

Rastersondenmikroskopie

Laboreinführung im Fachbereich Grundlagen

Prof. Dr. Renate Hiesgen

Renate.Hiesgen@fht-esslingen.de

Tel. (0711) 397-3414

Teil 1: Rastertunnelmikroskopie

(Scanning Tunneling Microscope: **STM**)

Dr. Dirk Eberhardt

Teil 2: Rasterkraftmikroskopie

(Atomic Force Microscope: **AFM**)

Dr. Jürgen Haiber

Fachbereich Grundlagen

Kanalstr. 33

Tel. (0711) 397-3426

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Teil 1: Rastertunnelmikroskopie

- 1.1 Funktionsprinzip
- 1.2 Messen eines Bildes
- 1.3 STM-Spitze
- 1.4 Aufbau des STM
- 1.5 Anwendungsbeispiele
 - 1.5.1 Graphit
 - 1.5.2 Elektronische Eigenschaften
 - 1.5.2.1 Messung von Fotoströmen im Nanometerbereich
 - 1.5.3 Messung in einer Flüssigkeit
 - 1.5.3.1 Messung im Elektrolyten
 - 1.5.4 Spektroskopie
 - 1.5.5 Das STM als Werkzeug in der Nanotechnologie

Teil 2: Rasterkraftmikroskopie

- 2.1 Das Rasterkraftmikroskop im Labor für Technische Physik
- 2.2 Funktionsprinzip der Rasterkraftmikroskopie
- 2.3 Sonden
- 2.4 Anwendungen
 - 2.4.1 Höhenprofile und Rauheitsanalyse
 - 2.4.2 Materialunterscheidung mit dem AFM
- 2.5 Verschiedene Messverfahren
 - 2.5.1. Contact Modus
 - 2.5.2 Non Contact Modus
 - 2.5.3 Pulsed Force Modus

Einleitung

Im Jahre 1982 gelang Binnig und Rohrer zum ersten Mal, die atomare Struktur einer Graphitoberfläche zu messen und das Rastertunnelmikroskop (**s**canning **t**unneling **m**icroscope, **STM**) wurde damit erfunden. Einige Zeit später wurde das Rasterkraftmikroskop (**a**tomic **f**orce **m**icroscope, **AFM**) erfunden, hierbei wird die Oberfläche der Probe mit einer sehr feinen Spitze abgetastet und es können im Gegensatz zum STM, wo ein elektrischer Strom fließen muss, auch nicht leitende Oberflächen dreidimensional abgebildet werden. Das STM und das AFM können dabei nicht nur die Oberflächen abbilden, sondern eignen sich auch, um physikalische (mechanische und elektronische) und chemische Eigenschaften der Probenoberfläche zu messen und als Bild darzustellen. Die Verfahren funktionieren sowohl an Luft, im Vakuum und auch in einer Flüssigkeit und sind daher universell anwendbar. Die Abbildung von feuchten Proben erlaubt sogar die Messung an lebenden Zellen. Allgemein werden diese Messverfahren als *Rastersondenmikroskopie* bezeichnet. Mit einem Rastersondenmikroskop kann man Bilder der Probenoberfläche mit höchster Auflösung ausmessen. Möglich ist die Abbildung von Flächen im Bereich von 0,1 mm bis unter 1 nm Seitenlänge; 1 nm = 1 Nanometer = 10^{-9} m.

Teil 1: Rastertunnelmikroskopie

1.1 Funktionsprinzip

Ein STM besteht im Prinzip aus einer extrem feinen Metallspitze, die sich im Abstand von 0.5 nm bis 5 nm (1 nm = 1 Nanometer = 10^{-9} m) über einer leitfähigen

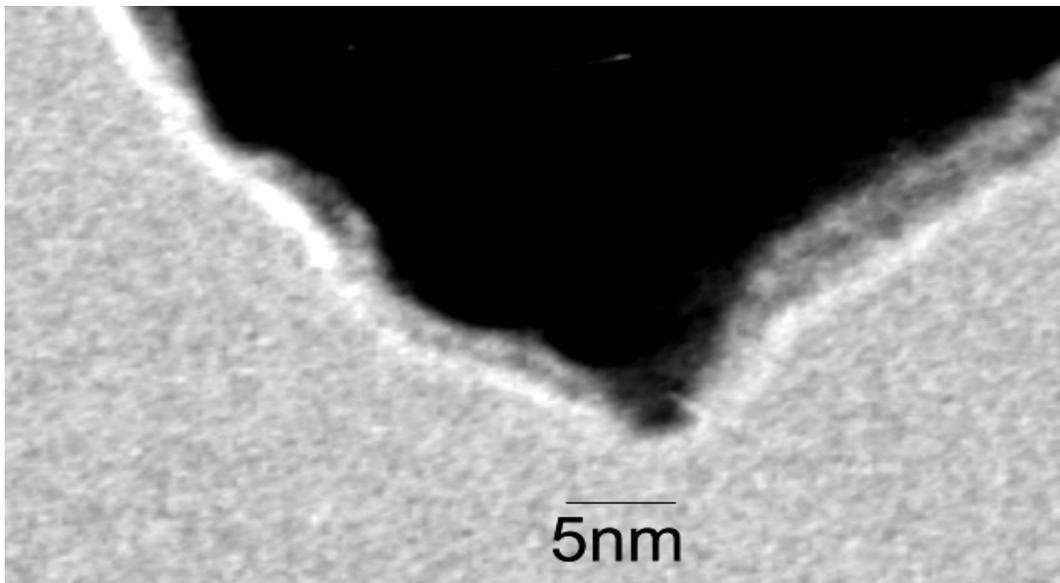


Abb. 1: Abbildung einer Tunnelspitze
Aufnahme eines Transmissions-elektronenmikroskopes

Probenoberfläche befindet. Sie kann durch piezokeramische Elemente in x-, y- und z-Richtung mit sehr großer Genauigkeit bewegt werden. Bei einem so kleinen Abstand fließt nach Anlegen einer kleinen Spannung im Millivoltbereich bereits ohne direkten Kontakt ein Strom zwischen Spitze und Oberfläche: die Elektronen können zwischen Tunnelspitze und Probe tunneln. Dieser Tunnelstrom ist exponentiell vom Abstand abhängig und eine elektronische Regelung, die den Strom konstant hält, hält somit auch den Abstand zwischen Spitze und Probe konstant.

1.2 Messen eines Bildes

Die Spitze kann nun durch die piezokeramischen Elemente zeilenweise über die Probenoberfläche gerastert werden. Wird nun beim Abrastern der Probenoberfläche der Tunnelstrom durch eine entsprechende Nachregelung des Abstandes zwischen Spitze und Probenoberfläche konstant gehalten, so tastet die Spitze das Oberflächenprofil ab. Auf diese Weise kann man ein dreidimensionales Bild der Oberfläche als Datenfile im Computer erhalten. Die dabei mögliche Ortsauflösung beträgt vertikal (in y-Richtung) bis zu 0.001 nm und lateral (in x-Richtung) bis zu 0,1 nm. Dabei ist die Messung der atomaren Struktur der Probenoberfläche möglich und teilweise sogar die Abbildung der inneren Struktur von Molekülen.

Da für die Regelung des Abstandes ein elektrischer Strom fließen muss, ist das STM nur bei elektrisch leitfähigen Proben einsetzbar.

1.3 STM-Spitze

Als STM-Spitze werden typischerweise elektrochemisch geätzte Drähte aus Platin/Iridium-Legierungen benutzt wie auch in Abbildung 1 zu sehen. Sie sind gut leitfähig und sehr hart, so dass die Abnutzung der Spitze sehr klein ist. Beim Tunneln auf rauhen Oberflächen kommt es darauf an, dass die Spitze einen möglichst kleinen vorderen Radius besitzt, damit der Tunnelstrom nur über eine kleine Fläche fließt und damit sie feine Oberflächenstrukturen ausmessen kann. Prinzipiell kann man auf rauhen Oberflächen nur Details messen, die grösser als die Abmessungen der Spitze sind. Nur auf atomar glatten Oberflächen spielt die Form der Spitze praktisch keine Rolle.

