

Versuchsprotokoll PG-III

Das Rastertunnelmikroskop (STM)



Der Versuch wurde aufgebaut und durchgeführt in Zusammenarbeit von
Fabian Fleischer, Matthias Sturm, René Könnecke, Ramin Torabi,
Heinrich Südmeyer und Diana Bednarczyk,
der Gruppe **268-III**
mit **Cornelia Sing** als Tutorin.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhalt	Seitenzahl
Inhaltsverzeichnis	2
Abstract	2
Einleitung	3
Theorie	4
Funktionsprinzip des STM	4
Tunneleffekt	6
Schwingungsentkopplung	8
Betriebsmodi	9
Feinansteuerung	9
Lock-In Verstärker	10
Spitzenherstellung	10
Versuchsaufbau	11
Grobeinstellung	11
Schwingungsentkopplung	13
Verstärkerschaltung	14
Regelung der Piezosteuerung	15
Analyse des Struktogramms	16
Rechner und Programm	16
Durchführung	16
Übersicht über die Versuchstage	16
Grobeinstellung	17
Schwingungsentkopplung	17
Feinansteuerung	18
Verstärkerschaltung	19
Regelkreis im STM	21
Auswertung	22
Resümee & Tips	24
Literaturverzeichnis	25

ABSTRACT

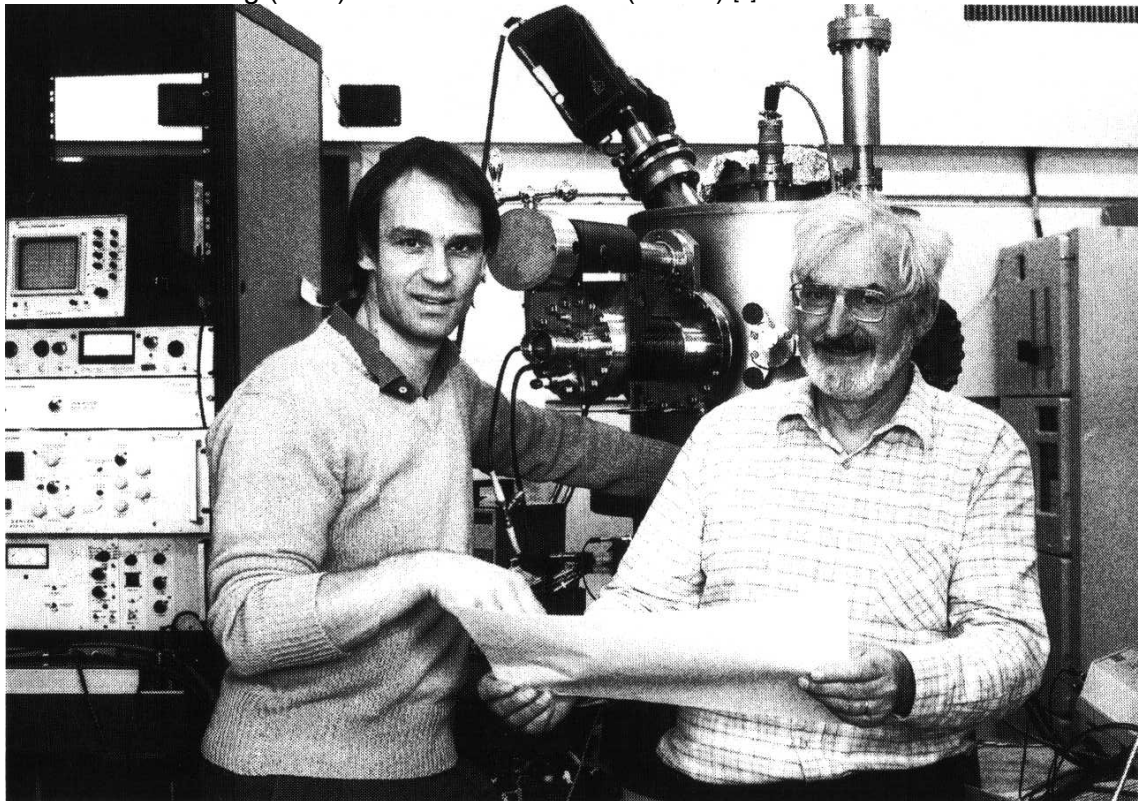
Es wurde versucht ein Rastertunnelmikroskop mit den Hilfsmitteln des PL zu bauen und damit die Oberfläche einer goldbeschichteten CD abzurastern, jedoch gelang es schließlich nicht einmal einen Tunnelstrom zu messen, der für die Aufnahme sehr kleiner (meist im Atomdurchmesser liegenden) Höhenunterschiede geeigneter Proben unerlässlich ist.

EINLEITUNG

Wie jeder weiß, kann man mehr Details erkennen, wenn die Dinge aus der Nähe betrachtet werden. Schon früh wurde bemerkt, daß es aber nicht immer (einfach) möglich ist, noch dichter heranzutreten. Schon länger werden zur Auflösungssteigerung optische Linsen verwendet. Auch heute finden sie bei Kindern oder älteren Menschen, die z.B. Kleingedrucktes lesen wollen, Verwendung. Aber schnell bemerkte man, daß durch Kombination mehrerer (mindestens zweier) Linsen die Auflösung noch einmal deutlich erhöht werden konnte. Derartige optische Mikroskope sind schon lange bekannt und werden primär in der Biologie und Medizin oder ähnlichen Bereichen eingesetzt. Der Physiker, der wissen will "Was die Welt im Innersten zusammenhält", bemängelt aber schnell, daß durch die Wellenlänge des verwendeten (sichtbaren) Lichtes begrenzte Auflösungsvermögen dieser Methode und somit steigt er auf Teilchen mit kleinerer Wellenlänge um - den Elektronen. Beim Elektronenmikroskop werden hochenergetische (im keV bis MeV Bereich liegende) gebündelte Elektronenstrahlen auf die Probe geschickt. Das Elektronenmikroskop bietet somit eine deutlich höhere Auflösung als optische Mikroskope. Es wird zum Beispiel in der Biochemie oder organischen Chemie eingesetzt, da mit ihm auch größere Moleküle erkennbar sind. Leider kann es durch den Beschuß der Probe mit hochenergetischen Elektronen zu Veränderungen oder sogar Beschädigungen auf der Probe kommen, die auch das Ergebnis verfälschen.

Einige Zeit dachte man, es sei nicht möglich, die Auflösung noch weiter zu steigern, aber im März 1981 bewiesen Gerd Binnig und Heinrich Rohrer mit der Entwicklung des Rastertunnelmikroskops das Gegenteil. Diese "Erfindung" wurde 1986 mit dem Nobelpreis belohnt. Mit dem Rastertunnelmikroskop (scanning tunneling microscope; kurz: STM) ist es heute möglich, einzelne Atomoberflächen abzurastern, ohne die Probe zu verändern, wie es z.B. bei der hochauflösenden Elektronenmikroskopie der Fall sein kann.

Abb.1: Gerd Binnig (links) und Heinrich Rohrer (rechts) [1]



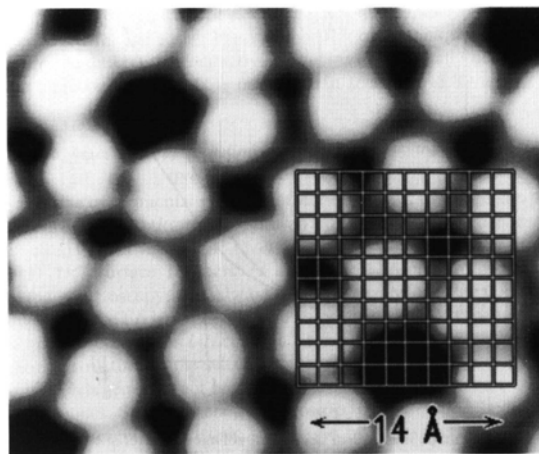
Wie funktioniert das STM?

Theoretisch ist der prinzipielle Aufbau eines STM ganz simpel. Man bringt eine Spitze in die Nähe einer leitfähigen (!) Probe. Wenn zwischen Spitze und Probe nun eine Spannung angelegt wird, kann ein Tunnelstrom gemessen werden. Das bedeutet obwohl sie sich nicht berühren tunneln Elektronen, die klassisch nicht einmal ausreichende Energie haben, zwischen Probe und Spitze (Tunnel-Effekt), diese Elektronen können als Tunnelstrom gemessen werden. Wird die Spitze nun über die Probe bewegt (oder umgekehrt) kann durch die Kenntnis der x, y und z - Positionen der Spitze und des Tunnelstroms auf das topologische Höhenprofil der Probe geschlossen werden.

Leider sieht die Praxis deutlich komplizierter aus:

Um vernünftige Tunnelströme messen zu können, muß der Abstand im Ångströmbereich (10^{-10} m) liegen, der Tunnelstrom liegt dann im Nano- bis Picoamperébereich.

Abb.2: [1]



Für atomare Auflösungen sollte die Spitze einatomar sein. Damit derartige Spitzen nicht kaputt gehen, wird dann im Ultrahochvakuum gearbeitet. Um möglichst genaue Meßergebnisse zu erhalten, und zur Vermeidung des Kontaktes zwischen Spitze und Probe muß deren Abstand zueinander genau eingehalten werden, dazu darf der Aufbau kaum Erschütterungen erfahren. Also bedarf es einer größeren Schwingungsentkopplungsapparatur.

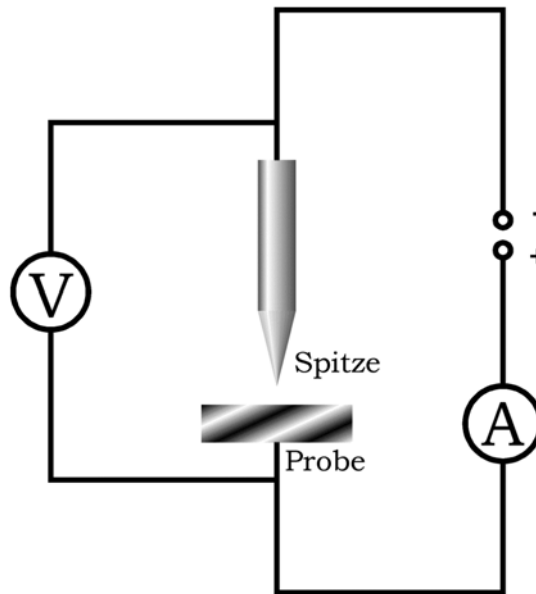
Um derartige Höhenprofile aufzuzeichnen, wird aufgrund der Fülle an Meßdaten ein Computer zu Hilfe genommen. Damit die Spitze in solch geringen Abständen bewegt werden kann, werden Piezokristalle verwendet, diese lassen sich auch gut über einen Computer ansteuern.

THEORIE

Das Funktionsprinzip des Raster-Tunnel-Mikroskops

Das Raster-Tunnel-Mikroskop (engl.: Scanning Tunneling Microscope, oder kurz STM) besteht nach entsprechender Abstraktion aus drei essentiellen Bestandteilen: Stromkreis, Spitze und Probe. Auf die Details dieser Bestandteile soll später eingegangen werden.

