

"Einrichtung eines
Versuchs: Rastertunnelmikroskopie für
das Fortgeschrittenen-Praktikum 2"

Als
Zulassungsarbeit
zur wissenschaftlichen Prüfung

für das Lehramt an Gymnasien

vorgelegt von

Dieter Ritzmann

Fakultät für Physik der
Albert-Ludwigs-Universität

Freiburg

Freiburg im Breisgau

Februar 1994



Inhaltsverzeichnis

	Seite
<u>1. Einleitung</u>	
1.1. Lichtmikroskop	5
1.2. Elektronenmikroskop	5
1.3. Feld-Emissionmikroskop	6
1.4. akustisches Mikroskop	7
1.5. Rastertunnelmikroskop (STM)	7
1.6. Rasterkraftmikroskop	8
<u>2. Theorie des STM</u>	8
2.1. Quantenmechanischer Tunneleffekt	8
2.2. Tunneleffekt bei Halbleitern	12
2.3. Piezokeramik-Scanner	13
2.4. Rückkopplung	15
2.5. Vibrationsisolierung der Tunneleinheit	16
2.6. Elektronische Datenverarbeitung	18
2.7. Arbeitsmodi des STM	18
2.7.1. Topographie	19
2.7.2. Spektroskopie	20
2.7.3. Austrittsarbeitmessung	21
2.7.4. Tunnelpotentiometrie	21
<u>3. Gerätebeschreibung</u>	22
3.1. STM-Kopf	23

3.1.1. Probenträger einsetzen	25
3.1.2. Spitzenherstellung	25
3.1.3. Proben und Spitzen einsetzen	26
3.1.4. Proben und Spitzen entfernen	27
3.2. Elektronische Kontrolleinheit	27
3.2.1. Tunneling Controls	28
3.2.2. Scan/Offset Controls	28
3.2.3. Tip Approach Controls	29
3.2.4. Monitor Outputs	30
3.3. True-Image-Software	30
3.4. Constant Current Mode und Constant Height Mode	31
3.4.1. Constant Current Mode	31
3.4.2. Constant Height Mode	31
<u>4. Versuchsdurchführung</u>	32
4.1. Gold (Metall)	33
4.2. Graphit (Halbmetall)	36
4.3. Molybdendisulfid (Halbleiter)	39
<u>5. Eigene Messungen</u>	43
5.1. Gold	43
5.2. Graphit	45
5.3. Molybdendisulfid	49

1. Einleitung

Durch die Physiologie des Auges bedingt beträgt dessen Auflösungsvermögen ungefähr $100\mu\text{m}$. Mit kleineren Strukturen beschäftigt sich die Mikroskopie.

Im folgenden soll ein Überblick über verschiedene Mikroskope gegeben werden.

1.1. Lichtmikroskop

Das Lichtmikroskop benutzt Licht im sichtbaren Bereich des Spektrums (380-680nm). Die Beugung des Lichts beschränkt die Auflösung A auf $0.1-0.2\mu\text{m}$ (nach $A=\lambda/2n$, wobei λ die Wellenlänge des Lichts und n der Brechungsindex des entsprechenden Mediums ist). Mit dieser Vergrößerung (10000x gegenüber Auge) können Mikroorganismen, Bakterien, bestimmte Typen von Viren und einzelne Zellen beobachtet werden.

1.2. Elektronenmikroskop

Nach de Broglie haben auch Teilchen Wellencharakter. Es gilt $\lambda=h/p$ (λ ist die Wellenlänge des Elektrons, h ist die Plancksche Konstante, p ist der Impuls des Elektrons).

Mit Spannungen um 10000V kann man Elektronenwellenlängen $<1\text{\AA}$ erhalten.

Das Transmission-Elektronen-Mikroskop (TEM) wurde 1932 von E. Ruska entwickelt. Hierbei wird die Fokussierung durch Magnetfelder bewerkstelligt [Rus 87]. Das TEM erfordert, daß die Probe in einer Hochvakuumkammer untergebracht ist, um Elektronenstreuung an Fremdpartikeln und Adsorption von Fremdatomen zu minimieren. Das TEM hatte einen wesentlichen Einfluß auf unser Verständnis der Zellstruktur und der biologischen Funktion von Makromolekülen.

Das Rasterelektronenmikroskop wurde parallel dazu entwickelt. Dieses Mikroskop liefert Bilder von Materialoberflächen, indem es die Intensität des reflektierten Elektronenstrahls und Sekundärelektronen (entstanden durch den einfallenden Elektronenstrahl) untersucht. Nichtleitende Proben müssen mit einem dünnen Goldfilm überzogen werden, um Aufladungseffekte zu vermeiden. Ein Elektronenstrahl wird über die Oberfläche gerastert. Zworykin, Hillier und Snyder erhielten die ersten Bilder 1942 bei einer Auflösung von $1\mu\text{m}$. Heutzutage erreicht man atomare Auflösung. Diese Grenze ist hauptsächlich durch die Fokussierung des Elektronenstrahls gesetzt. Im Vergleich zum TEM liefert das SEM einen stärkeren Kontrast.

Die Anwendung des SEM beinhaltet das Studium biologischer Materialien, Kristallwachstum, Halbleiter-Nanotechnologie. Wie beim TEM muß die Probe in einer Hochvakuumkammer untergebracht sein.

1.3. Feld-Emissionmikroskop

1936 und 1950 wurden jeweils das Feld-Emissionmikroskop (FEM) und Feldion-Mikroskop (FIM) durch E.W. Müller entwickelt. Diese Mikroskope untersuchen die emittierten Elektronen bzw. Ionen einer scharfen Spitze in Anwesenheit eines sehr stark beschleunigenden Feldes. Die Auflösung ist hier durch den Radius der Spitze und die Beugung der Teilchenwellen beschränkt. Die Form des Mikroskops ist unten gezeigt (siehe Abb. 1). Die verschiedenen Atome werden unter verschiedenen Winkeln von der Spitze wegbeschleunigt und erscheinen als einzelne Flecken auf dem Phosphorschirm. Atomare Auflösung wurde mit dieser Methode um 1960 erreicht. Anwendung findet diese Methode für das Verständnis von Oberflächenzuständen, Oberflächenreaktionen und atomare Diffusion auf Oberflächen. Die Spitzen des STM entsprechen im wesentlichen denen des FEM und FIM.

[Bru 90]

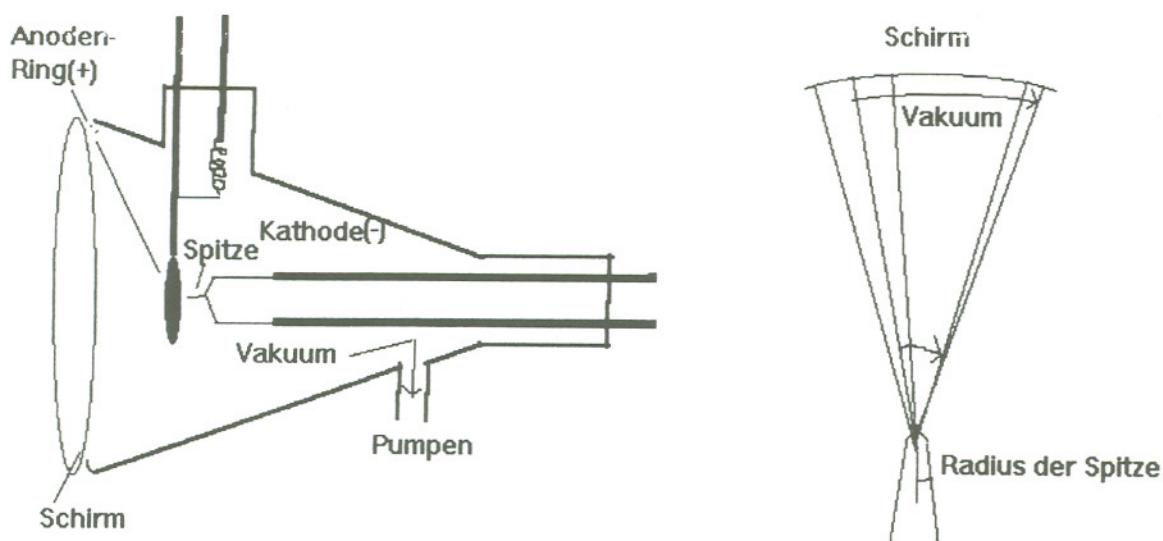


Abb. 1: Feld-Emissionmikroskop: Bringt man eine sehr scharfe Spitzenspitze nahe an eine Ringelektrode, so kann man Ionen oder Elektronen, die von der Spitzenspitze emittiert und beschleunigt werden auf einem Phosphorschirm detektieren. Das ist eine Möglichkeit, um atomare Auflösung zu erreichen, ohne fokusierende Baustein zu verwenden. So lange die Spitzenspitze scharf genug und der Abstand zum Schirm groß genug ist, können atomare Strukturen beobachtet werden.

1.4. Akustische Mikroskop

Das akustische Mikroskop benutzt Schallwellen zur Untersuchung von Materialien. Der Vorteil besteht darin, daß sie optisch undurchsichtige Medien durchdringen und verborgene Strukturen enthüllen können. Wichtige Anwendungen waren unter anderem biomedizinischer Art, beispielsweise zur Untersuchung innerer Organe. Die Auflösung ist auch hier durch die Beugung beschränkt. Eine weitere Beschränkung entsteht dadurch, daß man eine Flüssigkeit benötigt, um die Schallwelle auf die Probe zu übertragen. Die akustische Dämpfung verhält sich aber quadratisch zu der Frequenz. Nimmt man Wasser, ist die Auflösung auf ungefähr $0.2\mu\text{m}$ beschränkt. Mechanische Eigenschaften von Materialien lassen sich mit dem akustischen Mikroskop besser darstellen als beispielsweise mit einem optischen [Qua 86].

1.5. Rastertunnelmikroskop (STM, scanning tunneling microscopy)

Eine andere Art, Informationen über ein Objekt zu erhalten, besteht darin, daß man mit einer Sonde das Objekt abtastet. Das Abtasten ermöglicht eine Aufnahme der Oberflächentopologie. Die Spitze der Sonde erstellt eine Aufnahme der Topologie der Oberfläche anhand einiger möglicher Wechselwirkungen zwischen Spitze und Oberfläche. Diese Wechselwirkungen umfassen sowohl anziehende als auch abstoßende atomare Kräfte, magnetische Kräfte, elektrostatische Kräfte oder den Austausch von Ladungen (Ionen oder Elektronen). All diese Wechselwirkungen führen zu verschiedenen Arten von Mikroskopen. Die Auflösung dieser Mikroskope hängt von der Abstandsabhängigkeit der Spitzen-Oberflächenwechselwirkung und vom Radius der Spitzen ab. Im Falle des STM hängt der Bildkontrast vom Tunnelstrom der Elektronen ab, der exponentiell mit dem Abstand abfällt, wie weiter unten erklärt werden wird. Diese Empfindlichkeit ist ausschlaggebend für die atomare Auflösung des STM!

Der eigentliche Durchbruch gelang 1981 Gerd Binnig und Heinrich Rohrer [Bin 87]. Sie erkannten, daß Tunnelströme im Nanoampere-Bereich leicht aufgenommen werden können, wenn man eine

Metallspitze ca. 10\AA von der Oberfläche entfernt halten kann. Das eigentliche Problem bestand nun darin, mechanische Schwingungen, thermischen Drift usw. soweit zu minimieren, daß Aufnahmen möglich sind. Das erste STM (1981) erreichte eine Auflösung von 10\AA , indem es supraleitende Magnetspulen verwendete, um das STM mechanisch zu isolieren. Bei der weiteren Entwicklung des STM fanden Binnig und Rohrer heraus, daß verschiedene Herstellungsarten der Spitzen starke Unterschiede der Spitzoberflächen beinhalteten und in bestimmten Fällen dazu führen, daß ein einzelnes Atom näher an der Probe ist als alle anderen. Aufgrund der starken Entfernungshängigkeit ist es daher möglich, atomare Auflösung zu erreichen. Während ihrer Studien fanden Binnig und Rohrer heraus, daß das STM so klein und kompakt wie möglich sein sollte, um akustische Resonanzen außerhalb der STM-Frequenzen zu halten.

1.6. Rasterkraftmikroskop (AFM, atomic force microscopy)

Ein dem STM ähnelndes Mikroskop ist das Rasterkraftmikroskop. Es wurde kollaborativ zwischen Binnig, Quate und Gerber entwickelt [Bin 86]. Beim Atomkraftmikroskop wird die Spitz auf inneratomaren Abstand der Oberfläche gebracht, derart, daß sich die Atome der Spitz und der Oberfläche im Bereich ihres abstoßenden Potentials befinden. Indem man beim Abtasten die Bewegungen der Spitz aufzeichnet, erhält man ein Bild von der Oberfläche mit atomarer Auflösung. Die wichtigste Errungenschaft des AFM besteht darin, daß es Untersuchungen an nichtleitenden Materialien ermöglicht. Es gibt eine große Anzahl von Anwendungen des AFM, unter anderem biologische Systeme, Polymere, Isolatoren, Halbleitermaterialien...

2. Theorie des STM

2.1. Quantenmechanischer Tunneleffekt

Wird eine metallische Spitz, die im Idealfall atomar scharf

ist, an eine leitende Probenoberfläche auf ungefähr 10\AA herangeführt, so fließt nach Anlegen einer Potentialdifferenz U zwischen Spitze und Probe ein elektrischer Strom I , der normalerweise in der Größenordnung von einigen Nanoampere ist (siehe Abb. 2). Dieser Tunnelstrom kommt dadurch zustande, daß aufgrund des quantenmechanischen Tunneleffekts Elektronen aus besetzten Zuständen die endliche Potentialbarriere $\Phi(x)$ zwischen Oberfläche und Spitze durchtunneln.

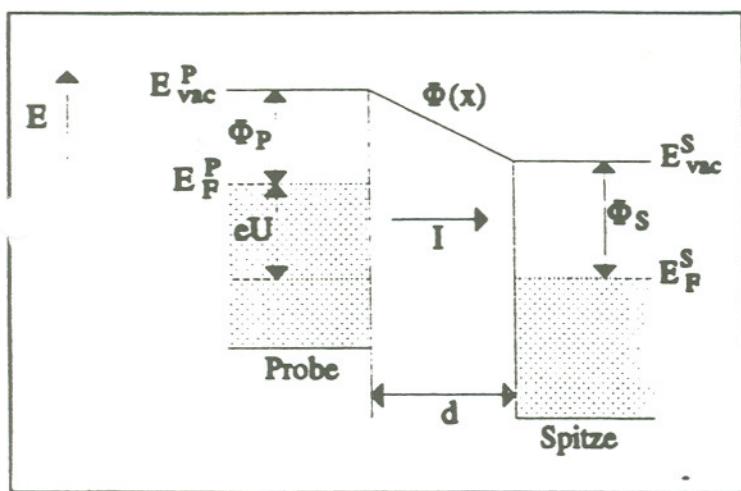


Abb. 2: E_F ist die Fermienergie, Φ die Austrittsarbeit

Der Strom ist exponentiell vom Abstand d der Spitze zur Probe abhängig und ist so ein äußerst empfindliches Maß für einer Veränderung dieser Entfernung. Verringert sich dieser Abstand beispielsweise um 1\AA , so verzehnfacht sich der Tunnelstrom. Für kleine Spannungen, d.h. $eU \ll \Phi, eU \ll E_F$ gilt näherungsweise

$$I \sim U e^{-\sqrt{\frac{2m\Phi}{\hbar^2}}d} \quad (1)$$

Hierbei ist Φ die effektive lokale Barrierenhöhe.

Solange die Größe der Formen im Nanometerbereich und größer liegt, ist die Beschreibung der STM-Bilder als Topographie der Oberfläche hinreichend. Befindet man sich dagegen im atomaren Bereich, ist eine genauere Interpretation nötig. Am plausibelsten wäre es, die Bilder einfach als Konturen konstanter Ladungsdichte der Oberfläche zu interpretieren. Da aber nur Elektronen nahe der Fermi-Energie am Tunnelprozeß teilhaben, ist auch diese

Interpretation ungenügend. Im Gegensatz dazu geben die Bilder beim Rasterkraftmikroskop die Konturen konstanter Ladungsdichte wieder. Verantwortlich für die abstoßenden Kräfte ist hier das Pauli-Prinzip.

Für typische Spitzen-Proben-Abstände (ungefähr 10\AA) ist die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe schwach, und der Tunnelprozeß kann in erster Ordnung Störungsrechnung behandelt werden. Der Strom ist dann gegeben durch [Str 93]:

$$I = \frac{2\pi e}{\hbar} \sum_{\mu, v} (f(E_\mu) [1 - f(E_v)] - f(E_v) [1 - f(E_\mu)]) |M_{\mu v}|^2 \delta(E_v + eU - E_\mu) \quad (2)$$

wo $f(E)$ die Fermifunktion ist, V die angelegte Spannung, $M_{\mu v}$ das Tunnelmatrixelement zwischen den Zuständen Ψ_μ und Ψ_v der entsprechenden Elektroden und E_μ die Energie des Zustandes Ψ_μ . Gleichung (2) gibt zwar erste Ordnung Störungstheorie wieder, unterscheidet sich aber formal dadurch, daß Ψ_μ und Ψ_v nichtorthogonale Eigenzustände verschiedener Hamiltonien sind. Zu beachten ist, daß Beiträge zum Tunnelstrom in beide Richtungen berücksichtigt sind. Für den Grenzfall niedriger Temperaturen verschwindet ein Term in Klammern (abhängig von der Polung der Spannung). Außerdem werden die Fermi-Verteilungen zu Treppenfunktionen. Im Grenzfall kleiner Spannungen vereinfacht sich der Ausdruck weiter zu

$$I = \frac{2\pi e^2}{\hbar} U \sum_{\mu, v} |M_{\mu v}|^2 \delta(E_\mu - E_F) \delta(E_v - E_F) \quad (3)$$

Bardeen [Bar 61] zeigte, daß die Tunnelmatrixelemente durch

$$M_{\mu v} = \frac{\hbar^2}{2m} \int dS (\Psi_\mu^* \nabla \Psi_v - \Psi_v \nabla \Psi_\mu^*) \quad (4)$$

dargestellt werden können. Die Integration vollzieht sich über eine beliebige Oberfläche innerhalb des Barrierenbereichs, die beide Seiten trennt. Für den Idealfall einer punktförmigen Tunnelspitze vereinfacht sich der Ausdruck des Tunnelstroms zu

$$I \sim \sum_v |\Psi_v(\vec{r}_0)|^2 \delta(E_v - E_F) = \rho(\vec{r}_0, E_F) \quad (5)$$

Dies bedeutet: Mit einer ideal scharfen Spitze wird nur die lokale Zustandsdichte ρ des Fermi niveaus der Oberfläche an der Stelle \vec{r}_0 , die die Spitze einnimmt, gemessen. Im Fall der endlichen Ausdehnung der Spitze bleibt diese Anschauung gültig, solange man in den Tunnelmatrixelementen die Wellenfunktionen der Spitze durch s-Wellenfunktionen hinreichend approximieren kann. Die Spitzenposition \vec{r}_0 ist dann als Ursprung der s-Wellenfunktionen, d.h. als Zentrum der Spitze zu interpretieren (siehe Abb. 3).

