls. Sobald der "Angelhaken" eine chemische Bindung mit einem Proteinmolekül eingeht, kann dieses aus der Oberfläche herausgezogen werden. Auf der abgebildeten Oberfläche des Proteinkristalls ist bereits ein solches Loch zu sehen, das ein "herausgeangeltes" Molekül hinterlassen hat.

Mit "spitzer Feder" schreiben

Rasterkraftmikroskope können auch als eine Art Schreibwerkzeug dienen. Sie können kleinste Strukturen in eine Oberfläche eingravieren.

IBM entwickelt einen Datenspeicher auf der Basis von Rasterkraftmikroskopen: Beim "Millipede" sollen mehr als tausend Sonden gleichzeitig einen Datenspeicher aus Kunststoff beschreiben oder auch auslesen können. Zum Schreiben werden die Sonden erhitzt, so dass sie eine kleine Mulde in den Datenspeicher schmelzen. Zum Lesen der Daten wird ausgenutzt, dass die leicht geheizte Sonde in so einem "Datenloch" schneller Wärme verliert als außerhalb.



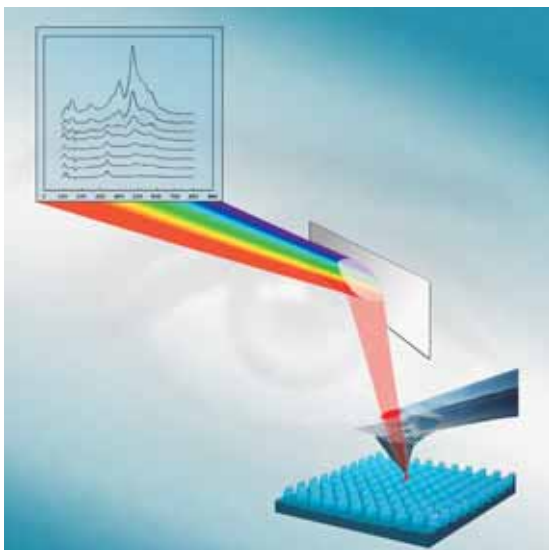
Studenten der Universität Hamburg gravierten die Initialen ihrer Universität zwischen die Datenlöcher einer CD. Die Buchstaben haben eine Höhe von weniger als ein Tausendstel Millimeter.

Licht im Nanokosmos - Nahfeldoptische Methoden

Ein weiterer interessanter Vertreter der Rastersondenmethoden ist die sogenannte Nahfeldoptische Mikroskopie (SNOM, engl.: scanning near-field optical microscopy). Wie oben beschrieben, können optische Mikroskope im Nanokosmos nichts erkennen, weil die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes viel zu groß sind. Das ist aber nur die halbe Wahrheit. Licht verhält sich im sogenannten Nahfeld einer Lichtquelle anders als im Fernfeld, welches wir ausschließlich wahrnehmen. Das Nahfeld ist die Umgebung sehr nah an der Lichtquelle, in einem Abstand, der deutlich kleiner ist als die Lichtwellenlänge.

Es gibt viele Varianten der optischen Nahfeldmikroskopie. Eine Möglichkeit ist, als Sonde eine mit Metall beschichtete Glasfaser zu verwenden. An der äußersten Spitze der Glasfaser ist ein winziges Loch in der Metallschicht, aus dem Licht ein- oder austreten kann. Die Sonde wird schwingend, nach einem ähnlichen Prinzip wie beim "Nicht-Kontakt-Modus" eines Rasterkraftmikroskops, bis auf wenige Nanometer an eine Oberfläche angenähert und auf einem konstanten Abstand zur Probe gehalten. Das von der Probe gestreute Licht wird detektiert.

Eine der Herausforderungen dieser Technik ist, möglichst kleine Lichtquellen herzustellen. So wurde auch schon erfolgreich versucht, ein einzelnes Molekül als Lichtquelle zu verwenden, das am äußersten Ende der Sondenspitze befestigt ist. Obwohl eine atomare Bildauflösung mit nahfeldoptischen Methoden prinzipiell möglich sein sollte, ist das wahre Auflösungsvermögen der bisher erfolgten Messungen nur schwer zu bestimmen. In einigen Experimenten wurden mit dieser Methode Strukturen einer Größe von etwa 2 Nanometer abgebildet.

