

Rastertunnelmikroskopie

(Überarbeitete Version)

Fred Stober, Martin Will
Gruppe 106

19. Juni 2006

Zusammenfassung

In diesem Versuch soll der Umgang mit einem Rastertunnelmikroskop geübt werden, sowie die erhaltenen Bilder diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

I	Theoretische Grundlagen	2
1	Fermi-Statistik	2
2	Bändermodell	2
3	Tunneleffekt	3
4	Piezoelektrischer Effekt	4
II	Experimentelle Grundlagen	5
5	Bedingungen an die zu untersuchenden Materialien	5
6	Informationsgehalt der RTM-Bilder	5
7	Einfluss des Veränderns von Tunnelstrom und -spannung	5
8	Anzahl der Tunnelelektronen	6
9	Einfluss von Adsorbanten	6
10	Atomare Auflösung	6
11	Schwierigkeiten des Piezomaterials	6
12	Strom-Spannungs-Kennlinien	6
III	Versuchsaufbau	7
IV	Durchführung und Auswertung	8
13	Präparation, Einsetzen und Annäherung	8
14	Ungeflammtes Gold	8
14.1	Oberfläche	8
14.2	Strom-Spannungs-Kennlinien	10
15	Graphit	10
15.1	Atomare Auflösung	10
15.2	x-y-Eichung	11
15.3	Strom-Spannungs-Kennlinien	12
15.4	Strom-Abstands-Kennlinien	13
16	Geflammtes Gold	14
16.1	Strom-Spannungs-Kennlinien	15

Teil I

Theoretische Grundlagen

1 Fermi-Statistik

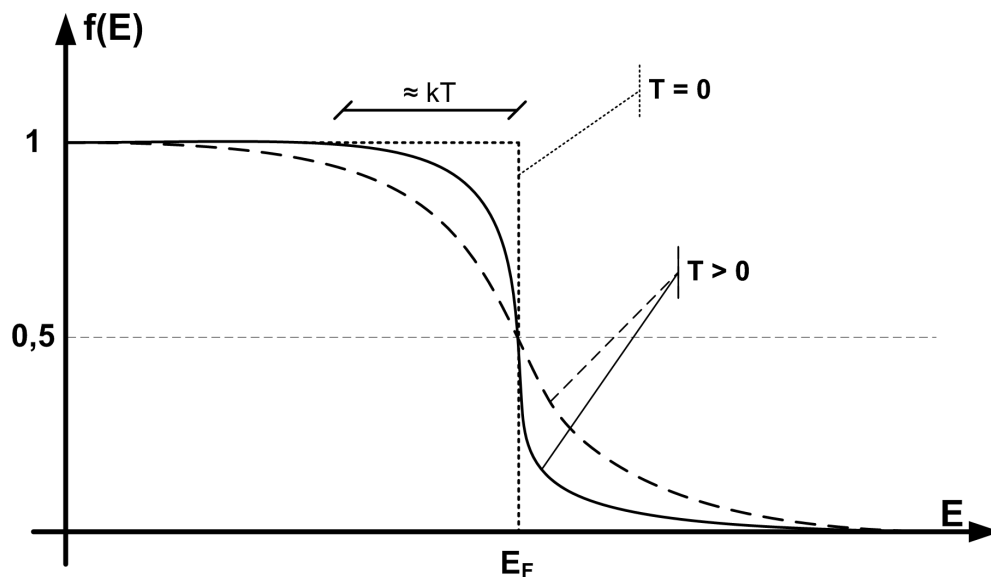
Die Fermi-Statistik beschreibt Teilchen mit halbzahligem Spin, also Fermionen. Die Zentrale Aussage der Femi-Statistik ist es, dass die Wellenfunktion eines n-Teilchen-Systems total antisymmetrisch unter Vertauschung zweier Teilchen ist. Als Folgerung daraus ergibt sich, dass die Besetzungsstatistik für Fermionen durch die die Fermiverteilung gegeben ist.

Betrachtet man also die Besetzung der Energieniveaus der Elektronen in einem Halbleiter, so muss diese durch die Fermi-Verteilung (oder Fermi-Dirac-Verteilung) beschrieben werden. Wie oben beschrieben, können aufgrund des Ausschließungsprinzips (Pauli-Prinzip), nicht alle Elektronen den Grundzustand annehmen. Betrachtet man zunächst ein System ohne thermische Anregungen ($T = 0$), so füllen die Elektronen die vorhandenen Energieniveaus lückenlos von unten bis zu einer Grenze E_F , der Fermi-Energie auf. Wird nun ein System ($T > 0$) betrachtet, so können durch thermische Anregungen Elektronen in einen höheren Energiezustand angehoben werden. Dabei ist die Fermi-Energie nun genau die Energie, bei der die Wahrscheinlichkeit einen Zustand zu besetzen 50% beträgt. Die Besetzungswahrscheinlichkeit $f(E)$ für einen Zustand der Energie E ist allgemein gegeben durch

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right) + 1}$$

Die Verteilung ist im folgenden Diagramm graphisch dargestellt für verschiedene Temperaturen. Im Grenzfall hoher Energien $E \gg E_F$ geht die Fermi-Verteilung über in die Maxwell-Boltzmann-Verteilung.

$$f_{MB}(E) = \exp\left(-\frac{E-E_F}{k_B T}\right)$$



2 Bändermodell

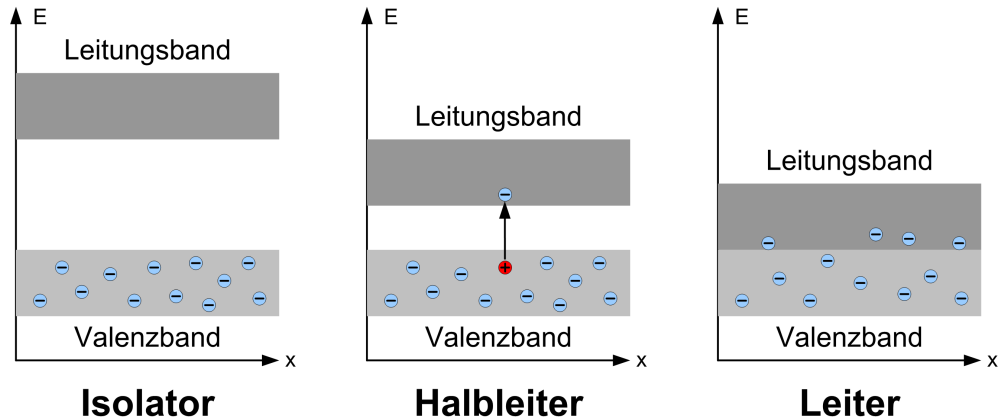
Betrachtet man die Energiezustände von zwei (gleichen) Atomen, die man genügend dicht zusammenbringt, so spalten atomare Energieniveaus auf in zwei Molekülniveaus (ein bindendes und ein antibindendes). Bringt man analog dazu N gleiche Atome zusammen, so spalten die sich entsprechenden atomaren Niveaus (gleicher Energie) auf in N Niveaus.

Für große N und einer periodischen Anordnung von gleichen Atomen, wie es z. B. in einem Kristall vorliegt, so liegen die Energieniveaus so dicht zusammen, dass man die beieinanderliegenden Energieniveaus als Kontinuum betrachten kann, die man als Energiebänder bezeichnet. Die verschiedenen Energiebänder werden durch die sogenannten Bandlücken getrennt.

Die Besetzung der Energieniveaus erfolgt von unten, gemäß der oben beschriebenen Fermi-Verteilung.