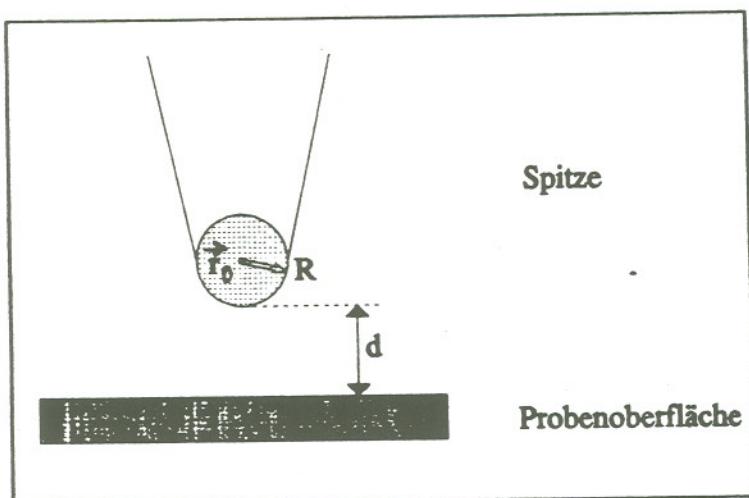


Abb. 3: Tersoff-Hamann-Standardmodell für eine räumlich ausgedehnte Tunnelspitze [Ter 85]

Bei der Beschreibung des Tunnelprozesses für die räumlich ausgedehnte Tunnelspitze gehen Tersoff und Hamann von einer kugelförmigen Spitzenelektrode mit Radius R aus, welche sich im Abstand d über einer planaren Oberfläche befindet. Die Spitze befindet sich am Ort \vec{r}_0 und wird wie zuvor durch s-Wellenfunktionen beschrieben. Für den Tunnelstrom erhält man den Term

$$I \sim U e^{-2k(R+d)} \rho(\vec{r}_0, E_F) \quad (6)$$

An dieser Gleichung erkennt man die früher erwähnte exponentielle Abhängigkeit des Tunnelstroms von dem Probenabstand d . Wie erwartet hängt der Tunnelstrom auch im Falle

der ausgedehnten Spitze linear von der Zustandsdichte ρ am Fermi niveau E_F ab.

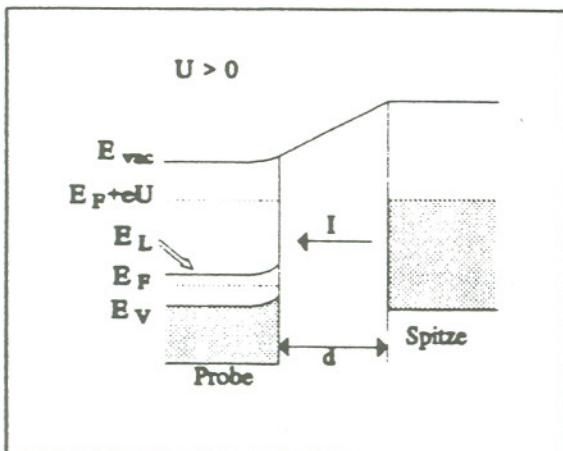
Durch die räumliche Ausdehnung R der Tunnelspitze kann das maximale laterale Auflösungsvermögen L des Tunnelmikroskops durch

$$L \sim \sqrt{R+d} \quad (7)$$

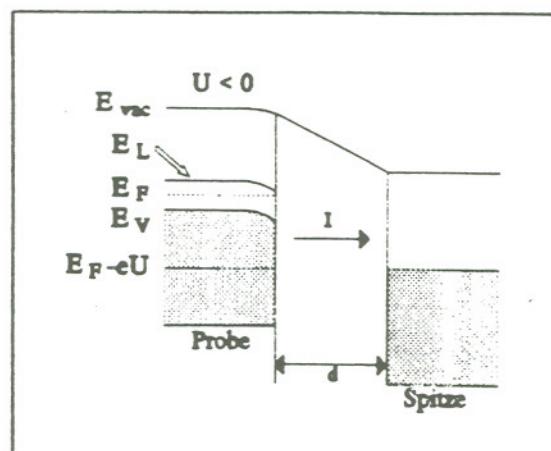
angegeben werden.

2.2. Tunneleffekt bei Halbleitern

Im Gegensatz zu Metallen treffen bei Halbleiteroberflächen die im letzten Kapitel gemachten Näherungen aufgrund der lokalisierten Oberflächenzustände und Diskontinuitäten an den Bandkanten nicht mehr zu [Str 93b]. Das Fermi niveau liegt in der Bandlücke, so daß höhere Tunnelspannungen notwendig sind. Bei hohen Spannungen zeigen die Matrixelemente und die Spitzenzustandsdichte jedoch eine komplizierte Energieabhängigkeit. Abbildungen 4a) und 4b) zeigen das Bändermodell im Fall des Tunnelüberganges zwischen einem Halbleiter und einem Metall für verschiedene Polaritäten der Gap-Spannung. Hierbei ist E_{vac} das Vakuum-Niveau, E_F das Fermi niveau, E_L die Leitungsbandkante und E_V die Valenzbandkante. Die Bandverbiegungen, die durch den Abfall der Tunnelspannung verursacht werden, sind in den Abbildungen angedeutet. Bei einer positiven Tunnelspannung $U > 0$ des Halbleiters gegenüber der Spitze tunneln Elektronen aus besetzten Zuständen der Spitze in unbesetzte Zustände des Leitungsbandes der Probe. Für negative Spannungen $U < 0$ fließt der Tunnelstrom von besetzten Zuständen des Valenzbandes der Probe in unbesetzte Zustände der Tunnelspitze.



4 a) Tunneleffekt zwischen Halbleiter und Metall bei positiver Gap-Spannung gegenüber der Spitze.



4 b) Tunneleffekt zwischen Halbleiter und Metall bei negativer Gap-Spannung gegenüber der Spitze.

Die Darstellung der räumlichen Verteilung der Valenzband- und Leitungsbandzustände in den STM-Bildern kann je nach Polarität der Gap-Spannung verschieden sein. Als typisches Beispiel sei GaAs(110) angeführt. Die Valenzbandzustände sind vorwiegend bei den As-Atomen, die Leitungsbandzustände jedoch vorzugsweise bei den Ga-Atomen lokalisiert. Je nach Tunnelspannung sind daher die As- oder die Ga-Atome sichtbar. Bei positiver Vorspannung tragen die Zustände an der Leitungsbandkante entscheidend zum Tunnelstrom bei. Der Strom ist am geringsten für Zustände an der Valenzbandkante. Ist die Gap-Spannung negativ, so kehrt sich dieses Verhältnis um. Da bei Halbleitern höhere Gap-Spannungen verwendet werden als bei Metallen, tragen nicht nur Zustände am Fermi-Niveau, sondern auch Zustände aus dem Energiebereich $[E_F, E_F + eU]$ zum Tunneleffekt bei. Der Tunnelstrom lässt sich in Erweiterung des Tersoff-Hamann-Modells angeben durch

$$I \sim \int_{E_F}^{E_F + eU} \rho(\vec{r}_0, E) dE. \quad (8)$$

2.3. Piezokeramik-Scanner

Wir haben gesehen, daß die Elektronen bei einem Abstand von ungefähr 10\AA die Potentialbarriere durchtunneln können. Um beim Abtasten einer Oberfläche atomare Auflösung zu erreichen, benutzt man piezokeramische Elemente. Wenn ein elektrisches Feld an ein piezoelektrisches Element angelegt wird, so dehnt es sich in eine Richtung aus und kontrahiert in die andere (siehe Abb. 5) [Bur 92a].

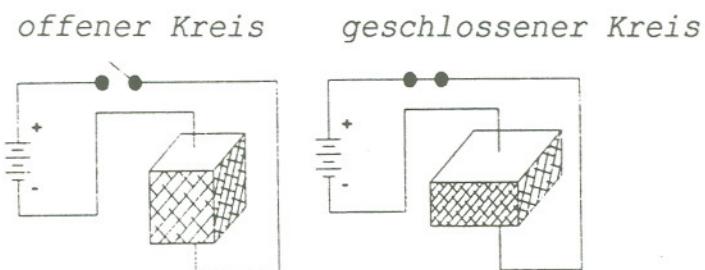


Abb. 5

Piezoelektrizität ist ein natürliches Phänomen. Beispielsweise hat Quarz diese Eigenschaft. Materialien, die diesen Effekt zeigen, sind alle Elektrete, d.h. sie besitzen ein permanentes elektrisches Feld (siehe Abb. 6) [Bur 92a].

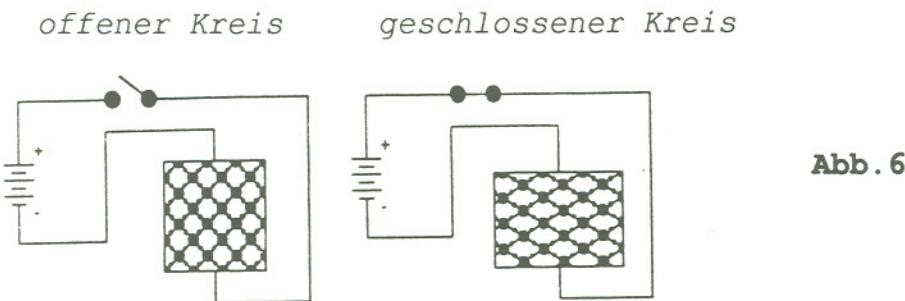


Abb. 6

Große und kleine Kreise stellen zwei verschiedene Arten von Atomen dar. Diese Atome sind so angeordnet, daß sie ein permanentes elektrisches Feld besitzen (Elektret). Wenn ein elektrisches Feld angelegt wird, richten sich die Atome entsprechend aus. Dies kann eine Änderung in den Abmessungen des Kristalls bewirken. Die Empfindlichkeit der piezoelektrischen Keramik hängt von der speziellen Anordnung der Atome im Kristall und seiner Dicke ab. Die Empfindlichkeit piezoelektrischer Elemente, die bei einem STM benutzt werden, liegen ungefähr bei $150\text{\AA}/\text{V}$. Da der Computer, der das Mikroskop steuert, die Spannungen auf mV genau regeln kann, beträgt die Genauigkeit weniger als ein \AA .

Räumliche Bewegungen erreicht man, indem man die Piezokeramik in die Form eines Hohlzylinders bringt. Die Spitze ist unten am Zylinder befestigt. Vier Elektroden sind außen am Zylinder angebracht, eine Elektrode im Inneren. Indem man unabhängig voneinander die Spannung über den verschiedenen Elektroden steuert, kann sich der piezoelektrische Zylinder in beliebige Richtung biegen, sich ausdehnen oder zusammenziehen (siehe Abb. 7a, b) [Bur 92a].

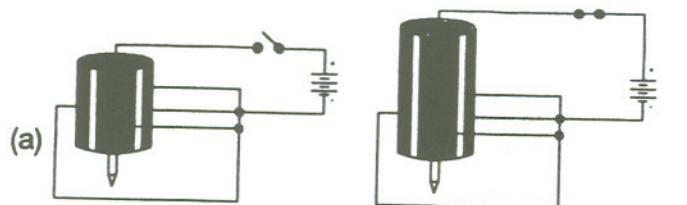
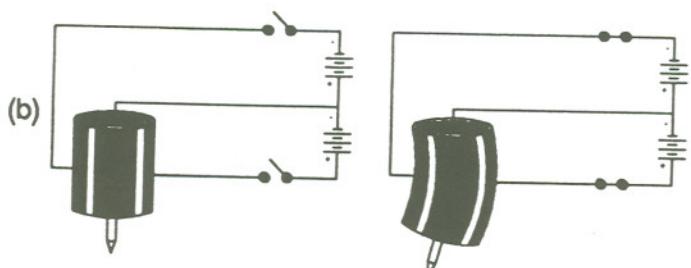


Abb. 7



2.4. Rückkopplung

Indem man den Tunnelstrom mißt, kann man den relativen Abstand der Spitze zur Probe feststellen. Die Vorrichtung, die den Tunnelstrom mißt, ist an einen elektronischen Regelkreis angeschlossen, der folgendermaßen wirkt: wenn er einen Abfall des Stromes mißt, so rückt er die Spitze näher an die Probe heran, mißt er eine Zunahme des Stromes, so bewegt er die Spitze von der Probe weg (siehe Abb. 8).

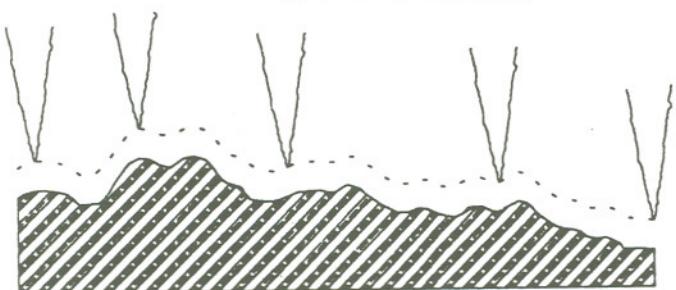


Abb. 8

Die Spitze zeichnet die Topographie der Oberfläche von links nach rechts auf. Wenn die Spitze an eine Erhöhung heranfährt, nimmt der Tunnelstrom zu. Der Regelkreis vergrößert den Abstand zwischen Spitze und Probe als Antwort auf einen Anstieg des Stroms über einen vorgegebenen Referenzwert des Tunnelstroms. Entsprechend bewegt er die Spitze in Richtung der Probe, wenn der Strom abfällt. Auf diese Art und Weise zeichnet die Spitze die Topographie der Oberfläche nach, wie die gestrichelte Linie zeigt.

2.5. Vibrationsisolierung der Tunneleinheit [Lee 92a]

Die Größe der Störungen darf die gewünschte Auflösung nicht übersteigen. Das Verhalten eines STM auf externe Störungen ist das Ergebnis zweier Faktoren: die Größe der Vibrationen, die das STM erreichen, und die Antwort des STM darauf. Typische externe Störungen sind Gebäudeschwingungen und Trittschall mit Frequenzen zwischen 1-100Hz. Typische Amplituden sind 0.5-150nm. Mittels spezieller Vibrationsisolierungen sollen diese externe Störungen minimiert werden. Drei Arten der Dämpfung sind entwickelt worden. Das erste STM verwendete die magnetische Schwebung von Permanentmagneten auf einer supraleitenden Schale. Diese Methode wird nicht mehr verwendet.

Die zweite Generation verwendete Federaufhängungen. Diese Federn agieren als low-pass-Filter. Logischerweise ist es vorteilhaft, die Abschneidefrequenz so niedrig wie möglich zu wählen.

Unglücklicherweise befindet sich eine Resonanzspitze an der Stelle der Abschneidefrequenz. Daher sollte das System gedämpft werden. Eine gebräuchliche Methode ist die Wirbelstromdämpfung. Ein Nachteil dieser Dämpfung besteht allerdings darin, daß sie die Filtereigenschaften sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Frequenzen negativ beeinflußt (siehe [Lee 92a]). Die Größe der Dämpfung sollte daher so niedrig wie möglich gewählt werden.

Eine dritte Methode der Vibrationsisolierung besteht aus mehreren Metallplatten, die durch Vitonringe getrennt übereinanderliegen.

Um die Antwort eines STM auf Vibrationen zu untersuchen, kann folgendes Modell verwendet werden. Die externen Vibrationen koppeln mit einer Grundfläche, auf der die Probe befestigt ist. Die Konstruktion, die die Spitze über der Probe hält, wird durch eine Feder dargestellt (Abb. 9).

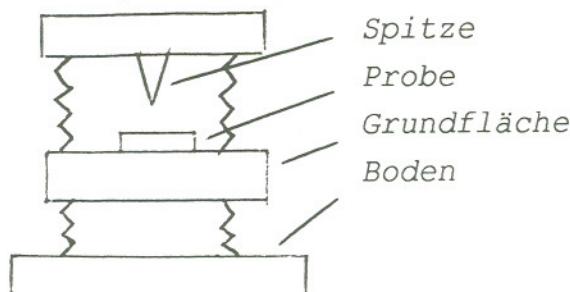


Abb. 9

Als wir die Vibrationsisolierung diskutiert hatten, war die Absolutbewegung der aufgehängten Masse relevant, und das Ergebnis war ein low-pass-Filter. Hier interessieren wir uns für Bewegungen der Spitze gegenüber der Probe. Das Ergebnis ist ein high-pass-Filter. Bis zu einer Abschneidefrequenz nimmt die Antwort zu. An der Stelle der Abschneidefrequenz befindet sich eine Resonanz. Bei sehr hohen Frequenzen koppeln alle Schwingungen direkt an den Abstand zwischen Spitze und Probe. Es ist vorteilhaft ein STM mit sehr hohen Abschneidefrequenzen zu haben. Um dies zu erreichen, sollte das STM möglichst klein und quadratisch sein. Die Antwort des STM zusammen mit der Vibrationsdämpfung ist in erster Näherung das Produkt der low-pass-Wirkung der Vibrationsdämpfung und der high-pass-Wirkung des STM selber. Das Ergebnis ist ein konstantes Plateau zwischen den Abschneidefrequenzen (siehe Abb. 10) [Lee 92a].

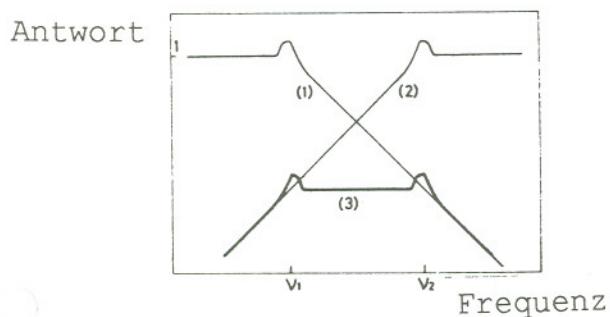


Abb. 10: die Antwortfunktion der Vibrationsdämpfung (1), des STM (2), und die Kombination beider (3)

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- (i) die Abschneidefrequenzen des STM und der Vibrationsisolierung sollten so weit wie möglich auseinanderliegen;
- (ii) die Dämpfung sollte derart sein, daß die Resonanzspitzen hinreichend niedrig sind;
- (iii) da die Dämpfung die Filtereigenschaften negativ beeinflußt, indem sie sowohl die low-pass als auch high-pass-Wirkung reduziert und damit die Höhe des Plateaus

vergrößert, sollte sie nicht größer als nötig sein.