Abb.3: Prinzipskizze des STM



Das gewünschte Resultat unserer STM-Messung ist das Höhenprofil einer elektrisch leitenden Oberfläche. Es werden auch andere Eigenschaften der Oberfläche registriert, doch hier soll uns nur die Topographie interessieren.

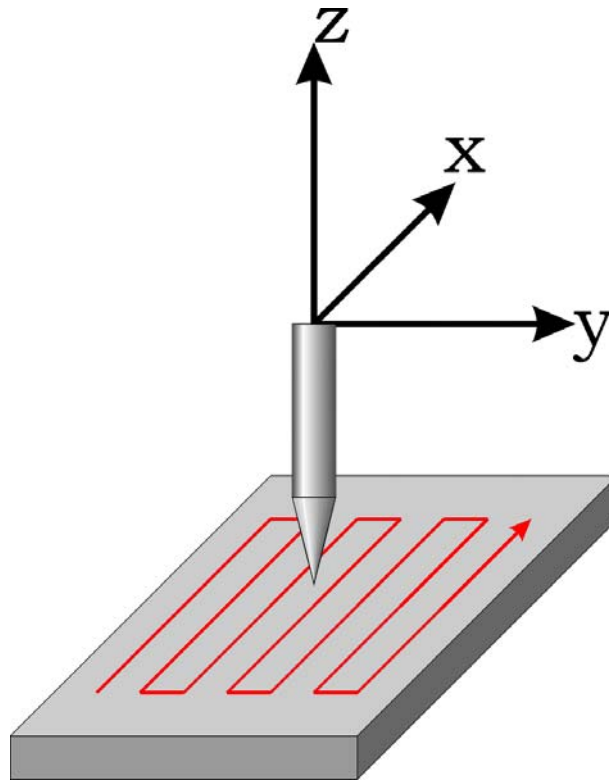
Dieses Profil erhält man indirekt über die Messung der Entfernung zwischen Spitze und Probe. Hierzu bedient man sich des unten erläuterten Tunnel-Effekts. Der elektrisch nicht leitende Raum zwischen Spitze und Probe stellt eine Potentialbarriere für den angelegten Strom dar. Wie erwähnt können einige der Elektronen diese Potentialbarriere durchtunneln. Die Anzahl der tunnelnden Elektronen ist nun wieder abhängig von der Spannung zwischen Spitze und Probe und deren Entfernung zueinander. Die Spannung in der Größenordnung einiger Volt wird vom Experimentierenden bestimmt und die Anzahl der tunnelnden Elektronen wird als sog. Tunnelstrom im Stromkreis registriert. Aus beiden Werten läßt sich nun die Entfernung zwischen Spitze und Probe errechnen. Aufgrund der Gesetzmäßigkeiten des Tunnel-Effekts tunneln etwa 95% aller tunnelnden Elektronen von dem Atom der Spitze, das der Probe am nächsten ist. Dieses Wissen rechtfertigt es, den Tunnelstrom in direkte Beziehung mit der Entfernung zu setzen.

Offensichtlich liegen die sinnvollen Entfernungen hier im Nanometerbereich, und selbst hier sind die Ströme ausgesprochen gering. Man hat nicht mehr als einige Nanoampere zu erwarten.

Das Erstellen des Abbildes einer Oberfläche ist ein Prozeß, der sich aus vielen Höhenmessungen zusammensetzt. Hierzu wählt man auf der Oberfläche eine bestimmte Anzahl äquidistanter Meßpunkte, das sog. Raster. Die Anzahl der Meßpunkte pro Fläche bestimmt hier die Auflösung der Abbildung.

Um eine solche Rasterung möglich machen, ist die Spitze so gelagert, daß sie in allen drei Raumrichtungen bewegt werden kann (man könnte auch die Probe beweglich lagern, das ist eine Frage der Konstruktion). So rastert man nun mit einer bestimmten Schrittfrequenz (typischerweise 10-20 Hz) über die Probe und registriert für jeden Meßpunkt den Tunnelstrom. Wie man den Tunnelstrom verwertet ist vom gewählten Arbeitsmodus abhängig.

Abb.4: Weg der Rasterung und Bezeichnung der Raumrichtungen



Der Tunneleffekt

Zunächst sei angemerkt, daß der Tunneleffekt zwar in der Praxis auftritt, jedoch immer noch nicht wirklich erklärbar ist, da zwar vor und hinter einer klassisch unüberwindlichen Barriere Teilchen Meßbar sind, jedoch nicht darin (siehe auch **Abb.4a** ☺).

Er beruht auf dem Welle-Teilchen-Dualismus von Teilchen, wie z.B. den Elektronen, die hier betrachtet werden, da diese als Ladungsträger fungieren, was entscheidend für den Tunnelstrom ist.

Dabei werden diese als Welle beschrieben, die auf eine Potentialbarriere (hier Vakuum) mit endlicher Breite und Höhe trifft. Sie kann diese jedoch klassisch nicht überwinden, das heißt, die Amplitude der Welle ist nicht hoch genug, damit die Welle über den Wall "schwappen" kann. Das hat zur Folge, daß die Welle reflektiert wird. Da jedoch der sogenannte Reflexionskoeffizient R , der sich aus dem Quotienten der quadratischen Beträge von Reflexionsamplitude und Einfallsamplitude zusammensetzt:

$$R(E) = \frac{|A_{\text{Reflex}}|^2}{|A_{\text{Einfall}}|^2} \quad \text{rechnerisch nicht gleich eins ist und damit auch die}$$

Aufenthaltswahrscheinlichkeit $|\Psi(r,t)|^2$ des Teilchens vor der Barriere nicht eins ist, muß es sich also, da das Teilchen innerhalb der Barriere nicht meßbar ist, zu einem gewissen Prozentsatz auf der anderen Seite dieser befinden (denn das Teilchen verschwindet nicht einfach). Diese Tunnelmöglichkeit gibt der Transmissionskoeffizient

T an, der sich ähnlich dem Reflexionskoeffizienten ergibt durch: $T(E) = \frac{|A_{\text{Trans}}|^2}{|A_{\text{Einfall}}|^2}$, in

vereinfachter Form ist $T(E) = \exp\left[-\frac{4}{\hbar}\sqrt{2m(V_0 - E)}q_0\right]$ (hier ist zu sehen, daß $T(E)$

mathematisch nie Null wird). Dabei ergeben $T + R = 1$ und somit ist das Teilchen auf jeden Fall vorhanden.

Der Transmissionskoeffizient, also die Zahl, die angibt mit welcher Wahrscheinlichkeit das Teilchen durch die Barriere wandert, ist exponentiell abhängig von der Breite d der

Potentialbarriere sowie von ihrer Höhe V_0 und natürlich der Energie E des Teilchens, wobei die letzteren beiden unter anderem als k zusammengefaßt sind, so daß

$T(E) \propto e^{2kd}$ mit $k = \frac{\sqrt{2m \cdot (V_0 - E)}}{\hbar}$, wobei m die Masse des Teilchens (hier:

Elektronenmasse) und $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ mit h als Plank'schem Wirkungsquantum sind.

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit nimmt also innerhalb der Potentialbarriere exponentiell mit oben genannter Abhängigkeit ab.

Eigentlich gehen diese Erläuterungen aus den Lösungen der zeitunabhängigen

Schrödingergleichung: $\left(-\frac{\hbar^2}{2m} + V(r)\right)\psi(r,t) = i\hbar \frac{\partial \psi(r,t)}{\partial t}$ hervor. Dazu wird das Problem,

in die drei Bereiche I (vor der Barriere), II (in der Barriere) und III (hinter der Barriere) unterteilt und für jedes der Teilstücke separat eine Lösung angegeben, wobei in I und III eine Wellenfunktion und in II eine Exponentialfunktion als Lösungen zu finden sind. Um das Problem zu vereinfachen wird das eigentliche Potential, das bogenförmig wie in **Abb.6b** verläuft, zu einem Kasten abstrahiert.

Abb.5a: [1]

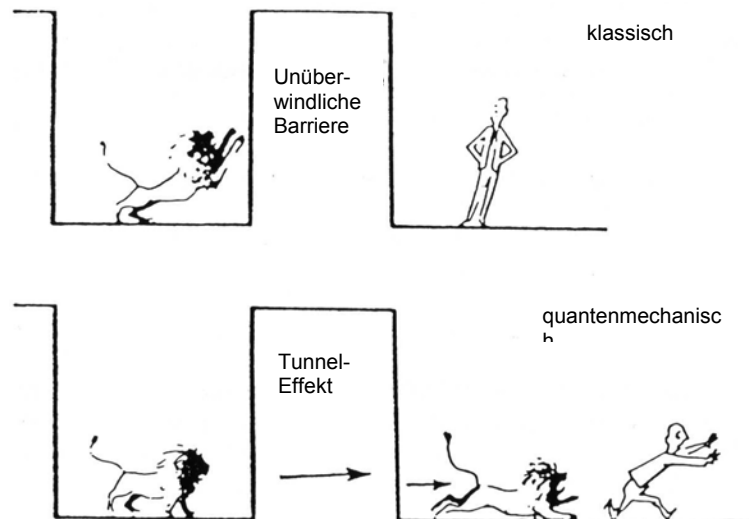
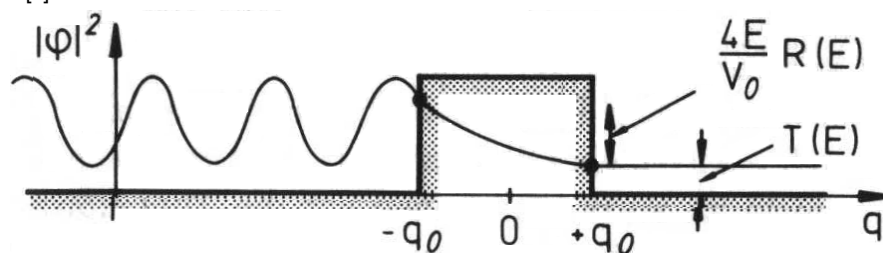


Abb.5b: [2]



In diesem Versuch soll nun der Tunnelstrom (also derjenige Strom, der durch tunnelnde Elektronen entsteht), der den Abstand von Spitze zu Probe und damit die Oberflächentopologie der Probe charakterisiert (denn: $I_{\text{Tunnel}} = e^{-2q_0}$, also ist der Logarithmus der Tunnelstroms proportional zum Abstand), gemessen werden. Damit die Tunnelgeschwindigkeit in beiden Richtungen nicht gleich groß ist und damit eine Messung der Spannungsdifferenz unmöglich macht, wird zwischen Probe und Spitze eine Spannung U angelegt. Diese sorgt dafür, daß die bis zum Fermi-niveau gefüllten Energiebänder der der Einfachheit halber ähnlichen Metalle mit fast gleichen

Ferminiveaus um die Energie $E = eU$, wobei e die Elementarladung ist, gegeneinander verschoben werden. Somit entstehen freie Zustände, die durch tunnelnde Elektronen besetzt werden können und diesen eine "Vorzugsrichtung" geben.