Durch die Besetzung der Bänder können Festkörper in Isolatoren, Halbleiter und Leiter klassifiziert werden. Das Valenzband ist dabei das höchste Energieband, dass für $T = 0$ von den Elektronen voll besetzt ist. Das energetisch darüberliegende Band nennt man Leitungsband. Im Leitungsband können sich die Elektronen frei bewegen, im Valenzband sind sie fest gebunden. Für $T > 0$ werden Elektronen gemäß der Fermi-Verteilung durch thermische Anregung vom Valenz- ins Leitungsband gehoben.

Auf diese Weise kann ein zuvor unbesetztes Leitungsband teilweise besetzt werden. In den teilweise besetzten Bändern können nun Ladungen transportiert werden, also ein Strom fließen.

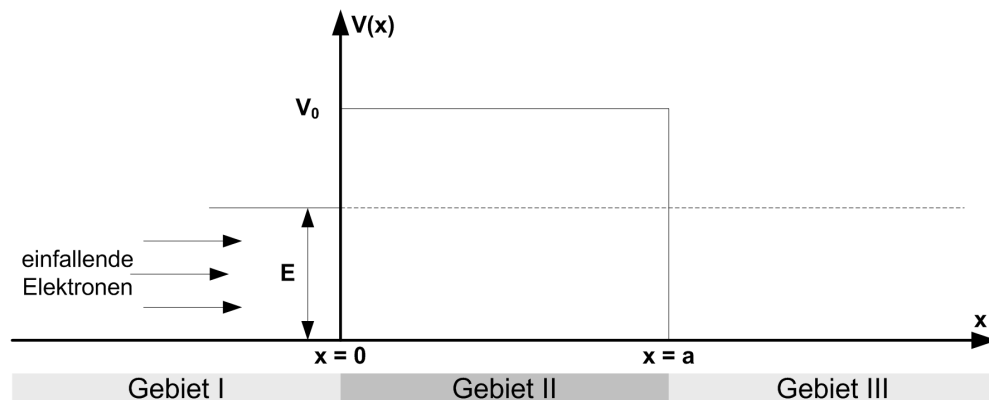


3 Tunneleffekt

Der Tunneleffekt bezeichnet den quantenmechanischen Effekt, der den Teilchen die Überwindung endlicher Potentialbarrieren erlaubt, die nach den Vorstellungen der Klassischen Physik für diese Teilchen unüberwindbar wären. Um den Effekt zu verdeutlichen, verwendet man dieses Potential:

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ V_0 & \text{für } 0 \leq x \leq a \\ 0 & \text{für } x > a \end{cases}$$

Im folgenden Diagramm ist die Situation dargestellt.



Für die mathematische Beschreibung geht man von der Schrödingergleichung aus.

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{x}, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{x}, t) \right) \psi(\vec{x}, t)$$

Um die Welle vollständig zu beschreiben, verwendet man diese Ansätze für die Wellenfunktion im jeweiligen Gebiet:

- Gebiet I

Die Wellenfunktion setzt sich hier aus einem einlaufenden und einem reflektierten Anteil zusammen:

$$\psi_1 = \underbrace{A \exp(ikx)}_{\text{einlaufende Welle}} + \underbrace{B \exp(-ikx)}_{\text{auslaufende Welle}}$$

- Gebiet II

Die Welle kann hier nicht frei propagieren, daher macht man den Ansatz einer Welle, die hauptsächlich exponentiell abfällt:

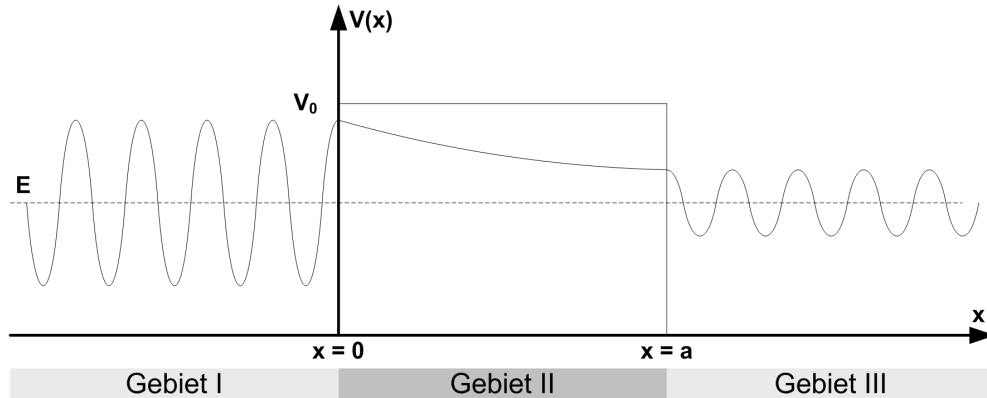
$$\psi_2 = C \exp(kx) + D \exp(-kx)$$

- Gebiet III

Hier macht man wieder den Ansatz einer transmittierten Welle:

$$\psi_3 = E \exp(ikx)$$

Die Energie des Teilchens wird durch das Tunneln nicht beeinflusst. Wie man in der nächsten Abbildung sehen kann, ändert sich nur die Amplitude der Wellenfunktion und damit die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens.



Die Durchlässigkeit der Barriere ist durch den Transmissionskoeffizienten T gegeben:

$$T = \left| \frac{\psi_1}{\psi_2} \right|^2 = \left| \frac{A}{E} \right|^2$$

Die Tunnelwahrscheinlichkeit P eines Teilchens, also die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Teilchen die Potentialbarriere durchdringen wird, ist gegeben durch:

$$P \propto \exp\left(-Ax\sqrt{V_0}\right)$$

Dabei ist A eine Proportionalitätskonstante, x die Barrierenbreite und V_0 die Potentialhöhe. Für den Tunnelstrom gilt:

$$I \propto \rho U \exp\left(-Ax\sqrt{V_0}\right)$$

Der Tunnelstrom ist also exponentiell abhängig von Barrierenbreite und -höhe, reagiert also sehr empfindlich auf eine Änderung dieser Parameter. Darüberhinaus ist er linear abhängig von der Elektrodendichte, die wiederum auf Materialeigenschaften zurückzuführen ist.

4 Piezoelektrischer Effekt

Piezoelektrizität ist die Fähigkeit von Isolatoren (häufig Kristalle) unter mechanischer Belastung eine Spannung zu erzeugen. Dieser Effekt ist reversibel. Das bedeutet, dass bei einer äußeren angelegten Spannung ein Kristall seine Form um einen kleinen Betrag ändern kann. Die Verformung spielt sich auf der Größenordnung von Nanometern ab. Piezoelektrische Materialien eignen sich daher für kleinste Positionsänderungen, wie sie beim Abrastern der Probe vonnöten sind. Gebräuchliche Piezomaterialien sind z. B. Quarz, Turmalin oder Piezokeramiken aus Barium- oder Titan-Salzen. Der Piezoeffekt wird auch häufig zur Stabilisierung der Frequenz in Schwingkreisen verwendet, indem man eine Wechselspannung mit der mechanischen Eigenschwingungsfrequenz an eine Quarzplatte anlegt.

Teil II

Experimentelle Grundlagen

5 Bedingungen an die zu untersuchenden Materialien

Aufgrund der eingeschränkten Beweglichkeit des Piezomaterials sollte die Oberfläche möglichst flach sein, also lediglich Rauigkeiten im Ångströmbereich aufweisen. Da die Messung an Luft durchgeführt wird sollte das Material desweiteren nicht allzu stark Sauerstoff adsorbieren um störende Oberflächenverunreinigungen zu reduzieren. Da diese jedoch nie auszuschließen sind sollte sich das Material gut von diesen Verunreinigungen bereinigen lassen.

