

Seminarvortrag zum Thema

Rastersondenmikroskopie

von Claudia Pöllmann

18.12.2003

Inhalt

1. Allgemeines und Grundlagen
2. Thermo-Rastertunnelspektroskopie
3. Raster- Thermo- Mikroskopie (SThM)
4. Scanning Ion Conductance Microscopy (SICM)
5. Akustische Rastermikroskopie (SAM)
6. Raster-Hall-Mikroskopie
7. SPM mit Nanotubes
8. Biologische Anwendungen der SPM
9. Manipulatio
- 10.Literatur

1. Allgemeines und Grundlagen

Der Begriff Rastersondenmikroskopie (engl. Scanning Probe Microscopy) hat sich als Sammelbegriff etabliert.

Abkürzungen: SPM bzw. SXM, wobei X als Platzhalter für verschiedene Sondenarten zu verstehen ist.

Die Entwicklung der Rastersondenmikroskopie begann vor etwa 22 Jahren.

1981 gelang es dem Schweizer Heinrich Rohrer und dem Deutschen Gerd Binnig in den Züricher IBM Research Laboratories erstmalig, mit Hilfe des von ihnen entwickelten Rastertunnelmikroskops (STM) Atome auf der Oberfläche verschiedener Metalle sichtbar zu machen. 1986 wurde das AFM entwickelt.

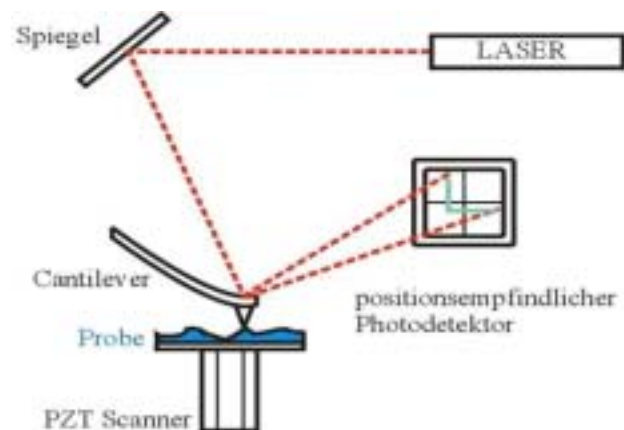
Sowohl Röntgen- als auch Elektronenmikroskopie haben den Nachteil, dass durch die zur Abbildung verwendete Strahlung das Objekt, das betrachtet wird, gleichzeitig verändert wird. Dies geschieht jedoch normalerweise nicht bei der Rastersondenmikroskopie, bei der sich die Sonde in einem sehr geringen Abstand von dem zu untersuchenden Objekt befindet. Um das Bild Punkt für Punkt in unmittelbarer Nähe des Objekts zu erfassen, muss die Sonde so bewegt werden, dass sie der Kontur des Objekts in geringem Abstand folgt. Will man beispielsweise die Oberflächenstruktur bestimmen, so wird man mit dieser Methode die zu untersuchende Fläche Linie für Linie abrastern.

Messprinzip aller Rastersondenmethoden

Rastersondentechniken haben sich in den letzten Jahren als Methoden zur Untersuchung vieler Struktureigenschaften (z.B. Oberfläche, Leitfähigkeit, Magnetismus) etabliert. Sie arbeiten alle nach dem folgenden Grundprinzip: eine kleine Sonde wird zeilenweise über die Oberfläche gerastert, wobei der Abstand zwischen Probe und Sonde durch Messung einer geeigneten Bezugsgröße ermittelt wird. Durch eine Höhenverstellung mittels eines piezoelektrischen Stellelements, die über eine Regelung mit der Bezugsgröße gekoppelt ist, wird die Position der Probe so verändert, dass die Bezugsgröße möglichst einem konstanten Sollwert entspricht und somit der Abstand zwischen Sonde und Probe konstant bleibt. Dadurch wird die Topographie der Probenoberfläche abgebildet und gleichzeitig können je nach Beschaffenheit der Sonde weitere physikalische Größen der Probe bestimmt werden.

Als gemessene Bezugsgröße dient beispielsweise für die zuerst entwickelte Rastertunnelmikroskopie der Tunnelstrom zwischen der Spitze und einer leitenden Probe, welcher sehr empfindlich von der Dicke der Vakuumbarriere abhängt.

Bei nicht leitenden Oberflächen dienen atomare Kräfte, die auf eine scharfe Spitze wirken, als Messgröße. Die Spitze wird üblicherweise an einem flexiblen Federbalken (Cantilever)



befestigt, der durch die kurzreichweitigen abstoßenden bzw. anziehenden Kräfte, die auf die Sonde wirken, eine Verbiegung erfährt. Mit Hilfe eines Laserstrahls, der von der Oberseite des Cantilevers reflektiert wird und anschließend auf einen Photodetektor trifft, wird die Verbiegung ausgewertet.

Empfindlicher und schonender als in diesem statischen, Kontakt-Modus genannten Verfahren, können atomare Kräfte im dynamischen Modus gemessen werden, bei dem die Änderung der Amplitude bzw. der Phase eines in Resonanz schwingenden Cantilevers gemessen wird (intermittant-contact mode oder tapping mode). Die Schwingungsamplitude ist so groß, dass sie sowohl den Bereich der anziehenden Van- der- Waals- Kräfte als auch den Bereich der Coulomb- Abstoßung durchläuft. Die Dämpfung der Schwingung kommt damit durch das "Auftippen" der Spitze auf die Oberfläche zustande.