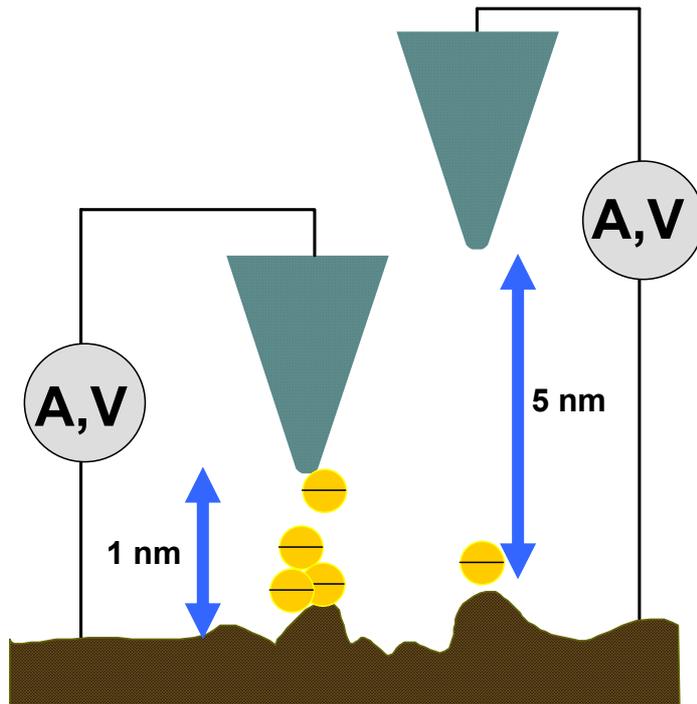


Abb. 2: Schema der Funktionsweise des STM

Linke Seite: bei einem Abstand von ca. 1 nm zwischen Spitze und Oberfläche fließt bei Anlegen einer kleinen Spannung ein Tunnelstrom bereits ohne direkten Kontakt.

Rechte Seite: bei einem Abstand von ca. 5 nm ist der Tunnelstrom, der exponentiell abfällt, bereits vernachlässigbar klein.

1.4 Aufbau des STM

Der gesamte Aufbau des Rastertunnelmikroskopes ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt und umfasst ausser dem Kopf mit der Tunnelspitze und der Probe noch das Datenerfassungssystem. Es besteht außerdem die Möglichkeit zum Arbeiten in Stickstoffatmosphäre und in einer Flüssigkeit.

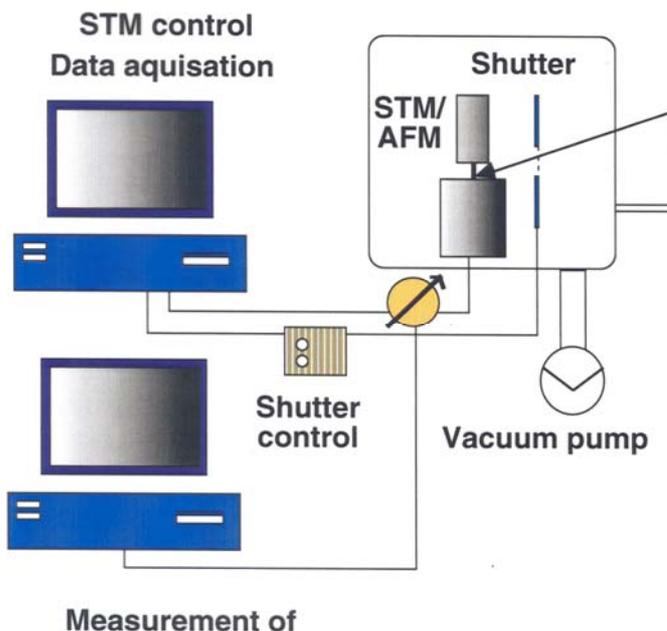


Abb. 3: Experimenteller Aufbau der Apparatur

1.5 Anwendungsbeispiele

1.5.1 Graphit

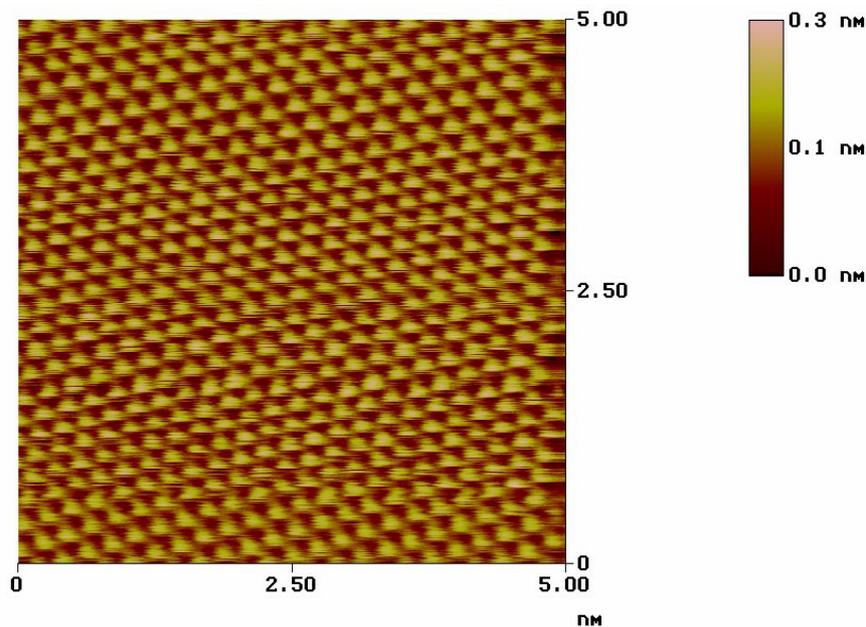


Abb. 4: STM-Bild der atomaren Oberfläche von Graphit, der Abstand der Atome beträgt: 0.25 nm, Seitenlänge 5 nm x 5 nm

1.5.2 Elektronische Eigenschaften

Da das Messsignal ein elektrischer Strom ist, der durch die elektronischen Eigenschaften der Probenoberfläche bestimmt wird, kann man nicht nur die geometrischen Eigenschaften einer Probe untersuchen, sondern auch ihre elektronischen Eigenschaften. Mittlerweile hat man es durch die Variation dieses Prinzips der oberflächennahen Sonde geschafft, auch andere physikalische Eigenschaften von

verschiedenen Probenoberflächen mit nanometrischer oder sogar atomarer Auflösung abzubilden. Beleuchtet man eine Halbleiteroberfläche, so kann man z. B. orts aufgelöste Fotoströme auf Halbleiterproben vermessen (Abb.: 5). Ein solches Projekt wird im Rahmen der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Labor des Fachbereiches Grundlagen bearbeitet.