Diese Bedingungen werden am besten von Edelmetallen erfüllt. Als Metall besitzen sie immer teilweise besetzte Leitungsbänder, in denen sich die Elektronen praktisch frei bewegen können. Dementsprechend einfach können sie auch am Tunnelprozess teilnehmen. Außerdem reagieren Edelmetalle nicht bzw. nur kaum mit Sauerstoff, weshalb kaum Verunreinigungen durch eine Oxidschicht zu erwarten sind. Desweiteren sind z. B. Gold-Einkristalle sowie aufgedampfte Goldschichten besonders flach, weshalb sie sich sehr gut als Material für eine Untersuchung mit dem RTM eignen.

Graphit eignet sich als Halbmetall ebenfalls gut zur Untersuchung. Es oxidiert zwar an Luft, die einzelnen Graphitschichten sind jedoch nur schwach gebunden und so kann die oberste, verunreinigte Schicht leicht abgelöst werden.

Isolatoren und Halbleiter eignen sich hingegen nicht als Untersuchungsmaterial. Beide besitzen zwischen Valenz- und Leitungsband eine Bandlücke, in denen es für die Elektronen keine erlaubten Zustände gibt. Bei Isolatoren ist diese so groß, dass selbst durch thermische Anregung keine Elektronen diese Bandlücke überwinden. Es stehen also keine Elektronen für den Tunnelprozess zur Verfügung. Bei Halbleitern befinden sich zwar bei Zimmertemperatur Elektronen im Leitungsband, jedoch besitzen Halbleiter an der Oberfläche freie Valenzen, weshalb sich sehr schnell eine Oxidschicht bildet, die die Messung behindert. Isolatoren können also prinzipiell nicht und Halbleiter nur im Hochvakuum problemlos untersucht werden.

6 Informationsgehalt der RTM-Bilder

Prinzipiell handelt es sich bei dem RTM-Bildern nicht um Abbildungen der Probenoberfläche. Sie enthalten lediglich Informationen über die Oberflächentopographie, sowie Bereiche konstanter Elektronenzustandsdichte ρ . Es gelten folgende Proportionalitäten:

$$\begin{aligned} I_T &\propto \exp(-2\kappa d) \\ I_T &\propto \rho(\vec{r}_0, E_F) \end{aligned} \tag{1}$$

Hält man den Tunnelstrom also konstant, so bleibt auch der Abstand der Spitze zur Oberfläche d konstant, die Spitze folgt also der Topographie der Probenoberfläche.

7 Einfluss des Veränderns von Tunnelstrom und -spannung

Wie man an der Proportionalität (1) im vorigen Abschnitt erkennt, wird bei einer Erhöhung des Tunnelstroms der Abstand zwischen Probenoberfläche und Tunnelspitze verringert.

In den theoretischen Grundlagen wurde die effektive Potentialbarriere hergeleitet:

$$\bar{\varphi} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2} + \frac{e \cdot U_T}{2} - E$$

Φ_1 und Φ_2 sind die Potentialhöhen der Spitze bzw. der Probe, E die Energie des tunnelnden Elektrons. Weiterhin besteht zwischen der Abklingkonstante κ und der effektiven Barriere der Zusammenhang:

$$\kappa^2 = \frac{2m_e}{\hbar^2} \bar{\varphi}$$

Bei Verringerung der Tunnelspannung U_T sinkt also $\bar{\varphi}$, damit sinkt κ und damit steigt wegen (1) der Tunnelstrom bzw. der Abstand d wird geringer. Bei kleinen U_T gilt $U_T \propto I_T$ und man kann das ohmsche Gesetz $U = R \cdot I$ beobachten.

8 Anzahl der Tunnelelektronen

Die Anzahl der Elektronen, die bei einem Tunnelstrom von $I_T = 1 \text{ nA}$ pro Sekunde von der Probenoberfläche zur Tunnelspitze tunneln berechnet sich zu:

$$I_T = \frac{Q}{t} = \frac{N \cdot e}{t}$$
$$\Rightarrow N = \frac{I_T \cdot t}{e} = \frac{1 \text{ nA} \cdot 1 \text{ s}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 6,242 \cdot 10^9$$

9 Einfluss von Adsorbanten

Bei der Untersuchung von Materialien an Luft ist eine Ablagerung von Sauerstoffatomen auf der Probenoberfläche unumgänglich. Diese Adsorbanten beeinflussen die Untersuchung indem sie die Wellenfunktion an der Materialoberfläche verändern. Da die Aufnahme eines RTM-Bildes lediglich die Zustandsdichte der Elektronen wiedergibt, kann es passieren, dass ein Adatom auf einem Bild als Loch erscheint, das Bild gibt also nicht die korrekte Topographie der Oberfläche wieder. Weiterhin kann ein adsorbiertes Atom bei verschiedenen Abständen der Spitze zur Probe sowohl als Loch, als auch als Erhebung wiedergegeben werden.

Lagert sich ein Fremdatom an der Spitze an, so besteht diese im Allgemeinen nicht mehr nur aus einem Atom, was die Messung verzerrt. Jedoch ermöglichen Fremdatome an der Spitze oder der Probenoberfläche inelastisches Tunneln. Den Elektronen stehen nun also mehrere Kanäle zum tunneln zur Verfügung, was zu einer Erhöhung der Tunnelwahrscheinlichkeit und somit des Tunnelstroms führt.

10 Atomare Auflösung

Die Elektronen im Leitungsband des Gold sind delokalisiert und können keinem bestimmten Atomrumpf zugeordnet werden. Sie werden durch ein Elektronengasmodell beschrieben. Da auf RTM-Bildern die Zustandsdichte der Elektronen abgebildet wird, ist atomare Auflösung an Luft nicht möglich.

Graphit besteht aus Kohlenstoff, dessen Elektronen lokalisiert sind. Somit kann aus der Zustandsdichte der Elektronen auf den Ort des Atomrumpfes geschlossen werden, weshalb bei Graphit an Luft atomare Auflösung erzielt werden kann.

11 Schwierigkeiten des Piezomaterials

Bei Piezomaterialien treten grundsätzlich drei störende Prozesse auf: Hysterese, Nachkriechen und thermischer Drift.

Die Ausdehnung der Piezomaterialien hängt nicht linear von der angelegten Spannung ab, weshalb es zu Hystereseeffekten kommt. Die Breite der Hystereseschleife hängt dabei von der vorherrschenden Feldstärke ab und ist somit materialabhängig. Die Größe der Piezoröhrchen, die die Hystereseeffekte einschränkt, muss jedoch auch anderen Kriterien genügen – beispielsweise der mechanischen Steifheit und der Schwingungsdämpfung. Es muss also ein Kompromiss gefunden werden.

Beim Anlegen einer Spannung an ein Piezomaterial dehnt es sich in relativ kurzer Zeit aus, kriecht allerdings noch einige Zeit nach. Dieser Nachkriecheffekt ist abhängig von der Höhe der Spannungsänderung am Piezo und kann bis zu 30 % der ursprünglichen Ausdehnung betragen. Nach dem Verschieben des Bildbereichs ist es also ratsam, die Spitze erst zur Ruhe kommen zu lassen.

Der Rohrscanner wird aus verschiedenen Materialien gefertigt, die einen verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen. Bei Erwärmung kommt es deshalb zu thermischem Drift. Beim Bau der Apparatur sollten deshalb Materialien mit ähnlichen Koeffizienten verwendet werden, sowie gewisse Symmetrien ausgenutzt werden um den Effekt zu mindern.