2.6. Elektronische Datenverarbeitung

Das Endergebnis des STM muß ein Bild sein. Mit einem Lichtmikroskop kann man das vergrößerte Bild anhand des reflektierten Lichts direkt sehen. Bei einem STM ist das Bild eine Sammlung von Spannungswerten. Daher muß ein Computer diese Werte graphisch umsetzen und in einem Bild darstellen (siehe Abb.11 [Bur 92b]).

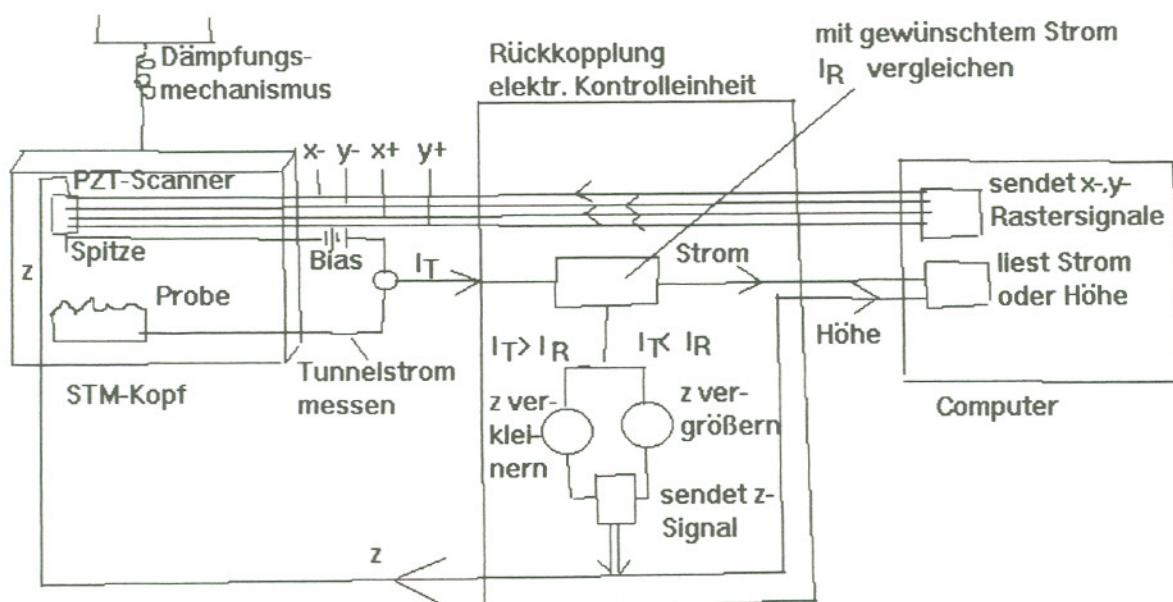


Abb.11: STM-System: STM-Kopf, bestehend aus dem Dämpfungsmechanismus, PZT, Probe und Spitze; Rückkopplung/elektronische Kontrolleinheit, bestehend aus dem Regelkreis und den x, y und z Spannungsquellen; Computer

2.7. Arbeitsmodi des Rastertunnelmikroskops

Das Tunnelmikroskop kann in verschiedenen Meßmethoden eingesetzt werden. Unterschiedlich analytische Aussagen über die Beschaffenheit einer Probe können so gewonnen werden. Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die möglichen Analysemethoden mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops [Lee 92b].

2.7.1. Topographie

a) Constant Current Mode

Im Constant Current Mode wird der Abstand zwischen Spitze und Probe so geregelt, daß der Tunnelstrom einem vorgegebenen Wert entspricht. Dies geschieht durch ein geeignetes Stellelement, welches durch die z-Spannung U_z angesteuert wird. Bei der Abtastung der Oberfläche liefert die Spannung $U_z(x, y)$ ein Maß für die absolute Höhe der Spitze über der Probe. Diese Information wird aufgezeichnet und steht somit als 3-dim Bild zur Verfügung. Die STM-Abbildungen enthalten die Zustandsdichte am Fermi-Niveau, welche nahezu als Topographie der Oberfläche interpretiert werden kann (siehe Abb. 12a).

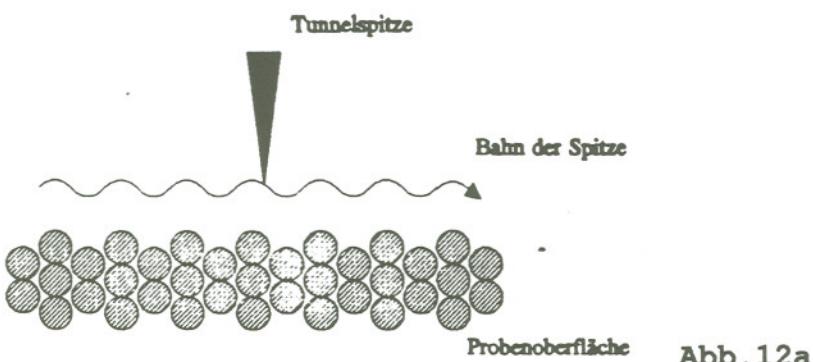


Abb. 12a

Die notwendige Regelelektronik muß im Constant Current Mode die Bedingung erfüllen, den Abstand zwischen Tunnelspitze und Probe hinreichend schnell zu korrigieren, damit der Tunnelstrom konstant bleibt.

b) Constant Height Mode

Wird die Regelung des Abstandes so verlangsamt, daß die Zeitkonstante größer als die Scan-Zeit ist, so bewegt sich die Spitze in einer konstanten Höhe über die Oberfläche. Im Constant Height Mode variiert daher der Abstand zu den Oberflächenatomen, der Tunnelstrom ist somit nicht konstant. Der Tunnelstrom wird aufgrund seiner Abstandsabhängigkeit als Meßgröße für die Oberflächentopographie herangezogen. Diese Abtastweise eignet sich nicht für große Höhenunterschiede auf der Probe, da die Gefahr des Spitzen-Proben-Kontaktes aufgrund

der langsamsten Regelung sehr groß ist. Der Constant Height Mode ist deshalb nur an atomar glatten Oberflächen einsetzbar. Vorteil dieses Abtast-Modus ist jedoch die Möglichkeit, Proben mit hoher Geschwindigkeit zu untersuchen, da an die Elektronik keine hohen Anforderungen bezüglich der zeitlichen Regelung gestellt werden (siehe Abb. 12b).

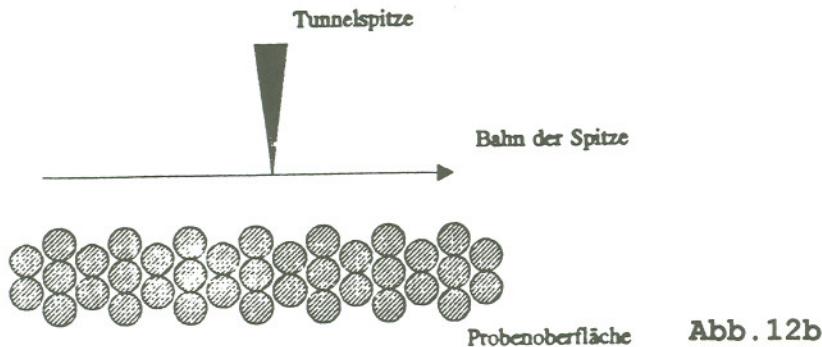


Abb. 12b

2.7.2. Spektroskopie

Durch die Rastertunnelspektroskopie kann die lokale elektronische Beschaffenheit einer Probe abgebildet werden. Hierbei erhält man Informationen über die besetzten und unbesetzten Zustände der Probenoberfläche. Dazu wird die Tunnelspitze an einen festen Punkt positioniert und der Regelalgorithmus abgeschaltet. Variiert man die Gap-Spannung U , so verändert sich der Tunnelstrom I , welcher linear von der Tunnelspannung abhängt. Man erhält eine Strom-Spannungs-Kennlinie, welche charakteristisch für die lokale Oberflächenbeschaffenheit ist. Bei positiven Gap-Spannungen tunnelt Elektronen aus besetzten Zuständen der Spitze in unbesetzte Zustände des Leitungsbandes der Probe. Für negative Gap-Spannungen kehren sich die Verhältnisse um. Je nach Polung des Tunnelüberganges können also besetzte oder freie Elektronenzustände der Oberfläche untersucht werden. Die differentielle Leitfähigkeit dI/dU liefert für jeden Spannungswert U eine Abbildung der Elektronenzustandsdichte der Probenoberfläche.

2.7.3. Austrittsarbeitmessung

Wird im Constant Current Mode die z-Spannung durch eine sinusförmige Hochfrequenz moduliert, so wird die Spitze zu vertikalen Schwingungen angeregt. Für kleine Schwingungsamplituden der Tunnelspitze von wenigen Angström misst man $\partial I / \partial d$ und erhält durch $\partial(\ln I) / \partial d$ einen Ausdruck, der zu der lokalen Höhe der Potentialbarriere Φ und damit zu der Austrittsarbeit E_A durch

$$\frac{\partial \ln I}{\partial d} \sim \sqrt{\Phi} \sim \sqrt{E_A} \quad (9)$$

proportional ist.

2.7.4. Tunnelpotentiometrie

Wird an die Probe ein lateraler Spannungsabfall ΔU angelegt, lässt sich mit dem Rastertunnelmikroskop die lokale Potentialverteilung auf der Probenoberfläche ermitteln. Dabei dient der Spannungsabfall der besseren Auflösung (siehe Abb. 13).

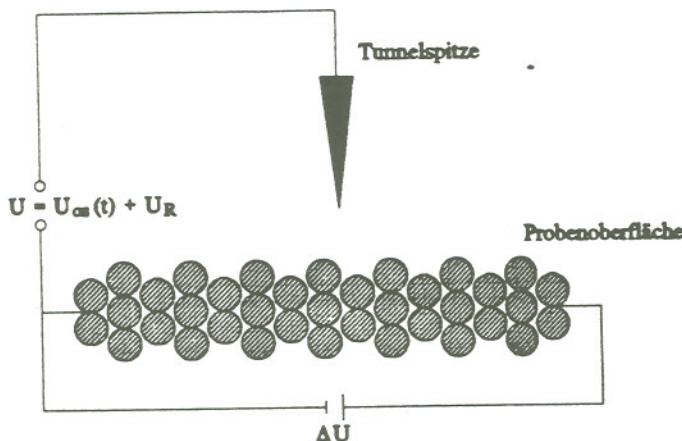


Abb. 13

Beim Rastern im Constant Current Mode könnte man nicht zwischen Höhenunterschieden der Oberfläche und Änderungen des Potentials unterscheiden. Damit man nur Potentialänderungen beobachtet, bedient man sich einer Modulation der Tunnelspannung. Hierzu wird die Tunnelspannung U aus einem regelbar konstanten Anteil U_R und einem oszillierenden Anteil $U_{osc}(t)$ zusammengesetzt. Die Amplitude des oszillierenden Tunnelstromanteils variiert mit Höhenänderungen der Oberfläche und wird daher ähnlich dem Constant Current Mode durch eine geeignete Steuerung des z-Piezoelements konstant gehalten.

Der Konstantspannungsanteil U_R wird bei der Oberflächenabtastung

stets so eingestellt, daß der Gleichstromanteil des Tunnelstroms, der durch den Spannungsabfall ΔU und dem Potential der Oberfläche erzeugt wird, verschwindet. Damit liefert die Spannung U_R in Abhängigkeit von den lateralen Probenkoordinaten das lokale elektrische Potential der Probenoberfläche.

3. Gerätebeschreibung

Das Rastertunnelmikroskop besteht aus drei Einheiten:

- die elektromechanische Tunneleinheit, im folgenden als STM-Kopf bezeichnet,
- die elektronische Kontrolleinheit,
- der Computer, der die Daten in einem Bild darstellt.

Im STM-Kopf sind Probe und Spitze untergebracht. Die Spitze wird an einem röhrenförmigen PZT befestigt. Diese Komponenten sind auf einem Stapel von vier Metallplatten befestigt, die durch spezielles Gummi gedämpft sind. Der Kopf beherbergt außerdem einen Verstärker, der die schwachen Tunnelströme zu einem Spannungssignal umsetzt und verstärkt.

Als zusätzliche Dämpfung befindet sich der STM-Kopf auf einem Stapel von drei Metallplatten (30cm x 30cm), die durch Viton-O-Ringe gedämpft übereinanderliegen.

Die elektronische Kontrolleinheit verfügt über eine Rückkopplung, um die Probe und Spitze innerhalb der Tunneldistanz zu halten. Die elektronische Kontrolleinheit bewerkstellt dies durch Vergrößerung der Spannung am z-Element des PZT, wenn der Tunnelstrom unter den gewünschten Wert fällt, entsprechend Verringerung wenn er über diesen Wert steigt.

Während die elektronische Einheit Korrekturen vornimmt, um den Tunnelstrom konstant zu halten, wird ein Fehlersignal erzeugt. Dieses Fehlersignal und der verstärkte Tunnelstrom werden an den Computer gegeben. Der Computer liest dann die Daten in Echtzeit und sendet die x- und y-Rastersignale an die elektronische Kontrolleinheit und stellt gleichzeitig beim

Rastern die Daten, die das Bild formen, auf dem Monitor dar.

3.1. Der STM-Kopf

Obwohl der STM-Kopf robust und kompakt ist, sollte er mit der nötigen Sorgfalt behandelt werden. Sowohl Spitzenträger als auch Probe werden mit Permanentmagneten an ihrem Platz gehalten (siehe Abb. 14) [Bur 92c].

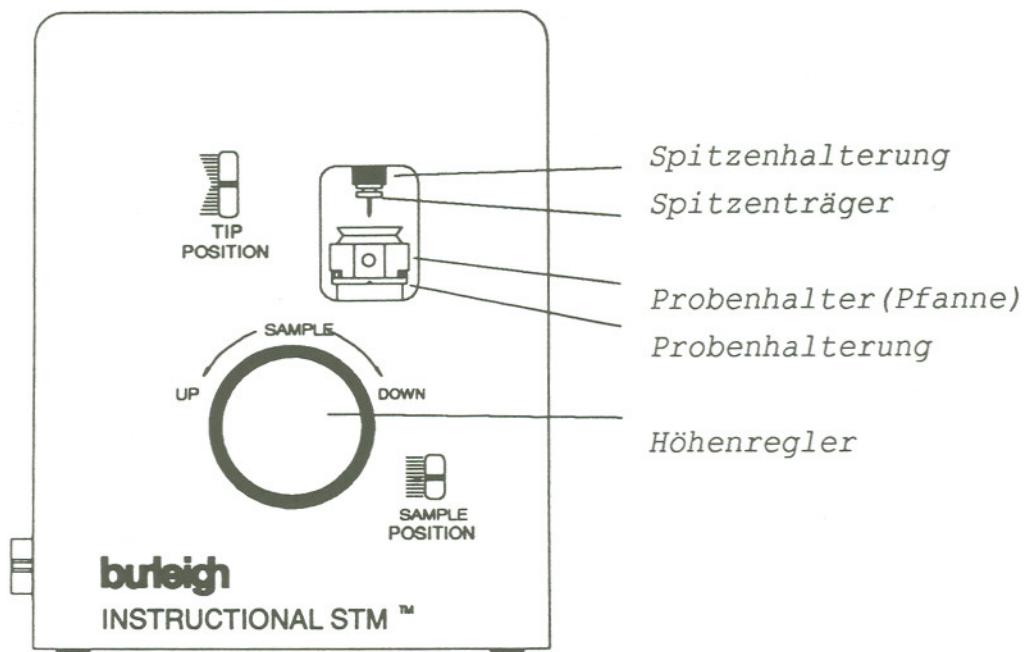
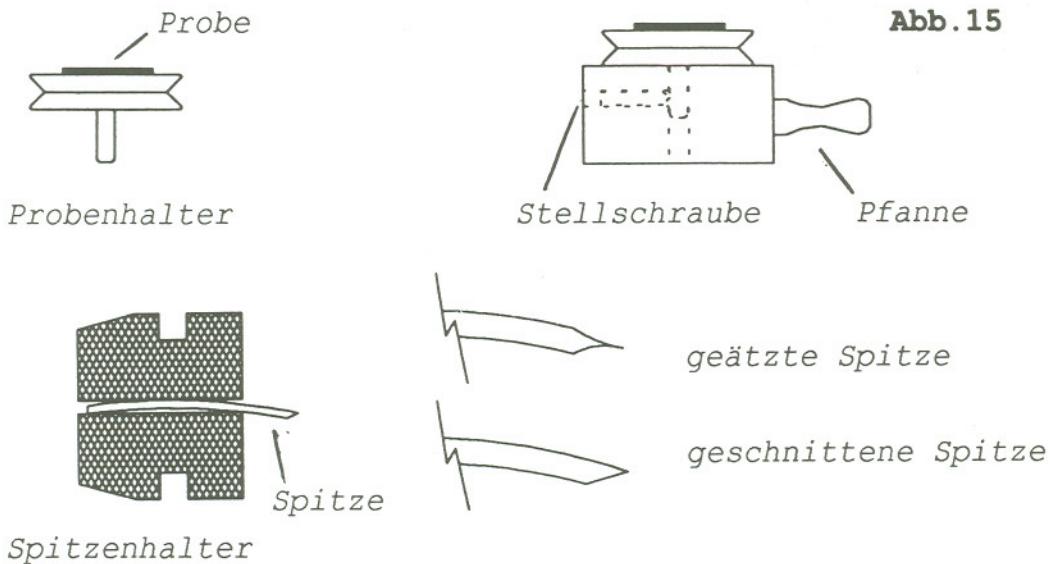


Abb. 14: der STM-Kopf und seine Komponenten

Der Probenträger paßt in den Probenhalter(Pfanne) und wird mit einer kleinen Schraube fixiert. Die Proben werden einfach ausgetauscht, indem man den Probenträger durch einen anderen ersetzt. Auch die Spitze wird in einem Träger befestigt(siehe Abb.15) [Bur 92c].



Das PZT hat einen Bereich von ungefähr $3.5\mu\text{m}$ in z- und ungefähr $7.6\mu\text{m}$ in x- und y-Richtung. Um die Spitze nahe genug an die Probe heranzufahren, benötigt man daher einen zusätzlichen Annäherungsmechanismus. Dieser besteht aus einem Hebelarm, der über einen Schrittmotor gesteuert wird (siehe Abb. 16). Die Spitze wird über die elektronische Kontrolleinheit so nahe an die Probe herangeführt bis der vorgegebene Tunnelstrom erreicht wird. Ebenso kann die Probe auf- und abbewegt werden, indem man den Regler vorn am STM-Kopf benutzt.