Neben der Topographie der Oberfläche können mit geeigneten Sonden eine Reihe weiterer Eigenschaften gemessen werden. So detektiert beispielsweise im Magnetkraftmikroskop eine magnetisch beschichtete Spitze Kräfte, die durch Streufelder an der Oberfläche erzeugt werden.

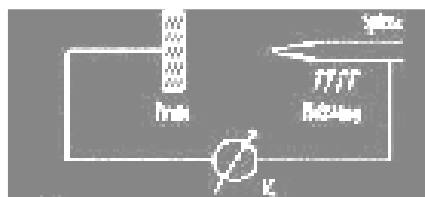
2. Thermo-Rastertunnelspektroskopie

Mit der Technik der Rastersondenmikroskopie lassen sich neben der Ermittlung der Oberflächenstruktur noch andere Untersuchungen durchführen.

Beim STM kann beispielsweise der Tunnelstrom als Funktion der angelegten Spannung gemessen werden (Tunnelspektroskopie). Daraus erhält man Information über die elektronischen Zustände, die an dem Tunnelprozess beteiligt sind.

Ein Beispiel hierfür ist die Thermo-Rastertunnelspektroskopie, bei der durch Wärme oder Kälte eine Temperaturdifferenz zwischen Spitze und Probe erzeugt wird und die sich daraus ergebende Spannung gemessen wird.

Die Anordnung kann mit einem konventionellen Thermoelement verglichen werden, bei dem zwei verschiedene Metalle in Kontakt gebracht werden und die Verbindungsstelle relativ zu den anderen Anschlüssen geheizt oder gekühlt wird. Man beobachtet i. d. R. eine Thermospannung die proportional zur Temperaturdifferenz ist mit einem für die bei Probe und Spitze verwendeten Materialien charakteristischen Proportionalitätsfaktor (Wärmekapazität).



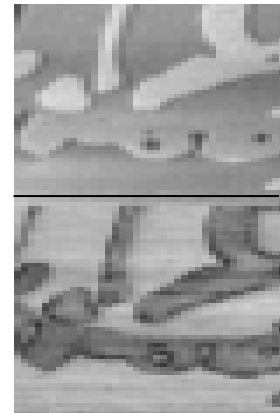
Bei der Thermo-Rastertunnelspektroskopie zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie beim Thermoelement. Auch hier ergibt sich ohne äußeren Strom eine elektrische Spannung, die proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Spitze und Probe ist (abhängig von der Wärmekapazität der unter der geheizten bzw. gekühlten Spitze befindlichen Atome). Ist die Probe aus verschiedenen chemischen Elementen zusammengesetzt, so ergibt sich ein Kontrast zwischen den verschiedenen Materialien. So kann mit der Thermo-Rastertunnelspektroskopie nicht nur die Oberflächenstruktur, sondern simultan auch die Verteilung verschiedener chemischer Elemente analysiert werden.

Als Beispiel für einen Materialkontrast zeigt das untere Bild die Messung an einer einkristallinen Goldstrukturoberfläche die zusätzlich zu einem Drittel mit einer Atomlage Silberatome bedeckt wurde.

Oberes Bild : nur Oberflächenstruktur

Unteres Bild :

Position der Ag- Atome durch simultanes Betrachten beider Bilder zu erkennen, da bekannt ist, dass Ag bei Thermo-Rastertunnelspektroskopie eine deutlich negativere Thermospannung als Gold aufweist (in entsprechenden Aufnahmen Silber dunkler eingefärbt als Umgebung).



3. Raster- Thermo- Mikroskop (SThM)

Gewöhnliche SThMs benutzen einen sehr kleinen thermischen Widerstand, der am Ende der Sonde angebracht ist. Wenn ein kleiner Strom den Widerstand passiert, und der Widerstand gemessen wird, während die Spitze über die Probe gescannt wird, wird die Temperatur-Landschaft der Probe aufgezeichnet.

Wenn andererseits ein hoher Strom den Widerstand passiert, und die Widerstandstemperatur signifikant oberhalb der der Probe liegt, detektiert die Spitze lokale Unterschiede der thermischen Leitfähigkeit der Probe. Bei der letzteren Vorgehensweise ist die thermische Leitfähigkeit der Probe, die an der Oberfläche präsentiert wird, eine Überlagerung aller thermischen Leitfähigkeiten innerhalb der Probe. Änderungen in der Zusammensetzung unterhalb der Probenoberfläche ergeben daher ein Muster auf der thermischen Karte. Die Möglichkeit, Strukturen unterhalb der Oberfläche darzustellen ist auf vielen Feldern der Mikroskopie wünschenswert, aber v. a. ist es wichtig in der Halbleiterindustrie.

Siliziumnitrid-Pyramide

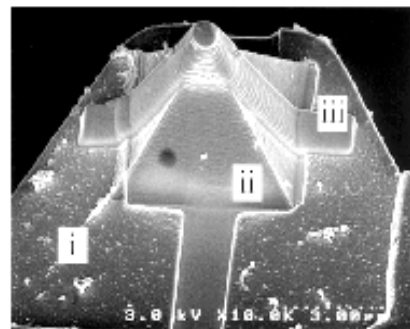
Pt-Streifen (1 μ m breit, 6 μ m lang, 0,25 μ m dick) mit 1-2 kOhm Widerstand überbrückt 2 Al- Kontakte direkt über die Spitze (\varnothing ~750 nm).

Anwendungen

Messungen mit dieser Sonde wurden bei Raumtemperatur an Luft durchgeführt, wobei ein Gleichstrom von etwa 400 μ A verwendet wurde um die Sonde zu heizen.