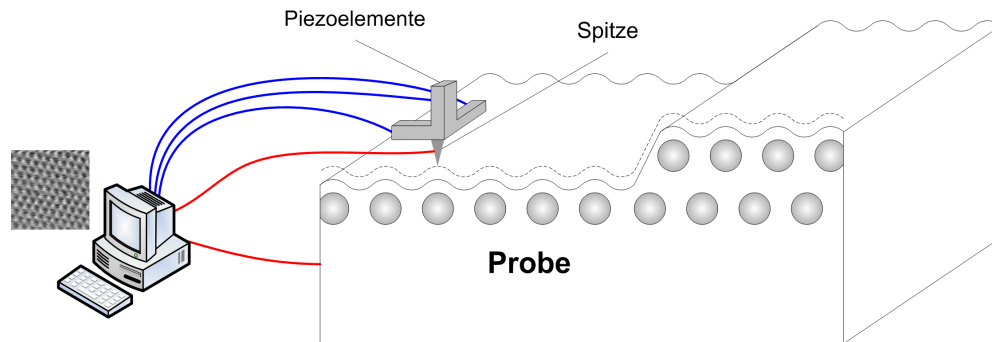
12 Strom-Spannungs-Kennlinien

Strom-Spannungs-Kennlinien können zur Stabilitätsprüfung des Spitze-Probe-Systems verwendet werden. Dies geschieht durch mehrfaches Aufnehmen einer Strom-Spannungs-Kurve in niedrigem Spannungsbereich, typischerweise $-2 \text{ V} \leq U_T \leq 2 \text{ V}$. Unterscheiden sich die Kennlinien nicht stark voneinander, so sind die Tunnelbedingungen einigermaßen stabil. Legt man Tunnelspannungen bis zu 6 V an, so kann

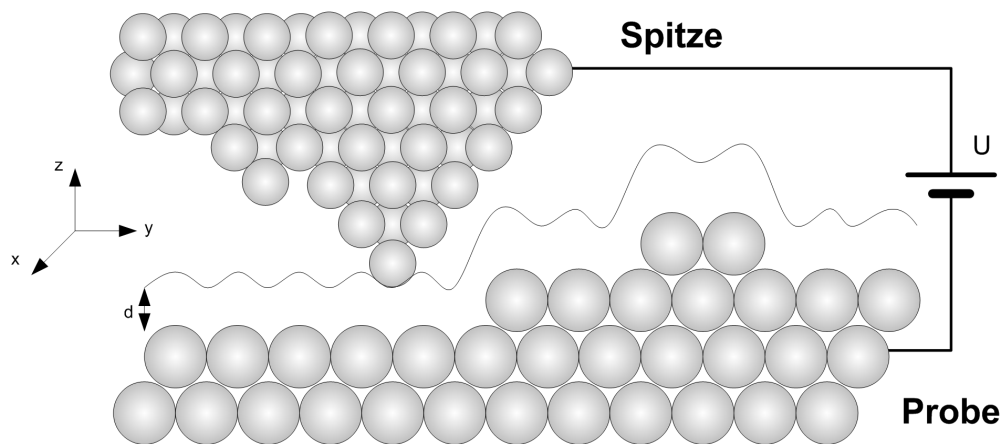
man die Tunnelbedingungen gezielt manipulieren. Dies ist dann ratsam, wenn sich nach längerer Versuchsdurchführung Fremdatome auf der Spitze oder der Probenoberfläche angelagert haben. Bei beiden Prozessen wird die Spitze festgehalten, also sowohl x-y-Position über der Probe, sowie der Abstand konstant gehalten.

Teil III

Versuchsaufbau



Das RTM besteht im Wesentlichen aus einer feinen Gold-Drahtspitze und drei Piezomotoren, die die genaue Positionierung der Spitze auf dem zu untersuchenden Material ermöglichen. Die Piezomotoren werden elektronisch gesteuert. Um das Tunneln zu erleichtern und um eine Messung des Tunnelstroms möglich zu machen, wird zwischen Messspitze und Probe eine Spannung angelegt. Dadurch werden die beiden unabhängigen Potentiale (Spitze und Probe) so gekoppelt, dass auf der Empfängerseite genügend freie Niveaus zur Verfügung stehen. Aus diesen werden die getunnelten Elektronen durch die angelegte Spannung wieder abgesaugt.



Rastertunnelmikroskope nutzen zur Annäherung von Probe und Spitze, sowie zum Abfahren der Probe piezoelektrische Trägheitsantriebe. Piezokristalle (z. B. Quarz) können Wärme- und Verformungsenergie in elektrische Energie umwandeln. Ebenso können sie durch Anlegen einer Spannung auf sehr präzise Weise verformt werden. Piezoelektrische Trägheitsantriebe nutzen dies auf folgende Weise aus:

Die zu verschiebende Nutzlast ruht auf den Piezokristallen. Durch einen kurzen Spannungstoß werden die Kristalle verformt, die Nutzlast schiebt sich nach vorne. Durch die Massenträgheit der Nutzlast wird verhindert, dass die Kristalle in ihre ursprüngliche Position zurückkehren. Statt dessen nehmen sie nur ihre ursprüngliche Form wieder an und schieben sich auf diese Weise ebenfalls nach vorn. Ein weiterer Spannungspuls wiederholt diesen Vorgang. So kann man die Mess-Spitze (bzw. die Probe), z. B. durch das Anlegen einer Sägezahnspannung, sehr genau steuern.

Teil IV

Durchführung und Auswertung

Zu Beginn des Versuchs gab es leider einige technische Schwierigkeiten mit der Grobannäherung an die Probe. Es konnte daher leider aus Zeitgründen eine Teilaufgabe nicht bearbeitet werden.

13 Präparation, Einsetzen und Annäherung

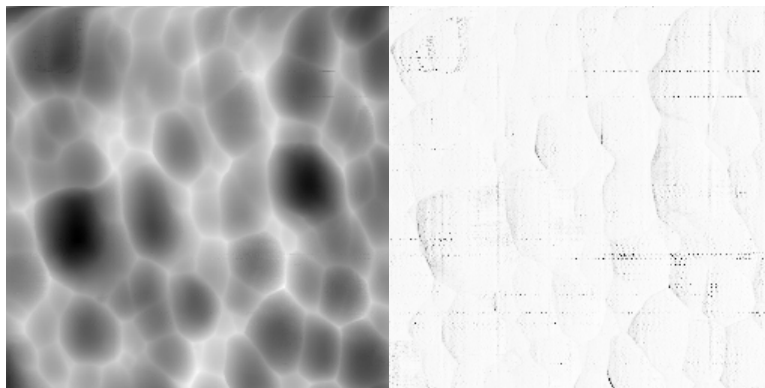
Wie in der Vorbereitungsmappe beschrieben wurde eine Tunnelspitze durch schräges Abschneiden eines Golddrahtes mit Hilfe eines Skalpells hergestellt. Beim Montieren in der Halterung muss darauf geachtet werden, dass der Draht gut festgedrückt wird, um Störungen der Messung durch Vibrationen der Spitze zu verhindern. Dies wurde im Laufe des Versuchs mehrmals wiederholt, da die Spitze vermutlich in die Probe gefahren wurde oder einfach nur schlechte Bilder lieferte. Nach Einbau der Spitze in das RTM wurde die Goldprobe und später die Graphitprobe eingesetzt. Das Graphit wurde zuvor präpariert, indem mit Hilfe eines Klebestreifens die oberste Schicht abgezogen und somit Verunreinigungen beseitigt wurden.