Abb.6a:

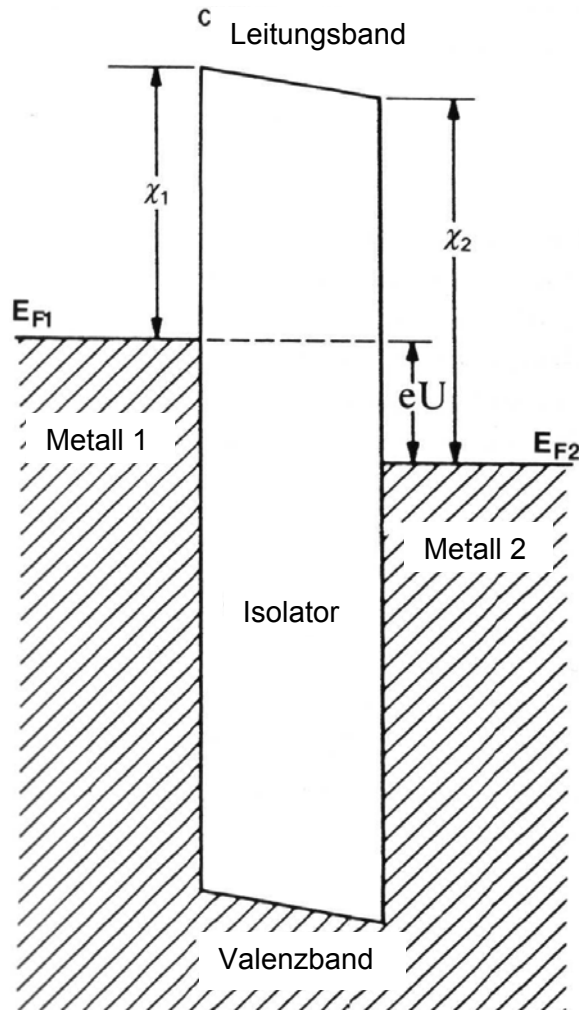
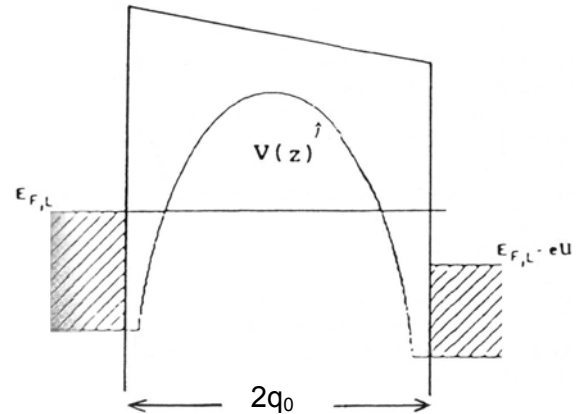


Abb.6b:



Schwingungsentkopplung

Wir gehen von einer erregenden Schwingung aus, die auf unser Schwingungssystem einwirkt. Die Kraft $m\ddot{x}(t)$ die dabei auf die schwingende Masse m wirkt setzt sich aus

der Rückstellkraft der Feder $-cx$ mit $c \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right]$ als Federkonstante und $x[\text{m}]$ als

Auslenkung, der zur Geschwindigkeit $\dot{x}(t) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ proportionalen Reibungskraft $-\beta\dot{x}(t)$

mit $\beta \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$ als Dämpfungskonstante und der durch die erregende Schwingung

wirkenden Kraft $F_0 \cos(\omega t)$ mit F_0 als maximal wirkende Kraft und ihrer Kreisfrequenz ω . Daraus ergibt sich folgende Schwingungsgleichung:

$$m\ddot{x}(t) = -cx - \beta\dot{x}(t) + F_0 \cos(\omega t)$$

eine übliche Schreibweise ist auch:

$$\ddot{x}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = K_0 \cos(\omega t) \quad \text{mit} \quad \omega_0^2 = \frac{c}{m} ; \quad Q = \frac{m \cdot \omega_0}{\beta} ; \quad K_0 = \frac{F_0}{m}$$

Diese Gleichung ist nicht mehr allgemein lösbar sondern nur durch Einsetzen gegebener Parameter. Durch exponentiellen Lösungsansatz, der Lösungsweg ist hier nicht dargestellt, erhalten wir eine komplexe Lösung mit dem Betrag $a(\omega)$ und der

Phase $\phi(\omega)$ mit $a(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega_0^2 \omega^2}{Q^2}}}$ und $\tan \phi = \frac{\omega \cdot \omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)}$.

Es ist ersichtlich, daß die Amplitude $a(\omega)$ der resultierenden Schwingung sehr stark von dem Verhältnis der Schwingungsfrequenzen ω_0 (Eigenfrequenz des Schwingungssystems) und ω abhängt. Liegen sie nah beieinander kann die Amplitude bei geringer Dämpfung sehr groß werden (da $\omega_0^2 - \omega^2$ gegen null geht). Liegen sie weiter auseinander nimmt die Amplitude jedoch sehr schnell ab, d.h. die Erregerschwingung kann die Masse nur sehr wenig beeinflussen.

Koppelt man nun zwei Schwingungssysteme mit sehr unterschiedlicher Eigenfrequenz, und verwendet dieses als Schwingungsfilter können kaum Schwingungen hindurch gelangen.

Betriebsmodi

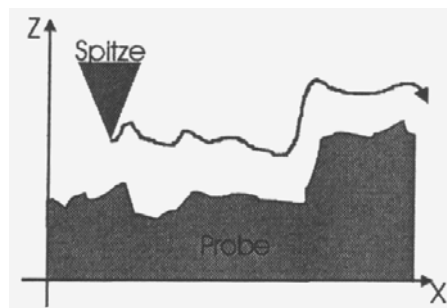
Das Rastertunnelmikroskop hat mehrere Betriebsmodi, die zwei gebräuchlichsten sind die Messung bei konstantem Tunnelstrom mit variabler Höhe und die Messung mit variablem Tunnelstrom und konstanter Abtasthöhe, die im Folgenden näher erklärt werden.

1. Konstanter Tunnelstrom (constant current mode)

In diesem Modus wird der Tunnelstrom zwischen Spitze und Probe durch Nachregeln der z-Koordinate der Spitze konstant gehalten. Als topologisches Profil der Probe nimmt man die Positionen, an denen durch die Spitze jener konstante Tunnelstrom, also auch recht konstanten Abstand (wenn die Probe nur aus gleichwertigen Atomen besteht), fließt.

Dieser Modus hat den Vorteil, daß er sehr genaue Ergebnisse liefert, außerdem benötigt man keine Näherungsformeln zum Umrechnen des Tunnelstroms. Durch einen zu schnellen Scanvorgang kann sich aber, bei nicht entsprechend schneller Nachregelung die Nachregeleinheit aufschaukeln, wodurch nicht nur die Ergebnisse verfälscht werden, sondern auch die Probe oder die Spitze in Mitleidenschaft gezogen werden können.

Abb.7a: [3]



2. Konstante Abtasthöhe (constant height mode)

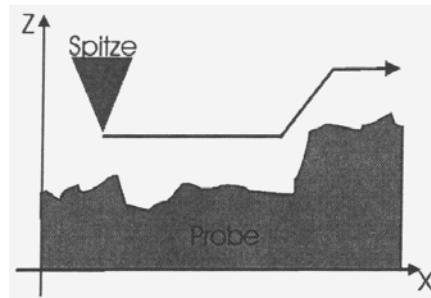
Hierbei wird die Abtasthöhe konstant gehalten. Das Höhenprofil der Probe muß dann über den Tunnelstrom berechnet werden ($\ln \langle I_T \rangle \propto [\text{Abstand}]$).

Als Vorteil hat dieser Modus, daß er sich nicht aufschaukeln kann und daher das Scannen viel schneller vonstatten geht. Leider ist er nicht so genau.

Außerdem muß der Tunnelstrom in einem gewissen Toleranzbereich gehalten werden; denn sollte der Tunnelstrom zu groß werden, droht die Spitze in die Probe zu stoßen

und bei viel zu kleinem Tunnelstrom kann dieser nicht mehr gemessen werden. Dieses Problem wird durch Nachregeln wie im Modus des konstanten Tunnelstromes gelöst. Aus der Kombination beider Modi ergibt sich dann das Höhenprofil.

Abb.7b: [3]



Die Feinansteuerung

Dazu eignet sich ein Röhrenpiezo, da dieser sich durch Elektrostriktion im Nanometerbereich proportional zur angelegten Spannung auslenken kann. (siehe Protokoll: Der Piezo-Effekt)

Dabei handelt es sich um einen Piezo der röhrenförmig ist und deswegen in drei verschiedene Richtungen ausgelenkt werden kann. Dies geschieht folgendermaßen: der Piezo ist von außen durch vier an ihm längs entlanglaufende und von einander getrennten Leiterschichten bedeckt welche als X1, X2, Y1, Y2 benannt sind. X1 liegt auf der gegenüber liegenden Seite von X2. Legt man eine entgegengesetzte Spannung an die beiden X Leiterschichten an, verschiebt sich der Piezo in X-Richtung. Ein Beispiel

Wir legen 75 V an die X1 und -75 V an die X2 Leiterschicht an. Dadurch dehnt sich die X1 Seite des Piezos aus, während sich die X2 Seite im gleichen Maß zusammenzieht, was zur X-Auslenkung führt. Die Y-Auslenkung funktioniert analog dazu.

Um eine Z-Auslenkung zu bekommen wird der Piezo im Inneren der Röhre angesteuert. Dort werden gleichzeitig alle X und Y Seiten des Piezos unter eine gleiche Spannung gesetzt, was zu einer Gleichmäßigen Ausdehnung des gesamten Piezo führt.

Da die Z-Ansteuerung in der Mitte des Piezos angelegt ist, werden alle vier Seiten des Piezos gleich verformt.

Durch diese Eigenschaft kann mit der Z-Auslenkung der Abstand zwischen Probe und Spitze, also der Tunnelstrom konstant gehalten werden.

Weiterhin ist es möglich, mit dem Piezo zu rastern, indem man ihn entweder in X oder Y-Richtung auslenkt.

Die Ansteuerung des Piezos geschieht dabei durch ein spezielles Gerät, welches alle drei Richtungen zusammen und getrennt ansteuert.

Dadurch, daß man den Abstand über die Spannung regeln kann, kann der Piezo vom Computer aus gesteuert werden und seine Daten an ihn weiter geben.

Der Lock-In-Verstärker

Der Lock-In-Verstärker führt eine Fourier-Analyse durch. Das heißt, er überprüft das eingehende Signal mit dem Referenzsignal. Das Referenzsignal ist das Signal, welches in den Aufbau hineingeht. Das eingehende Signal ist das Signal, welches aus dem Aufbau herauskommt. Beide Signale gehen also in den Lock-In-Verstärker und werden zueinander in Beziehung gesetzt. Wird die Frequenz aus dem Referenzsignal wieder in dem eingehenden Signal erkannt, so wird dieses Signal herausgefiltert und verstärkt. Der Rest fällt weg. Mit dieser Methode läßt sich Rauschen aus dem eingehenden Signal entfernen. Jedoch muß dabei beachtet werden, daß nur die Amplitude verstärkt wird und **nicht** der Offset.

Verwendet man dieses Gerät auch für ein Experiment mit Gleichstrom, so wie in unserem Fall, muß man sich im Klaren sein, daß wachsender Gleichstrom gleich zu

setzen ist mit wachsender Amplitude.

Lediglich die Größe der Amplitude ist von Bedeutung für die spätere Weiterverarbeitung.