Eine Standardprobe, die aus drei 1 μ m breiten Metalldrähten besteht, deren Enden mit Siliziumoxid (~2 μ m dick) abgeschlossen wurden, wurde zur Analyse ausgewählt.

AFM (tapping mode) und SEM zeigten das erste Bild; kein topographischer Hinweis auf die Drähte.



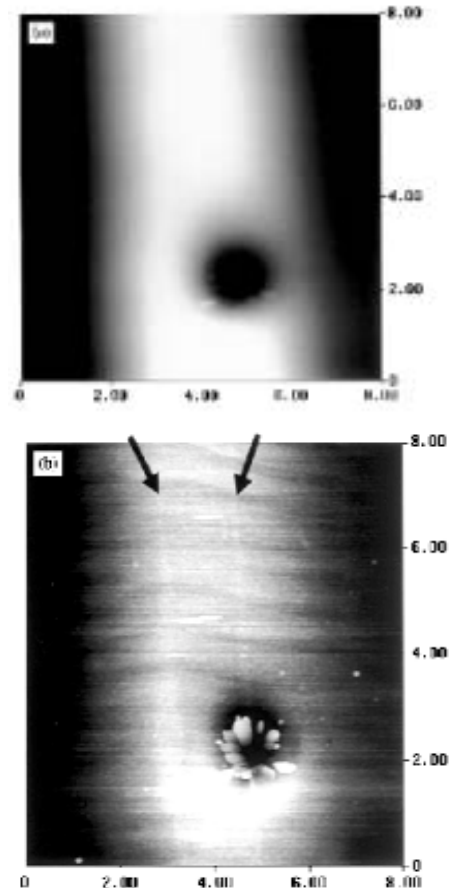
1. Bild

Bei Wachsen der Oxidschicht wurde beachtet, dass sich Lücken zwischen den Drähten bilden, von denen erwartet wurde, dass sie lokal die thermische Leitfähigkeit zwischen Sonde und Probe reduzieren.

Da ein anfänglicher Scan der Oberfläche mit der Thermo-Spitze keine Anzeichen für Lücken unterhalb der Oberfläche aufwies, wurden vertikale Gräben ($20 \times 20 \mu\text{m}$ breit) mit Tiefen von $0,5$ bis $2 \mu\text{m}$ in die Probenoberfläche oberhalb der Drähte eingefräst.

Das zweite Bild ($8 \times 8 \mu\text{m}^2$) zeigt die topographische Abbildung, das dritte die thermische Karte der Probe in einem Graben mit der Tiefe von $\sim 1,7 \mu\text{m}$. Der Graben erscheint relativ flach, abgesehen von einer Grube am rechten unteren Ende der Abbildung.

Das dritte Bild zeigt zwei feine Linien die parallel zu den unter der Oberfläche gelegenen Drähten liegen, die aber im oberen topographischen Bild nicht zu sehen sind. Die Position des Linienpaares korrespondiert zu den Lücken zwischen den Drähten, und der Kontrast entsteht durch die unterschiedliche Leitfähigkeit des Metalls und der Lücken.



4. Scanning ion-conductance microscopy

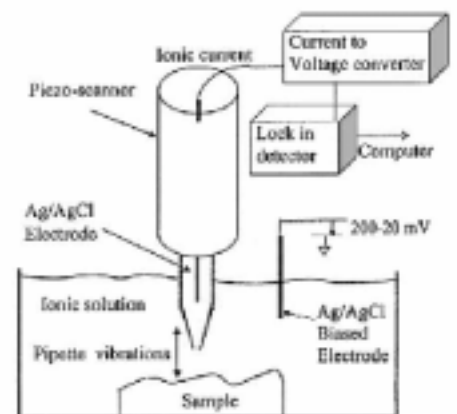
Es besteht großes Interesse daran, mit einem SPM glatte Oberflächen in Flüssigkeiten zu untersuchen um biologische Strukturen unter nahezu natürlichen Bedingungen zu beobachten.

Die Sonde des SCIM ist eine mit Elektrolyten gefüllte Pipette, die den Fluss der durch die Pipettenöffnung (kleiner als 100nm) ausfließenden Ionen misst. Da dieser Strom abhängig vom Abstand der Spitze zur Probe ist und eine teilweise Stockung des Ionenflusses auf die Probenoberfläche zurückzuführen ist, kann die Topographie der Probe reproduziert werden; im Normalfall kommt die Sonde nicht in Kontakt mit der Oberfläche.

Da jedoch die Abhängigkeit des Ionen- Stroms vom Abstand Spitze-Probe nicht sehr stark ist, kann die Spitze während einer Routinemessung gegen eine unebene Oberfläche gefahren werden, und somit in die Brüche gehen. Daher wurde der Arbeitsabstand von der Probenoberfläche verhältnismäßig groß gewählt. Dies jedoch führt zu einem beträchtlichen Abfall der Sensitivität und der Auflösung, da die effektive Größe der Probe auch relativ zum Abstand abnimmt.

Eine neue Technik (2001), die signifikant die Sensitivität des Ionen- Stroms in Bezug auf den Spitze-Proben Abstand ansteigen lässt, ist einen Ionen- Wechselstrom zu verwenden.

Ein Lock-in Verstärker wird verwendet, um Änderungen der Wechselstromamplitude zu detektieren, welche dann den Rückkopplungskreis kontrollieren.