Die Grobannäherung erfolgte mit einer Lupe. Der z-Piezo wurde manuell gesteuert. Die Spitze wurde so nahe wie möglich an die Probe herangefahren, es wurde jedoch darauf geachtet noch einen sichtbaren Spalt zu lassen und keinen Kontakt herzustellen, was die Spitze deformiert hätte. Über solche Abstände im Millimeterbereich tunneln noch keine Elektronen, weshalb auf dem Oszilloskop kein Signal zu erkennen ist. Die Feinannäherung wird vom Computer übernommen. Er gibt Spannungspulse auf den z-Piezo, bis der Tunnelstrom einen voreingestellten Threshold-Wert erreicht. Nun ist auf dem Oszilloskop auch ein deutliches Signal erkennbar.

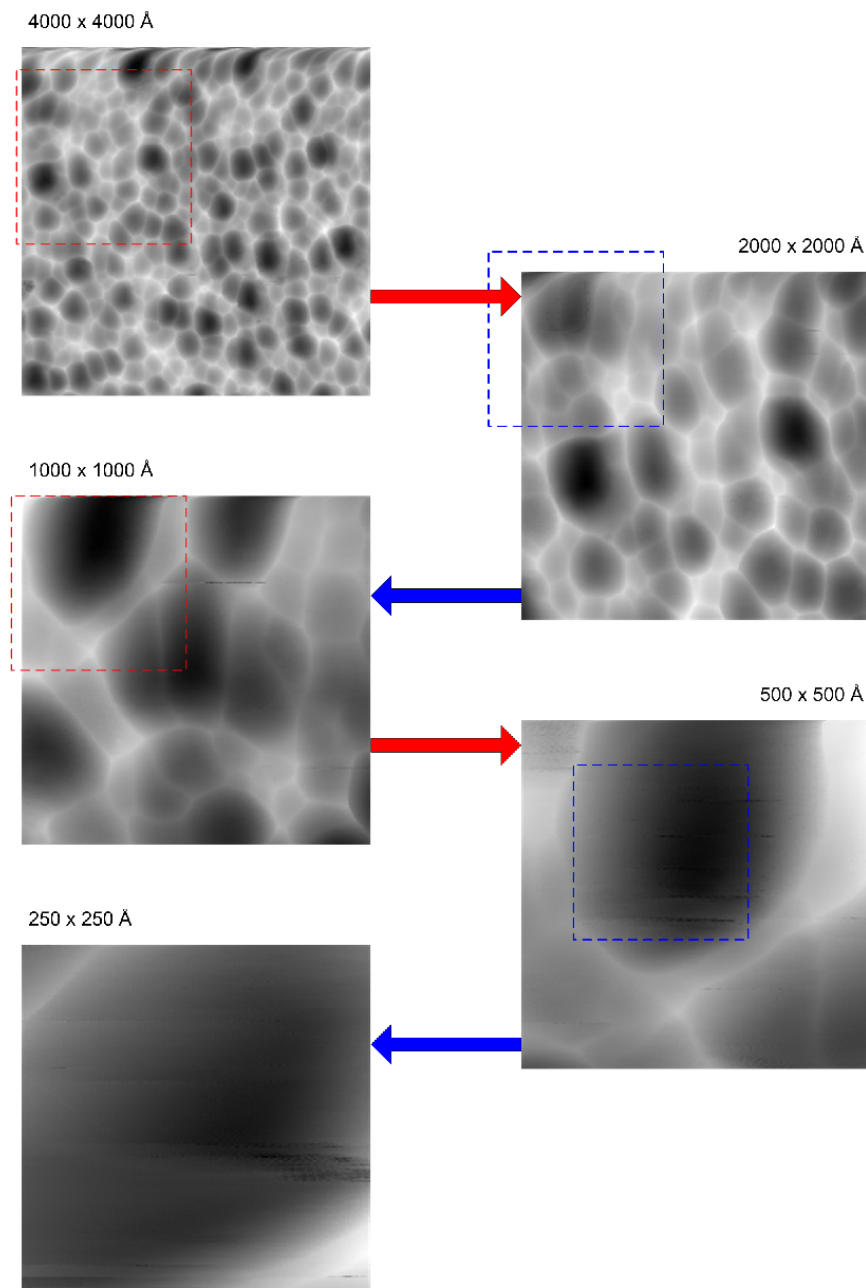
14 Ungeflammtes Gold

14.1 Oberfläche

Die Oberfläche einer ungeflamten Goldprobe wurde untersucht. Dabei wurden sowohl Topographie- als auch Strombilder aufgenommen. Beim Topographiebild werden die Steuerungsspannungen der z-Bewegung des Piezomaterials während des Rasterns verarbeitet. Beim Strombild wird an jedem Bildpunkt der Tunnelstrom gemessen, bevor die Rückkopplungsschleife den Abstand nachregelt. Nachfolgend ein Topographie- und Strombild bei einer Auflösung von $2000 \times 2000 \text{ \AA}$.



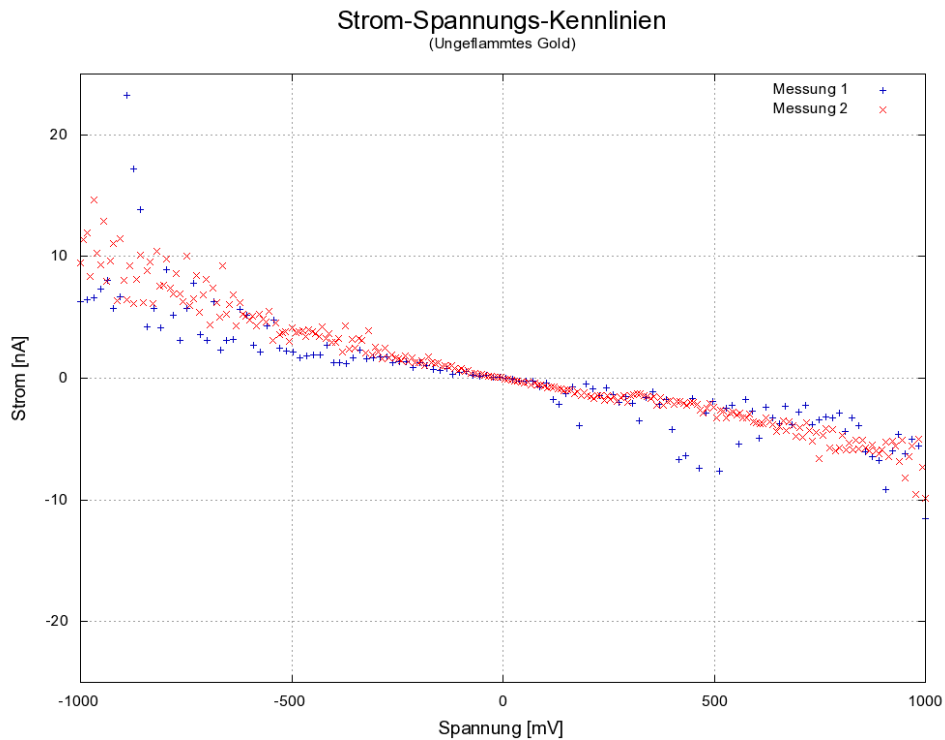
Man erkennt, dass in den Strombildern keine Mehrinformation steckt, weshalb wir uns bei der Auswertung auf die Topographiebilder beschränken.



