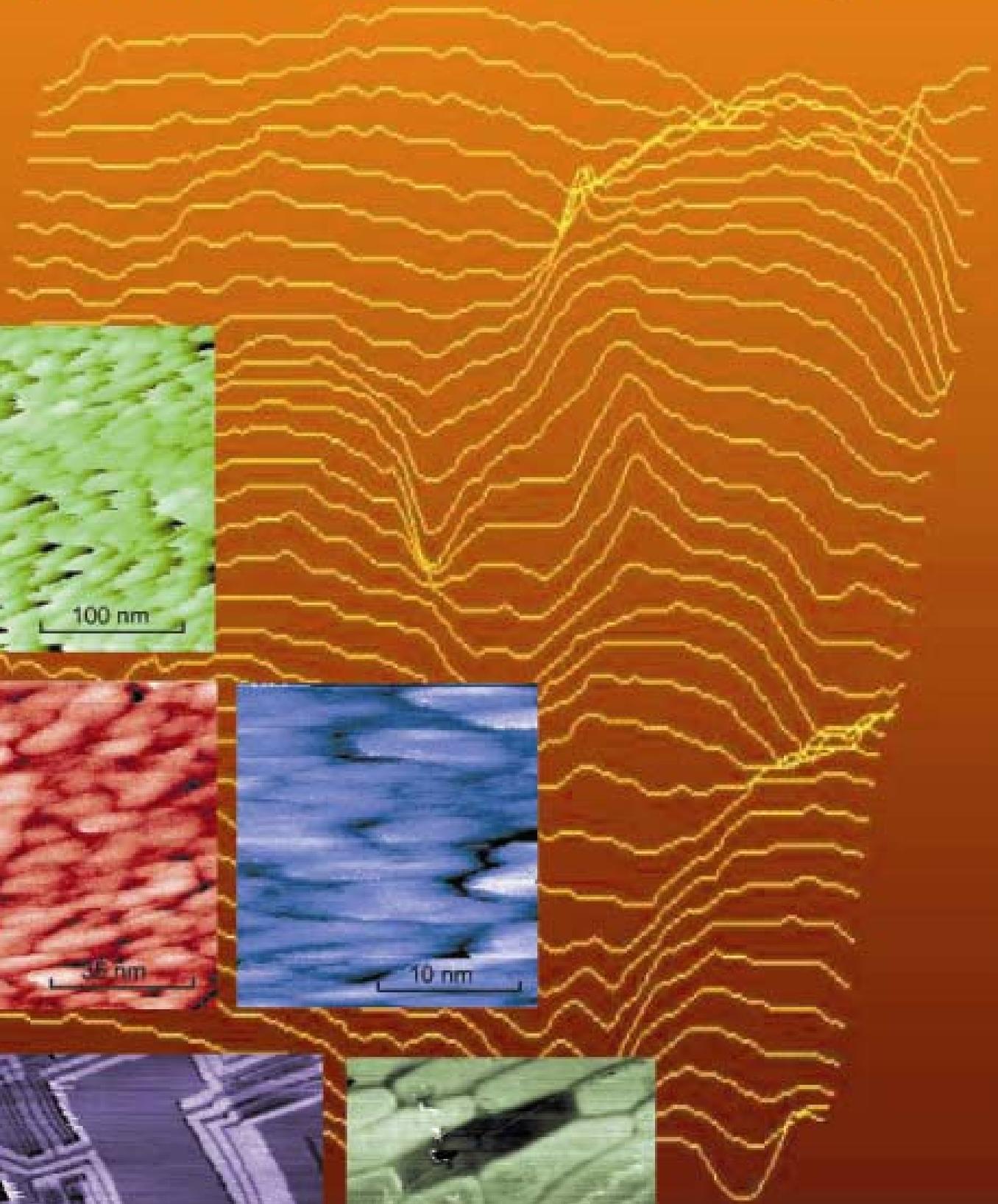
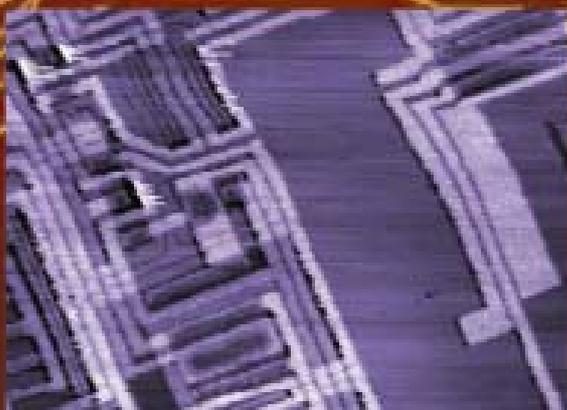
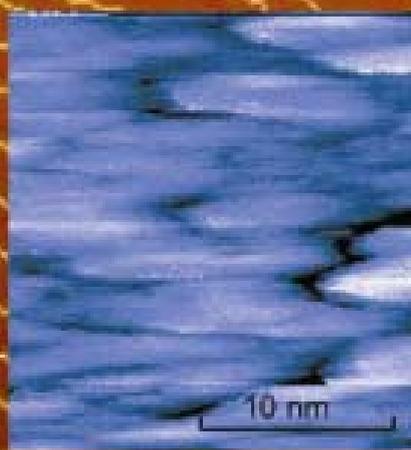
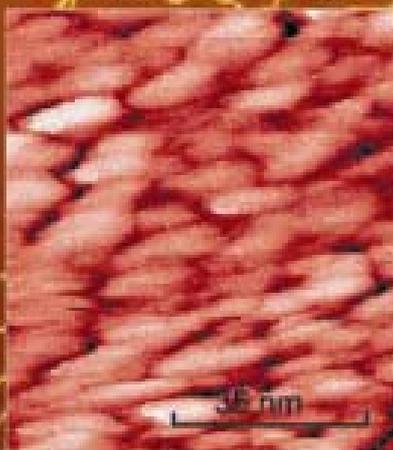
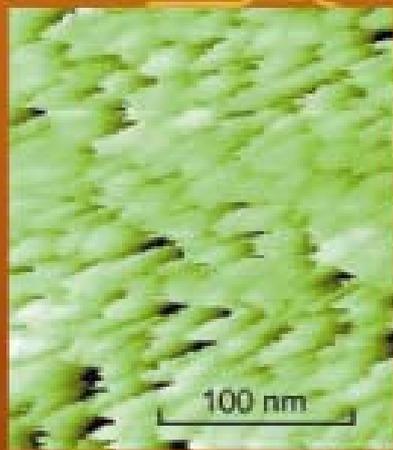