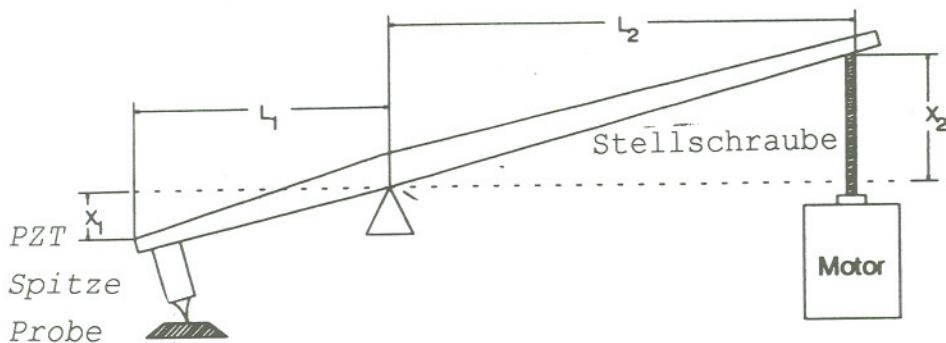


Abb. 16: die Spitze bewegt sich um die Strecke $X_1=L_1/L_2 \cdot X_2$

Die Vibrationsisolierung, die im STM-Kopf benutzt wird, besteht aus einem Stapel von vier Metallplatten, zwischen denen

spezielles Gummi zur Dämpfung angebracht ist. Der Kopf ist über einen Anschluß an der Seite mit der elektronischen Kontrolleinheit verbunden. Die Spitze-Probe-Gap-Spannung und die x-, y- und z-PZT-Spannungen werden über das Kabel an den STM-Kopf gegeben. Umgekehrt wird der verstärkte Tunnelstrom an die elektronische Kontrolleinheit weitergegeben.

-Einrichtung des STM-Kopfes

beachte: die elektronische Kontrolleinheit sollte jetzt ausgeschaltet sein!

3.1.1. Probenträger einsetzen

1. Stecken Sie den Probenträger in die Pfanne und befestigen Sie ihn, indem Sie die kleine Schraube leicht anziehen (nicht zu fest!!). Das entsprechende Werkzeug befindet sich im Kasten.

Hinweis: Sollten Sie größere periodische Strukturen wie zum Beispiel das Goldgitter untersuchen, so achten Sie darauf, daß die Linien des Goldgitters parallel zum Griff der Pfanne verlaufen, d.h. senkrecht zur Richtung, in der gescannt wird.

3.1.2. Spitzenherstellung

Eine mechanisch starre Spitze mit einer geringen Verschmutzung der Oberfläche ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für gute Bilder. Die Spitze sollte frei von Metallhärrchen sein, die anfällig für akustische Störungen sind, und muß scharf genug sein, damit eine vernünftige Chance für ein Atom besteht, näher an der Probe zu sein als alle anderen. Es gibt zwei bevorzugte Spitzenmaterialien für das STM. Diese werden entweder aus Wolfram oder Platin-Iridium-Draht hergestellt. Die PtIr-Spitzen sind am einfachsten herzustellen. Dazu benötigt man nur einen scharfen Drahtschneider.

Nachdem Sie eine Spitze hergestellt haben, stecken Sie sie mit ihrem ungeschnittenen Ende in den Spitzenhalter. Berühren Sie keinesfalls die Spitze und lassen Sie die Spitze nicht aus dem

Spitzenhalter hinten herausragen. Achten Sie darauf, daß die Spitze leicht gebogen sein muß, damit sie im Probenhalter bleibt. Da die Herstellung der PtIr-Spitzen am einfachsten ist, werden diese im Praktikum vorgezogen. Außerdem neigen diese nicht in dem Grade zur Oxidation wie Wolfram.

Herstellung: Halten Sie ungefähr 0.5-1.0cm Draht mit einer Zange fest und schneiden Sie die Spitze mit einem Seitenschneider in einem spitzen Winkel, indem Sie Spitze und Rest des Drahtes beim Schneiden auseinanderziehen.

Hinweis: Der Seitenschneider ist speziell für die PtIr-Spitzen gedacht und keinesfalls für andere Materialien wie zum Beispiel Wolfram.

3.1.3. Proben und Spitzen einsetzen

1. Bewegen Sie den Probentisch mittels des Reglers am STM-Kopf nach unten.
2. Kontrollieren Sie die Spitzenposition. Sollte sie sich nicht oberhalb der Mitte befinden, so benutzen Sie den Coarse Retract Schalter an der Kontrolleinheit, um die Spitze zurückzufahren.
3. Setzen Sie nun den Spitzenhalter mit der Spitze nach unten in die Halterung. Benutzen Sie dazu die nichtmagnetische Pinzette.
4. Schieben Sie dann die Pfanne in den Probentisch und achten Sie darauf, daß genügend Platz zwischen Spitze und Probe bleibt!
5. Nachdem sowohl die Spitze als auch die Probe eingesetzt sind, bringen Sie sie auf einen Abstand von 0.5-1.0mm. Nun kann die Elektronik den Annäherungsmechanismus automatisch steuern.

Hinweis: Berühren Sie weder Spitze noch Probe solange die elektronische Kontrolleinheit eingeschaltet ist. Achten Sie darauf, daß die Einheit ausgeschaltet ist, solange Sie mit dem Einsetzen von Spitze und Probe beschäftigt sind. Der PZT-Scanner wird bei hoher Spannung betrieben, außerdem ist der äußerst empfindliche Vorverstärker dazu ausgelegt, Ströme im nA-Bereich zu messen!

3.1.4. Proben und Spitzen entfernen

1. Bewegen Sie die Probe nach unten, indem Sie den Regler am STM-Kopf betätigen. Überschreiten Sie nicht den Anzeigebereich!
2. Ziehen Sie die Pfanne aus dem Probentisch, wenn der Abstand zwischen Probe und Spitz groß genug ist (2mm).
3. Vermeiden Sie den Kontakt zwischen Spitz und Probe, wenn Sie die Probe entfernen (andernfalls zerstören Sie die Spitz bzw. die Probe).
4. Berühren Sie nicht die Oberfläche der Probe!
5. Benützen Sie die nichtmagnetische Pinzette, um den Spitzthalter zu entfernen.
6. Die Spitz sollten nach oben zeigen, wenn sie irgendwo untergebracht werden.

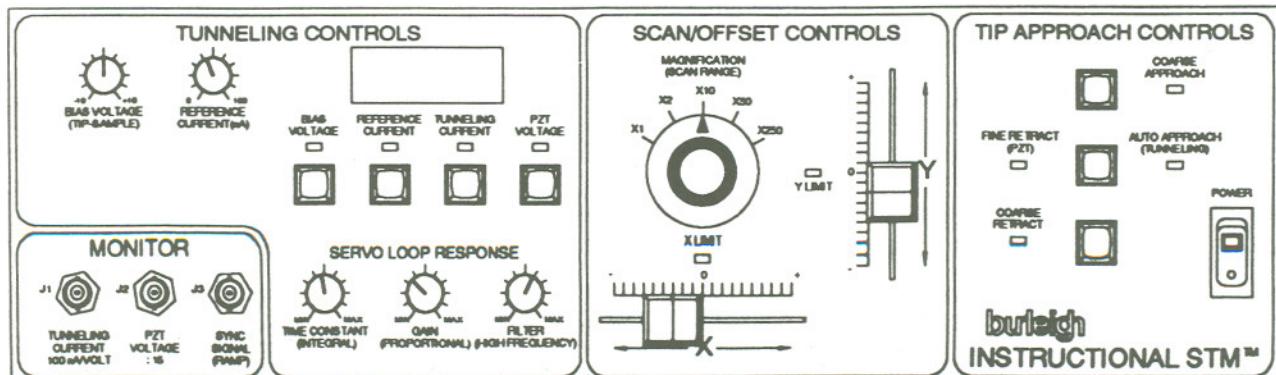
3.2. Elektronische Kontrolleinheit

Damit der Tunneleffekt eintritt, ist es nötig, eine sogenannte Bias-Spannung zwischen Spitz und Probe anzulegen. Ist der Abstand dann noch klein genug, kann ein Tunnelstrom fließen. Die elektronische Kontrolleinheit steuert die Spitzposition, damit der konstante Tunnelstrom erhalten bleibt. Um den Tunnelstrom innerhalb eines kleinen Bereichs konstant zu halten, muß die Kontrolleinheit eine große Empfindlichkeit (gain) aufweisen. Das heißt, bei einer kleiner Änderung des Tunnelstroms reagiert die Kontrolleinheit mit einer großen Änderung der Spitzposition. Andererseits kann dies bei zu groß eingestellter Empfindlichkeit zu Oszillationen führen, weil das System große Korrekturen als Antwort auf kleine Änderungen im Tunnelstrom vornimmt.

Abb.17 [Bur 92d] zeigt die Vorderseite der elektronischen Kontrolleinheit. Die Kontrollvorrichtung ist in vier Einheiten unterteilt:

Tunneling Controls, Scan/Offset Controls, Tip Approach Controls, Monitor Output Signals

Abb. 17



3.2.1.Tunneling Controls

Bias Voltage: bestimmt die Bias-Spannung zwischen Probe und Spitze. Sie kann zwischen $\pm 10V$ Gleichspannung variiert werden.

Reference Current: bestimmt den Strom, bei dem getunnelt werden soll. Er kann zwischen 0 und $100nA$ variiert werden. Das Vorzeichen des Stroms hängt vom Vorzeichen der Spannung ab. **Bei negativer Spannung fließt der Strom von der Probe zur Spitze.**

Current/Voltage Monitor: Vier Parameter können über die LED-Anzeige abgelesen werden. Indem man den entsprechenden Knopf drückt, kann man die Werte der Bias-Spannung, des Referenzstroms, des Tunnelstroms oder der PZT-Spannung ablesen. Drücken Sie nicht mehr als einen Knopf gleichzeitig.

Servo Loop Response: wird benutzt, um die Antwort des Servo Loop für eine bestimmte Probe zu optimieren. Während die Oberfläche abgetastet wird, nimmt die Rückkopplung laufend den Tunnelstrom auf und nimmt Korrekturen vor, je nachdem wie der Servo Loop eingestellt ist. Wenn die Zeitkonstante (Time Constant) auf Minimum gestellt wird, so reagiert der Servo Loop sehr schnell auf jede Änderung der Oberflächenbeschaffenheit. Wenn die Empfindlichkeit (gain) hochgestellt wird, so antwortet der Servo Loop auf jede Änderung im Tunnelstrom sehr stark. Wenn der Filter hoch eingestellt wird, werden alle hochfrequenzartigen Änderungen des Stroms nicht berücksichtigt.

3.2.2.Scan/Offset Controls

Diese Kontrollvorrichtung steuert die PZT-Spannungen der x- und y-PZT-Elemente. Sie ermöglicht es, bei verschiedenen Vergrößerungen verschiedene Stellen der Probe zu untersuchen.

Die Vergrößerung (Magnification (Scan Range)) wird einfach durch Verkleinerung des Gebiets, das abgetastet wird, erreicht.

Die x- und y-Kontrollvorrichtungen erlauben es, das Rastergebiet

zu verschieben. Eine LED-Anzeige leuchtet auf, wenn die gewünschte Verschiebung den verfügbaren Bereich des PZT übersteigt. Die x- und y-Grenzen hängen auch von der jeweiligen Vergrößerung ab. Es ist keine Verschiebung möglich, wenn bereits der volle verfügbare Bereich abgetastet wird. Bei höheren Vergrößerungen hat man eine relativ große Freiheit für Verschiebungen in x- und y-Richtungen.

Tip: Wenn man kleine Gebiete der Oberfläche untersucht, sollte man die x- und y-Schiebeknöpfe nicht über große Distanzen bewegen, weil dies aufgrund der elektromechanischen Eigenschaften des PZT zu Störungen des Bildes durch Drift führen kann.

3.2.3. Tip Approach Controls

Der STM-Kopf hat zwei Einstellungsmechanismen. Die Grobeinstellung umfaßt den Schrittmotor, die Schraube und den Trägerarm. Die segmentierte PZT-Röhre sorgt für die Feineinstellung der x-, y- und z-Bewegungen bei atomaren Größenordnungen.

Coarse Retract: Bevor man eine Probe einsetzt, sollte man genug Arbeitsraum im STM-Fenster haben. Über diesen Regler kann die Spitze zurückbewegt werden. Er betreibt den Schrittmotor, so lange er gedrückt wird. Die Spitzensposition sollte dabei die Bereichsanzeige am STM-Kopf nicht überschreiten. Da dieser Regler auch die Kontrollvorrichtung zum Tunneln aktiviert, muß er immer unmittelbar vor dem Tunneln betätigt werden.

Coarse Approach: Über diesen Regler wird die PZT-Rastervorrichtung auf die Probe zubewegt. Um diesen Regler zu betätigen, sollte zuerst die Auto Approach Funktion (siehe unten) aktiviert sein.

Fine Retract (PZT)/Auto Approach (Tunneling): Dieser Regler hat zwei Funktionen, die von der Stellung der Kontrolleinheit abhängen. Wird er unmittelbar nach dem Coarse Retract Regler betätigt, so bringt der Schrittmotor die Spitze in Tunneldistanz

zur Probe. Während der Annäherung blinkt die Tunnel-LED, bis die Tunneldistanz erreicht ist. Beim Tunneln leuchtet die LED konstant. Dabei wird der Schrittmotor deaktiviert. Er bewegt sich solange nicht, bis er wieder durch den Coarse Retract Regler aktiviert wird. Drückt man den Fine Retract(PZT)/Auto Approach(Tunneling) Regler ein zweites Mal, so wird die Spitze zurückbewegt, der Schrittmotor bleibt aber deaktiviert.

3.2.4. Monitor Outputs

Beim Tunneln müssen mehrere Einstellungen optimiert werden. Die normale Oberflächenrauhigkeit kann oft die Antwortfähigkeit der Spitze übersteigen. Dann müssen die Parameter der Rückkopplung angepaßt bzw. das abzutastende Gebiet verändert werden.

Zugang zu drei internen Signalen liefern die Ausgänge am Monitor Outputs. Der Tunnelstrom und die PZT-Spannung können mit einem Oszilloskop aufgezeichnet werden, während die PZT-Raster-Spannung als Trigger-Signal benutzt werden kann. Der Ausgang J1 für den Tunnelstrom hat eine Skala von 10nA/V. Die PZT-Spannung (J2) hat einen Skalenfaktor $\div 15$.

3.3. True-Image-Software

Die True-Image-Software verwaltet die Rastersignale, die an die elektronische Kontrolleinheit gegeben werden, und stellt die sich ergebenden Bilder in nahezu Echtzeit dar.

Starten der True-Image-Software:

1. Geben Sie an der MS-DOS-Eingabeaufforderung C:〉 win ein und drücken Sie dann die Eingabetaste enter.
2. Doppelklicken auf das Burleigh-Zeichen
3. Doppelklicken auf das Burleigh-STM-Zeichen

Schließen der True-Image-Software:

1. Schließen Sie die True-Image-Software, indem Sie Close vom File Menu wählen. Sie können aber auch auf das Minuszeichen in der oberen linken Ecke doppelklicken.
2. Es kann sein, daß eine Menu Box erscheint, die Sie

auffordert, die Bilddaten abzuspeichern.

3. Sie sind nun wieder beim Windows Program Manager. Doppelklicken Sie auf das Minuszeichen oben links, um Windows zu verlassen.

4. Sie sind nun wieder bei der Eingabeaufforderung und können den Computer ausschalten.

Hinweis: Bevor Sie den Computer ausschalten, müssen Sie sowohl die True-Image-Software als auch Windows ordnungsgemäß beenden.

3.4. Constant Current Mode und Constant Height Mode

3.4.1. Constant Current Mode

1. Bringen Sie die Probe auf ungefähr 1mm an die Spitze heran (oder die Spitze an die Probe).

2. Stellen Sie die Gap-Spannung auf den angegebenen Wert ein (wird in der Versuchsdurchführung angegeben).

3. Stellen Sie den Referenzstrom auf den angegebenen Wert ein.

4. Stellen Sie den Gain Regler auf Maximum.

5. Stellen Sie den Time Constant Regler auf Minimum.

6. Stellen Sie den Filter Regler auf Maximum.

7. Drücken Sie kurz den Coarse Retract Regler.

8. Drücken Sie kurz den Auto Approach (Tunneling)-Regler.

9. Der Schrittmotor läuft nun und bringt die Spitze an die Probe heran. Wenn der Tunneleffekt eintritt, springt der Strom auf den vorgegebenen Referenzwert.

Sollte der Strom oszillieren, so können Sie dies mit den Reglern, insbesondere mit dem Gain Regler, korrigieren. Manchmal ist das Oszillieren so stark, daß ein Pfeifton des Piezostellelements hörbar ist.

3.4.2. Constant Height Mode

Hinweis: Beachten Sie, daß Sie die Spitze immer im Constant Current Mode an die Probe heranbringen, unabhängig davon, welchen Mode Sie dann wählen. Andernfalls kann es zu einem Spitzen-Proben-Kontakt kommen!!!

1.-9. siehe unter 3.4.1.

10. Stellen Sie den Gain Regler auf *Minimum*.

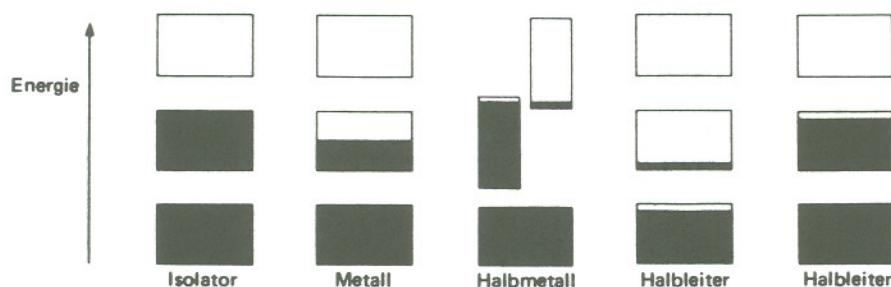
11. Stellen Sie den *Time Constant* Regler auf *Maximum*.

4. Versuchsdurchführung

Ziel dieses Versuchs soll sein, sich mit den Prinzipien der Rastertunnelmikroskopie vertraut zu machen. Dazu sollen drei Materialien untersucht werden:

- Gold als Vertreter für die Gruppe der Metalle,
- Graphit als Vertreter für die Gruppe der Halbmetalle,
- MoS₂ als Vertreter für die Gruppe der Halbleiter.