- Bild 1 ($4000 \times 4000 \text{ \AA}$):
Man erkennt deutlich die körnige Struktur des ungeflamten Golds, die durch das Aufdampfen auf das Quarzglas entstanden ist.
Im oberen Bereich des Bildes kann man eine Verzerrung erkennen, die sich wahrscheinlich auf eine Verschiebung des Bildbereichs zurückführen lässt. Diese lässt sich wiederum auf thermischen Drift des Piezomaterials zurückführen.
- Bild 2/3 ($2000 \times 2000 \text{ \AA}$ / $1000 \times 1000 \text{ \AA}$):
Die Streifen im oberen Teil des Bildes lassen sich vermutlich auf eine äußere Störung zurückführen lassen.
- Bild 4 ($500 \times 500 \text{ \AA}$):
Man erkennt wieder horizontale Linien, die teilweise mit Änderungen im Kontrast einhergehen, die ebenfalls mit äußeren Störungen erklärbar sind.
„Unsaubere“ Bereiche vor und hinter den Korngrenzen sind durch verzögertes Nachregeln des Piezos entstanden, da der Höhenunterschied zu groß war.

14.2 Strom-Spannungs-Kennlinien

Bei konstantem Abstand wurde die Spannung zwischen Spitze und Oberfläche in einem geringen Bereich variiert und der Tunnelstrom gemessen, wodurch folgende Strom-Spannungs-Kurven entstanden:

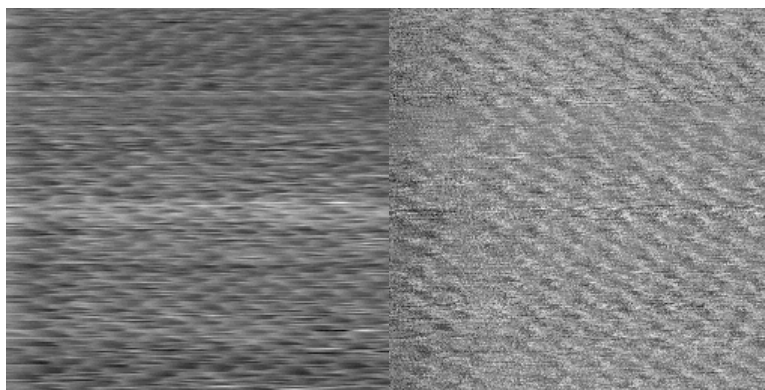


Man erkennt in beiden Kurven in etwa den erwarteten linearen Verlauf um den Nullpunkt und einen exponentiellen Anstieg für größere Spannungen. Vergleicht man die beiden, unmittelbar hintereinander aufgenommenen Kennlinien, so sind nur geringe Unterschiede erkennbar, was auf hinreichend stabile Tunnelbedingungen hindeutet.

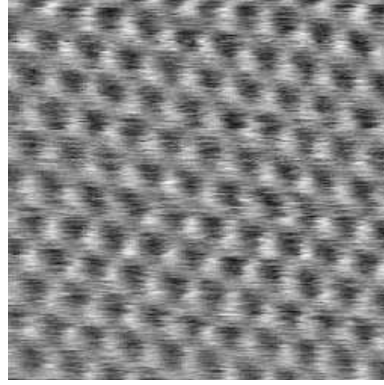
15 Graphit

15.1 Atomare Auflösung

Man sollte nun versuchen, die Graphitoberfläche atomar aufzulösen. Dabei sollten die Auswirkungen der Variation der Parameter untersucht werden. Dies war leider nicht möglich, da bereits die direkt hintereinanderfolgende Aufnahme zweier Bilder mit den selben Parametern völlig verschiedene Ergebnisse lieferte. Auch das mehrmalige Auswechseln der Spitze und Ändern des Bildbereichs brachte keine Verbesserung. Die beste Abbildung, die wir erreichen konnten, ist hier dargestellt ($40 \times 40 \text{ \AA}$). Der Versuch, die Struktur besser aufzulösen scheiterte kläglich.



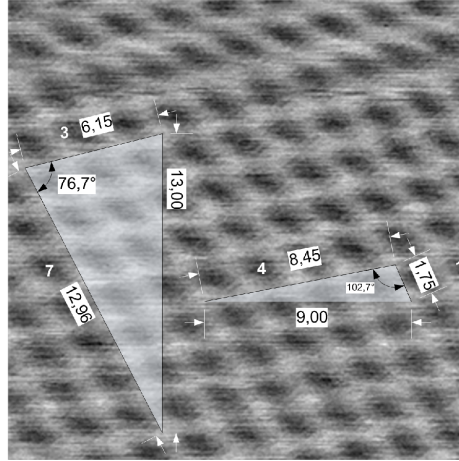
Zum Vergleich ist hier das Bild aus der Vorbereitungsmappe ($25 \times 25 \text{ \AA}$):



Hier sind – im Gegensatz zu unserem Bild – deutlich trianguläre Strukturen erkennbar, die die β -Atome der Atomstruktur darstellen. Dabei handelt es sich um diejenigen Atome der hexagonalen Graphitstruktur, die in der nächstunteren, verschobenen Gitterebene kein Nachbaratom besitzen, sondern erst in der übernächsten Schicht. Die Elektronenzustandsdichte der übrigen Atome (α -Atome), die direkt über einem Nachbaratom sitzen, wird von dessen Elektronen dahingehend verändert, dass sie auf dem RTM-Bild nicht zu sehen sind, weshalb sich statt der sechseckigen eine dreieckige Struktur ergeben sollte.

15.2 x-y-Eichung

Da der theoretische Abstand zwischen zwei β -Atomen bekannt ist ($2,46 \text{ \AA}$), können anhand obiger Bilder die x- und y-Achsen geeicht werden.



Auf dem Bild sind von uns zwei Dreiecke über die Gitterstruktur gelegt worden, eines hat eine parallele Seite zur x-Achse, eines zur y-Achse, die jeweils anderen Seiten sind entlang des Gitters ausgerichtet. Durch Abzählen der Atome entlang dieser Seiten und Bestimmen des Winkels innerhalb des gezeichneten Dreiecks ist es mit Hilfe des Cosinussatzes möglich, die zur Achse parallel verlaufende Dreiecksseite zu berechnen und diesen Wert mit dem Gemessenen im Bild vergleichen. Dabei ist darauf zu achten, dass RTM-Bilder nicht winkeltreu abgebildet werden. Wir messen folgende Größen und erhalten schließlich einen Streckungsfaktor $s_{x,y}$ in x- und einen in y-Richtung:

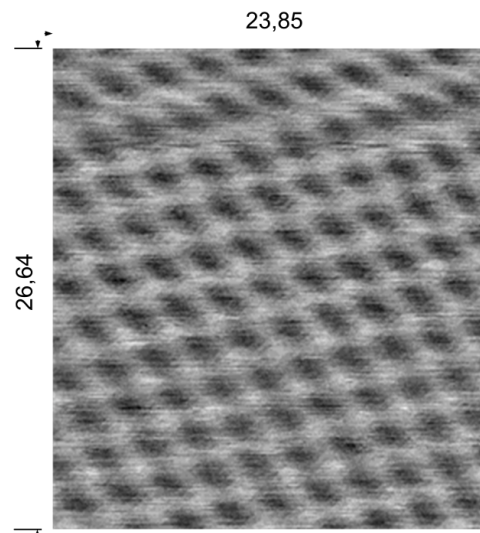
$$\begin{aligned}
 a_{x,th} &= 4 \cdot 2,46 \text{ \AA}, & b_{x,th} &= 1 \cdot 2,46 \text{ \AA}, & a_x &= 8,45 \text{ \AA}, & b_x &= 1,75 \text{ \AA}, & \gamma_{x,th} &= 120^\circ \\
 c_{x,th}^2 &= a_{x,th}^2 + b_{x,th}^2 - 2a_{x,th}b_{x,th} \cos \gamma_{x,th} = 127,08 \text{ \AA}^2 = \left(11,27 \text{ \AA}\right)^2 \\
 c_x^2 &= a_x^2 + b_x^2 - 2a_x b_x \cos \gamma_{x,th} = 89,25 \text{ \AA}^2 = \left(9,45 \text{ \AA}\right)^2 \Rightarrow s_x = \frac{11,27 \text{ \AA}}{9,45 \text{ \AA}} = 1,19
 \end{aligned}$$

$$a_{y,th} = 7 \cdot 2,46 \text{ \AA}, \quad b_{y,th} = 3 \cdot 2,46 \text{ \AA}, \quad a_y = 12,96 \text{ \AA}, \quad b_y = 6,15 \text{ \AA}, \quad \gamma_{y,tr} = 60^\circ$$

$$c_{y,th}^2 = a_{y,th}^2 + b_{y,th}^2 - 2a_{y,th}b_{y,th} \cos \gamma_{y,th} = 223,91 \text{ \AA}^2 = \left(14,96 \text{ \AA}\right)^2$$