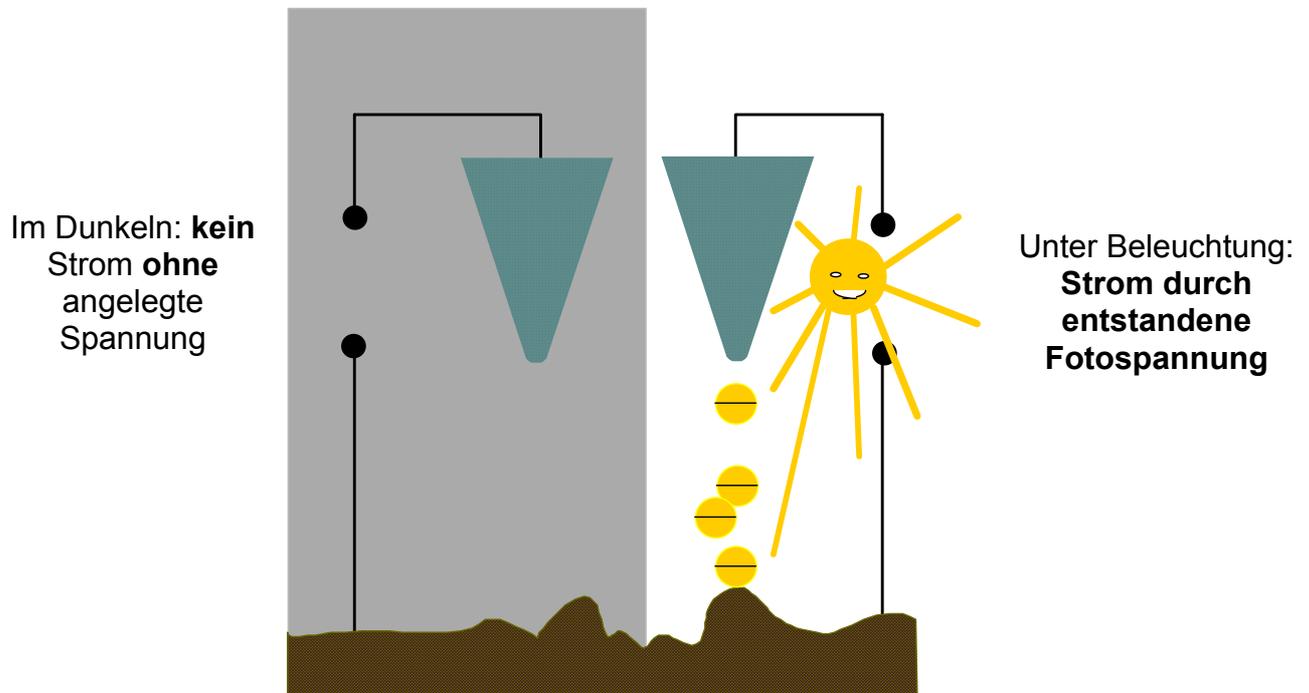


Abb. 5: Schema der Fotostrommessung

Linke Seite: Ohne angelegte Spannung fließt im Dunkeln kein Tunnelstrom

Rechte Seite: Unter Beleuchtung entsteht eine Fotospannung, die einen Tunnelstrom, den Kurzschlussfotostrom des Halbleiters, fließen lässt.

1.5.2.1 Messung von Fotoströmen im Nanometerbereich

Prinzipiell ist aber fast jede physikalische Eigenschaft mittlerweile mit einem Rastersondenmikroskop mit nanometrischer Auflösung messbar und als Bild darstellbar.

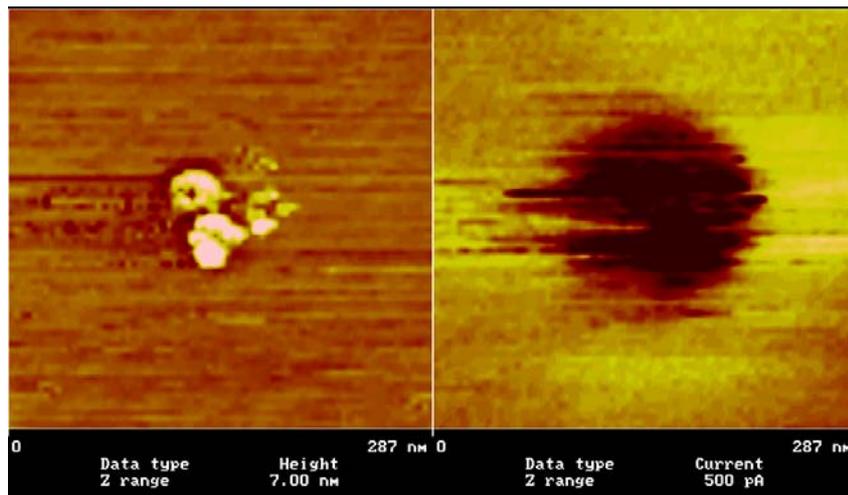


Abb. 6a: Linke Seite:
Abbildung von
Kupferpartikeln auf einer
Halbleiteroberfläche

Abb. 6b: Rechte Seite:
Fotostrom (hell = viel
Strom) um das Metall

1.5.3 Messung in einer Flüssigkeit

Das Tunneln von Elektronen ist im Prinzip unabhängig vom Medium zwischen den beiden leitfähigen Materialien. Daher können STM-Messungen sowohl im Vakuum als auch an Luft und in Flüssigkeit durchgeführt werden. Insbesondere ist es möglich, STM in einer elektrochemischen Zelle unter Kontrolle der elektrischen Potentiale von Tunnelspitze und Probenoberfläche *in-situ* in einem definierten Elektrolyten durchzuführen. Dabei können z. B. lokale Messungen der chemischen Reaktivität untersucht werden. Die Abbildung zeigt als Beispiel die Messung der Reaktivität eines einzelnen Platin-Katalysatorpartikels, wie sie z. B. in Brennstoffzellen eingesetzt werden.

1.5.3.1. Messung im Elektrolyten

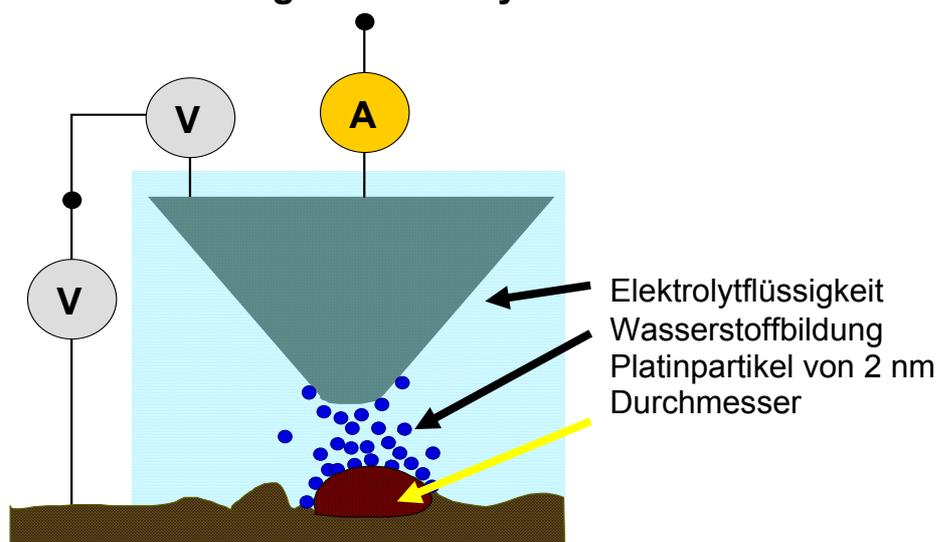


Abb.7: Schema der Nanoreaktivität

An einem Platin-Katalysatorpartikel wird Wasserstoff erzeugt, der an der Spitze wieder oxidiert wird und einen messbaren Strom proportional zur Wasserstoffmenge liefert.

1.5.4 Spektroskopie

Das STM bietet auch die Möglichkeit, an einer festen Probenstelle spektroskopische Messungen durchzuführen. Dabei kann bei einem festen Abstand die Abhängigkeit des Stromes von der Spannung (Strom-Spannungskurve: $I(V)$) oder es kann bei einer festen Spannung die Abhängigkeit des Stromes vom Abstand ($I(s)$) gemessen werden. Damit kann z. B. die lokale Leitfähigkeit gemessen werden .

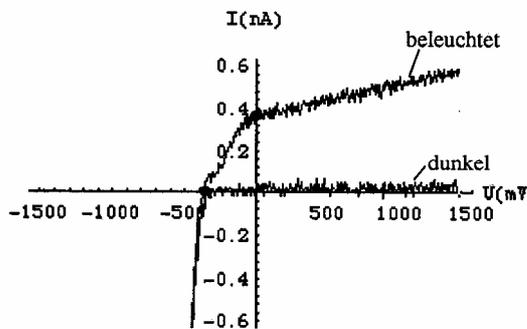


Abb. 8:
Die Strom-Spannungskennlinie einer beleuchteten Halbleiteroberfläche zeigt die Kennlinie einer Nano-Solarzelle: es fließt ein Kurzschluss-Fotostrom von 0.4 nA und man erhält eine Leerlauf-Fotospaltung von -390 mV.