Die Elektronen in einem Metall sind in Energiebändern angeordnet, die durch Energiebereiche voneinander getrennt sind, in denen keine Elektronenzustände erlaubt sind. Solche Bandlücken röhren von der Wechselwirkung der Leitungselektronenwellen mit den Ionenrumpfen des Kristalls her. Wenn die erlaubten Energiebänder ganz besetzt oder ganz leer sind, so verhält sich der Kristall wie ein Isolator, und dann kann sich kein Elektron in einem elektrischen Feld bewegen. Der Kristall verhält sich wie ein Metall, wenn ein oder mehrere Bänder teilweise besetzt sind. Wenn alle Bänder besetzt sind bis auf ein oder zwei Bänder, die entweder sehr wenig oder fast ganz besetzt sind, so stellt der Kristall einen Halbleiter oder ein Halbmetall dar (siehe Abb. 18) [Kit 88].



Schematische Darstellung der Besetzung der erlaubten Energiebänder durch Elektronen für Isolator, Metall, Halbmetall und Halbleiter. Die Vertikalausdehnung der Rechtecke kennzeichnet die erlaubten Energiebereiche, die schattierten Flächen die mit Elektronen besetzten Bereiche. In Halbmetallen (wie Wismut) ist am absoluten Nullpunkt ein Band fast ganz besetzt und ein anderes fast ganz leer; ein reiner Halbleiter (wie Silizium) wird dagegen am absoluten Nullpunkt zum Isolator. Der linke der zwei Halbleiter hat eine endliche Temperatur, Ladungsträger sind thermisch angeregt. Der andere Halbleiter hat ein Elektronendefizit infolge von Verunreinigungen.

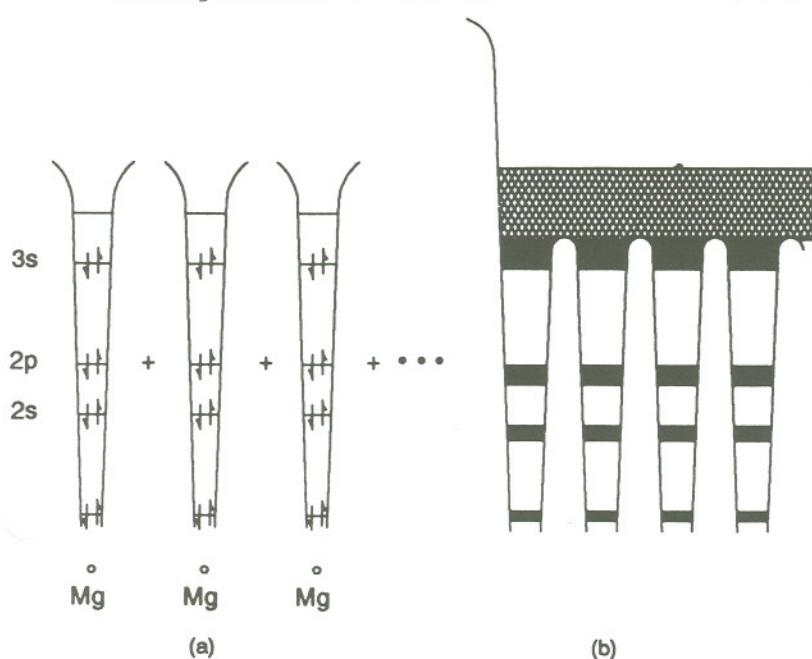
Abb. 18

Zum Bändermodell der Festkörper

Bringt man zwei Atome zusammen und ist die Energie zweier Orbitale ähnlich, so kombinieren die Zustände und bilden ein Molekülorbital niedrigerer Energie (bindend) und ein Molekülorbital höherer Energie (nichtbindend). Beim bindenden Molekülorbital ist die Elektronendichte zwischen den beiden Atomen groß. Die Gesamtenergie des Systems nimmt ab, um einen niedrigeren Bindungszustand, nämlich den der Molekülbinding, zu bilden.

Statt zweier Atome wechselwirken nun N Atome. Jedes atomare Energieniveau führt auf insgesamt N benachbarte Niveaus. Wenn N sehr groß ist, liegen die verschiedenen Energieniveaus so nahe beieinander, daß man sagen kann, daß sie ein kontinuierliches Energieband bilden (siehe Abb. 19a, b) [Bur 92e].

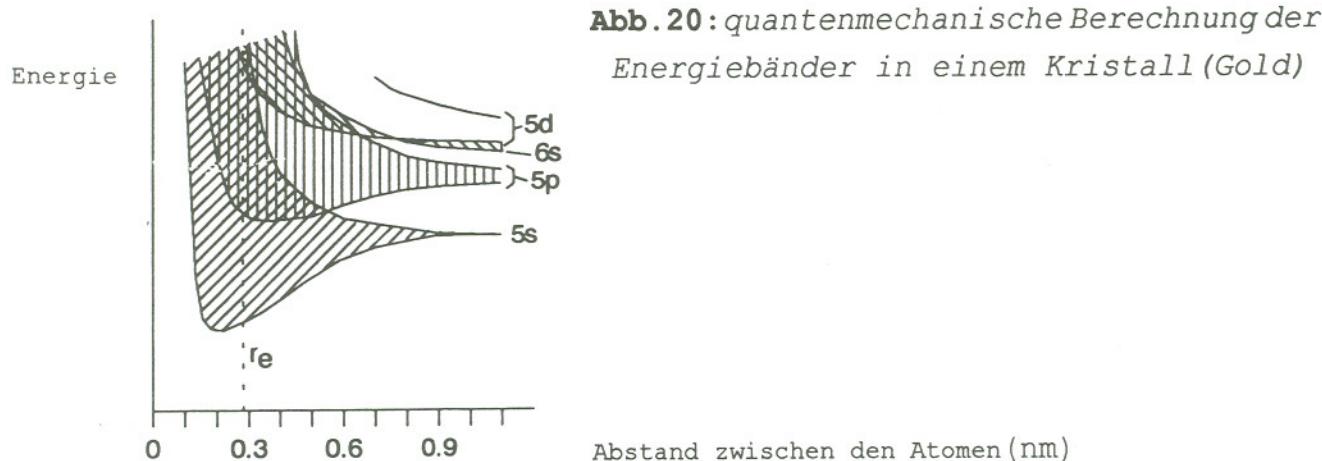
Abb. 19: Energieniveaus von Magnesium: (a) einzelne Atome, (b) Kristall: die scharfen Energieniveaus der Atome bilden zusammen die Bänder im Kristall.



4.1. Gold (Metall)

Damit ein Metall elektrisch leitet, müssen sich die Elektronen in Anwesenheit eines elektrischen Feldes bewegen können. Das ist nur möglich, wenn es naheliegende unbesetzte Orbitale gibt, in denen sich die Elektronen bewegen können. Diese Bedingung können nur die Bänder erfüllen, die aus den Valenzorbitalen gebildet werden. Im Experiment messen Sie die räumliche Verteilung der Elektronendichte der höchstbesetzten Zustände dieses

Bandes. Diese Zustände liegen nahe der Fermi-Energie des Metalls. Diese Elektronen "spüren" die niedrigste Potentialbarriere und können in unbesetzte Zustände der Nadel tunneln. Gold hat die Valenzelektronenkonfiguration $6s^1 5d^{10}$. Das Leitungsband besteht hauptsächlich aus diesen 6s- und 5d-Atomorbitalen (siehe Abb. 20) [Bur 92f].



Experiment:

Durch die Metalleigenschaft von Gold sind die Elektronen streng zwischen den Atomen delokalisiert, und es gibt daher nur kleine Variationen in der Elektronendichte zwischen den Atomen. Typische Modulationen sind in der Größenordnung von 0.1\AA , daher sollte man nicht erwarten, atomare Auflösung zu erreichen [Hal 87].

Die erste Probe, die untersucht werden soll, ist das goldbeschichtete Gitter. Diese Probe illustriert den Scan-Bereich des Piezo-Stell-Elements und die möglichen Vergrößerungen des STM. Das Gitter besitzt 2400 Linien/mm, d.h. ungefähr $0.4\mu\text{m}$ Linienabstand.

Vorgehensweise:

1. Bereiten Sie eine PtIr-Nadel vor und setzen Sie diese ein.
2. Setzen Sie das Goldgitter so ein, daß die Gitterlinien parallel zum Griff der Pfanne verlaufen (Licht wird senkrecht zu den Linien gestreut).
3. Bringen Sie die Spitze auf einen Abstand von ca 1mm zur Probe.
4. Laden Sie grating3.img (File/Load).
5. Stellen Sie den Scan-Delay (Collect/Configure) auf 0.2mS/Sample.

6. Stellen Sie den Data Type auf Topographie (Collect/Configure).
7. Stellen Sie die Bias-Spannung auf ungefähr 1V.
8. Stellen Sie den Referenzstrom auf 8nA.
9. Stellen Sie auf Constant Current Mode, d.h. Gain auf Maximum, Filter auf Maximum, Time Constant auf Minimum.
10. Stellen Sie die Vergrößerung auf X1.
11. Stellen Sie die x- und y-Schiebeknöpfe auf die Mitte.
12. Drücken Sie kurz den Coarse Retract Regler.
13. Drücken Sie kurz den Auto Approach Regler zur Annäherung und warten Sie.
14. Wenn der Tunnelstrom einsetzt, starten Sie Unidirectional Scan (Collect/Scan Unidirectional).

Hinweis: Wenn Sie A drücken, wird der Scan-Vorgang sofort abgebrochen. Drücken Sie H, so läuft der Scan-Vorgang noch bis zum Ende und behält das Bild auf dem Monitor.

15. Ändern Sie den Scan-Bereich und denken Sie daran, die Software (Collect/Configure) entsprechend einzustellen. Sammeln Sie Bilder bei verschiedenen Vergrößerungen.

Im großen Scan-Bereich sollten die Linien mit einer Periode von 4000Å zu sehen sein. Bei stärkerer Vergrößerung werden Einzelheiten des Kristallisationsprozesses von Gold sichtbar. Dabei bilden sich Kornstrukturen von einer Größe von 100-200Å.

Hinweis: Artifakte können Sie erkennen, indem Sie eine andere Vergrößerung wählen. Bleibt die Größe der Struktur unverändert, so handelt es sich um keine Struktur, die von der Probe herrührt.

Mit Hilfe des Goldgitters können Sie den Scan-Bereich des PZT-Stellelements kalibrieren.

Stellen Sie dazu Scan Range in X auf Max Scanner Range in X (Collect/Configure) und entsprechend Scan Range in Y auf Max Scanner Range in Y. Stellen Sie den Schalter Magnification auf X2. Nehmen Sie ein Bild auf. Zählen Sie dann die Anzahl der Linien

auf dem Bild und multiplizieren diese Zahl mit 4170 (Å, dem Abstand der Linien). Stellen Sie den Max Scanner Range in X und Y auf diese Zahl, multipliziert mit zwei. Der Max Scanner Z Range beträgt ungefähr 40% dieses Werts: Eine wesentlich genauere Kalibrierung erfolgt mit dem Graphitgitter.

Laden Sie nun grating5.img oder ein entsprechendes Bild von Ihnen (wenn Sie monoatomare Stufen auflösen sollten), und untersuchen Sie die Korrugationen auf einer monoatomaren Stufe (Display/Cross Section). Die geringen Korrugationen (ca. 0.1 Å) veranschaulichen die streng delokalisierte Natur der Elektronen, wie sie für Metall typisch ist.

4.2. Graphit (Halbmetall)

Da man das STM in Luft betreibt, sollte man Materialien verwenden, die möglichst wenig zur Verunreinigung neigen. Zu diesen Materialien gehört neben Gold auch Graphit.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Graphit ist der hohe Grad an Anisotropie. Graphit besteht aus übereinanderliegenden Schichten von Kohlenstoffatomen, die in sechs-eckiger Form angeordnet sind (siehe Abb. 21) [Bur 92g].

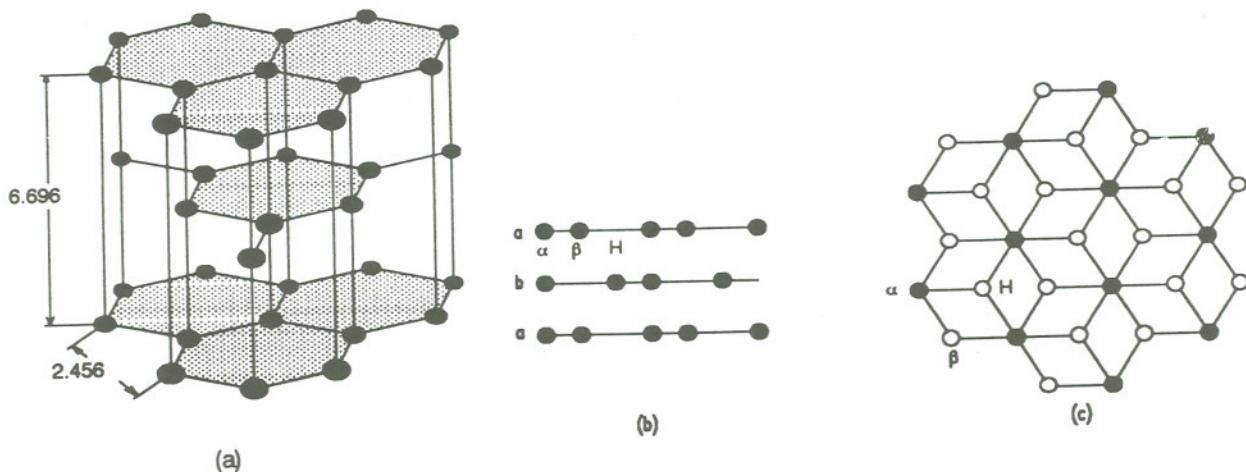
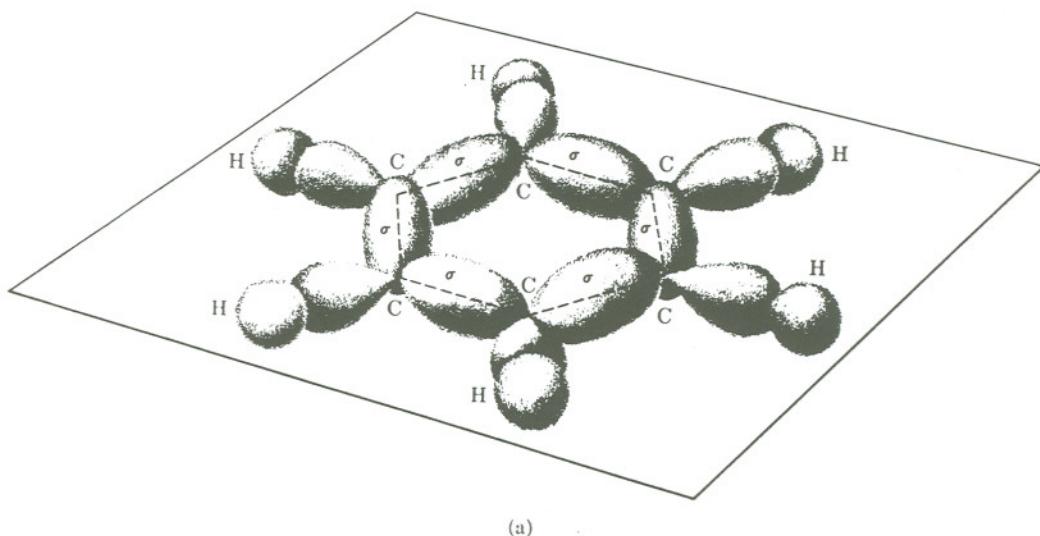


Abb. 21: Kristallstruktur von Graphit. (a) Anordnung der verschiedenen Ebenen. (b) Beachten Sie die verschiedenen Positionen der α - und β -Atome. (c) Aufsicht (Dimensionen in Å)

Es gibt zwei Arten von Atomen in der obersten Schicht, die hier α -Atome und β -Atome genannt werden. Ein α -Atom der oberen Schicht liegt genau über einem α -Atom in der Schicht darunter, hingegen

ein β -Atom der oberen Schicht über einem Loch der unteren Schicht liegt. Diese Atome können daher mit dem STM unterschieden werden. Da die α -Atome der oberen Schicht mit α -Atomen der unteren Schicht koppeln können, wird die Energie der Elektronen der α -Atome erniedrigt. Da hauptsächlich Elektronen nahe der Fermi-Energie zum Tunnelprozeß beitragen, sind im wesentlichen nur noch die β -Atome sichtbar. Man sollte also eher ein dreieckiges Gitter bestehend aus β -Atomen beobachten als ein honigwabenförmiges Gitter bestehend aus allen Oberflächenatomen. Die Atome in einer Schicht sind durch lokalisierte kovalente σ -Bindungen mit sp^2 -Hybridwellenfunktionen und nichtlokalisierte π -Bindungen, wie in Benzol (siehe Abb. 22a, b), gebunden [Alo 90]. Die nichtlokalisierten π -bindenden Elektronen können sich parallel zu den Schichten frei bewegen (was die elektrische Leitfähigkeit des Graphits parallel zu den Schichten erklärt) aber nicht senkrecht zu ihnen (daher Halbmetall). Aufeinanderfolgende atomare Schichten verhalten sich wie Makromoleküle. Diese Schichten werden wie molekulare Kristalle durch schwache van der Waals-Kräfte zusammengehalten, wodurch sich das flockige, schlüpfrige Verhalten des Graphit erklärt. Gerade aufgrund dieser Struktur wird Graphit als Schmiermittel benutzt.

Eine einfache Methode, den Kristall zu spalten, besteht darin, eine Schicht von Graphit mit Tesafilm abzuziehen. Dadurch erhält man eine saubere Oberfläche.



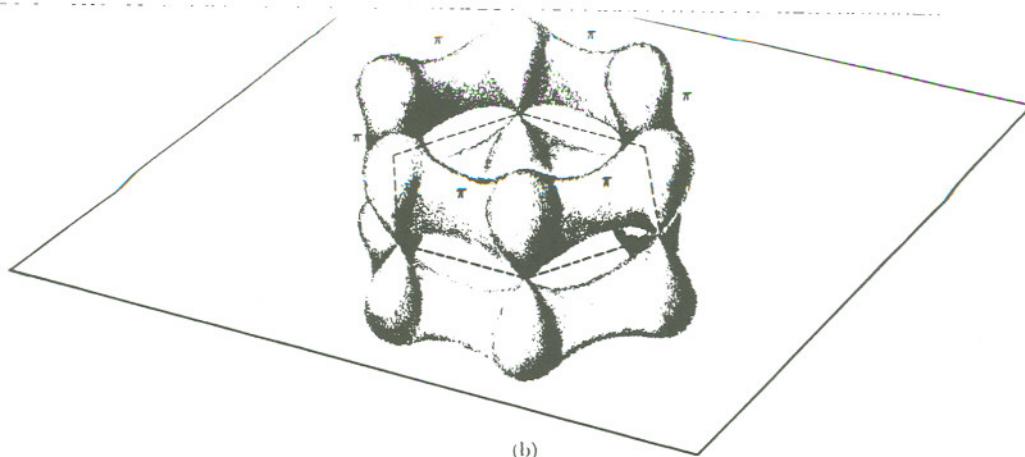


Abb. 22: Molekülorbitale für Benzol. (a) Lokalisierte σ -Bindungen
 (b) unlokalisierte π -Bindungen

Experiment:

In diesem Experiment sollte die atomare Struktur von Graphit aufgelöst werden. Es sollte außerdem der Unterschied der räumlichen Verteilungen der Elektronendichten zwischen Metallen und Halbmetallen veranschaulicht werden können. Dies zeigt Natur und Grad der Überlappung der beteiligten Atomorbitale.