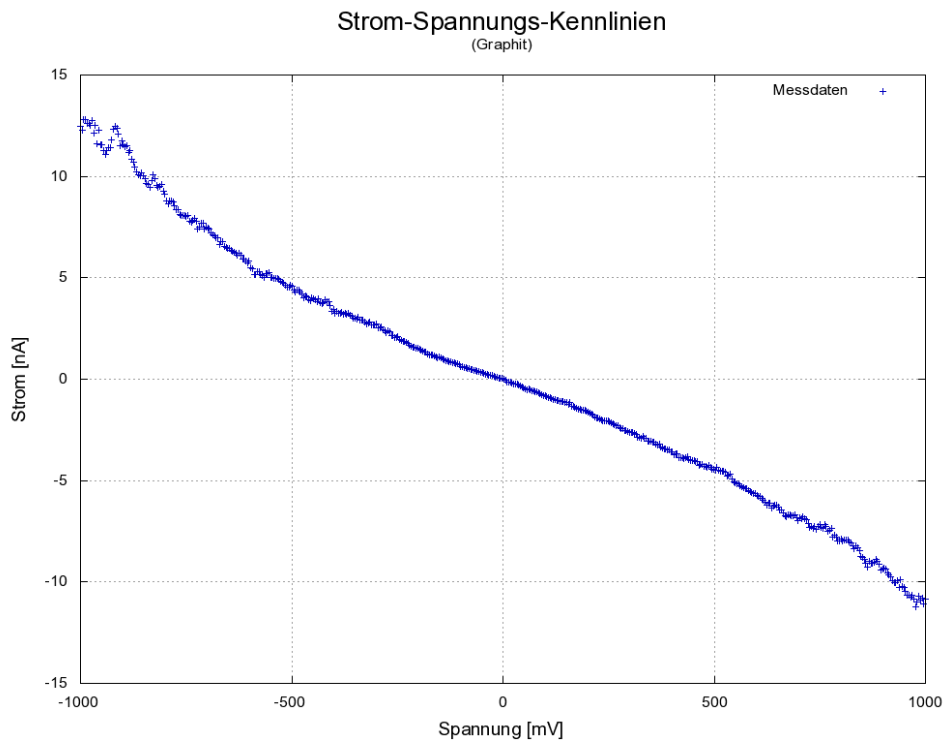
$$c_y^2 = a_y^2 + b_y^2 - 2a_yb_y \cos \gamma_{y,th} = 126,08 \text{ \AA}^2 = \left(11,23 \text{ \AA}\right)^2 \Rightarrow s_y = \frac{14,96 \text{ \AA}}{11,23 \text{ \AA}} = 1,33$$

Die Eichfaktoren sind also $s_x = 1,19$ und $s_y = 1,33$. Es gibt also eine Verzerrung von 11,8% bezüglich der Länge der x- und y-Achse. Berücksichtigt man die Eichfaktoren, so erhält man folgendes Bild:



15.3 Strom-Spannungs-Kennlinien

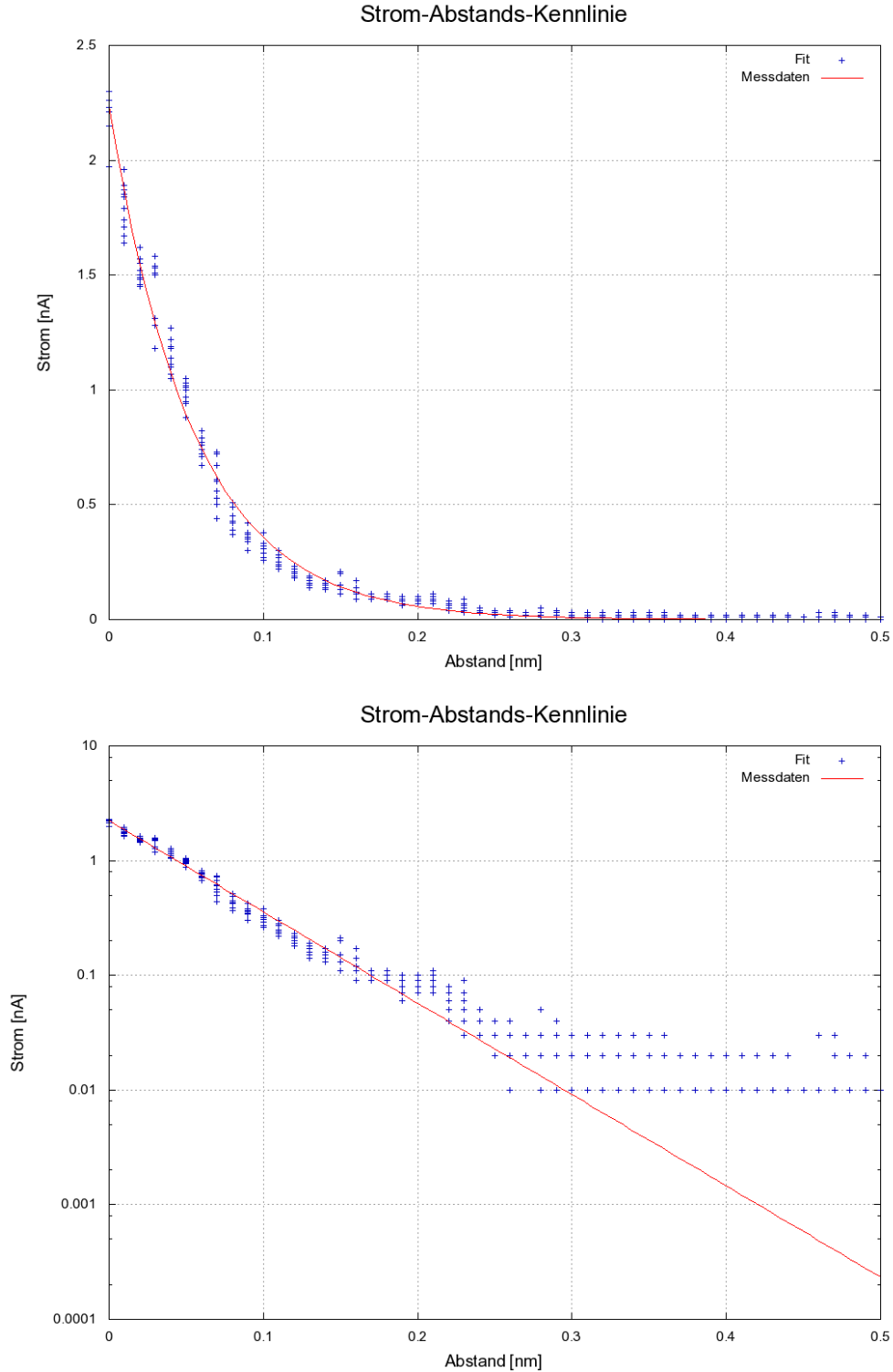
Bei Graphit wurden ebenfalls Strom-Spannungs-Kurven aufgenommen:



Man erkennt wieder den erwarteten Verlauf, d. h. einen linearen Verlauf im Bereich des Ursprungs, sowie die Andeutung eines exponentiellen Verlaufs.