Spitzenherstellung

Eigentlich wird ein sehr feiner, positiv geladener Wolframdraht in eine mit Silber beschichtete, negativ geladene Natronaugenlösung gebracht. Durch Elektrolyse "fließt" das Wolfram in der Silberschicht nach unten in die Natronlauge und der Draht bildet zwei Spitzen aus, die (vorausgesetzt der Vorgang verläuft planmäßig) einatomar sein sollten.

Diese so gewonnenen Spitzen sind allerdings sehr anfällig gegen Verschmutzung, so daß sie nur im Ultrahochvakuum vernünftig eingesetzt werden können, da hier die Wahrscheinlichkeit, daß ihr ein Fremdatom anhaftet innerhalb von Stunden sehr gering ist.

Abb.8a: Spitzenätzung schematisch [1]

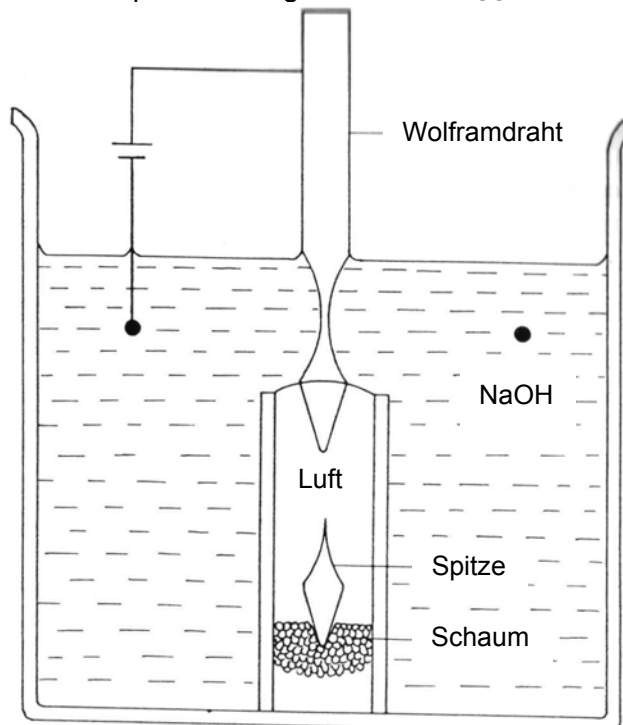
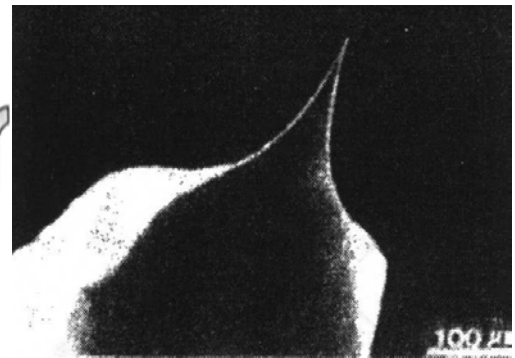


Abb.8b: fertige Spitze [3]



Da dieser Versuch allerdings an Luft stattfinden sollte (obwohl durch den winzigen Abstand zwischen Spitze und Probe kein Luftmolekül zwischen diese gelangt), in der bekanntlich sehr viele Fremdatome umherschweben, wurde sich für einen Goldhaardraht als Spitze entschieden, der zwar eine atomare Auflösung verhindert, dafür jedoch resistenter auf Verschmutzungen reagiert.

Deshalb sei hier die Spitzenherstellung nur kurz angeschnitten.

VERSUCHSAUFBAU

Fast die gesamte Mechanik wurde aus Abfallprodukten der Kabelleger des Wotan-II-Netzes, dem Bestand der Werkstatt und aus dem vierten Stock (bei den "Rastertunnel-Fachleuten") geborgten Dingen oder teilweise von den Leuten dieser PL-Gruppe gesponsorten Kleinteilen zusammengestellt.

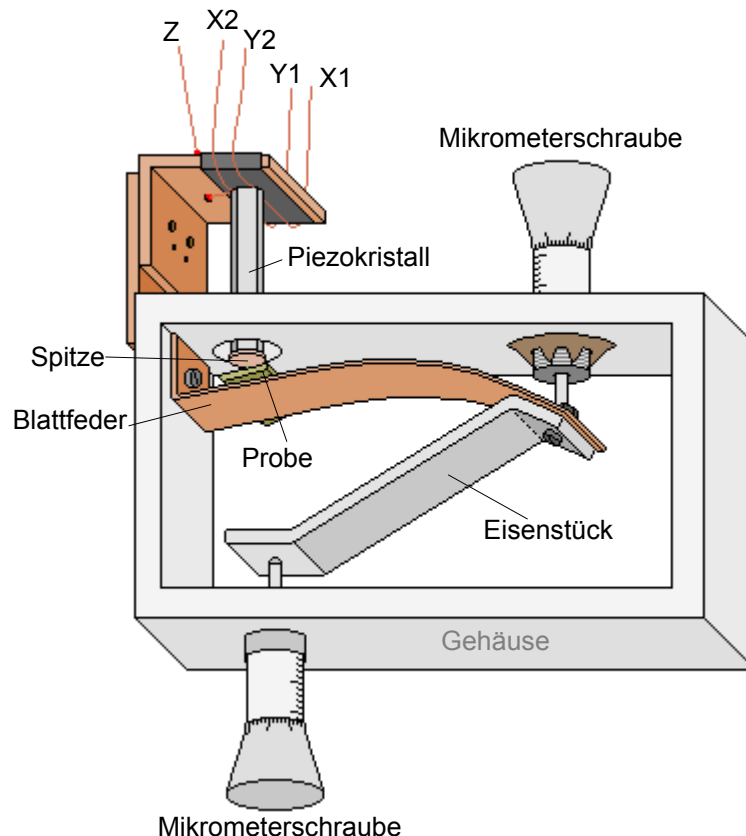
Es wurden lediglich zwei Mikrometerschrauben (723a) aus dem Optikraum verwendet.

Die Grobeinstellung

Den Rahmen der Grobeinstellung bildete ein etwa 4 cm tiefes und ca. 0,5 cm starkes Aluminiumrechteck von etwa 7 cm Breite und 5 cm Höhe. Darin befand sich gut festgeschraubt eine Konstruktion aus einer dünnen Blattfeder oben und daran nach unten weg befestigt ein festes, unbiegsames, jedoch nicht an den Rahmen montiertes, Metallstück. Auf dem Stück der Blattfeder, der ihrer Rahmenbefestigung am nächsten war, wurde die Probe (ein Stück goldbeschichtete CD) geklebt; denn genau darüber befand sich die Bohrung in dem Gehäuse, durch die der Piezokristall mit vorn angeklebter Golddrahtspitze geführt wurde. Dieser war, soweit möglich, senkrecht an einer kupfernen Winkelkombination befestigt, die verschiedene Löcher zur Verschraubung und Durchführung der Kabel, die zur Ansteuerung des Piezos dienten, aufwies.

Weitere zwei Bohrungen im Rahmen, eine fast dem Loch für den Piezo gegenüber, das andere neben diesem, sorgten dafür, daß zwei PL-eigene Mikrometerschrauben einmal an der Verschraubung von Blattfeder zum Eisenstück und zum anderen an der frei hängenden Seite desselben angreifen konnten. Diese waren beide jeweils mit einem, glücklicherweise in das feine Gewinde der Mikrometerschrauben passenden, ringförmigen Kabelstopper fixiert.

Abb.9:



Der Piezokristall ist, wie bereits im Protokoll zum Piezo-Effekt erwähnt, ein röhrenförmiges Gebilde mit vier längsseitigen Unterteilungen, mit derer Hilfe er separat in die drei Raumrichtungen bewegt werden kann. Dabei sind zwei sich jeweils gegenüberliegende Teilstücke für die x- bzw. y-Koordinate zuständig, die alle mit Leitern (sehr dünnem Kupferdraht) mit einer Spannungsquelle verbunden sind. An einem Ende des Piezos ist ebenfalls in der Mitte ein Kupferdraht angelötet, der die z-Richtung, also die gleichmäßige Ausdehnung des Kristalls in x- und y-Richtung, bestimmt.

Abb.10a:

X1
Z

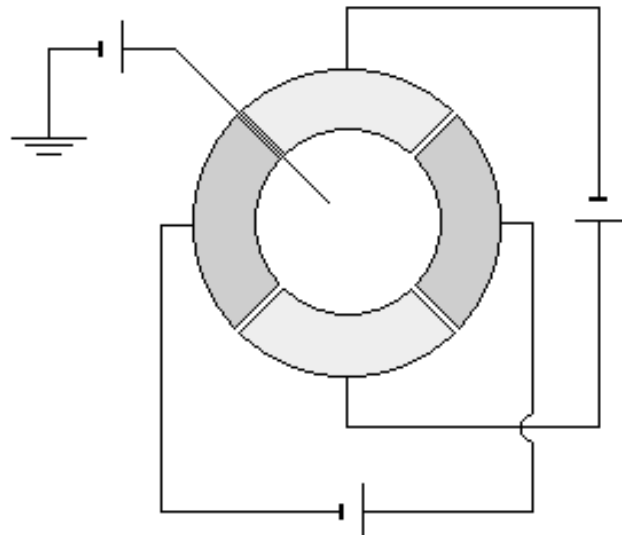
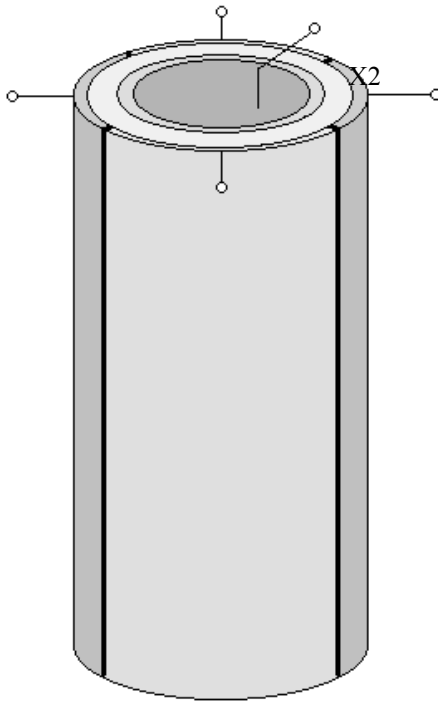
Abb.10b:

Y1

Y2

X1

Selbstverständlich waren dieser Kupferwinkel zum Piezo hin, der Durchlaß des z-Ansteuerungsdrabtes (die anderen Drähte wurden einfach zu den Seiten weggebogen), sowie die Drähte untereinander isoliert und die Lötstellen untereinander



möglichst nicht verbunden (später zeigte sich jedoch, daß die Lötstellen zu dicht beieinander lagen). Leider war hier der gesamte Aufbau aus Metall, so daß nur zu hoffen blieb, daß der benutzte Klebstoff genug Festigkeit in die so

dringend benötigte Isolation brachte, da dieser Aufbau im Rahmen der Schwingungskopplung, gerade an der Befestigungsstelle des Piezos, besonders steif sein mußte.

Schwingungskopplung

Der Aufbau der Schwingungskopplung bestand aus einem Gerüst aus Aluminiumwinkeln, einer darin an Gummiseilen aufgehängenen, mit einer Bleiplatte beschwerten Preßspanplatte und einem auf ihr ruhenden Plexiglaskasten mit integriertem Faraday'schen Käfig und der Grobansteuerung im Innern.