Kurzschluß-Photostrom $I = 0.4 \text{ nA}$
Leerlauf-Photospannung $U = -390 \text{ mV}$

1.5.5 Das STM als Werkzeug in der Nanotechnologie

Außer zu Messungen kann die Spitze des STM auch als Werkzeug genutzt werden. Es können nanometergroße Metallpartikel auf der Oberfläche erzeugt werden und auch nanometerfeine Strukturen in die Probenoberfläche eingeritzt werden und so erste Schritte zu einer Nano-Elektronik und Nano-Lithographie gelegt werden. Abbildung 9 zeigt als Beispiel 4 Palladium-Cluster, die mit der STM-Spitze auf einer palladiumfreien Goldoberfläche deponiert wurden. Ziel ist hier die Messung der Eigenschaften definierter Katalysatorpartikel, wie sie z. B. für Brennstoffzellen eingesetzt werden, aber auch die Erzeugung von nanometrischen Halbleiterstrukturen für die Elektronik.

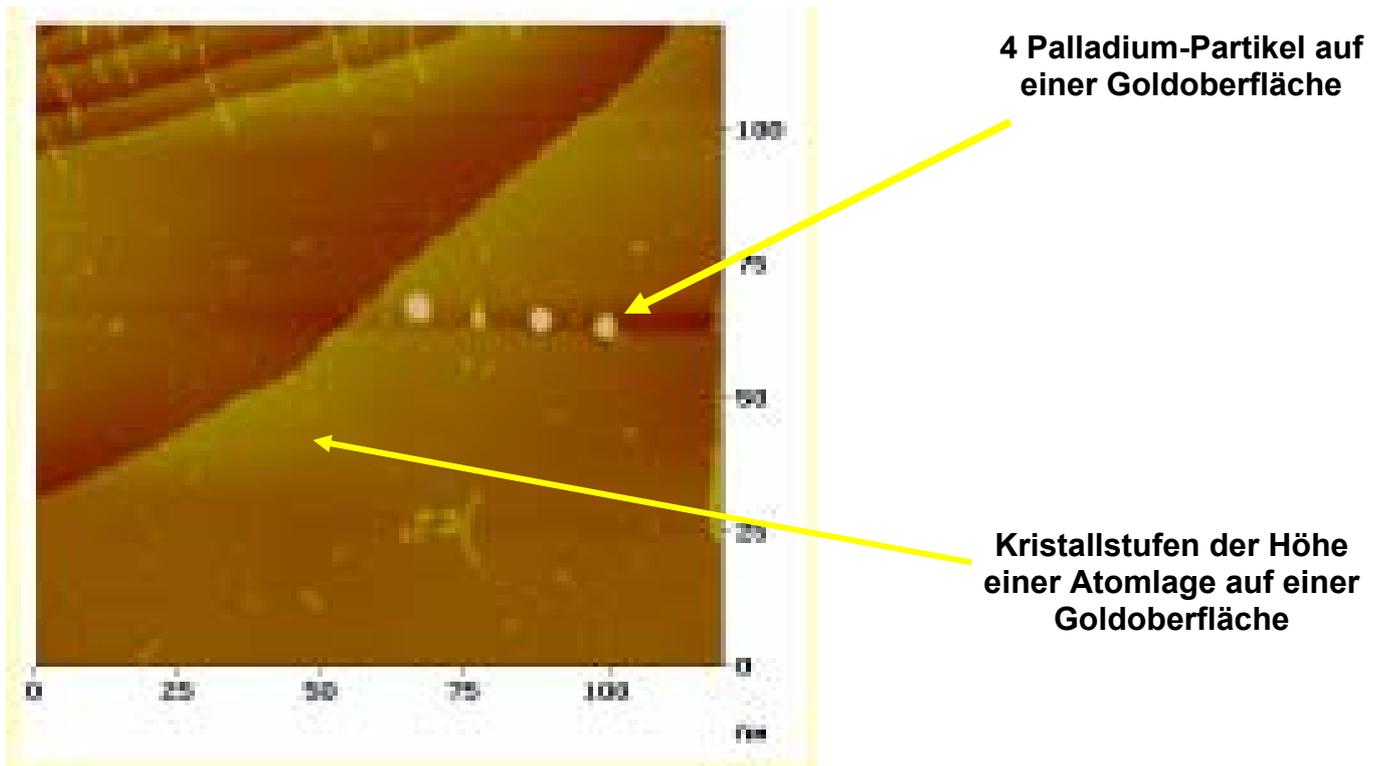


Abb. 9: STM-Bild einer nanostrukturierten Goldoberfläche mit 4 Palladium-Clustern

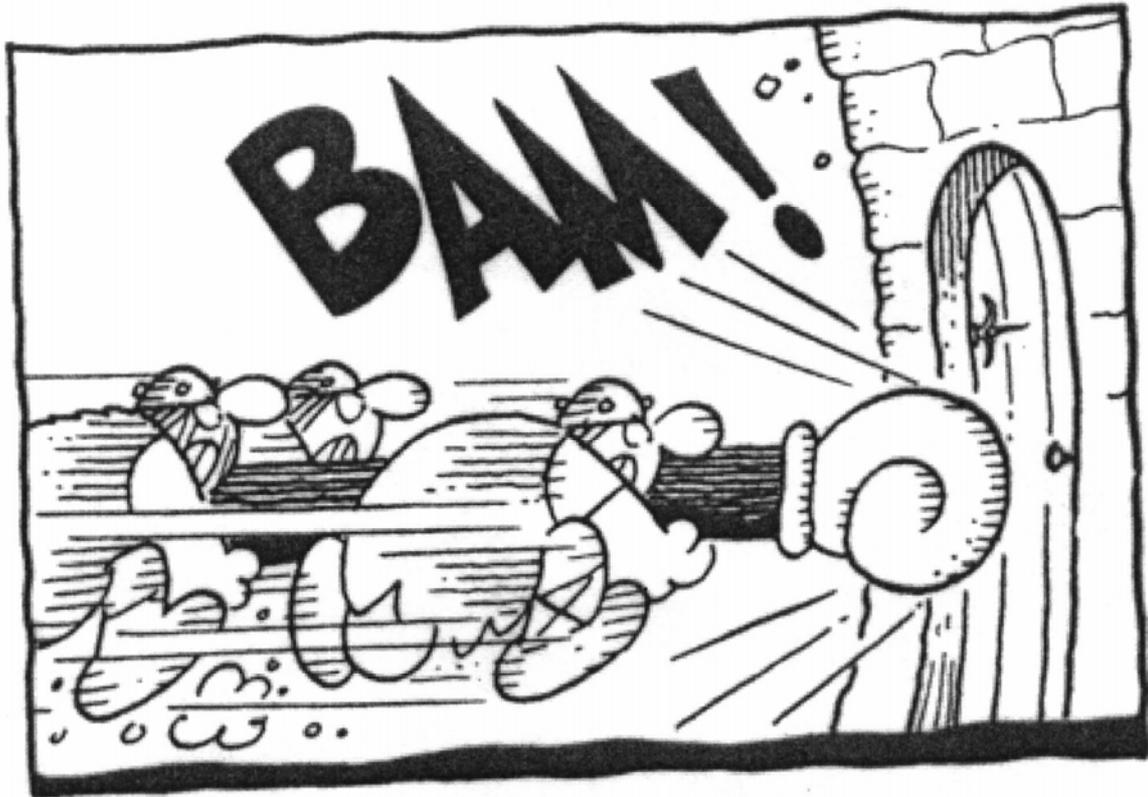
STM-Messung: Jürgen Meier, TUM

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Kraftwechselwirkung zwischen einer Spitze und einer Oberfläche zur Messung der Oberflächentopographie zu benutzen. Dies wird im Rasterkraftmikroskop (**atomic force microscope, AFM**) ausgenutzt, das daher auch nichtleitende Probenoberflächen abbilden kann. Dies stellt für die technische Anwendung einen erheblichen Vorteil da. Allerdings ist die Auflösung meist deutlich schlechter als in einem Rastertunnelmikroskop. Für technische Anwendungen ist dies aber meist nicht so relevant. Daher wird das Rasterkraftmikroskop im Teil 2 genauer behandelt.