15.4 Strom-Abstands-Kennlinien

Wie in der Vorbereitungsmappe beschrieben wurde eine Strom-Abstands-Kennlinie aufgenommen. Wir wählten eine Abstandsvergrößerung von $5 \text{ \AA}$. In den folgenden Diagrammen wurde die vom Programm gelieferte Spannungsachse auf eine Längsachse reskaliert. Dabei fehlte uns jedoch eine exakte z-Eichung, die aus weiter unten genannten Gründen nicht durchgeführt werden konnte. Wir erhielten folgenden Verlauf für $U = 184,1 \text{ mV}$:



Man erkennt sehr gut den erwarteten exponentiellen Verlauf. Man sieht auch, dass die Messdaten nur mit genau 2 Nachkommastellen vorlagen und daher gegen kleine Werte eine „Treppenbildung“ vorliegt. Legt man die theoretisch vorhergesagte exponentielle Strom-Abstands-Relation $I_T \propto \exp(-2\kappa d)$ zugrunde, so kann man durch lineare Regression die Abklingkonstante κ bestimmen. Mit GnuPlot wird eine

Exponentialfunktion der Form $I(d) = A \cdot \exp(-2\kappa d)$ angefitet. Wir stießen auf folgende Parameter samt Standardabweichung:

$$A = 2,235 \pm 0,001 \text{ nA}$$

$$\kappa = 0,917 \pm 0,008 \frac{1}{\text{\AA}}$$

Aus der Beziehung

$$\begin{aligned} \kappa^2 &= \frac{2m_e}{\hbar^2} \bar{\varphi} \\ \Rightarrow \bar{\varphi} &= \frac{\hbar^2}{2m_e} \kappa^2 \end{aligned}$$

lässt sich die effektive Barrierehöhe $\bar{\varphi}$ bestimmen. Der Fehler errechnet sich mit Gauß'scher Fehlerfortpflanzung nach der Formel

$$\sigma_{\bar{\varphi}} = \frac{\hbar^2}{m_e} \kappa \cdot \sigma_{\kappa}$$

Wir erhalten eine Potentialhöhe von

$$\bar{\varphi} = 3,20 \pm 0,05 \text{ eV}$$

Der angegebene Fehler ist natürlich nur der mathematisch fortgepflanzte Fehler der obigen Kurvenanpassung. Dieser wird jedoch durch andere Fehlerquellen überschattet.

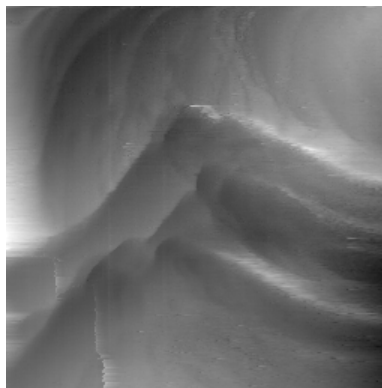
Adsorbate im Tunnelsystem setzen die effektive Potentialbarriere herab, weshalb es nicht verwunderlich ist, dass wir im Gegensatz zum erwarteten Wert von 4 – 5 eV eine zu kleine Barriere finden.

16 Geflammtes Gold

Erhitzt man eine Goldprobe, so können sich stellenweise terrassenförmige Strukturen ausbilden. Dies geschieht unter anderem durch Volumendiffusion, das Verdampfen schwächer gebundener Atome der Oberfläche, am wahrscheinlichsten jedoch durch Oberflächendiffusion. Dabei wird die thermisch zugeführte Energie von den Goldatomen genutzt die energetisch günstigste Anordnung einzunehmen. Dieser entsteht bei möglichst guter Bindung der Atome, also möglichst glatten Terrassen. Misst man die Höhe der Terrassen mit Hilfe einer geeigneten Software, so kann man mit diesen Daten eine Eichung des z-Piezos durchführen.

Bei einer geflammten Goldprobe sollten die terrassenartige Strukturen vermessen werden. Leider war trotz mehrerer Messungen mit verschiedenen Tunnelspitzen an unterschiedlichen Stellen auf der Probe keine dieser Strukturen zu entdecken. Aus Zeitgründen wurde der Versuch abgebrochen und die Eichung des z-Piezos wurde nicht durchgeführt.

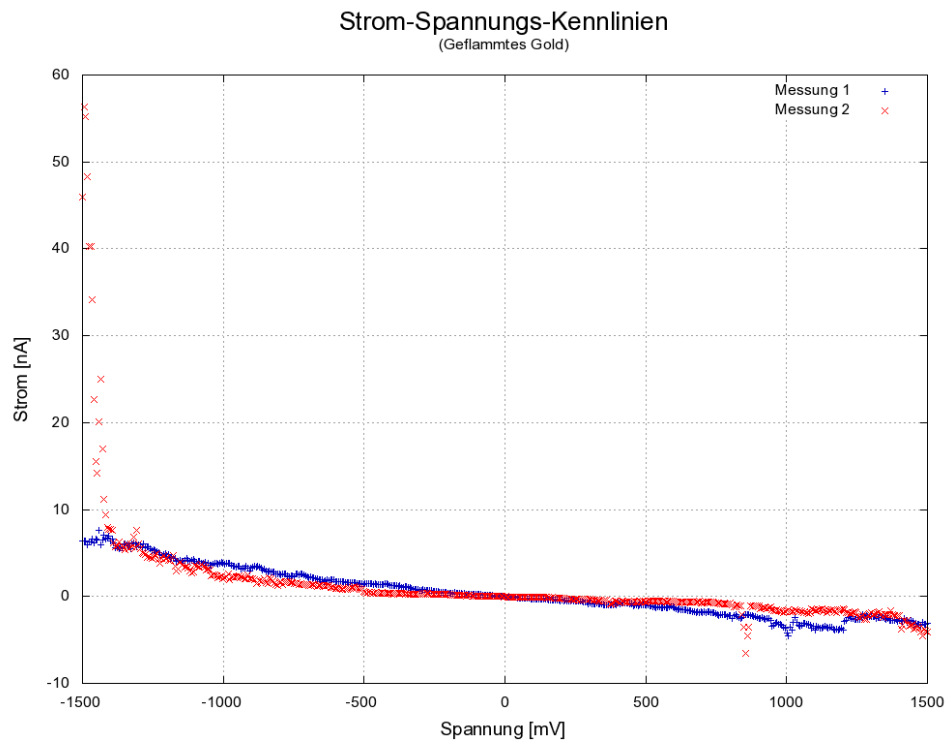
Selbst im Falle einer Andeutung von Terrassen in größeren Maßsträßen konnten diese nicht in höherer Auflösung bestätigt werden.



Andeutung einer Terrasse bei einer Auflösung von $2000 \times 2000 \text{ \AA}$

16.1 Strom-Spannungs-Kennlinien

Hier wurden ebenfalls Strom-Spannungs-Kurven aufgenommen:



Man erkennt in beiden Kurven wieder den erwarteten Verlauf. Vergleicht man die beiden, unmittelbar hintereinander aufgenommenen Kennlinien, so sind deutliche Unterschiede erkennbar, was auf nicht stabile Tunnelbedingungen hindeutet.