Dies ist eine viel sensitivere Methode als die auf Ionen- Gleichstrom basierende, und sie erlaubt der Sonde, in einem Abstand von nur wenigen nm zu arbeiten.

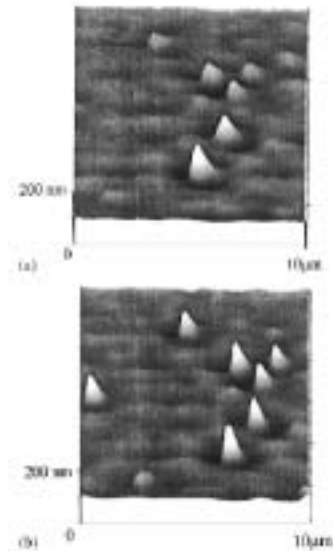
Untersuchung von Polystyren-Microkugeln ($\varnothing=300\text{nm}$), die auf einer Glasoberfläche sitzen (Amplitude der Sondenschwingungen=30nm, 8kHz).

Spitze- Proben Abstand für

Bild (a) 150nm

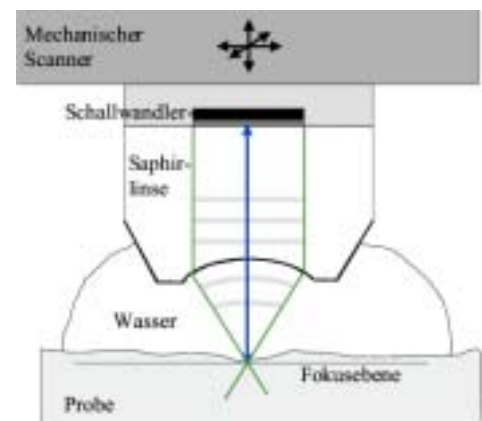
Bild (b) 70nm.

→ in Bild (b) Auflösung und Kontrast gestiegen



5. Akustische Rastermikroskopie (SAM)

Bei der akustischen Rastermikroskopie entsteht der Bildkontrast durch lokale Unterschiede der akustischen Impedanz. In den 70er Jahren wurde das erste Ultraschallmikroskop gebaut, das aus zwei konfokal angeordneten akustischen Linsen besteht, in deren gemeinsamen Brennpunkt sich die Probe befindet. Je höher die Ultraschallfrequenz, desto größer ist die laterale Auflösung und umso geringer die Eindringtiefe. Die hochauflösende SAM in Transmission eignet sich nicht für die Untersuchung dickerer Objekte, da die Abschwächung der Ultraschallstrahlen zu groß ist. Dies führte zur Entwicklung der SAM in Reflexion. Das SAM in Reflexion zur Untersuchung von Probenoberflächen und oberflächennahen inneren Strukturen hat Anwendung in den Materialwissenschaften, der Biologie, der Medizin, und der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung gefunden.



Im Puls-Echo- Verfahren wird die Probe durch eine stark fokussierende akustische Linse mit kurzen Impulsen bestrahlt. Dafür erzeugt ein Schallwandler mit dem umgekehrten piezoelektrischen Effekt aus einer hochfrequenten Wechselspannung eine mechanische Schwingung, die annähernd ebene Schallwellen in axialer Richtung in die Saphirlinse sendet. Der Schallwandler ist elektrisch an das HF- Sende- und Empfangsteil angeschlossen. Dieses Teil überträgt für die gewünschte Frequenz ein Maximum an elektrischer Energie auf den Wandler. Ein elektrischer Puls löst eine akustische Welle aus, welche die Linse durchläuft, am Untersuchungsobjekt reflektiert und nach durchlaufen der Linse im Wandler wiederum in einen elektrischen Impuls umgewandelt wird. Die Linse des SAM i.R. arbeitet gleichzeitig als Ultraschallsender und -empfänger. Sie besteht z.B. aus einem Saphirkristall mit geringer Dämpfung in der Grundform eines Zylinders, dessen Achse parallel zur Zylinderachse verläuft. Eine konkave Kalotte bildet die brechende Fläche der Linse. Die Linsenkonkavität

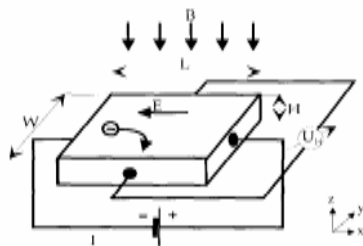
fokussiert die vom Wandler ausgesandten Wellen beim Übertritt in das Kopplungsmedium (meist Wasser) im Richtungsverlauf des Krümmungsradius. Der Impedanzunterschied zwischen Saphir und dem Kopplungsmedium Wasser ist sehr hoch, wodurch die Schallwellentransmission an der Saphir-Wasser-Grenzschicht mit ca. 3% sehr gering ausfällt. Diese akustische Fehlanpassung kann mit einer dritten Schicht zwischen den beiden Medien verringert werden. Verwendung finden Entspiegelungsschichten u. a. aus SiO₂ oder Kalkglas. Die von der Probe reflektierten Echos werden von dem gleichen Wandler empfangen und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Der Schallwandler befindet sich auf der Rückseite des Saphirkörpers. Die kurze Impulsdauer erlaubt die Trennung des gesendeten und des reflektierten Signals. Um die an den Grenzflächen entstandenen Echosignale von den von der Probe ausgesandten Signalen zu trennen, wird die Empfangszeit durch ein Zeitfenster begrenzt.

Die Helligkeitsintensität des Rasterbildes ist proportional zur Höhe des elektrischen Eingangssignals der reflektierten Schallwelle und hängt von dem Reflexionskoeffizienten R der Probe an der gescannten Stelle ab.