Die verschiedenen Kraftwechselwirkungen zwischen der Sondenspitze und der Probenoberfläche erlauben z. B. die Abbildung der räumlichen Verteilung von Reibungskräften, elektrostatischen Kräften und magnetischen Eigenschaften. Das Prinzip der Nahfeldsonden kann auch auf die Optik übertragen werden und erlaubt Abbildungen mit Photonen mit einer Auflösung weit unterhalb der Beugungsbegrenzung von Licht (ca. $0.8 \mu\text{m}$) bis herunter zu einigen 10 nm.

Teil 2: Rasterkraftmikroskopie

Aus den Anfängen der Rasterkraftmikroskopie:
erste Feldversuche zur Entwicklung eines AFM



Die besonderen Vorteile der AFM-Technik sind:

- Keine Materialbeschränkung
- Keine Probenvorbehandlung
- Messung an der Luft
- Auflösung besser als 1 nm, in jeder Raumrichtung
- Dreidimensionale Vermaßung (Höhenprofile, Rauheitsanalyse)
- Optionen zur Messung von speziellen Oberflächeneigenschaften wie Adhäsion und „Härte“

Nachteil der Methode: der messbare Bereich einer Probe ist im Vergleich zu anderen Techniken sehr klein, maximal 150 μm x 150 μm .

2.1 Rasterkraftmikroskop im Labor für Technische Physik

Bei uns an der FHTE wird das Rasterkraftmikroskop Topometrix Explorer eingesetzt. Das Grundgerät selbst ist mit ca. 15 cm Höhe recht handlich. Normalerweise sitzt es auf einem Verstellstuhl, der die Handhabung von Proben bis etwa (3 x 3) cm erlaubt. Prinzipiell kann das Gerät jedoch komplett auf beliebig großflächige Proben gesetzt werden.

Die Einstellung des Lasers wird manuell mittels der Bedienelemente nach Abb. 10 vorgenommen. Zur Steuerung, Bilderfassung und –Bearbeitung sind noch diverse Peripheriegeräte notwendig. Die Messungen laufen computergestützt ab.

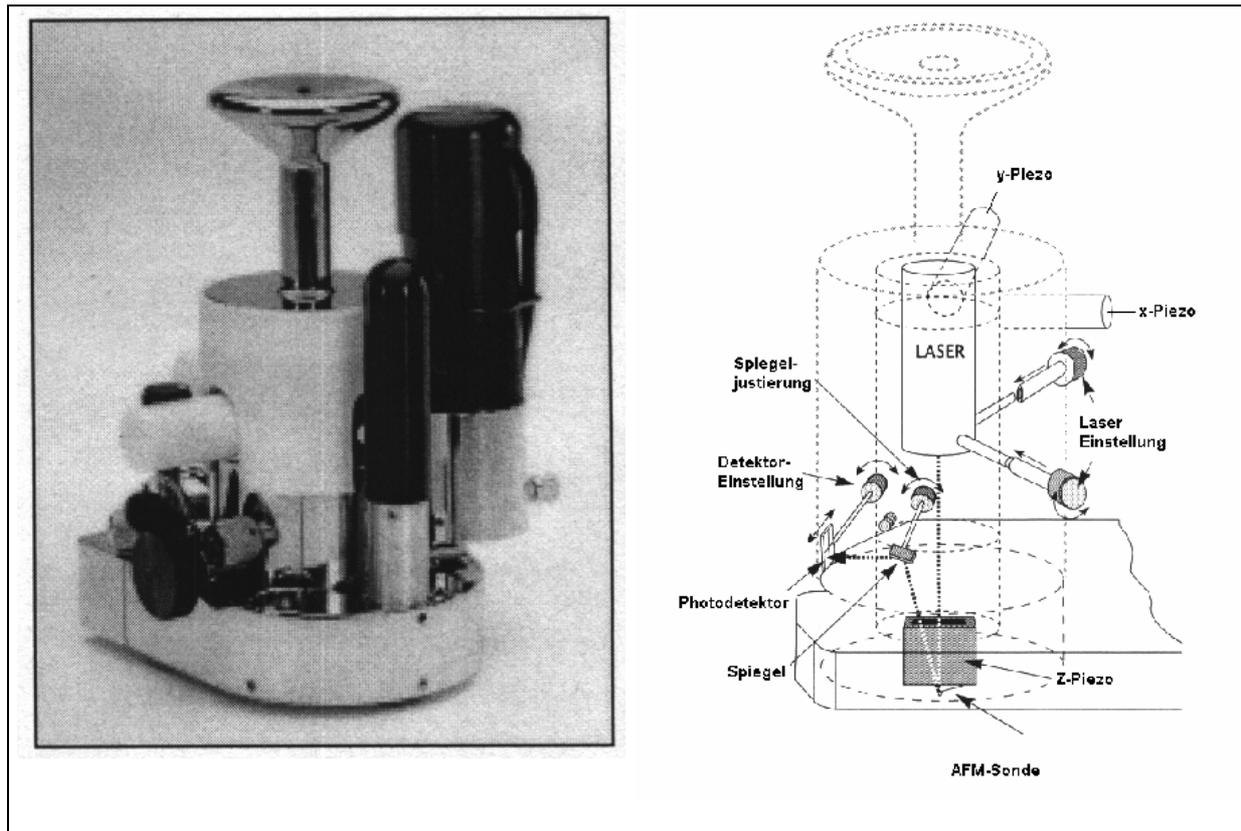


Abb. 10 Aussenansicht (links) und Bedienelemente (rechts) am Rasterkraftmikroskop Topometrix Explorer

2.2 Funktionsprinzip der Rasterkraftmikroskopie

Bei der Rasterkraftmikroskopie, AFM (Atomic Force Microscopy) wird die Topographie der Oberfläche mit einer Spitze (= Sonde) mechanisch abgetastet. Als Sonde dient eine feine Si- oder Si-Nitrid-Kristallspitze mit einem Spitzenradius von ≈ 10 nm, s. Abbildungen 11a und 11b. Nähert sich die Spitze der Probenoberfläche, so biegt sie sich durch die gegenseitigen Kräfte durch, wie in Abbildung 11a schematisch gezeigt wird. Die Durchbiegung des Federbalkens (Cantilever), an dessen Ende die Spitze angebracht ist, ist ein Maß für die Kräfte zwischen Spitze und Oberfläche.