Abb.11a:

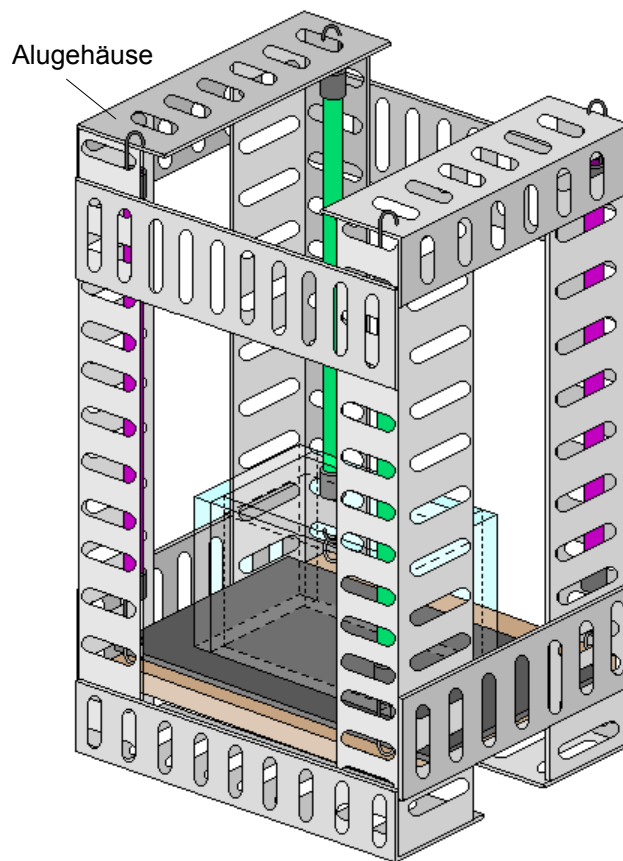


Abb.11b:

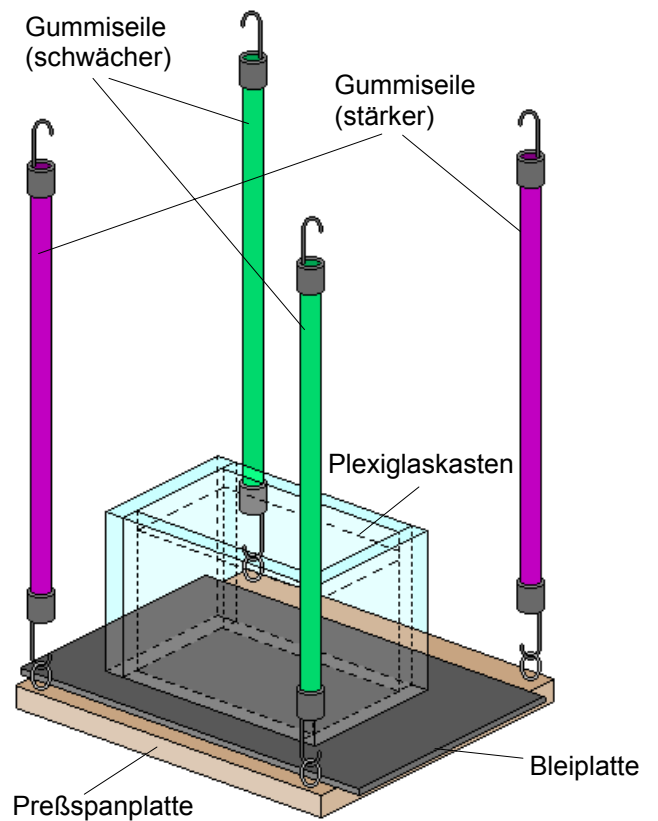
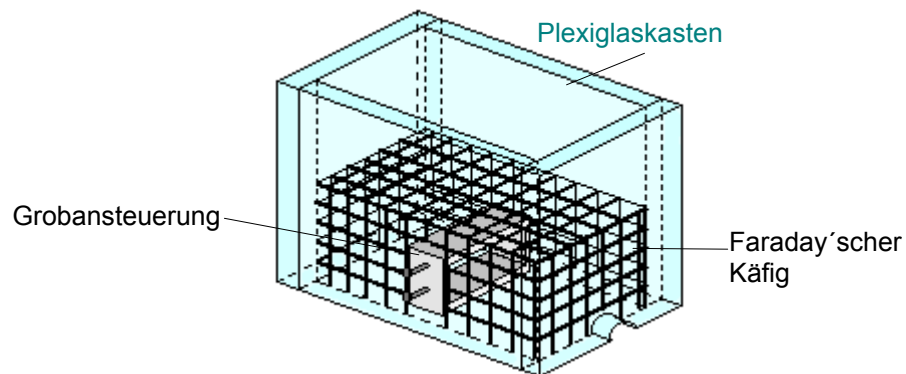


Abb.11c:



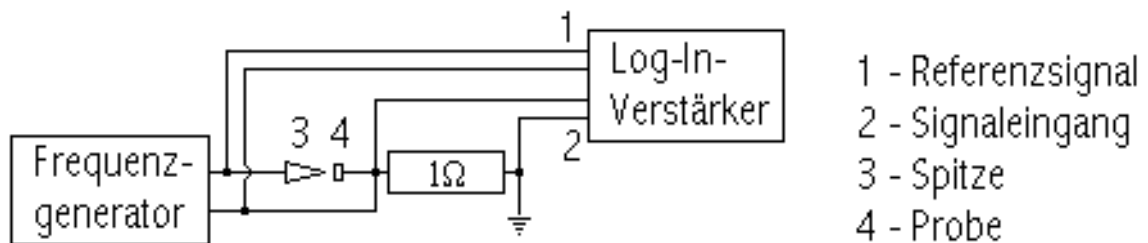
Verstärkerschaltung

Geräteliste:

Lock-In-Verstärker	045a
Frequenzgenerator	010a
Verstärkermodul	212a

Unsere Verstärkerschaltung sah wie folgt aus:

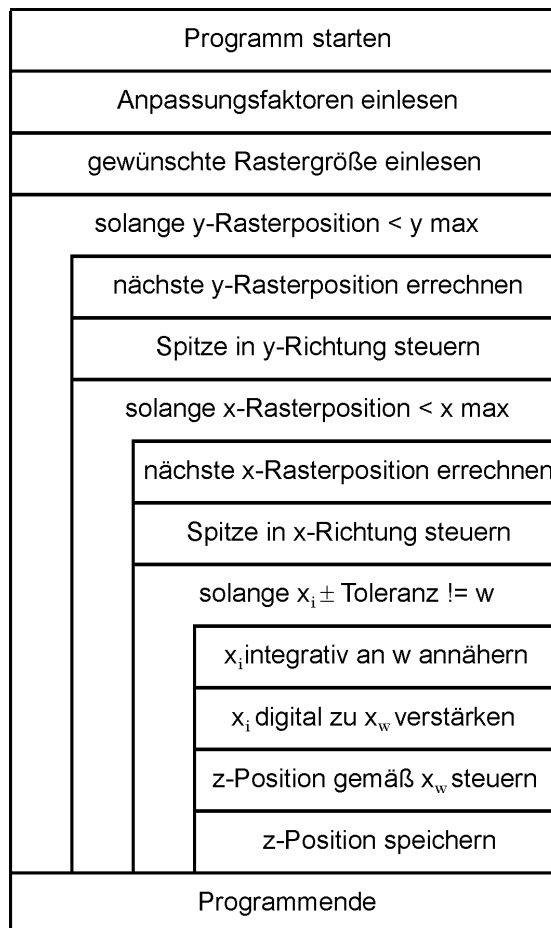
Abb.12: Lock-In-Verstärkerschaltung



Regelprogramm der Piezo-Steuerung

Das Regelprogramm hat in unserem Fall zwei Aufgaben. Die erste und einfachere ist die Bewegung der Spitze in x- und y-Richtung entlang des Rasterpfades. Als zweite Aufgabe übernimmt das Programm die Funktion des Vergleichers, Verstärkers und Stellglieds in unserem bereits erläuterten Regelkreis. Um die Funktionsweise dieses Programms übersichtlich darzustellen, verwendet man eine Darstellungsweise, die man auch Struktogramm nennt und unter dem Namen Nassi-Shneiderman-Diagramm bestimmten Konventionen, die Darstellung und Struktur betreffend, folgt. Der größte Vorteil dieser Darstellungsweise ist die Unabhängigkeit von der verwendeten Programmiersprache. Implementationsspezifische Details sind in der Darstellung nicht nötig und auch nicht erwünscht. Die folgende Darstellung des Programms liegt in abstrahierter Form vor und zeigt die grundlegende Idee hinter dem Algorithmus, ohne allzu technisch zu werden. Abweichungen von den Nassi-Shneiderman-Konventionen seien verziehen, sie soll dem einfacheren Verständnis für weniger geübte Betrachter solcher Diagramme dienen. Benutzte Bezeichner beziehen sich auf Größen, die bei der Erläuterung des Regelkreises eingeführt wurden.

Abb.13: Einfaches Struktogramm des Regelprogramms für die Piezo-Steuerung



Analyse des Strukturprogramms

Das Struktogramm wird klassisch von oben nach unten gelesen. Es besteht hauptsächlich aus drei verschachtelten Schleifen, deren Schleifenköpfe durch die einschließenden Rechtecke dargestellt werden; die Schleifenrumpfe werden durch die eingeschlossenen Rechtecke dargestellt. Im Schleifenkopf steht eine Bedingung, die erfüllt werden muß, damit die Anweisungen im Schleifenrumpf ausgeführt werden.

Am Beginn steht die Initialisierung der Anpassungsfaktoren. Hier werden Größen wie Verstärkungsfaktoren, spezifische Ausdehnung des Piezokristalls in den Raumrichtungen, Rasterfrequenz und Sollgrößentoleranz gespeichert und können vom Experimentierenden von Meßdurchlauf zu Meßdurchlauf variiert werden.

Nun wählt man die gewünschte Rastergröße und nimmt damit direkten Einfluß auf die Ausführung der ersten beiden Schleifen, die keine andere Aufgabe haben, als die Spitzenposition den Rasterpfad entlang zu führen. x_{\max} und y_{\max} beschreiben die Anzahl der Meßpunkte pro Raumrichtung.

Die dritte Schleife übernimmt nun die eigentlich Regelung. Sie wird an jedem Rasterpunkt gestartet und wartet nach Vollendung ihrer Aufgabe eine gewisse Zeit um die Rasterfrequenz einzuhalten.

Das Resultat eines Durchlaufes dieses Programms ist ein zweidimensionales Array, in dem die z-Positionen der Spitze über dem jeweiligen Rasterpunkt gespeichert sind, also so etwas wie eine Höhenkarte.

Rechner und Programm

Es gab zwei Ansätze, PC und Programm im Aufbau zu verwenden, doch beide scheiterten.

Der erste Versuch war die Erweiterung eines Programms, das als Quellcode dem Piezo-Steuerungsgerät beilag. Zwei Probleme traten auf. Das erste war das Fehlen

eines seriellen Schnittstellenkabels mit ausreichender Pin-Belegung, das dann aber später aus Resten zusammengelötet und erfolgreich durchgemessen wurde. Das zweite, weitaus größere Problem, war der Umstand, daß der mitgelieferte Quellcode nicht kompilierte, auch nicht in der Urform. Der Fehler lag aber zu tief vergraben, als daß wir ihn hätten finden können.