6. Raster-Hall-Mikroskopie

Bereits in früheren Jahren wurden Hallsonden mit Ausdehnungen von mehreren Mikrometern benutzt, um ortsaufgelöst magnetische Felder zu messen. Die Vorteile von Hallsonden zur Streufeldmessung gegenüber der Kraftmessung wie beim MFM liegen in der wechselwirkungsfreien Messung der Proben. Das Eigenfeld der stromdurchflossenen Hallsonde kann bei der Untersuchung von weichmagnetischen Proben vernachlässigt werden. Erstes Raster-Hall-Mikroskop mit sub- μm -Auflösung wurde 1992 von Chang et al. vorgestellt. Hier wurde ein Hallkreuz mit 0,5 μm breiten Armen aus GaAs-AlGaAs-2DEG-Material verwendet, und mittels einer Tunnelstromabstandsregelung in konstantem Abstand über die Probe gerastert. Die Empfindlichkeit betrug $36\mu\text{T}/(\text{Hz})^{1/2}$ bei 4,2K. Bei einem ähnlichen Aufbau 1996 konnte von Oral et al. eine laterale Auflösung von 0,85 μm , eine Empfindlichkeit von $29\text{nT}/(\text{Hz})^{1/2}$ bei 77K und $3,8\mu\text{T}/(\text{Hz})^{1/2}$ bei 300K erreicht werden.

Halleffekt in Halbleitern



Für das Hall-Feld E_H ergibt sich für $j=0$, d.h. in großer Entfernung von den Stromkontakten

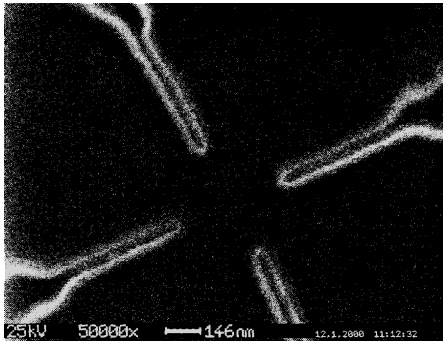
$$E_H \equiv E_y = B j_x / (n_s e),$$

wobei das Längsfeld E_x von B unabhängig

und $n_s =$ Ladungsträgerdichte ist.

Gemessen wird die Hallspannung wie in der Abbildung dargestellt, in einer dünnen Schicht, an der die Kontakte kreuzförmig angeordnet sind. Die Messung findet bei konstantem Strom I statt, die gemessene Hallspannung beträgt dann $U_H = (n_s e)^{-1} B I$. Um möglichst kleine Magnetfelder messen zu können und eine gute Auflösung zu erreichen, soll der Hallkoeffizient $R_H = (n_s e)^{-1}$ möglichst groß und der Widerstand klein sein, was sich besonders gut in Halbleiterheterostrukturen, die ein zweidimensionales Elektronengas mit geringer Ladungsträgerdichte ausbilden, realisieren lässt.

GaAs/AlGaAs sind derartige Struktur-Systeme, genauso wie InAs und InAlAs und werden daher auch hauptsächlich als Ausgangsmaterial für Hallsonden verwendet.



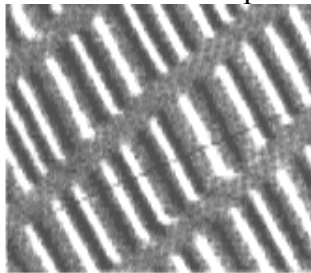
REM- Aufnahme des zentralen Bereichs der Hallsonde nach der Einengung (zur höheren Auflösung), die nominale Kanalbreite betrug hier 300 nm, die Linienbreite beträgt ca. 100nm, dadurch verringert sich die tatsächliche physikalische Kanalbreite auf ca. 200nm.

Dieses klassische Drude-Modell gilt, solange keine quantenmechanischen Einflüsse wirksam sind. Wenn aber die freie Weglänge der Elektronen größer ist, als die Abmessungen der Probe, verliert es seine Gültigkeit. Der Transport verläuft dann nicht mehr diffusiv, sondern ballistisch, und Ladungsträger bewegen sich ohne Magnetfeld geradlinig durch die Probe, bis sie an den Rändern reflektiert werden.

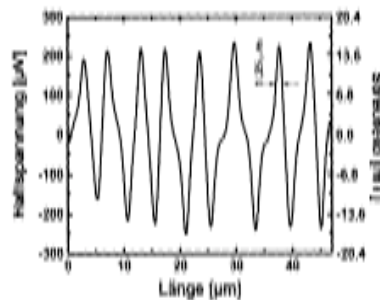
Im ballistischen Transport-Regime kommt die Geometrie der Probe mit ins Spiel, denn raue Ränder, sowie abgerundete Ecken können die Bahnen der Ladungsträger entscheidend beeinflussen und damit die lineare Abhängigkeit der Hallspannung vom Magnetfeld zerstören.

Beim Einsatz von Hallsonden zur Messung magnetischer Felder wird üblicherweise davon ausgegangen, dass Feldänderungen über die Größe der Hallsonde klein sind und somit das Magnetfeld im Bereich der Hallsonde homogen ist. Dies ist selbst bei Hallsonden mit Ausdehnungen im sub- μm Bereich nicht der Fall, wenn damit Streufelder von Nanostrukturen untersucht werden, die sich im Bereich weniger Nanometer stark ändern.