Vorgehensweise:

1. Bereiten Sie eine PtIr-Nadel vor und setzen Sie diese ein.
2. Ziehen Sie mit Tesafilm eine Schicht von Graphit ab und setzen Sie die Probe ein.
3. Bringen Sie die Spitze auf einen Abstand von 1mm zur Probe.
4. Laden Sie graph1.img(File/Load).
5. Stellen Sie den Scan Delay(Collect/Configure) auf 0.0mS/Sample.
6. Stellen Sie den Data Type auf Current(Collect/Configure).
7. Stellen Sie die Bias-Spannung auf -20mV.
8. Stellen Sie den Referenzstrom auf 5mA.
9. Gehen Sie zur Annäherung auf Constant Current Mode, d.h. stellen Sie Gain auf Maximum, Filter auf Maximum und Time Constant auf Minimum.
10. Stellen Sie die Vergrößerung auf X250.
11. Stellen Sie die x- und y-Schiebeknöpfe auf die Mitte.
12. Drücken Sie den Coarse Retract Regler.
13. Drücken Sie den Auto Approach Regler zur Annäherung und warten Sie.
14. Wenn der Tunnelstrom einsetzt, gehen Sie auf Constant Height

Mode, d.h. stellen Sie Gain auf Minimum, Time Constant auf Maximum und Filter auf Maximum. Starten Sie dann Unidirectional Scan (Collect/Scan Unidirectional). Suchen Sie eine möglichst flache Stelle mittels der x- und y-Regler. Gehen Sie dazu auch auf X50.

Hinweis: das System braucht immer etwas Zeit, bis es sich stabilisiert hat.

15. Nehmen Sie Bilder auf und ändern Sie den Scan-Bereich. Denken Sie daran, die Software entsprechend einzustellen (Collect/Configure).

Wenn Sie keine atomare Auflösung bekommen, wechseln Sie zunächst die Nadel aus. Sollte nach mehreren Versuchen auch dies nicht zum Erfolg führen, so können Sie nochmals eine Schicht von Graphit mit Tesafilem abziehen.

Betrachten Sie nun die Korrugationen. Sie sollten ungefähr zwischen 1-2 Å variieren (Korrugationen bei Gold ca 0.1 Å).

Messen Sie die hexagonale Oberflächenstruktur aus.

4.3. Molybdendisulfid-MoS₂ (Halbleiter)

Halbleiter sind dadurch charakterisiert, daß sie ein volles Valenzband besitzen und sich eine Energilücke zwischen Valenz- und Leitungsband befindet. Leitende Eigenschaften erhalten sie entweder durch thermisch angeregte Elektronen oder Elektronen, die von Verunreinigungen herrühren. Wirken die Verunreinigungen als Elektronen-Donatoren, so befinden sich die Donatoren-Zustände nahe der unteren Leitungsbandkante. Man bezeichnet die Halbleiter dann als n-leitend, weil der Strom von jenen Elektronen herröhrt, die thermisch ins Leitungsband angeregt werden. Umgekehrt können Verunreinigungen, die leere Zustände nahe der oberen Valenzbandkante besitzen, Elektronen aufnehmen. Dabei entsteht ein Loch im Valenzband. Elektronen können in dieses Loch fallen und bewirken, daß sich das Loch in umgekehrte Richtung bewegt. Der Halbleiter heißt dann p-leitend.

In diesem Experiment soll MoS_2 untersucht werden. MoS_2 ist ein Halbleiter mit einer Energielücke von 0.75eV [Wei 88]. Ähnlich Graphit besteht MoS_2 aus Schichten, in denen alle Valenzorbitale innerhalb einer einzelnen Schicht in die Bindungsorbitale eingehen. Im allgemeinen führt die Begrenzung des Gitters durch die Oberfläche dazu, daß Valenzorbitale an der Oberfläche nicht an Bindungen beteiligt sind (dangling-bonds). Sie neigen zu Reaktionen mit Adsorbaten an der Oberfläche, was zu anderen Energiezuständen der Elektronen führt. Bei Halbleitern erzeugt dieser Vorgang Oberflächenzustände in der Energielücke. Ein typisches Beispiel ist Silizium. Messungen werden hier nur in Ultrahochvakuum durchgeführt. Bei MoS_2 gibt es dagegen keine nichtbindenden Orbitale an der Oberfläche. Alle Valenzorbitale in einer Schicht sind an der Bindung beteiligt. Es wirken nur schwache Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Schichten. Der 2-dim Charakter des Gitters bedeutet auch, daß die Schicht an der Oberfläche relativ stabil ist, d.h. sie neigt nicht zur Oberflächenrekonstruktion, um die Energie an der Oberfläche zu minimieren. Damit kann man also mit dem STM auch Aufschluß über das Volumen erhalten. MoS_2 besteht aus Schichten von Molybdän zwischen zwei Schichten Schwefel (siehe Abb. 23) [Wei 88]. Die Schwefelatome bilden ein Diamantgitter mit einer Gitterkonstanten von 3.16\AA . Ein ähnliches Muster haben die Molybdenatome in der nächsten Schicht, sie sind aber seitlich versetzt. Diese Eigenschaft dient der Möglichkeit, beide Atomsorten unterscheiden zu können.

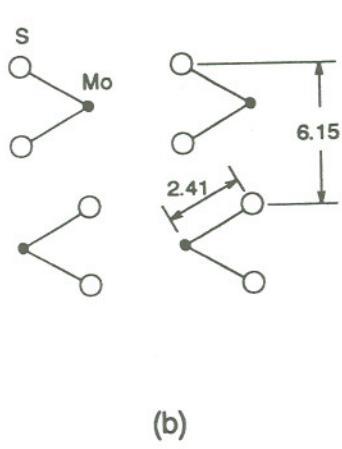
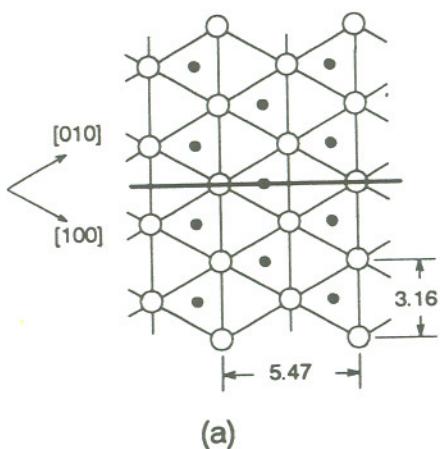


Abb. 23: (a) (100) Oberflächenstruktur von MoS_2 und (b) (110) "cross section" entlang der dicken Linie in (a) (Dimensionen in \AA)

Experiment:

Wie bei Graphit kann man auch bei MoS₂ mit Tesafilm Schichten von der Oberfläche lösen.

Vorgehensweise:

1. Bereiten Sie eine PtIr-Nadel vor und setzen Sie diese ein.
2. Ziehen Sie mit Tesafilm eine Schicht von MoS₂ ab und setzen Sie die Probe ein.
3. Bringen Sie die Spitze auf einen Abstand von 1mm zur Probe.
4. Laden Sie mos1.img(File/Load).
5. Stellen Sie den Scan Delay(Collect/Configure) auf 0.2mS/Sample.
6. Stellen Sie den Data Type auf Topographie.
7. Stellen Sie die Bias-Spannung auf 50mV.
8. Stellen Sie den Referenzstrom auf 2nA.
9. Gehen Sie zur Annäherung auf Constant Current Mode, d.h. stellen Sie Gain auf Maximum, Filter auf Maximum und Time Constant auf Minimum.
10. Stellen Sie die Vergrößerung auf X10.
11. Stellen Sie die x- und y-Schiebeknöpfe auf die Mitte.
12. Drücken Sie den Coarse Retract Regler.
13. Drücken Sie den Auto Approach Regler zur Annäherung und warten Sie.
14. Starten Sie Unidirectional Scan(Collect/Scan Unidirectional)
15. Nehmen sie Bilder bei unterschiedlichen Vergrößerungen auf. Denken Sie daran, die Software entsprechend einzustellen(Collect/Configure).

Hinweis: Das schwierigste an diesem Versuch ist es, eine flache Stelle zu finden, um dann atomare Auflösung zu erreichen. Suchen Sie daher zuerst eine flache Stelle (Korrgationen < 200 Å) bei Vergrößerung X10. Wechseln Sie dann auf Constant Height Mode und wählen die Vergrößerung X50 bzw. X250.

Es sollte möglich sein, zumindest die Schwefelatome zu

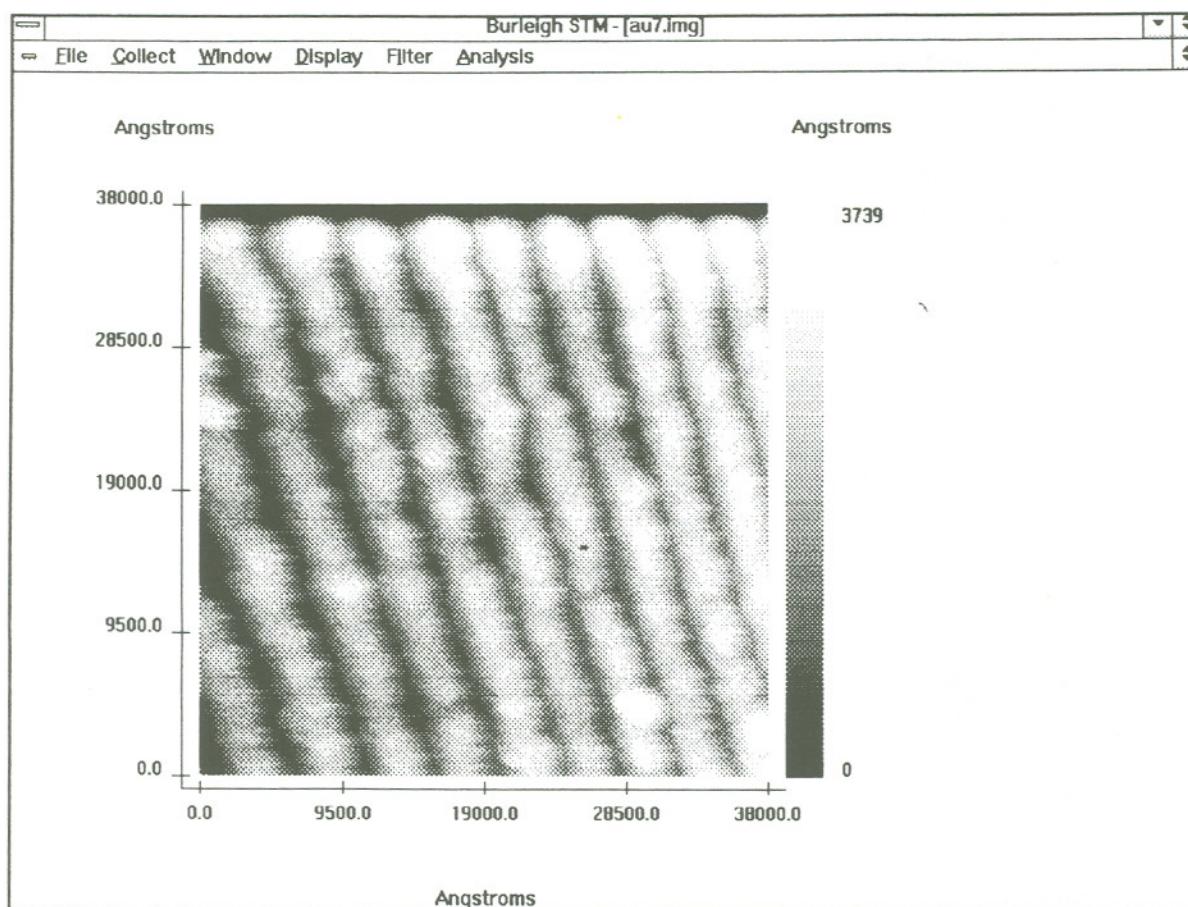
identifizieren.

Versuchen Sie nach dem Filtern der Rohdaten ,die unter den Schwefelatomen liegenden Molybdenatome auszumachen (Cross Section/Display Menu) .

5. Eigene Messungen

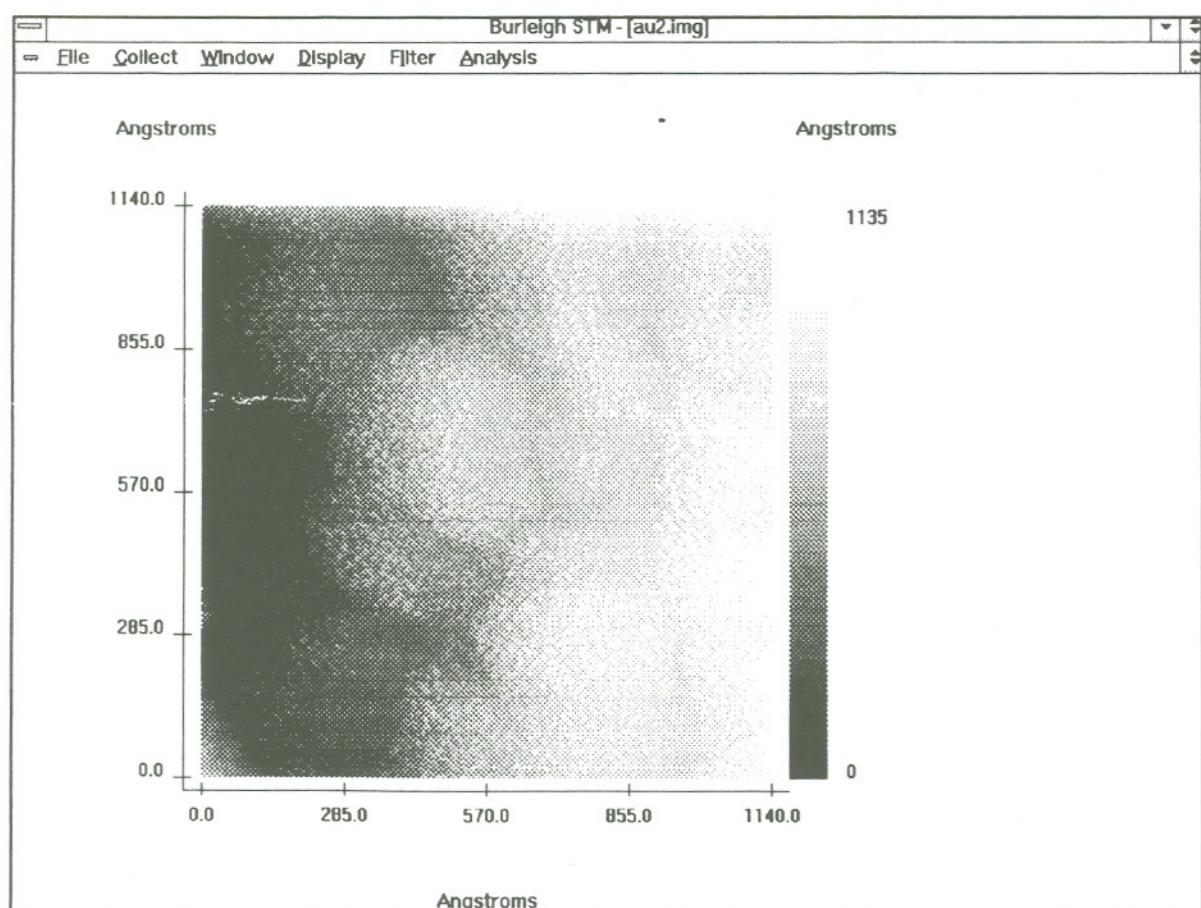
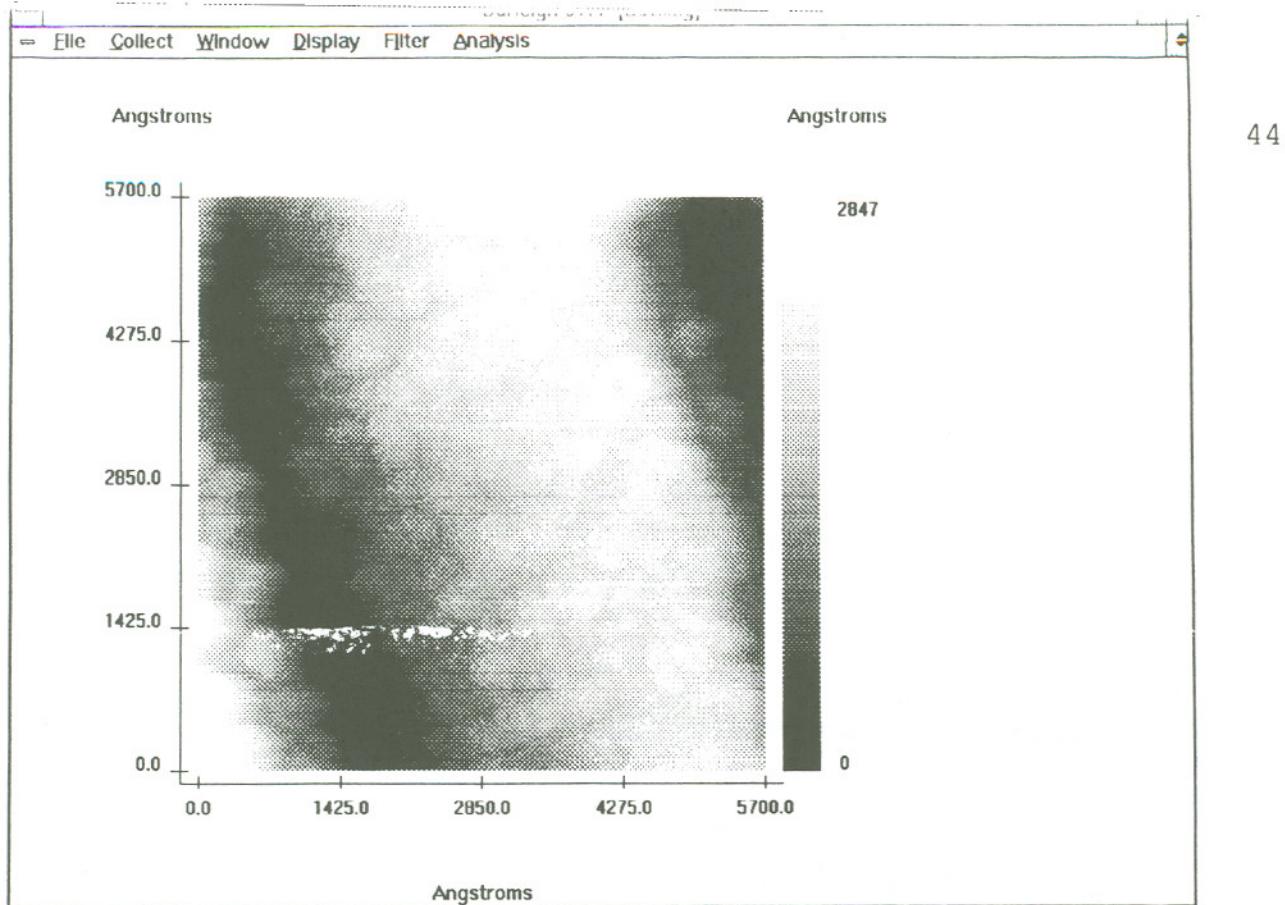
Um die Möglichkeiten des STM und die Qualität der Bilder zu demonstrieren, füge ich in diesem Kapitel einige eigene Bilder ein.