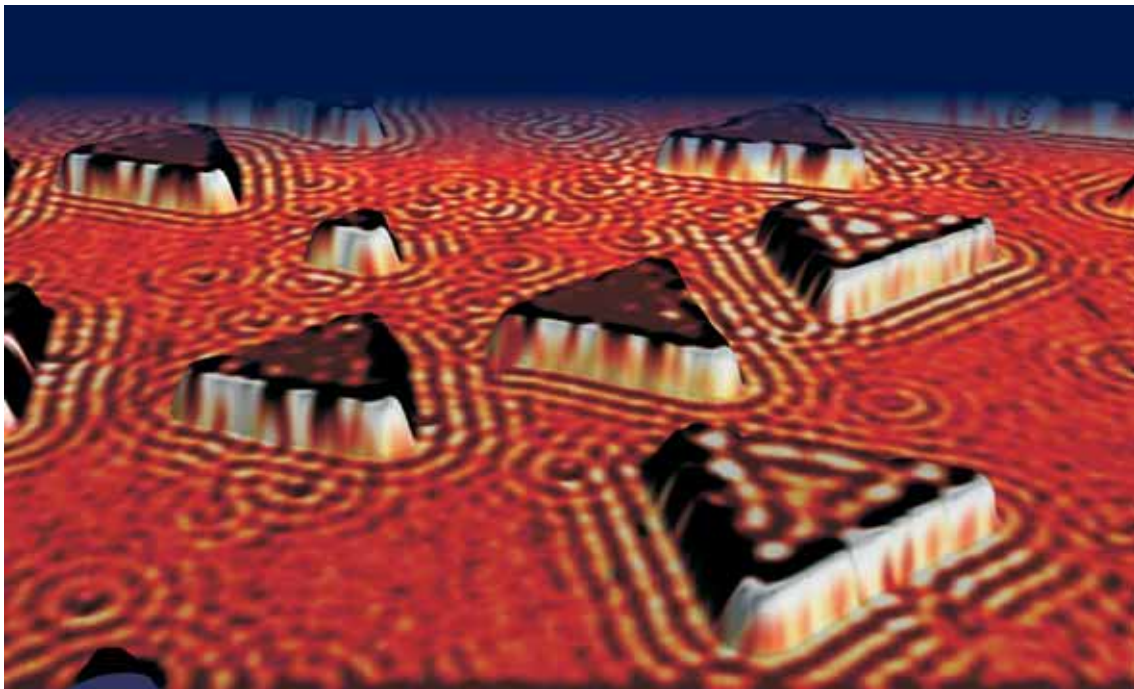


SNOM - Mikroskopie mit dem Nahfeld des sichtbaren Lichtes

Rastersondenmikroskopie - ein Ausblick

Rastersondenmikroskope sind Augen, Tastfinger und zunehmend auch Werkzeuge für den Nanokosmos. Ihre große Stärke ist, dass sie "fühlen können". Sie bilden nicht nur das Oberflächenrelief einer Probe ab, sie ertasten auch diverse Materialeigenschaften zum Teil mit atomarer Präzision. Das macht diese Mikroskopie zu einer spannenden und unverzichtbaren Methode für die verschiedensten Anwendungen. Einige aus der makroskopischen Welt bekannten Phänomene, wie Reibung oder Magnetismus, sind auf atomarer Ebene noch längst nicht verstanden. Aber auch die chemische Bindung oder biologische Prozesse können mit Rastersondenmethoden in einer völlig neuen Qualität erforscht werden. Es gibt schon unzählige Mikroskoptypen, mit entsprechend maßgeschneiderten Sonden zur Messung der verschiedensten Materialeigenschaften und es kommen immer wieder neue Ideen hinzu. Auch in der industriellen Entwicklungsarbeit spielen Rastersondenmethoden eine wachsende Rolle.

Gegenüber anderen Mikroskopieverfahren auf der Nanometer-Skala, wie zum Beispiel der Elektronenmikroskopie, haben Rastersondenmethoden einige Vorteile. Sie arbeiten in einem Energiebereich deutlich unterhalb der Bindungsenergie von Atomen und Molekülen. Daher können an den Proben keine Strahlenschäden entstehen wie sie bei der Elektronen- und der Röntgenmikroskopie auftreten. Weiterhin lassen sie sich unter den verschiedensten Umgebungsbedingungen einsetzen und - sie "sehen" nicht nur, sie können "fühlen".



Kobalt bildet auf der Oberfläche eines Kupferkristalls unter bestimmten Bedingungen Inseln in der Form von gleichseitigen Dreiecken. Die Inseln sind genau zwei Atome hoch und die Kanten etwa 50 Atome (10-20 Nanometer) lang. Die Wellen stammen von Kupferelektronen, die an den Inseln reflektiert werden. Die Aufnahme wurde mit einem Rastertunnelmikroskop erstellt.

Impressum

Wenn Sie mehr Informationen wünschen,
wenden Sie sich bitte an:

Kompetenzzentrum HanseNanoTec

Universität Hamburg
Jungiusstraße 11
20355 Hamburg

Leitung:

Prof. Dr. Roland Wiesendanger
wiesendanger@physnet.uni-hamburg.de

Pressestelle:

Dipl.-Chem. Heiko Fuchs
hfuchs@physnet.uni-hamburg.de
Telefon: 040/4 28 38 - 69 59
Telefax: 040/4 28 38 - 24 09

<http://www.hansenanotec.de>

Konzeption, Text und Gestaltung:

Klaus Schoepe