# Rastersonden-Mikroskope

## Grundlagen, Anwendung und Selbstbau

### Teil 2, Tunnel- und Kraftmikroskope



<b>1. DAS TUNNELMIKROSKOP, STM (SCANNING TUNNEL MICROSCOPE).....</b>	<b>4</b>
1.1. GRUNDLAGEN .....	4
1.1.1 <i>Der Tunnelstrom</i> .....	4
1.1.2 <i>Konstantstrom Modus</i> .....	5
1.1.2 <i>Konstanter Abstand Modus</i> .....	7
1.2. SPITZEN FÜR DIE TUNNELMIKROSKOPIE .....	8
1.2.1. <i>Geschnittene Spitzen</i> .....	8
1.2.2 <i>Geschliffene Spitzen</i> .....	9
1.2.3. <i>Geätzte Spitzen</i> .....	10
1.3. PIEZOSCANNER.....	12
1.3.1 <i>Der Piezoeffekt</i> .....	12
1.3.2. <i>Tripod-Scanner</i> .....	14
1.3.3. <i>Röhrchen-Scanner</i> .....	15
1.3.4. <i>Bimorph-Scanner</i> .....	17
1.3.5. <i>TripodScanner mit Bimorph-Antrieb</i> .....	18
1.4. SCANNERTREIBER.....	19
1.4.1. <i>Hochspannungstreiber</i> .....	19
1.4.2. <i>Niedervolt-Treiber</i> .....	23
1.5. GROBANNÄHERUNG .....	24
1.5.1. <i>Elektrische Laus</i> .....	24
1.5.2. <i>Elektromagnetischer Stepper</i> .....	26
1.5.3. <i>Hebeluntersetzung</i> .....	28
1.5.4. <i>Feinverstellung durch Massenträgheit</i> .....	30
1.6. REGELVERSTÄRKER.....	34
1.7. SCHWINGUNGSDÄMPFUNG .....	35
1.8. HOCHSPANNUNGSMIKROSKOP .....	37
1.8.1. <i>Scankopf</i> .....	38
1.8.2. <i>Hauptplatine</i> .....	39
1.8.3. <i>Betriebsprogramm</i> .....	42
1.8.4 <i>Betrieb des STMs</i> .....	45
1.8.5. <i>Bildverarbeitung</i> .....	47
1.8.6. <i>Bilder von Metallfilmen</i> .....	49
1.8.7. <i>Bilder von Halbleiteroberflächen</i> .....	50
1.8.8. <i>HOPG-Grafit</i> .....	51
1.8.9. <i>Poröses Aluminiumoxid</i> .....	55
1.8.10. <i>Kolloidale Metalle</i> .....	56
1.9. TUNNELMIKROSKOP MIT BEEPER-SCANNER .....	56
1.9. 1. <i>Elektronik</i> .....	58
1.9.2. <i>Betriebsprogramm</i> .....	59
1.9.3. <i>Betrieb</i> .....	61
1.9.4. <i>Logarithmischer Verstärker</i> .....	62
1.9.5. <i>Bilder von Metalloberflächen</i> .....	63
1.9.6. <i>Liniendarstellung der Messwerte</i> .....	66
1.9.7. <i>Bilder eines Halbleiterspeichers</i> .....	68
<b>2. AFM, ATOMIC FORCE MICROSCOPE .....</b>	<b>71</b>
2.1. GRUNDLAGEN .....	71
2.2. SPITZEN FÜR DAS AFM .....	72
2.3. MESSUNG DER KRAFT .....	73
2.4. KRAFTMIKROSKOP AUS EINEM CD-LESEKOPF .....	73
2.4.1. <i>Elektronik für den CD-Lesekopf</i> .....	75
2.4.2. <i>Abbildung von Oberflächen</i> .....	75
2.4.3. <i>Abbildung einer integrierten Schaltung</i> .....	76
2.4.4. <i>Abbildung von Pflanzenzellen</i> .....	78