5.1. Gold



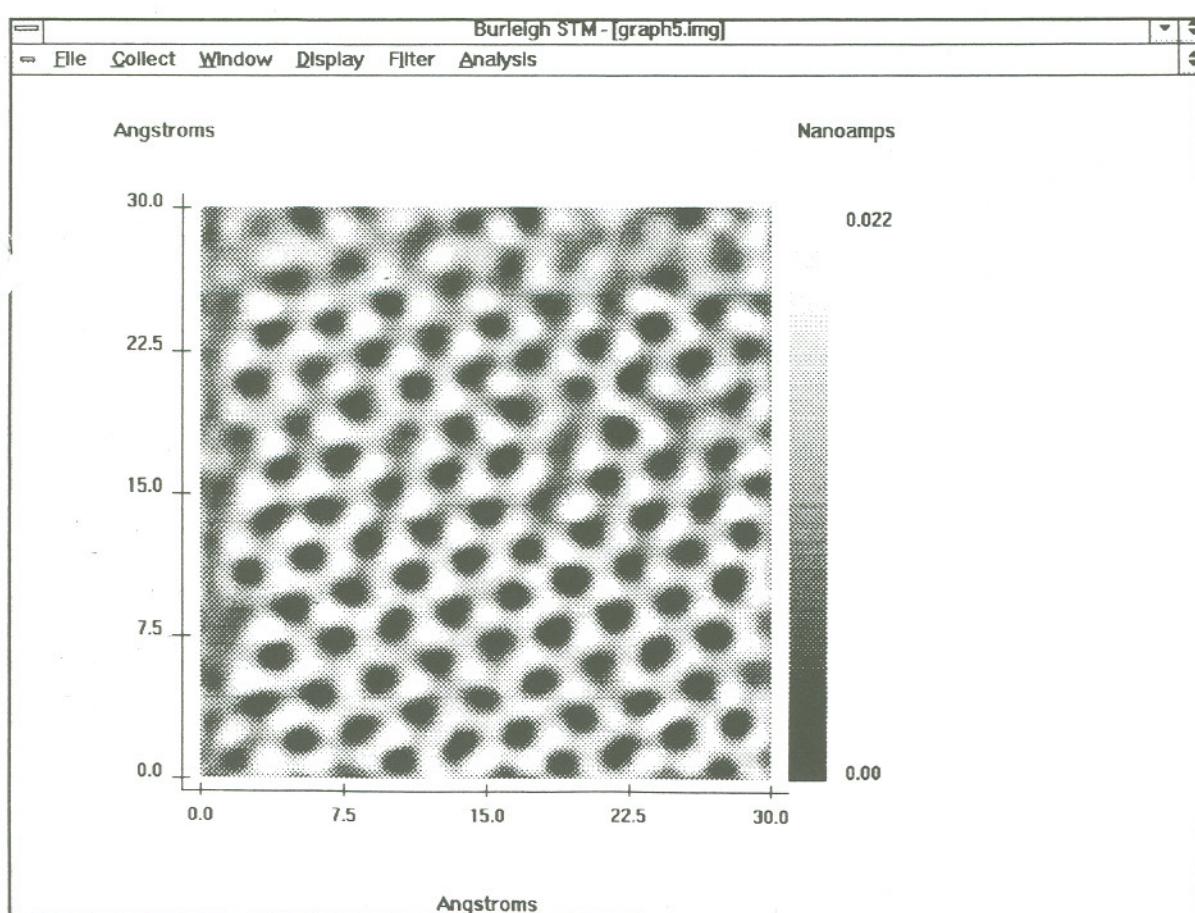
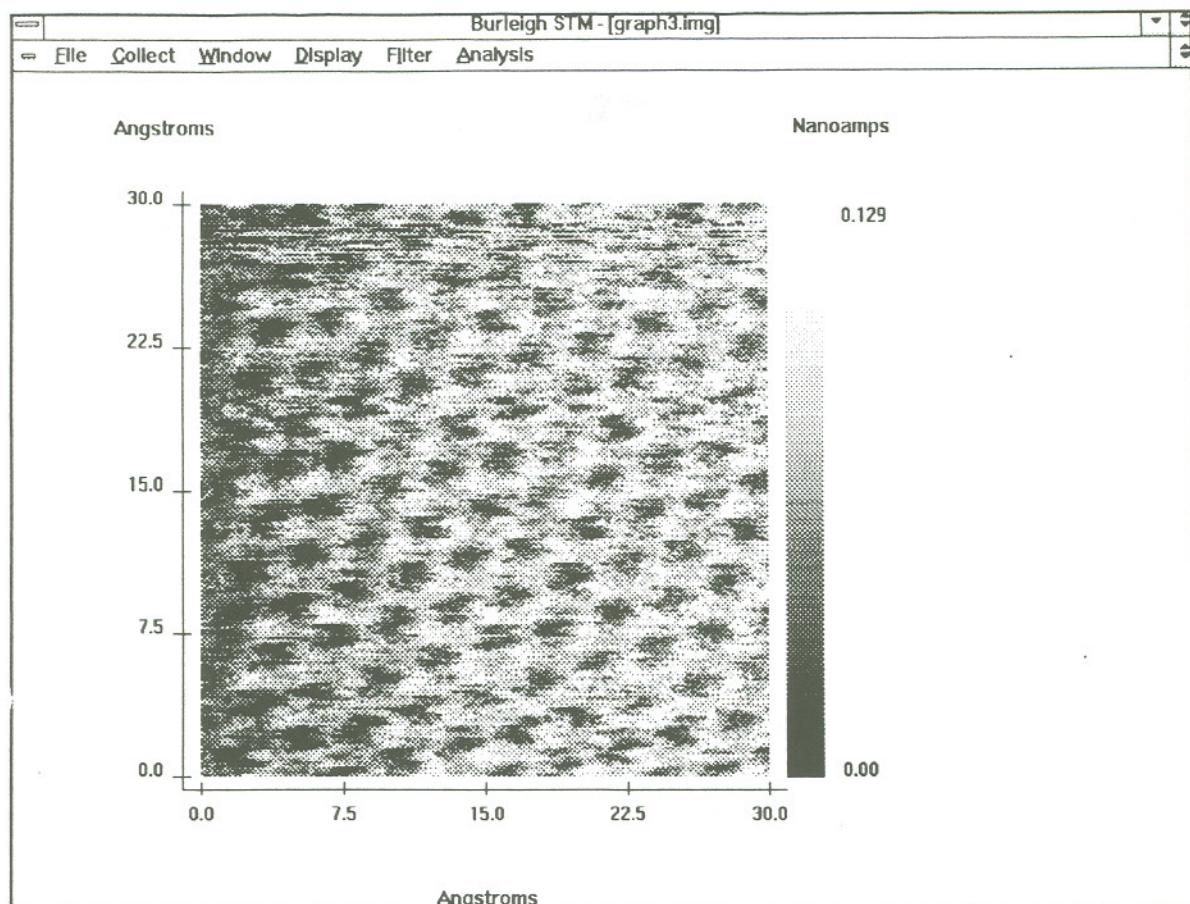
Zu sehen ist hier(au7.img) das Goldgitter mit einem Linienabstand von ungefähr 4000\AA .

In den beiden nächsten Bildern(au1.img, au2.img) erkennt man die Kornstrukturen, die vom Kristallisationsprozeß herrühren.

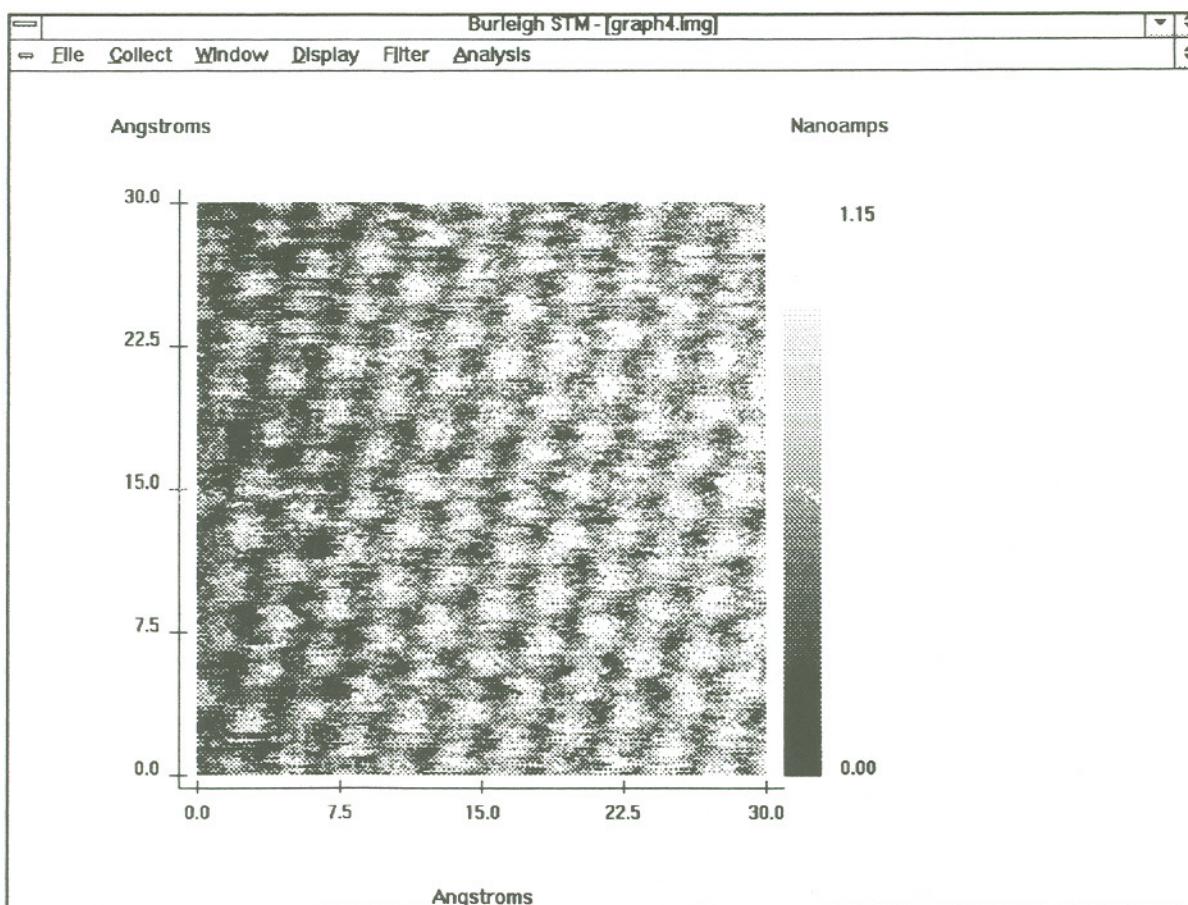


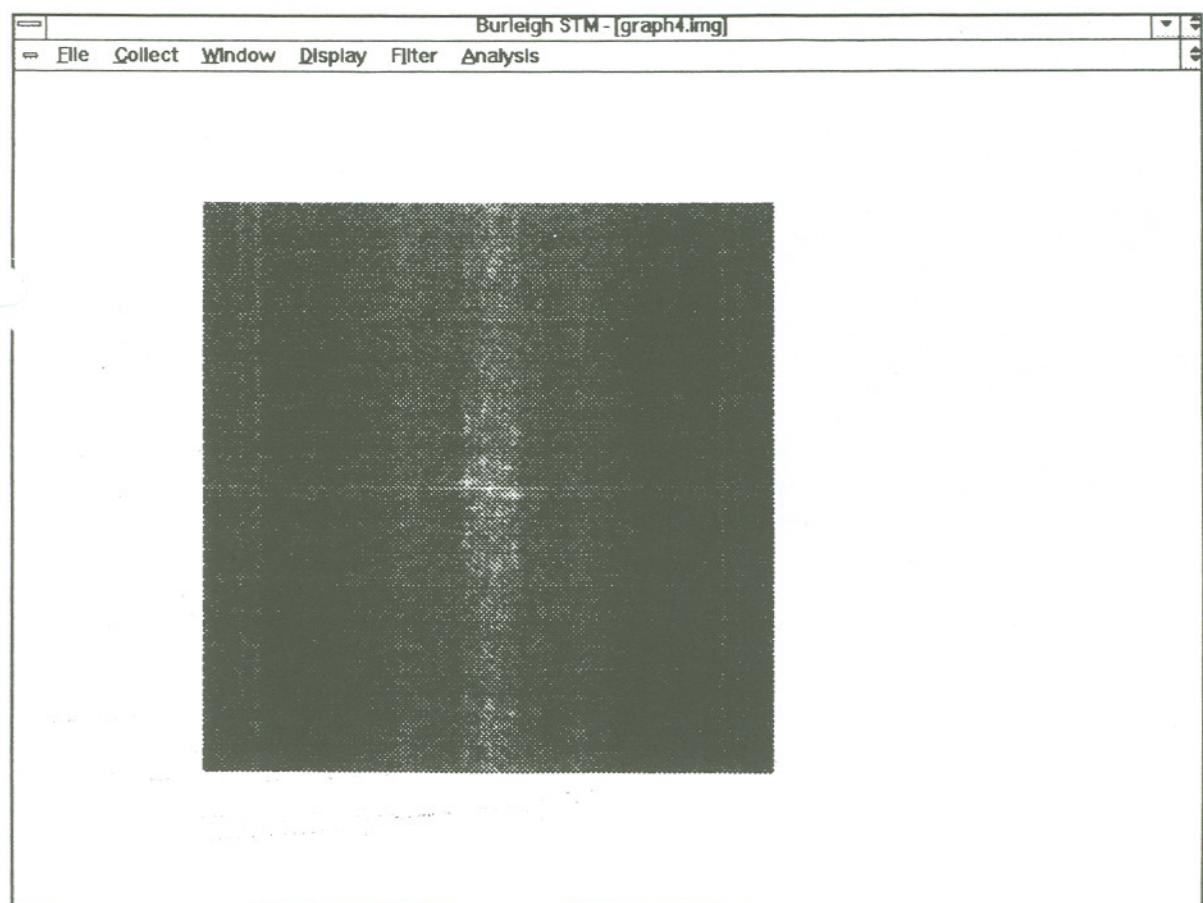
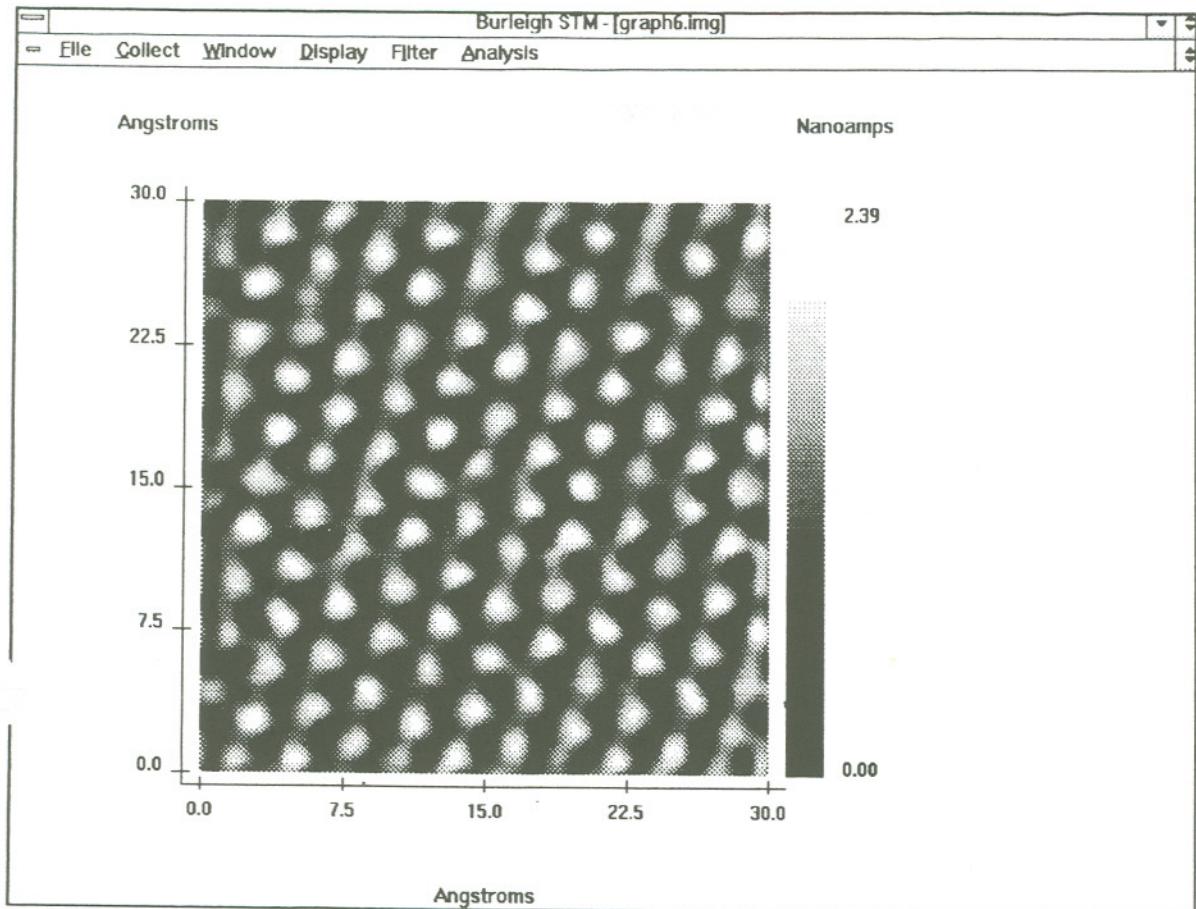
5.2.Graphit