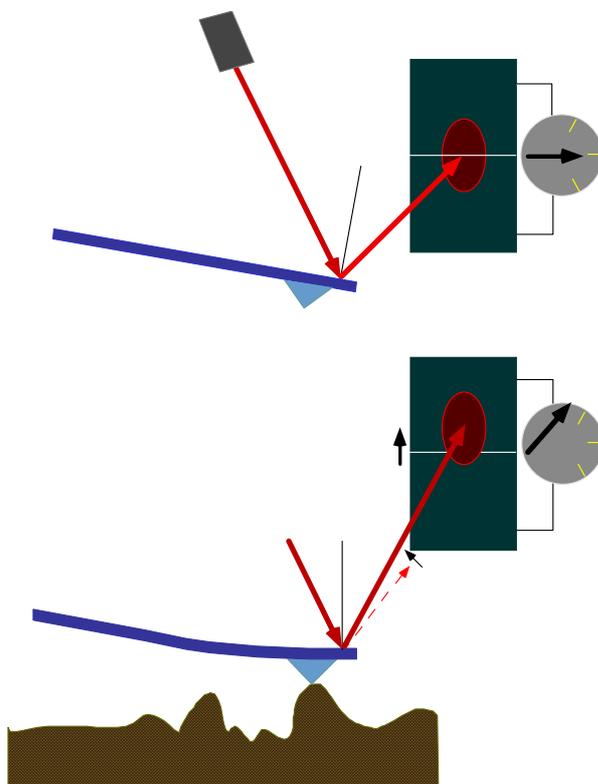
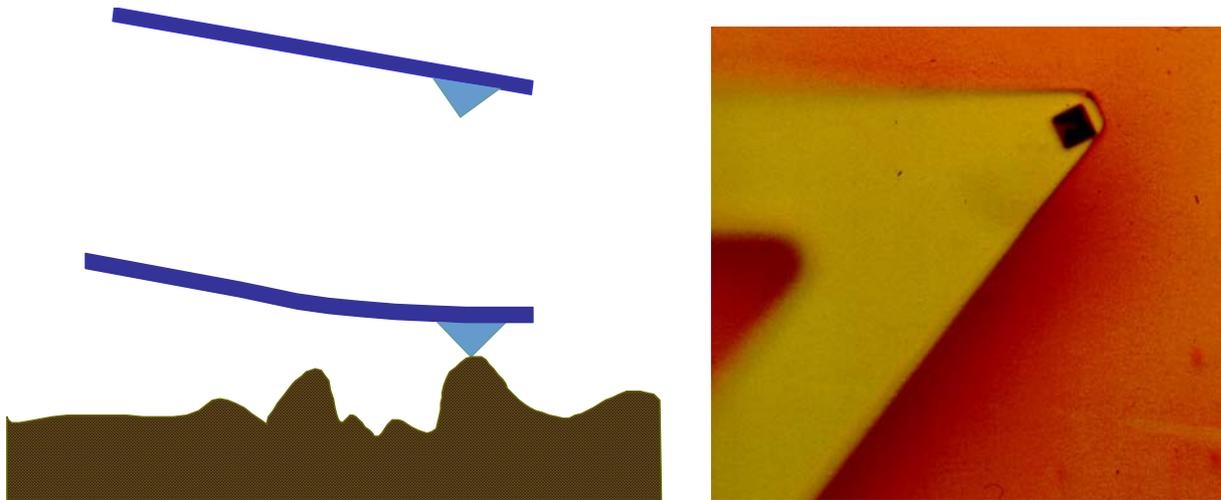


Abb. 11:

a, links oben: Durchbiegung des Cantilevers bei Probenkontakt als Maß für die Krafteinwirkung

b, rechts oben: Mikroskopbild eines Siliciumnitrid-Kristalls auf einem Silicium Cantilever

c, links unten: Verschiebung des Auftreffpunktes eines auf das Ende des Cantilevers reflektierten Lichtstrahles zur Messung der Verbiegung

Die Verbiegung kann durch einen reflektierten Lichtstrahl, der auf das Ende des Federbalkens fällt, gemessen werden. Bei einer Änderung der Verbiegung wandert der reflektierte Lichtstrahl, wie in Abbildung 11c skizziert. Die Änderung seiner Position

kann über eine ortsempfindliche Fotodiode gemessen werden. Durch Anpassen der Probenhöhe kann die Verbiegung wieder auf den alten Wert nachgeregelt werden. Fährt nun die Spitze mit konstanter Verbiegung über die Probenoberfläche, erhält man eine dreidimensionale Abbildung ihrer Topografie. Wie in Abb. 11 skizziert, wird die Oberfläche zeilenweise abgerastert und so das Bild gemessen. Die Bewegung der Sonde über die Oberfläche erreicht man über die Bewegung von Piezoelementen.

2.3 AFM-Spitzen

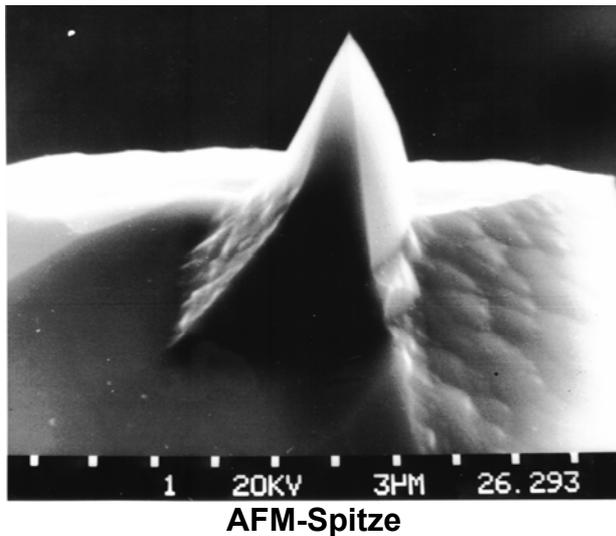


Abb. 12 REM-Aufnahmen einer AFM-Spitze. Zu sehen ist nur die Spitze am Ende des Federbalkens. Skalierung: 1 Skalenteil = 3 µm

2.3 Sonden

Die Sonden in der AFM sind meist Silicium oder Siliciumnitridspitzen (Abbildung 12). Bei der Messung darf die Spitze nur mit dem vordersten Ende die Probe berühren. Nur wenn der effektiv eingesetzte Spitzenradius kleiner ist als die abzubildenden Strukturen, erhält man gute Bilder. Der entscheidende Parameter für das Auflösungsvermögen mittels einer AFM-Spitze ergibt sich nach Abbildung 13 als Aspekt-Verhältnis $A = W/L$. Eine gut auflösende Spitze ist demnach sehr lang und dünn. Sie wird dadurch jedoch mechanisch weniger belastbar, so dass in der Praxis ein Kompromiss gefunden werden muss.

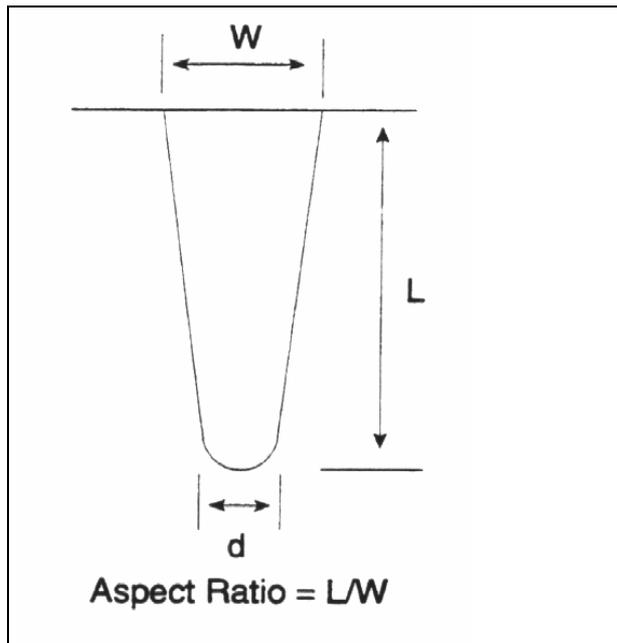


Abb. 13

Zum Aspekt-Verhältnis einer AFM-Spitze aus der nutzbaren Geometrie.

Spitzenweite: W ,
 Spitzenlänge: L ,
 Spitzendurchmesser: d

Wie die Abbildungsqualität von der Spitzenform abhängt zeigt Abbildung 14 am Beispiel einer senkrechten Stufe. Im oberen Teil des Bildes besitzt die Spitze ein kleines Aspekt-Verhältnis, die scharfe Kante wird schlecht wiedergegeben. Der untere Bildteil zeigt das Abbildungsverhalten bei Verwendung einer Spitze mit großem Aspekt-Verhältnis. Die Kante wird gut wiedergegeben. Die Grenzen der Methode sind daran ebenfalls zu erkennen. Ein senkrechter Anstieg kann grundsätzlich nicht genau wiedergegeben werden. Die maximal mögliche Steigung wird vom Flankenwinkel der Spitze begrenzt. Höhendifferenzen sind dagegen sehr unempfindlich gegenüber der Spitzenform.