Die gemessene Hallspannung entspricht, zumindest bei kleinen Magnetfeldern, einem über die aktive Fläche der Hallsonde gemittelten Magnetfeldwert. Wie diese aktive Fläche und die Gewichtung der Mittelung aussieht, hängt stark davon ab, ob der Strom durch diffusen oder ballistischen Transport zustande kommt.



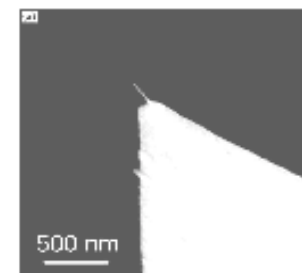
$48\mu\text{m}^2$



Raster-Hall-Mikroskopie-Aufnahme einer Festplatte mit einer 400nm Hallsonde

7. SPM mit Nanotube- Sonden und Nanotube-Pinzetten

Kohlenstoff Nanoröhrchen haben aufgrund ihrer einzigartigen Strukturen und Eigenschaften große Aufmerksamkeit erregt als ideale Sonden für ein SPM. Konventionelle SPM- Sonden bestehen aus Si oder Si_3N_4 und haben die Form einer Pyramide oder eines Kegels mit einem Spitzenradius von 10nm oder oft größer.



Die Vorteile der Nanoröhrchen- Sonden:

1. Kleiner Spitzenradius (Minimum ist $\sim 0,5\text{nm}$) steigert die Auflösung
2. Hohe Seitenverhältnisse von $10\sim 10^3$ ergeben die Möglichkeit abrupte Höhenunterschiede mit hoher Genauigkeit zu messen.
3. Spitzen aus Nanoröhrchen können abgeschnitten werden und chemisch zu einer Sonde für ein Chemisches Kraft Mikroskop umfunktionalisiert werden
4. Nanoröhrchen, deren Spitze ein kleines Stück magnetisches Metall beinhaltet, können als Sonde für ein MFM verwendet werden.
5. Nanoröhrchen sind mechanisch flexibel und können ohne Schaden elastisch verbogen werden. \rightarrow keine Beschädigung organischer und biologischer Proben
6. Beide Röhrchenenden sind verschlossen und damit chemisch und physikalisch sehr stabil.

8. Biologische Anwendungen

Höhenbestimmung der DNA mit einem AFM (April 2002)

Einige Jahre nach der Erfindung des AFM (1986) wurden viel versprechende Methoden zur Abbildung von Biomolekülen, wie z.B. DNA an Luft oder Wasser vorgestellt. Nachdem 1994 der tapping-mode entwickelt wurde, stieg die Auflösung und einige exzellente Ergebnisse wurden veröffentlicht. Jedoch war die gemessene Höhe der DNA immer geringer als die durch theoretische Rechnungen vorhergesagten 2nm .

In den ersten Experimenten wurde diese Diskrepanz einer Verformung der Probe durch Wechselwirkungen mit der Spitze, der Dehydrierung der Moleküle und auch Salzablagerungen zugeschrieben. In all den daraus hervorgegangenen Artikeln war die gemessene Höhe der DNA immer geringer als 1nm , also über die Hälfte kleiner als theoretisch vorhergesagt wurde.

Bei den neueren Messungen wurden 2 Methoden verwendet:

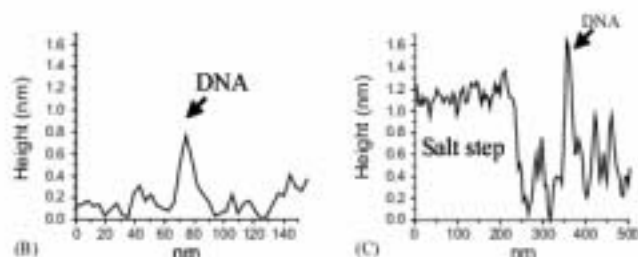
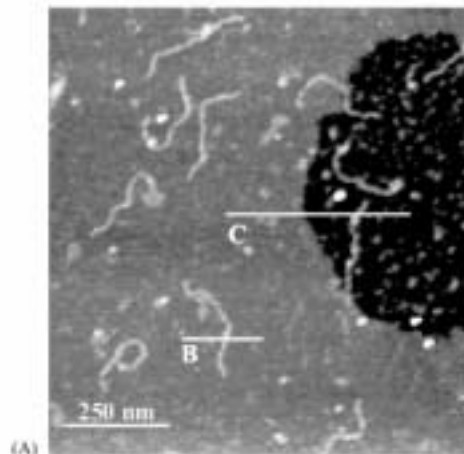
- non-contact tapping mode an Luft ;
Cantilever schwingt nahe seiner
Resonanzfrequenz (75-80 kHz)

AFM non-contact-tapping mode :

(A) DNA an Luft ($1\mu\text{m}^2$)

(B) DNA komplett in Salzlösung
($0,7 \pm 0,2\text{nm}$)

(C) DNA nur teilweise in Salzlösung
($1,5 \pm 0,2\text{nm}$)

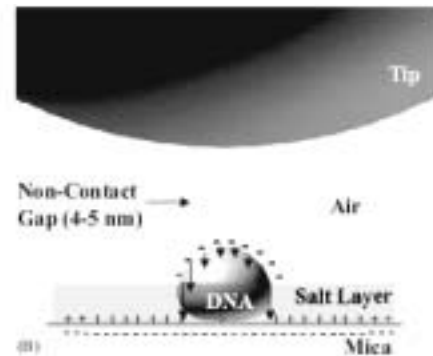


- Jumping mode an wässrigen Lösungen ; ergibt ein Kraft- Abstand- Diagramm (Kontakt-Zeit und Kraft mit hoher Genauigkeit bestimmbar)

Die DNA Moleküle wurden in Salzlösung eingebettet, welche zwar die gemessene Höhe etwas verfälschte, aber die zu messenden Wechselwirkungen mit der Spitze und die Dehydrierung standen bei diesen Messungen im Vordergrund.