Der zweite Ansatz bestand darin, aus zwei fertigen Programmen und einer LabView .vi das Beste herauszuholen, doch das Steuergeräte weigerte sich schlicht, überhaupt auch nur auf eines der Programme zu reagieren.

An das Problem, daß die Verkabelung, die dem Steuergerät beilag, nur den Anschluß von zwei anstatt der benötigten drei Piezo-Kanäle erlaubte, kamen wir also gar nicht.

DURCHFÜHRUNG

Übersicht über die Versuchstage

06.06.01:

Der Aufbau um den Piezokristall, der durch den vorigen Versuch bereits rudimentär verkabelt war, wird an die Anforderungen des STM angepaßt. Viele Fragen sind noch offen und das PL wird nach seinen Möglichkeiten untersucht, des öfteren mit ernüchternden Ergebnissen.

13.06.01:

Die Idee von einer Messung mit einer geätzten Spitze wird endgültig verworfen und statt dessen ein feiner Golddraht eingesetzt. Bei Umbauarbeiten am Piezokristall bricht dieser ab und wir müssen mit dieser kürzeren Version Vorlieb nehmen.

20.06.01:

Es wird begonnen, den Grobaufbau, d.h. Gestell und Schwingungsentkopplung, aufzubauen. Der neue Entwurf der Grobansteuerung mit Blattfeder und zwei Mikrometerschrauben wird erdacht und dessen Umsetzung begonnen. Erste Möglichkeiten für eine Verstärkung des Tunnelstroms werden untersucht. Die Verwendung von Operationsverstärkern führt aber nicht zu den gewünschten Ergebnissen.

27.06.01:

Die geplanten Federn in der Konstruktion der Schwingungsentkopplung werden durch Fahrradgepäckträgerbänder ersetzt. Weitere Versuche mit Operationsverstärkern werden durchgeführt, aber es wird immer noch kein befriedigendes Ergebnis erreicht.

04.07.01:

Die Grobansteuerung wird fertiggestellt und funktioniert hervorragend. Die Acrylglasumhüllung des Meßbereichs wird durch einen Faraday'schen Käfig ergänzt. Wir sehen von einer Benutzung von Operationsverstärkern endgültig ab und widmen uns den Nanoampere- und Lock-In-Verstärkern. Der Lock-In-Verstärker scheint die beste Wahl zu sein, auch wenn wir die an Spitze und Probe angelegte Spannung nun mit einer Schwingung überlagern müssen, da der Lock-In-Verstärker ein phasensensibler Verstärker ist.

11.07.01:

Die Endmontage aller Einzelteile findet statt. Der Versuch, den Rechner in den Aufbau mit einzubeziehen scheitert bereits bei der Ansteuerung der Piezosteuerung. Es wird der Versuch unternommen, eine erste Messung durchzuführen, selbige scheitert aber bereits daran, daß wir nicht in der Lage sind, einen Tunnelstrom zu messen. Zu fortgeschrittener Stunde beschließen wir, die Waffen vor dem STM zu strecken.

Die Grobeinstellung

Die Position des Piezos und damit die der Golddrahtspitze waren, sofern keine Spannung am Kristall anlag, fest.

Der mechanisch beweglichste Körper, der für die Grobeinstellung wichtig ist, ist die Blattfeder, die mit der oberen Mikrometerschraube direkt durch Druck gebogen werden konnte, was die gröbere Einstellungsmöglichkeit der Grobeinstellung ausmachte. Die feinere Variante wurde mit der unteren Mikrometerschraube erzielt, die ebenfalls durch Druck den frei beweglichen Teil des Metallstreifens bewegen konnte und damit auch Spannung auf die Blattfeder gab, jedoch in feineren Schritten. Damit konnte die Probe, die auf dem höchsten Punkt der Blattfeder, direkt neben der Verschraubung am Gehäuse, fixiert war, sehr nahe (eben so nahe, wie es das Reaktionsvermögen zuließ) an die Spitze gebracht werden.

Spitze und Probe waren beide leitend und mit einem Multimeter verbunden. Nachdem der Piezo unter Spannung gesetzt wurde, konnte, wenn Spitze und Probe sich berührten, über das Multimeter ein Kontaktstrom gemessen werden, da sich ein Stromkreis geschlossen hatte. Mit der Grobeinstellung wurde die Probe dann gerade so eingestellt, daß dieser eben gerade nicht mehr meßbar war.

Die Schwingungsentkopplung

Da zur Schwingungsentkopplung nicht viel zur Durchführung gesagt werden kann, was nicht auch in den Aufbau gehören würde (die Schwingungsentkopplung arbeitet nämlich allein und muß nicht bedient werden, d.h. also, daß die Durchführung sich auf den Zusammenbau, also den Aufbau der Schwingungsentkopplung bezieht) wird hier die obige Skizze erklärend erläutert.

Aus Aluminiumwinkeln, die vom Bau des Wotan-II-Netzes übriggeblieben waren, wurde ein von der Grundfläche etwa quadratisches und ca. 1 Meter hohes Gerüst gebaut, wobei alle Bauteile erst per Hand zurecht gesägt werden mußten. Um das Gerüst, in das genau eine Gehwegplatte paßte, stabil zu halten, wurden möglichst viele Winkel verwendet. Leider reichten die Winkel nicht aus und so mußten zwei gegenüberliegende Seiten des Kastens zueinander um 90° verdreht mit den übrigen Alublechstreifen von etwas 10cm Breite verschraubt werden. Dies waren zugleich die schwächsten Stellen des Gestells, obwohl die 90°-Verdrilling durchaus einen Teil der Stabilität erhielt. Glücklicherweise waren die Winkel, sowie auch die Streifen, schon gelocht, so daß weder das Verschrauben, noch das Einhängen der Gummiseile (mehr dazu gleich) besonders schwierig war.

Die eben erwähnten Gummiseile (eigentlich zum Sichern des Fahrradgepäckes gedacht) wurden an Stelle der zuerst erwogenen Spiralfedern, wegen der eingeschränkten Belastungsfähigkeit jener Federn, verwendet. Sie dienten zur schwingenden Lagerung einer schweren Plattform. Zuerst wurde hierbei an einen quadratischen Pflasterstein gedacht, da diese von Größe und Form perfekt in die selbstgebaute Halterung paßte. Jedoch erwies sich dieser für die, in ihrer Dehnfähigkeit leider unterschiedlichen, Gummiseile als zu schwer und somit wurde sich für eine sehr viel leichtere, zurechtgesägte Preßspanplatte entschieden. Diese war jedoch etwas zu leicht, um eine möglichst niedrige Schwingungsfrequenz der Seile (bei ca. 1Hz) zu ermöglichen. So wurde sie mit einer flachen Bleiplatte beschwert und zusammen mit dem übrigen Gewicht des restlichen Aufbaus ergab das ziemlich genau die gewünschte Frequenz. (Obwohl die Platte nun sehr nah am Boden hing, war dies doch die mit unseren Mitteln bestmögliche Konstruktion.)

Der restliche Aufbau bestand aus der Grobeinstellung, die in einen relativ schweren unten offenen Plexiglaskasten mit etwa 1cm Wandstärke und einem Loch zur Kabeldurchführung (der glücklicher Weise schon vorhanden war), eingeschraubt war. Dieser hatte einen integrierten (eingeklemmten) Faraday'schen Käfig (Maschendrahtkasten), der die Grobeinstellung ebenfalls umschloß und unten offen war. Diese Konstruktion wurde einfach auf die Preßspanplatte gestellt, wobei noch zu bemerken ist, daß der Plexiglaskasten lediglich der Abschirmung jeglicher Luftbewegungen diente, da diese den nicht besonders schwingungsarmen goldenen Haardraht (der deswegen natürlich auch besonders kurz gehalten werden mußte) leicht negativ hätten beeinflussen können und der Faraday'sche Käfig den Schutz vor elektromagnetischer Strahlung gewährleistete.

Es bleibt zu vermerken, daß die Schwingungsentkopplung als Hochfrequenzfilter trotzdem möglichst ruhig zu halten ist, schon allein wegen des nicht allzu stabilen Aufbaus.

Die Feinansteuerung

Zu Beginn mußten Drähte an die Kontaktstellen des Röhren-Piezo gelötet werden: Dabei ist Lötwasser zu benutzen, und es darf nur mit maximal 250°C gelötet werden, da sonst die Polarisierung des Piezo verloren gehen kann. Auch sonst ist der Piezo mit äußerster Vorsicht zu behandeln, da er sehr spröde ist und zum Brechen neigt. Die Lötstellen sind mit äußerster Sorgfalt zu setzen, denn falls sich zwei nebeneinander liegende Leiterschichten berühren, wird der Piezo für den Versuch unbrauchbar und muß erneut gelötet werden.

Das Befestigen des Piezos stellte uns vor neue Probleme, da er nur sehr gering deformiert, kann er nur auf sehr wenige Arten befestigt werden. Viele Halterungen absorbieren die Ausdehnungen, deswegen entschlossen wir uns, auf Hupoxid-Harz zurück zu greifen der gleichzeitig noch den Vorteil hat zu isolieren, um in an einem Winkel zu befestigen.

Das gleiche Problem hatten wir auch bei der Spitze, welche zusätzlich noch leitend sein mußte.

Diesen Winkel samt Piezo mußten wir nur noch an der Grobansteuerung befestigen.

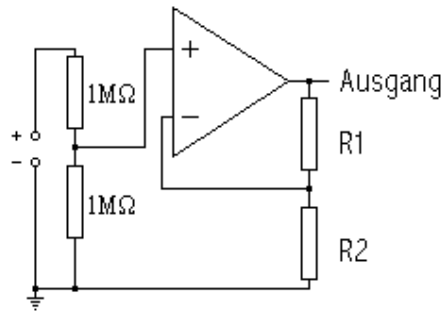
Achtung Hupoxid-Harz braucht sehr lange zum Trocknen (Minimum 30 min).

Es war unserem Versuch nicht sonderlich dienlich, als wir gegen 1 Uhr feststellen mußten, daß unser Piezo nicht sauber genau gelötet war, was eine Ansteuerung unmögliche machte.