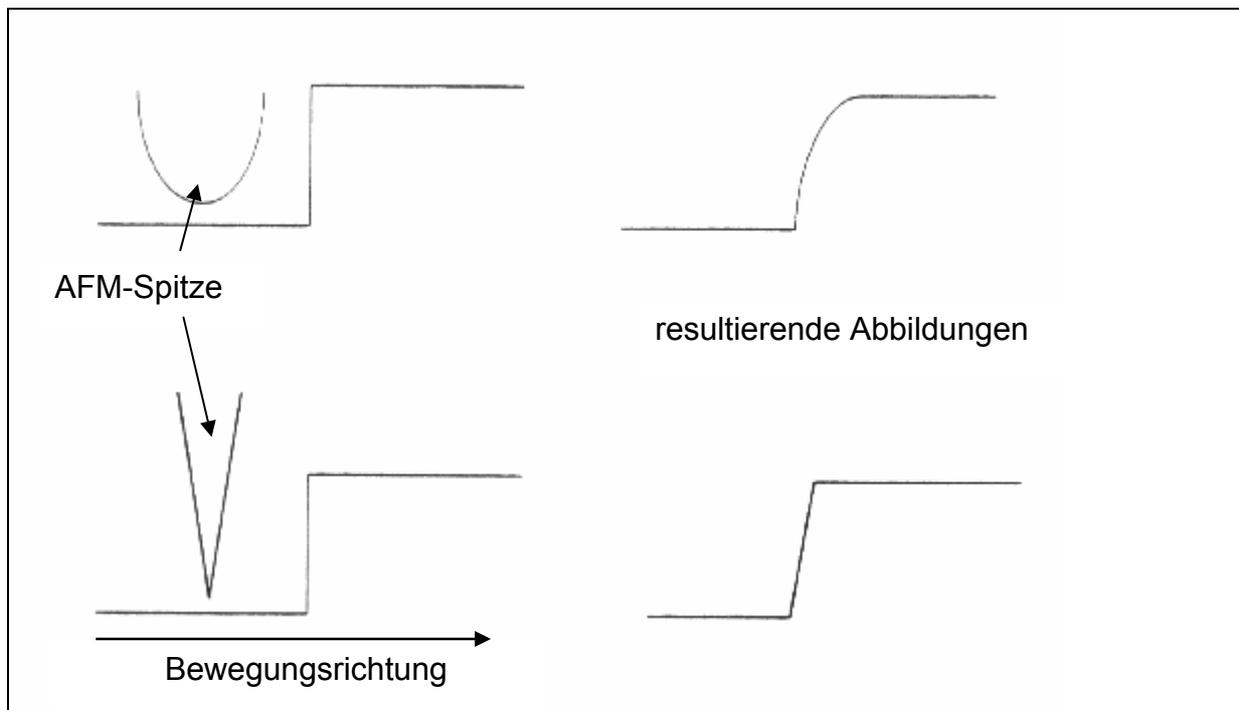


Abb. 14

Einfluss der Spitzengeometrie auf die Abbildungsqualität, gezeigt am Beispiel einer senkrechten Stufe

2.4 Anwendungen

2.4.1 Höhenprofile und Rauheitsanalyse

Das Rasterkraftmikroskop eignet sich hervorragend zur Messung von Höhenprofilen. Anders als bei herkömmlichen Profilometern, die Sondenradien von ca. $1\ \mu\text{m}$ besitzen, können durch das flächenhafte Abrastern von Oberflächen genaue 3D-Profile erstellt werden. Bilder, die mit dem AFM gemacht werden, enthalten die Höheninformation in Form einer Farbskala, vergleichbar mit Landkarten. Die Farbskala wird meist neben das Bild gestellt, werden Profilschnitte mit Höhenangaben gezeigt, so kann die Farbskala weggelassen werden.

Das Abbilden und Vermessen von Höhenprofilen mit der Bestimmung von Rauheitsdaten sind typische Einsatzgebiete des AFM. Die Meßtechnik läßt sich für die Qualitätssicherung von elektronischen Systemen hervorragend anwenden. Zum Beispiel lassen sich Profilschnitte durch Leiterbahnen anfertigen, Abbildung 15. Dabei wird die Höhe der Leiterzüge ebenso erfaßt wie die Breite. Verschiedene Rauheitsdaten z. B. R_a , R_t , R_p werden ausgegeben. Die Werte sind wie folgt definiert:

- R_a arithmetischer Mittenrauwert, entspricht der mittleren Abweichung vom Mittelwert
- R_p maximale Profilspitze über dem Mittelwert
- R_t maximale Höhendifferenz im Profil
- RMS quadratischer Mittenrauwert (Standardabweichung vom Mittelwert)

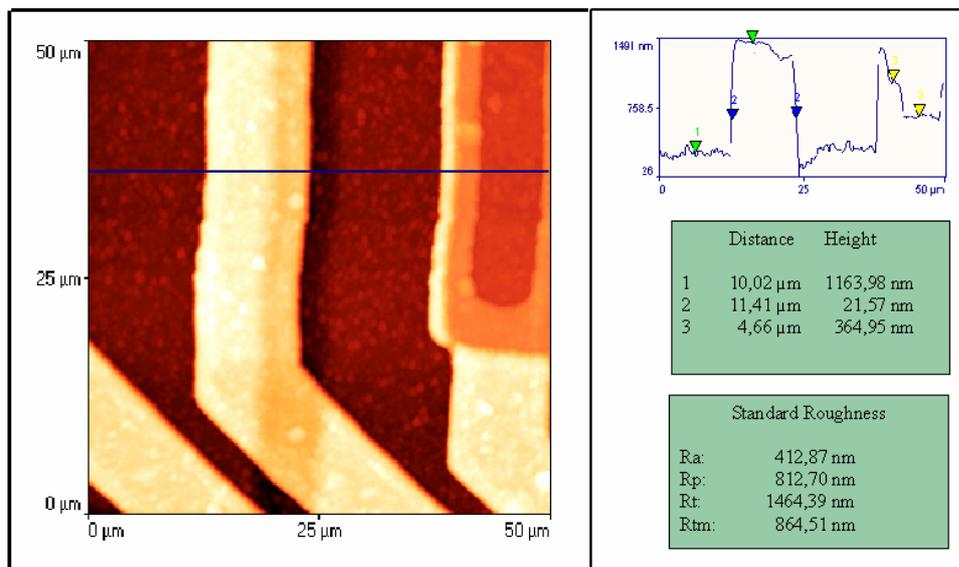


Abb. 15 Leiterbahnen: Topographie mit Höhenprofil und Rauheitsdaten

Auch zum Bestimmen von Flächenrauheiten läßt sich die Methode anwenden. Dazu werden alle Profillinien eines Bildes automatisch ausgewertet.

In Abb. 16 wird die Wirkung eines Plasmaätzverfahrens auf die Oberflächenrauheit von Siliciumwafern untersucht. Als Vergleich dient ein unbehandelter Wafer (der helle Fleck ist eine Verunreinigung). Es zeigt sich, dass die Plasmaätzung die Oberfläche deutlich aufgeraut hat. Am aussagekräftigsten sind hier die RMS-Werte.