Eine weitere Quelle für Wechselwirkungen der DNA mit dem Substrat sind die elektrostatischen Ladungen. Auf einer Nanometerskala gehört die elektrostatische Wechselwirkung zu den Kräften mit der größten Stärke und auch zu denen der größten Reichweite. Mit einer effektiven Ladungsdichte in einer wässrigen Lösung von einer Elementarladung e^- pro Basenpaar ist die DNA in etwa so stark geladen, wie ein lineares Polymer geladen sein kann.

Elektrostatische Kräfte sind sehr stark in wässrigen Lösungen und halten so Moleküle voneinander fern. Diese elektrostatische Wechselwirkung bindet die Moleküle an das Substrat.



Weitere Biologische Anwendungen des AFM

Das AFM ermöglicht es, auf Oberflächen angebrachte Biomoleküle mit molekularer Auflösung abzubilden und so strukturelle Informationen über einzelne Moleküle oder Anordnungen zu erlangen. Da man sich hier in Dimensionen im Bereich von etwa 1 bis 100nm befindet, ist die Lichtmikroskopie nicht mehr anwendbar (250nm Auflösung) und es muss so auf die Rastermikroskopie zurückgegriffen werden. Mit dem AFM ist man in der Lage, einzelne Biomolekül-Komplexe auseinander zu reißen oder ein einzelnes Molekül durch Anlegen einer äußeren Kraft auseinander zu ziehen. Die Kraftauflösung beim AFM liegt bei wenigen pN und die maximale Kraft bei mehreren nN. Biologische Wechselwirkungen und Bindungen liegen gerade in diesem Bereich; Antikörper bindet mit 50-70 pN an körperfremden Eindringling.

Vergleich: Kraft um ein Reiskorn aufzuheben: 300 μ N

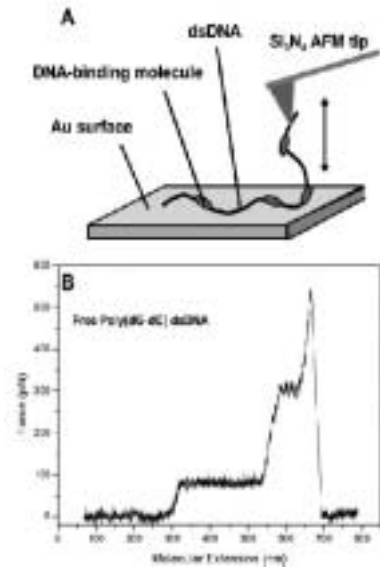
Wie fest bindet ein Biomolekül?

Biomoleküle erkennen mit einer erstaunlichen Präzision bestimmte Gegen-Moleküle und binden sich an sie (und nur sie). Diese Bindungsereignisse können nun ebenfalls mit Hilfe der AFM- Technologie untersucht und qualitativ gemessen werden. So lässt sich etwa die spezifische Bindung von Proteinen an DNA-Moleküle charakterisieren, indem der DNA-Strang an die AFM- Spitze gebunden wird und das Protein auf der Oberfläche fixiert wird. Durch Annähern der Spitze mit der Oberfläche kann das Molekül an das Molekül, welches auf der Oberfläche sitzt, anbinden. Beim mechanischen Zurückziehen der Spitze reißt diese Bindung wieder ab. Aus der Verbiegung des Cantilevers lässt sich diese Kraft berechnen und daraus lassen sich Rückschlüsse auf die molekularen Vorgänge des Bindungsprozesses ziehen.

Wie reagiert ein Molekül, wenn man an ihm zieht?

Ein ähnliches Experiment gibt Aufschluss über Kräfte, die im Innern eines Biomoleküls wirken. Dazu entfaltet man ein einzelnes, zwischen AFM-Spitze und Oberfläche gespanntes Molekül, indem man die Spitze langsam zurückzieht. Die Kräfte, die das Molekül der von außen angelegten Spannung entgegensetzt, lassen sich dann mit Wechselwirkungen im Inneren des Moleküls korrelieren.

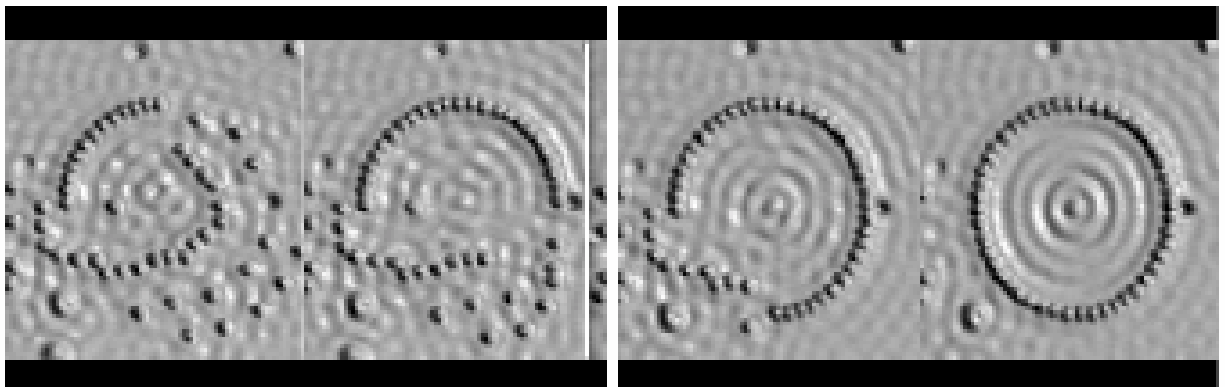
Bei einem fadenförmigen Molekül würde man erst einmal in Analogie zu einer Feder erwarten, dass die Kraft mit zunehmender Ausdehnung steigt. Betrachtet man nun z.B. die DNA, so lässt sich ein Bereich identifizieren, in dem das Molekül um etwa 70% verlängert wird, ohne der äußeren Spannung eine merkliche Kraft entgegenzusetzen (die Kraft bleibt konstant). Dieser kooperative Effekt lässt sich mit strukturellen Umordnungen der Atome in dem Molekül erklären.