Die Verstärkerschaltung

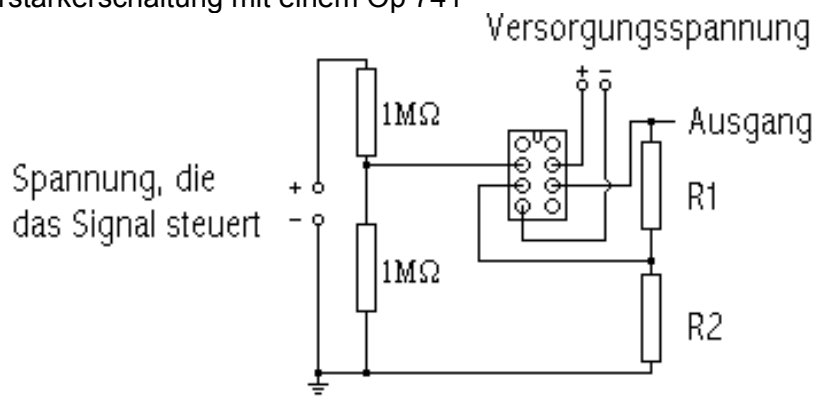
Das einzige, was wir von Anfang an wußten, war die Tatsache, daß wir einen Strom verstärken müssen, der nur wenige Nanoampere groß ist. Dazu gab es unterschiedliche Möglichkeiten, wie sich in Laufe der Zeit herauskristallisierte. Am Anfang hatten wir nur die Idee eines Verstärkers mit Operationschip. Wir suchten uns einen Standard Operationsverstärker, den Op741. Da wir bereits etwas Erfahrung mit Chips hatten, aufgrund unseres Experimentes mit logischen Schaltungen, wußten wir auch, wo wir für die entsprechenden Anschlüsse nachsehen mußten. Über ein paar kleine Ungereimtheiten bezüglich der Bezeichnungen für den Chip half uns eine Assistentin drüber weg. Nachdem wir uns mit den Anschlüssen des Chips einigermaßen vertraut gemacht hatten, wollten wir den Verstärker so anschließen, wie es uns logisch erschien. Das Signal kommt in den Nichtinvertierenden Eingang und der zweite Eingang wird einfach geerdet. Glücklicherweise war ein Elektronik-Tutor zur Stelle, der uns einen Schnellkurs in Sachen Verstärker gab. Dabei erfuhren wir auch, daß es an der Innenseite der linken Schranktür vom Schrank 01X einen Schaltplan für die entsprechenden Verstärkerarten inklusive Rückkopplung und Verstärkerfaktor gab. Gleichzeitig erfuhren wir etwas über die Möglichkeit der Erzeugung eines sehr geringen Stromes mit einem Spannungsteiler. Nun hatten wir alle Informationen und bauten die folgende Schaltung zusammen. Es ist eine nichtinvertierende Verstärkerschaltung mit Rückkopplung. Da der Verstärker theoretisch ins Unendliche verstärken kann, wird er nur von der Versorgungsspannung begrenzt. Die Rückkopplung sorgt dafür, daß sich der Verstärker bei einem bestimmten Wert einpegelt. Dieses Schwingen der Differenz der beiden Eingänge des Verstärkers von Null auf den Wert des Signals ist so hochfrequentiert, daß am Ausgang ein klares sauberes Signal anliegt.

Abb.14: Nichtinvertierende Verstärkerschaltung mit Rückkopplung



Bevor wir jedoch den Verstärkerchip nutzten, wollten wir die Art des Verstärkens erst mit einem Verstärkermodule testen. Aufgrund einiger Ungereimtheiten bezüglich des Verstärkens hatten wir das Gefühl, daß das Gerät nicht so funktioniert, wie wir uns es vorstellten. Zusätzlich wurde uns in diesem Moment des Testens eine neue Möglichkeit eröffnet. Sie bestand darin, den Strom mit einem Nanoamperemeter direkt zu messen. Dies erschien uns viel einfacher, zumal das Meßgerät zusätzlich noch ein Ausgang für den XY-Schreiber beinhaltet. Für uns bedeutete der Ausgang insofern etwas, daß wir wußten, daß der XY-Schreiber mit einer Spannung von 0 bis 10V versorgt wird. Daraus schlußfolgerten wir, daß das Nanoamperemeter ein idealer Verstärker und relativ einfach in unserer Schaltung integrierbar ist. Das Meßgerät wurde nun an den Spannungsteiler angeschlossen. Es funktionierte alles prima, solange man nur die normale Anzeige des Meßgerätes betrachtet. Wir wollten aber nun wissen, ob das Meßgerät auch mit der Geschwindigkeit unseres Aufbaues mithalten kann. Dazu wechselten wir die Gleichspannung gegen einen Frequenzgenerator aus und schlossen ihn über den Spannungsteiler an ein Oszilloskop an. An dem zweiten Eingang kam der Ausgang des Meßgerätes. Bei dieser Überprüfung stellten wir fest, daß das Meßgerät ein sauberes Signal herausgibt, als es hinein bekommt, jedoch nicht sauber genug, besser gesagt präzise genug, für unsere Messung war. Somit gingen wir wieder zurück zu unserem Chip. Auch das Verstärkermodule wurde nicht weiter betrachtet, wir wollten einfach nur eine Verstärkung mit dem Chip erreichen.

Abb.15: Verstärkerschaltung mit einem Op 741



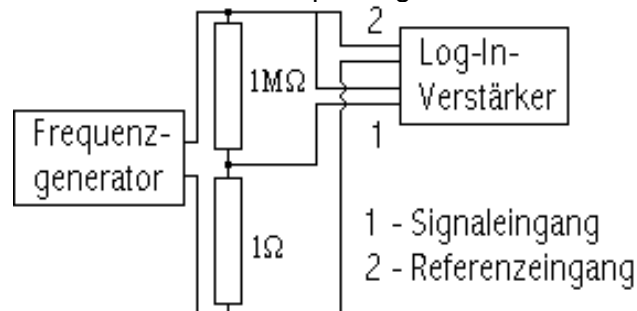
Es sollte sich herausstellen, daß eine Verstärkung mit einem Chip nicht so einfach ist, wie man sich dieses vorstellt. Einige Tutorien und ein Experimentaltermin wurden dabei „verbraucht“, um nur eine einfache Verstärkung mit einem Chip zu erhalten. Die Schaltung wurde mehrmals aufgebaut, mehrmals nach der Schaltung an der Tür, einmal nach einer Schaltung aus einem Protokoll, die eigentlich genau die gleiche war, und zuletzt nach einem Bastelbuch für Elektronikfans. Wir probierte alle möglichen Kombinationen der Verhältnisse der Widerstände, um eine anständige Verstärkung zu erreichen. Das Verhältnis der beiden Widerstände gibt den Verstärkungsfaktor an. Selbst der genaue Nachbau einer Schaltung mit Widerständen erbrachte nicht die Verstärkung, die dazu angegeben wurde. Möglicherweise hatten wir einen ganz fatalen Fehler in unserer Schaltung, wir wissen aber nicht, welcher es war. Jedenfalls wurde

stark darauf geachtet, daß kein Wackelkontakt bestand.

Nun, nach einigen Terminen des Probierens, wurde uns die Idee des Lock-In-Verstärkers angetragen. Nach einer Einführung eines anderen Tutors wußten wir ungefähr, was dieser macht und wie er funktioniert, siehe Beschreibung im Aufbau.

Da der Lock-In-Verstärker nur mit Wechselstrom arbeitet, mußten wir uns eine Idee einfallen lassen, wie wir das mit unserem Aufbau realisieren, zumal wir ursprünglich nur Gleichstrom nutzen wollten. Zufälligerweise wurde die Idee gleich mit der Funktionsweise mitgeliefert. Wir modulierten auf unseren Gleichstrom einen Wechselstrom. Zum Testen des Lock-In-Verstärkers wurde wieder der Frequenzgenerator genutzt. Die zugehörige Schaltung ist in **Abb.16** zu erkennen.

Abb.16: schematischer Aufbau einer Überprüfung des Lock-In-Verstärkers



Als Frequenz wurde 100 kHz, als Amplitude 1V und als Offset auch 1V auf den Spannungsteiler gegeben. Den Offset verwendeten wir, damit wir überhaupt einen Tunnelstrom messen können. Ohne Offset würde der Tunnelstrom in beiden Richtungen, von der Spitze zur Probe und von der Probe zur Spitze, gleich groß sein. Der resultierende Tunnelstrom wäre so Null.

Nach ein paar kleineren Schwierigkeiten, besser gesagt Ungereimtheiten, schafften wir es einen Strom im Nanobereich sichtbar zu verstärken. Ungereimtheiten waren spontane Ausschläge der Anzeige in beiden Richtungen ohne sichtbare äußere Effekte.

Aufgrund der Komplexität der Regelschaltung entschieden wir uns, nur noch einen verstärkten Strom qualitativ nachzuweisen.

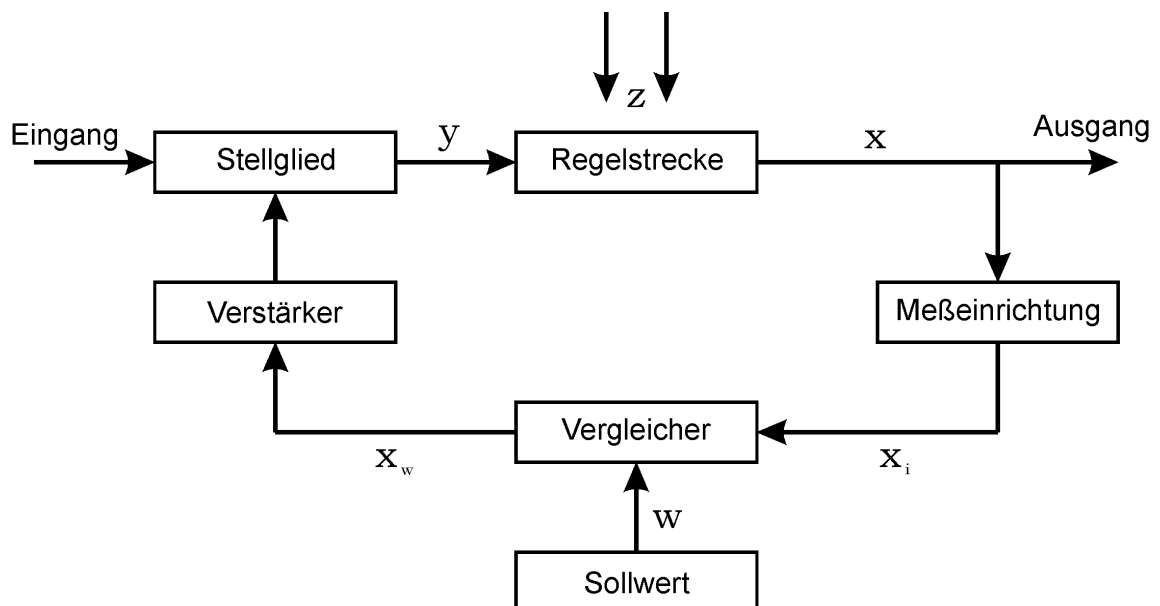
An diesem Punkt unseres Experimentes hätten wir durchaus wieder mit dem Nanoamperemeter arbeiten können.

Letzten Endes bauten wir die Schaltung so auf, wie sie im Aufbau bereits gezeigt wurde.

Der Regelkreis im STM

Da unser STM im Arbeitsmodus 1 (konstanter Tunnelstrom) arbeiten soll, benötigen wir ein System, daß den Abstand zwischen Spitze und Probe während des Rasterns konstant hält. Das ist insofern problematisch, da eine Nachregelung der z-Komponente der Spitzenposition ja wieder einen Einfluß auf den Tunnelstrom hat. Die Regelelektronik für die Spitzenhöhe und die Meßapparatur für den Tunnelstrom müssen also miteinander gekoppelt werden. Diese Rückkopplung nennt man "Regelkreis".