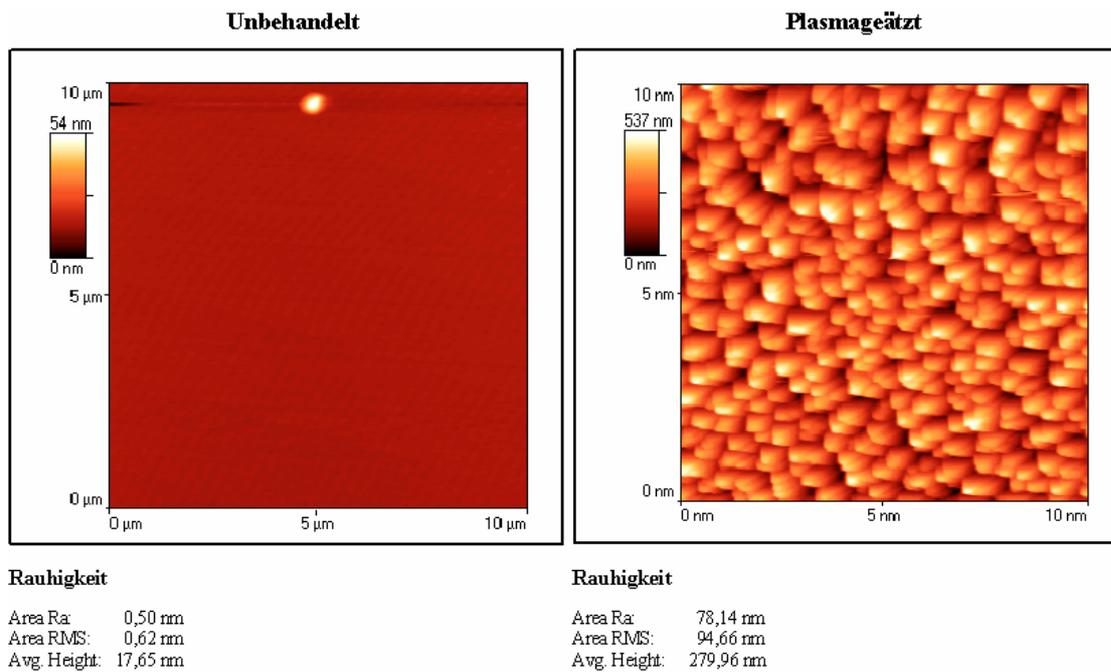


Abb. 16 Oberflächenrauheit von Silicium-Wafern

2.4.2 Materialunterscheidung mit dem AFM

Durch Anwendung spezieller Messverfahren lassen sich mit dem AFM auch topographieunabhängige Oberflächeneigenschaften ermitteln.

Als Beispiel sollen hier Adhäsions- und „Härte“-Bilder gezeigt werden, die mit dem sogenannten „Pulsed Force Mode“ (PFM) aufgenommen wurden. Eine genauere Einführung in dieses Messverfahren wird in Abschnitt . 2.5.3 gegeben. Die Messmethode PFM ist geeignet, Materialien selbst in dünnsten Schichten anhand ihrer Adhäsions- und „Härte“-Differenzen zu unterscheiden.

In Abb. 17 sind Topographie, Adhäsion und „Härte“-Bilder einer organischen Schicht auf Siliciumwafer dargestellt. Die Schicht besteht aus der Carbonsäure Arachinsäure.

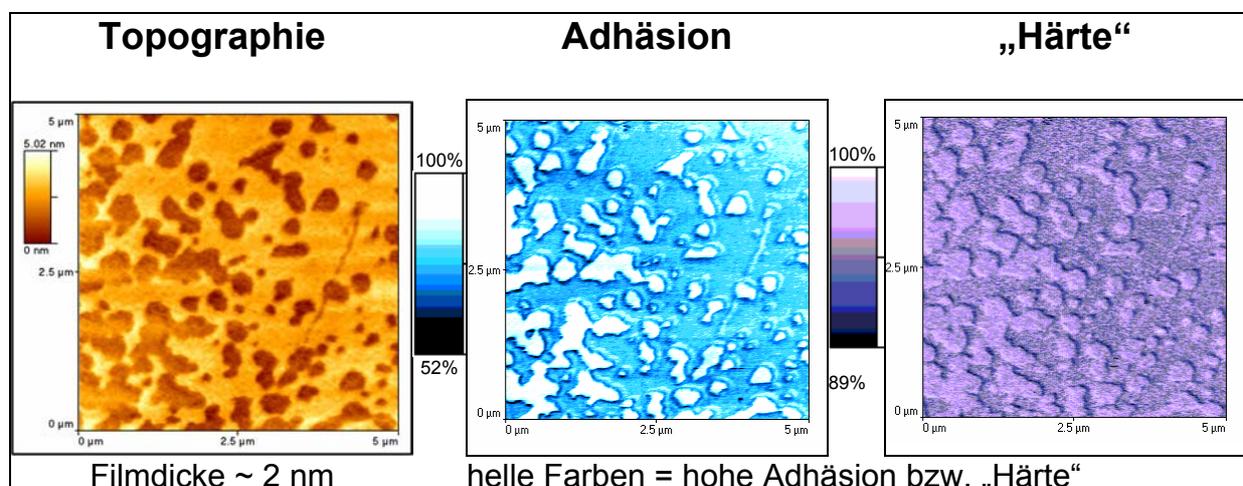


Abb. 17 PFM-Aufnahmen eines Arachinsäurefilms auf Silicium-Wafer

Aus dem Topographiebild ergeben sich zwei Ebenen mit einem Höhenunterschied von ca. 2 nm. Die zwei Nanometer Schichtdicke entsprechen etwa einer Molekülschicht Arachinsäure.

Im Zusammenhang mit dem Pulsed Force Mode wird der Begriff „Härte“ auch im folgenden in Anführungszeichen gesetzt. Hiermit soll ausgedrückt werden, dass es sich nicht um die Härte (Brinell-, Vickers-, ...) im herkömmlichen Sinn handelt, sondern um eine dynamische Eigenschaft der Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Spitze im Nanometerbereich.

Aus dem reinen Topografiebild kann nicht entnommen werden, ob die untere Schicht aus Arachinsäure oder Silicium besteht. Die simultan aufgenommenen Adhäsions- und „Härte“-Aufnahmen können hier die benötigte Zusatzinformation liefern.

Das Adhäsionsbild, Abb. 17, zeigt zwei Adhäsionsebenen. Helle Farbwerte repräsentieren daher Silicium, dunkle Arachinsäure. Die „Härte“-Abbildung stützt diesen Befund. Als Ergebnis der Messung wird eine löcherige Schicht Arachinsäure auf unbelegtem Silicium festgestellt.

2.5. Verschiedene Messverfahren

2.5.1 Contact Modus (Con)

Mechanisch stabile Proben wie Metall-, Glas-, Keramik usw. werden am besten im Contact Modus gemessen, da der Messaufwand hier am geringsten ist.

In diesem Messmodus besteht ein ständiger Kontakt der Spitze zur Oberfläche. Die Andruckkraft der Spitze auf die Oberfläche wird konstant gehalten. Die Topographie wird aus der Bewegung der Spitze über die Oberfläche gewonnen.

2.5.2 Non Contact Modus (NC)

Sehr empfindliche Proben wie lebende Zellen, Kunststoffe, Wachse oder Flüssigkeitsfilme müssen im NC gemessen werden, um die Oberflächenstruktur bei der Messung nicht zu zerstören. Im NC übt die Spitze nur leichte, **senkrechte** Stöße auf die Oberfläche aus. Die zerstörenden Querkräfte sind ausgeschaltet. Um dies zu erreichen, wird der Federbalken nahe seiner Eigenfrequenz (100 kHz-Bereich über den z-Piezo) zum Schwingen angeregt. Bei der Messung wird er der Oberfläche soweit angenähert, dass sich die Amplitude der freien Schwingung um einen vorgegebenen Betrag verringert. Die Spitze berührt die Oberfläche nun während jeder Schwingungsperiode nur einmal ganz kurz. Durch die Festlegung der Messamplitude lässt sich die Maximalkraft, mit der die Spitze auf die Oberfläche stößt, steuern.

2.5.3 Pulsed Force Mode (PFM)

Der PFM ist ein materialelektives Messverfahren, das Materialunterscheidungen anhand von Adhäsions- oder „Härte“- Differenzen erlaubt. Man kann damit oberflächlichen Verschleiss, die Qualität von Lackierungen oder Beschichtungen oder geringste Verunreinigungen erkennen. Wie beim NC besteht hier nur einmal pro Schwingungsperiode Kontakt zur Oberfläche. Jedoch verläuft die Bewegung des Federbalkens ganzzzeitig gesteuert, s. Abbildung 18.

Der AFM-Spitze wird eine Sinusschwingung im kHz-Bereich aufgeprägt. Die Spitze befindet sich innerhalb einer Periode sowohl im Kontakt mit der Oberfläche als auch zeitweise darüber. Im Bereich A wird die Spitze gegen die Oberfläche gedrückt, in B