-atomare Oberflächenstruktur

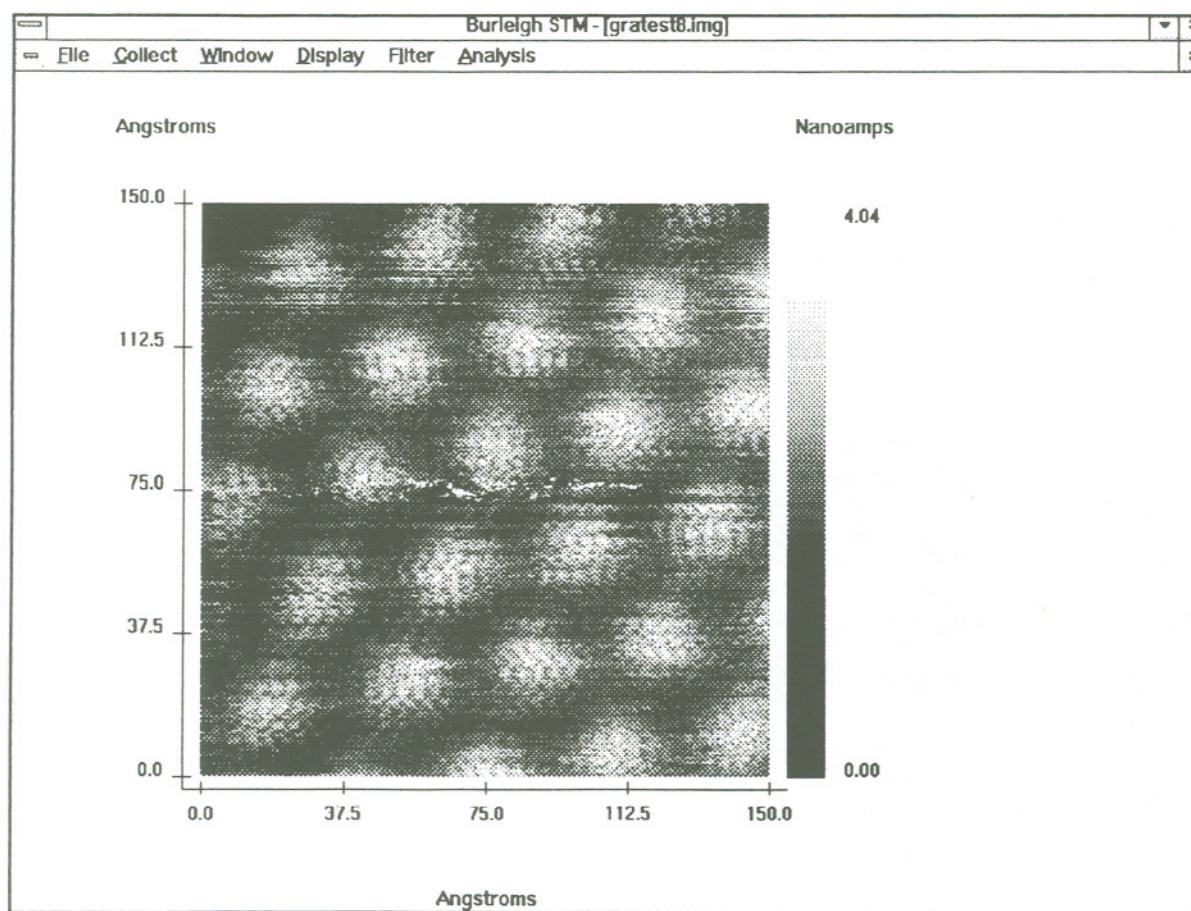


In den letzten beiden Bildern erkennt man die atomare Oberflächenstruktur von Graphit. Das untere Bild(graph4.img) ist das Ergebnis nach Verwendung eines low-pass-Filters. Die hexagonale Struktur von Graphit ist deutlich zu erkennen. Man sieht auch, daß die α -Atome dunkler als die β -Atome erscheinen. Im folgenden Bild(graph4.img) sind dagegen die α -Atome nahezu verschwunden. Beigefügt ist ebenfalls ein gefiltertes Bild(low-pass-Filter) (graph6.img) und ein 2-dimensionales Fourier-Spektrum des Rohdatenbilds.





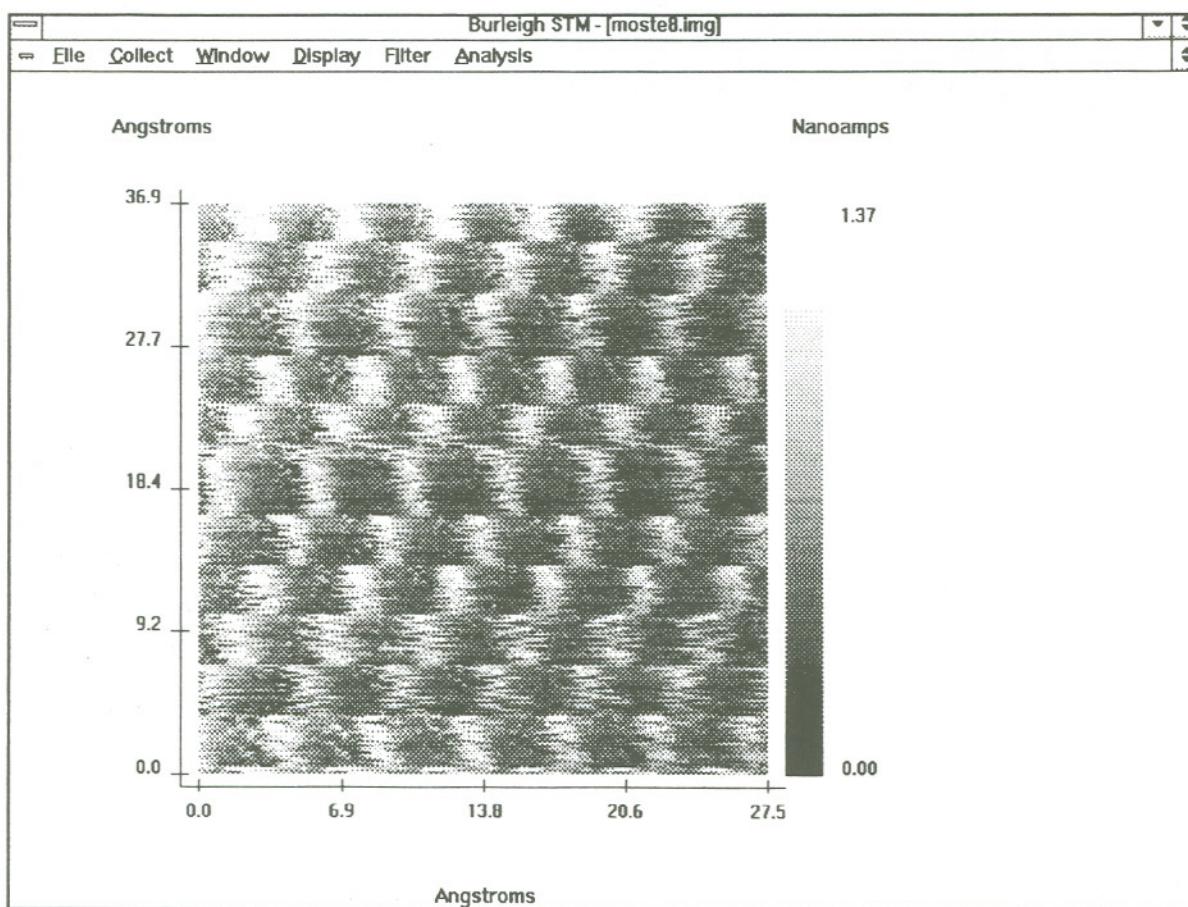
Außerdem konnte ich eine Überstruktur (gratest8.img) feststellen, die den atomaren Korrugationen überlagert ist. Solche Überstrukturen können durch Verdrehung zweier Schichten gegeneinander (Moiré-Effekt) entstehen. Diese Verdrehung kann einerseits durch das Abziehen von Schichten mit Tesafilm entstehen, oder bereits ursprünglich als solche vorliegen [Yan 92]. Zur Demonstration sind im Arbeitsordner zwei Folien beigefügt, die die Graphitschichten darstellen. Durch Verdrehung der beiden Folien gegeneinander lassen sich Überstrukturen mit unterschiedlichen Perioden herstellen.

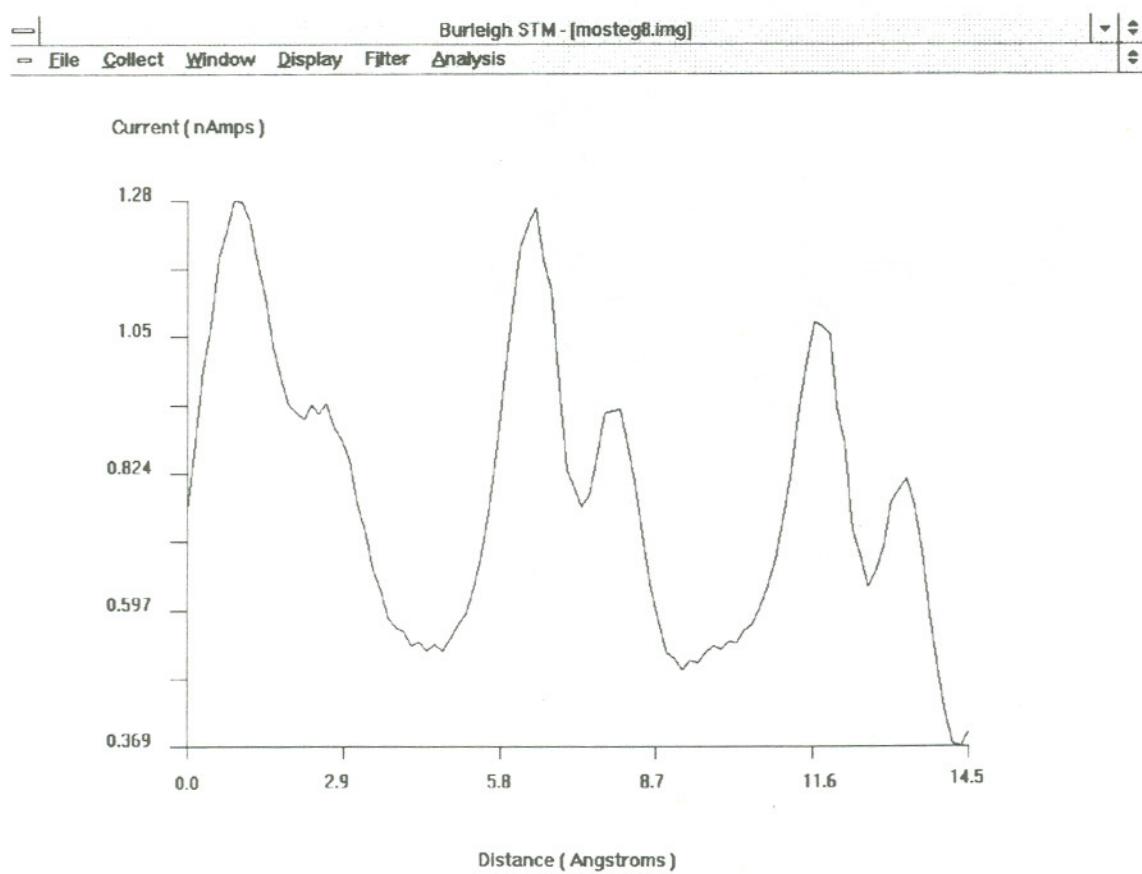
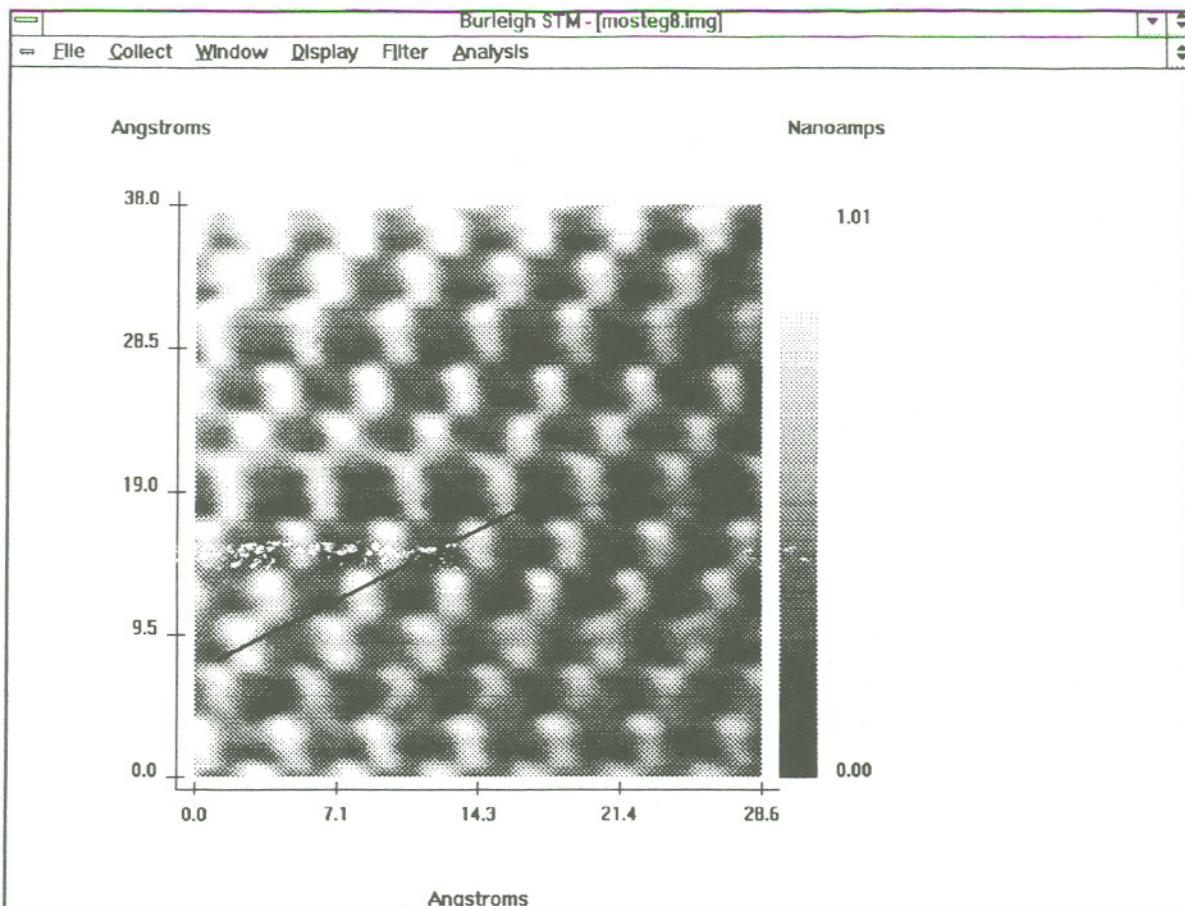


5.3. Molybdendisulfid (MoS₂)

-atomare Oberflächenstruktur

Auf diesem Bild (moste8.img) erkennt man die atomare Oberflächenstruktur von Molybdendisulfid. In der oberen Schicht liegen die Schwefelatome. Legt man einen Schnitt durch das gefilterte Bild (mosteg8.img), so erkennt man die darunterliegenden Molybdenatome.





Literaturverzeichnis

- [Alo 90] M. Alonso/E. Finn, "Quantenphysik", Addison-Wesley (1990): 230
- [Bar 61] J. Bardeen, "Tunneling from a many-particle point of view", Physical Review Letters Vol. 6, No. 2 (1961): 57-59
- [Bin 86] G. Binnig et al, "Atomic force microscopy", Physical Review Letters 56 (1986): 930-933
- [Bin 87] G. Binnig und H. Rohrer, "Nobelvortrag", Physikalische Blätter 43 (1987) Nr. 7, 282
- [Bru 90] L. E. Brus et al, "Nucleation and growth CdSe on ZnS quantum crystallite seeds, and in inverse micelle media," Journal of the American Chemical Society 112 (1990): 1327-1332.
- [Bur 92] R. J. Dwayne Miller et al, "Burleigh Instructional STM" (1992)
- Bur 92a: 2-14
- Bur 92b: 2-20
- Bur 92c: 3-3, 3-4
- Bur 92d: 3-14
- Bur 92e: 4-4
- Bur 92f: 4-7
- Bur 92g: 4-15
- [Hal 87] V. M. Hallmark et al, "Observation of Atomic Corrugation on Au(111) by STM", Phys. Rev. Lett., Vol. 59, No. 25 (1987): 2879-2882
- [Kit 88] Ch. Kittel, "Einführung in die Festkörperphysik" (1988): 195
- [Lee 92] LEC van de Leenput und H van Kempen, "Scanning tunneling microscopy", Rep. Prog. Phys. 55 (1992)
- Lee 92a: 1189-1191
- Lee 92b: 1197-1206
- [Qua 86] C. F. Quate, "Vacuum tunneling: A new technique for microscopy", Physics Today 39:2 (1986): 26-33

- [Rus 87] E.Ruska, "Development of the electron microscope and of electron microscopy",
Reviews of Modern Physics, Vol.59, Number 3, Part 1, (1987) 627-638
- [Str 93] Joseph A. Stroscio und William J. Kaiser, "Scanning Tunneling Microscopy", Academic Press (1993)
Str 93a:5
Str 93b:11
- [Ter 85] J.Tersoff und D.R. Hamann, "Theory of the scanning tunneling microscope", Physical Review B, Vol.31, No.2 (1985):805-813
- [Wei 88] M. Weimer et al, "Tunneling microscopy of 2H-MoS₂:A compound semiconductor surface", Phys. Rev. B, Vol.37, No.8 (1988):4292-4295
- [Yan 92] X.Yang et al, "Several large-scale superperiodicities on HOPG observed by STM", Ann. Physik 1(1992):3-10

Herrn Prof. Dr. Gerber danke ich für die Vergabe und Betreuung dieser Arbeit.

Dem Doktoranden R. Hiss möchte ich in diesem Rahmen besonders danken, da er immer zur Stelle war, wenn ich einmal Hilfe brauchte.

Allen Mitgliedern der Abteilung herzlichen Dank, da auch ihre Hilfe mir viel Mühe ersparte.

Ich erkläre, daß ich die Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und daß alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnungen kenntlich gemacht worden sind.