Abb.17: Schematischer Regelkreis



Die zu regelnde Größe ist hier x , in unserem Fall also der Tunnelstrom, der eng mit der Spitzenhöhe verknüpft ist, und liegt am Ausgang des Regelkreises an. Die Meßeinrichtung mißt den tatsächlichen Wert x_i der Regelgröße, also den Tunnelstrom. Dieser Wert x_i wird nun mit dem Sollwert w verglichen. Die Differenz von x_i und w wird mit x_w (Regelabweichung) bezeichnet. Die Regelabweichung beeinflusst über den Regelverstärker die Stellgröße y , also die Spitzenhöhe, und damit die Variation der Regelgröße. Die Störgröße z verursacht eine unbeabsichtigte Regelabweichung, z.B. eine atomare Stufe auf der Probenoberfläche, oder allgemein deren Struktur.

Man unterscheidet mehrere Formen der Regelung und die Kombinationen aus ihnen:

Proportionale Regelung

Die Stärke der Regelung ist proportional zur Differenz von Soll- und Istwert. Diese Form der Regelung ist sehr schnell, erreicht den angestrebten Istwert aber nie vollständig.

Integrierende Regelung

Der Regelwert des integrierenden Reglers ist proportional zur "Fläche" unter der zu regelnden Größe. Die Regelung erfolgt sehr langsam, der Istwert wird aber auch unter dem Einfluß der Störgröße erreicht.

Differentielle Regelung

Der differentielle Regler stellt die Regelgröße proportional zur Ableitung des Istwertes ein, wodurch sich ein sehr kurzer Regelimpuls ergibt. Die Anwendung eines solchen Reglers macht nur in Verbindung mit mindestens einem anderen Regler Sinn.

Wir planen für unseren Aufbau den Einsatz einer integrierenden Regelung, da wir bei den relativ niedrigen Rastergeschwindigkeiten keine Probleme mit der Langsamkeit der Regelung zu fürchten hatten und das Nachregelverhalten am besten zur exponentiellen Entfernung/Tunnelstrom-Beziehung paßt. Die integrative Steuerung verwandelt diese sozusagen in einen linearen Zusammenhang.

AUSWERTUNG

Natürlich existiert keine vernünftige Auswertung, da weder der Aufbau ganz vollendet wurde, noch wenigstens eine Messung stattfand. Dennoch seien hier einige optische Eindrücke vermittelt, was mit einem Rastertunnelmikroskop alles an Auflösung zu erreichen ist. Es gilt sich also nunmehr an der Schönheit kleiner Dinge (wie die Erfolge im PL ☺) zu laben.

Abb.18a: [1]

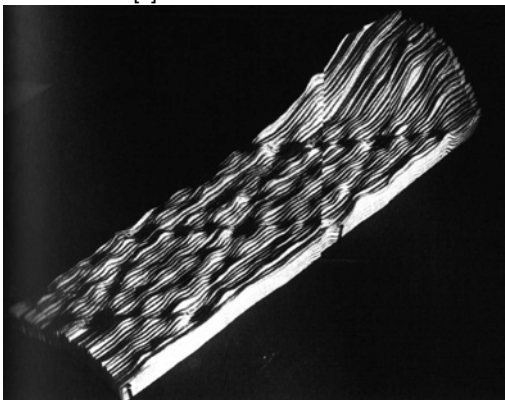


Abb.18b: [1]

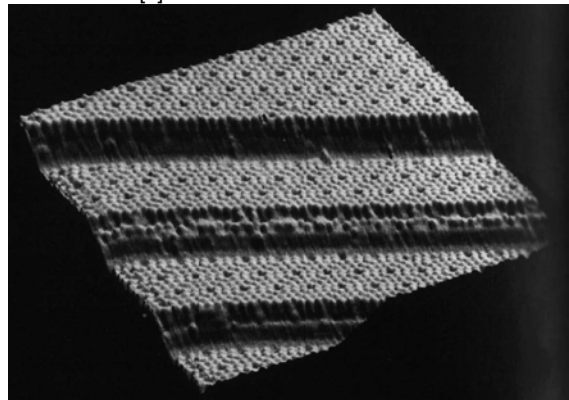


Abb.18c: [1]

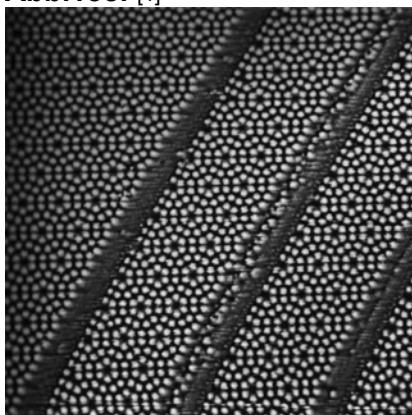


Abb.18d: [1]

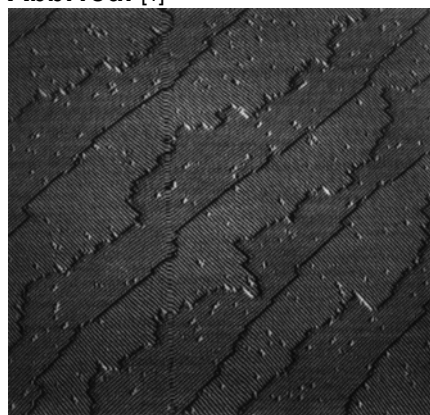
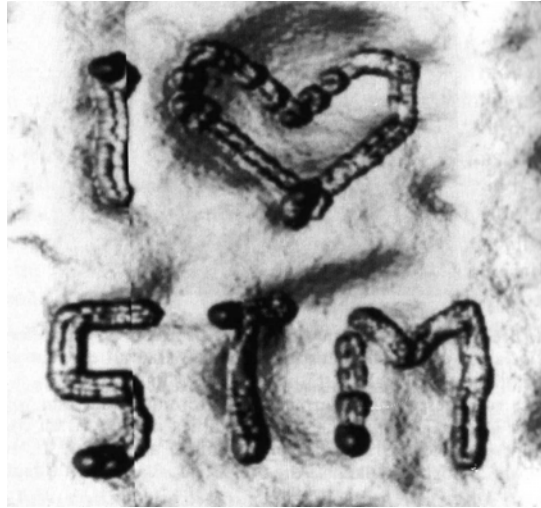


Abb.18e: [1]



Da Siliciooberflächen, wegen ihrer schönen Struktur, sehr beliebte Objekte zur Abrasterung sind, kommt es, daß auch hier die meisten Bilder (**Abb. 18a** bis **Abb. 18.d**) eben diese zeigen. Dabei ist **Abb. 18a** eines der ersten STM-Bildern, von Binnig und Rohrer selbst aufgenommen; **Abb. 18b** und **18c** zeigen jeweils die selbe Oberfläche aus verschiedenen Blickwinkeln.

RESÜMEE

Heinrich

Selbst wenn das Experiment nicht zu einem meßbaren Ergebnis führte, war es doch sehr lehrreich, eine so komplexen Versuch in Angriff zu nehmen.

Fabian

Trotz ergebnisleerer Hände und einigen Motivationstiefs, die wirklich an den Nerven gezerzt haben, möchte ich diesen tiefen Einblick in die anwendungsorientierte Physik nicht missen. Ich denke, nun ein recht fundiertes Wissen über eine interessante und etablierte Technologie erlangt zu haben.

Ich bin nicht wirklich enttäuscht. Ich denke, daß wir viel unserer Ziele erreicht haben und auf einige interessante Abende/Nächte zurückblicken können.

René

Für die Verstärkung eines geringes Stromes gibt es unterschiedliche Varianten von Schaltungen.

Es sollte darauf geachtet werden, welche man für welches Experiment benutzt.

Ob unsere Verstärkerschaltung am Ende funktioniert hätte, müßte noch überprüft werden, zumindest sah die Idee vielversprechend aus.

Ramin

Ich würde sagen: alles in allem ein sehr schöner Versuch, der auch eine anspruchsvolle, aber nicht unverständliche Theorie benötigt.

Leider stellte sich der hitzeanfällige Piezokristall schon bevor wir überhaupt mit den Versuchen zum STM anfangen konnten als Problemfaktor dar. So waren wir z.B. nicht in der Lage ihn vernünftig zu befestigen und anzusteuern. Nachdem am ersten Versuchstag nur der Piezo geklebt und gelötet wurde (zwei sehr undankbare Aufgaben), war wahrscheinlich schon die Luft raus, statt sich mit dem (völlig unfertigen) STM zu befassen, waren die meisten mit Nebenversuchen beschäftigt.

So geschah es dann letztendlich, daß wir zwei bis drei Wochen hinter dem ursprünglichen Zeitplan herhinkten und schließlich kleine Probleme (wie die

Funkenüberschläge zweier Lötstellen am Piezo) das ganze Projekt unmöglich machten.

ich weiß nicht, ob es funktioniert hätte, wenn wir im Zeitplan gewesen wären, hätte es aber gerne herausgefunden. Leider war schon lange vorher die Motivation unserer Gruppe so weit gesunken, daß keiner mehr so recht an ein Gelingen glauben konnte.

Diana

Der Aufbau der Mechanik, vor allem die Schwingungsentkopplung, war schweißtreibende körperliche Arbeit.

Die letztendliche Kapitulation und das Scheitern der Aufnahmen war um so frustrierender und hinterließ ein Gefühl die Arbeit umsonst investiert zu haben.

Dies hätte vielleicht verhindert werden können, wäre auf die Nebenversuche verzichtet und dafür gleich mit einer vernünftigen Planung (auch Zeitplanung) an das Semesterprojekt STM gegangen worden.

Zum Schluß bleibt mir nur noch zu sagen, daß es mir verständlich ist (bin ich doch involviert), daß am letzten Versuchstag des letzten PL-Semesters um zwei Uhr morgens keine herausragende Motivation mehr bestand diesen Piezo zum mittlerweile vierten Mal zu löten, alles wieder zusammen zu bauen, die Ansteuerung per PC noch zum Laufen zu bringen und noch einiges mehr. So ist es wohl nicht weiter verwunderlich, wenngleich auch besonders schade, daß noch nicht einmal der Tunnelstrom gemessen werden konnte.

TIPS:

Ramin

Da ich nicht weiß, welche anderen experimentellen Hürden noch hätten gemeistert werden müssen, kann ich kaum Tips für andere PL-Gruppen geben; ich kann nur sagen, daß man mindestens sechs Termine einplanen sollte, daß man keine Nebenversuche machen sollte, solange es noch etwas zu tun gibt und, daß es - meines Wissens - durchaus möglich sein sollte im PL ein STM zu bauen - vorausgesetzt man kümmert sich um zusätzliches Equipment.

Diana

Diesmal habe ich nur einen Tip auf Lager.

Vielleicht ist er nicht besonders inspirierend oder mag sein daß ich mich wiederhole, aber:

bevor ein größeres Projekt angestrebt wird, sollte doch im Vorhinein sicher gestellt werden, daß die benötigten Gerätschaften und Rohmaterialien im PL vorhanden oder wenigstens (anderweitig) beschafft werden können; denn leider scheint das Bestreben der meisten Studis im PL herauszufinden, was schon vorhanden ist nicht besonders ausgeprägt zu sein.

LITERATURVERZEICHNIS

- 1.: Roland Wiesendanger: Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy; Cambridge University Press 1994
- 2.: Wolfgang Nolting: Grundkurs Theoretische Physik, Band 5.1; 4. Auflage Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden, 2000
- 3.: Cornelia Sing: Rastertunnel- und Kraftmikroskopie (altes Protokoll)