9. Manipulation

Ein Rastersondenmikroskop ermöglicht es durch die Nähe der Oberfläche zur Sonde auch, die Oberfläche zu modifizieren. Normalerweise ist man bemüht die Wechselwirkung der Sonde mit der Probe gering zu halten, damit die Abbildung nicht beeinträchtigt wird.

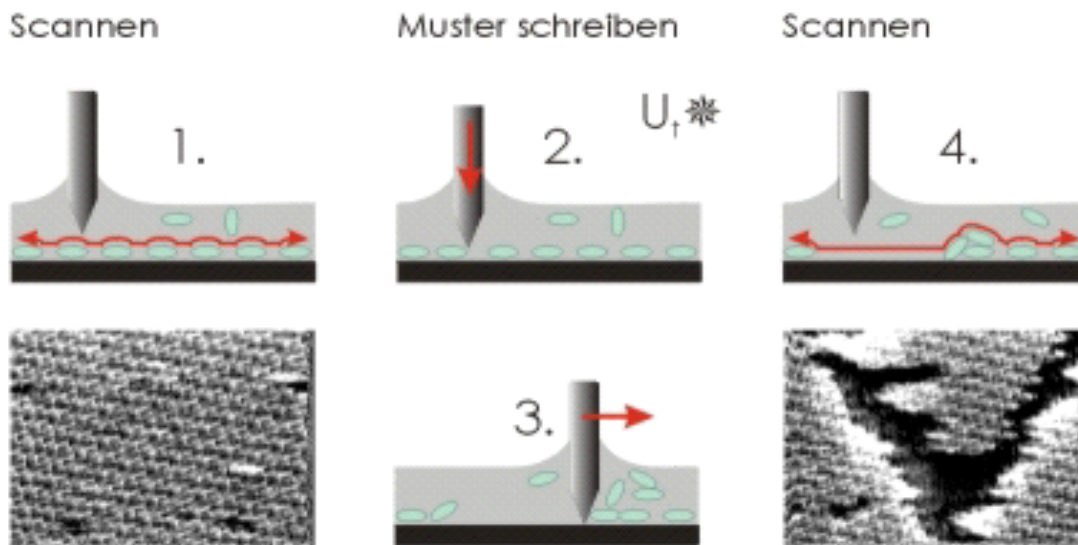
Man kann jedoch durch die Erhöhung des Stroms (STM), bzw. der Kraft (AFM) einzelne Atome oder Moleküle vorübergehend an die Sonde binden, und sie so über die Oberfläche schieben oder ziehen. Die Abbildung zeigt, wie eine kreisförmige Anordnung von 48 Eisenatomen auf einer Kupferoberfläche aufgebaut wird.



Hier wurden zunächst die statisch auf der Oberfläche verteilten Eisenatome mit der Spitze des STM "zusammengesucht" und auf Kreisform gebracht.

Dieses Experiment wurde unter Ultrahochvakuumbedingungen bei -269°C durchgeführt, da die Oberfläche sonst sofort mit anderen Atomen bedeckt sein würde und die einzelnen Eisenatome sich auch so, ohne Wechselwirkung mit der Sonde ständig bewegen würden. Man kann hier die Vorhersage der QM direkt überprüfen: die konzentrischen Kreise im Inneren des letzten Eisenringes sind Materiewellen von Elektronen einer best. Energie.

Schreiben bzw. "Kratzen" mit dem STM



10. Literatur

- Rolf Möller, Einblick in die Materie, Essener Unikate 13/2000
- Robert Ros et al., Einzelne Biomoleküle im Visier, Forschung an der Universität Bielefeld 24/2000
- Thomas Schweinböck, Raster-Hall-Mikroskopie, Universität Regensburg, Dissertation 2000
- G. Mills et al., Detection of subsurface voids using scanning thermal microscopy, Ultramicroscopy 80 (1999) 7-11
- Fernando Moreno-Herrero et al., DNA height in scanning force microscopy, Ultramicroscopy 96 (2003) 167-174
- David Pastré et al., Characterization of AC mode scanning ion-conductance microscopy, Ultramicroscopy 90 (2001) 13-19
- Yoshikazu Nakayama, Scanning probe microscopy installed with nanotube probes and nanotube tweezers, Ultramicroscopy 91 (2002) 49-56
- Silke Gudziol, Ultraschallmikroskopie zur Bestimmung der Verteilung der akustischen Impedanz in Schnitten menschlicher Gehörknöchelchen, Universität Halle Dissertation 2001
- www.ntmdt.ru/scan-gallery/
- www.nano.geo.uni-muenchen.de/external/resea...n/structuring_STM/