2.4.5. <i>Abbildung von roten Blutkörperchen</i> .....	78
2.5. KRAFTMIKROSKOP MIT UHRENQUARZSENSOR .....	79
2.5.1. <i>Elektronik des Uhrenquarzsensors</i> .....	79
2.5.2. <i>Test des Uhrenquarzsensors</i> .....	80
2.5.3. <i>Herstellung einer Diamantspitze</i> .....	86
2.5.4. <i>Abbildung eines optischen Gitters</i> .....	87
2.5.5. <i>Abbildung einer Schallplatte</i> .....	88
2.5.6. <i>Abbildung eines Ram-Speichers</i> .....	89
2.5.7. <i>Abbildung von dünnen Metallschichten</i> .....	89
2.5.8. <i>Verbesserte Elektronik zum Betrieb der Quarze</i> .....	90
<b>3. MAGNETISCHES KRAFT-MIKROSKOP</b> .....	<b>92</b>
3.1. DER GMR-EFFEKT .....	92
3.2. AUFBAU VON GMR-SENSOREN .....	92
3.3. AUSBAU VON GMR-SENSOREN AUS FESTPLATTEN .....	93
3.4. BESCHALTUNG VON GMR-SENSOREN AUS FESTPLATTEN .....	95
3.5. ABBILDUNG VON OBERFLÄCHEN MIT DEM GMR-SENSOR .....	96
3.5.1. <i>Abbildung von Oberflächen mit der Bittermethode</i> .....	97
3.5.2. <i>Abbildung einer Festplatte mit dem GMR-Sensor</i> .....	98
3.5.3. <i>Abbildung der magnetischen Domänen in einer YIG-Schicht</i> .....	99
3.5.4. <i>Abbildung der magnetischen Domänen in einer Eisenschicht</i> .....	99
<b>4. KAPAZITÄTSMIKROSKOP</b> .....	<b>101</b>
4.1. GRUNDLAGEN .....	101
4.2. AUFBAU EINES KAPAZITÄTSSENSORS .....	101
4.3. ELEKTRONIK DES KAPAZITÄTSSENSORS .....	101
4.4. TEST DES KAPAZITÄTSSENSORS .....	104
4.5. ABBILDUNG MIT DEM KAPAZITÄTSSENSOR .....	105
4.5.1. <i>Abbildung eines Speicherchips</i> .....	106
4.5.2. <i>Abbildung Schallplatte</i> .....	106
4.5.3. <i>Abbildung einer Metallfläche</i> .....	107

## 1. Das Tunnelmikroskop, STM (Scanning tunnel microscope)

### 1.1. Grundlagen

Das Tunnelmikroskop, 1981 von Binnig und Rohrer entwickelt, wurde zum Ausgangspunkt für eine neue Klasse von Mikroskopen welche bislang nicht für möglich gehaltene Eigenschaften bieten. Trotz des vergleichsweise einfachen Aufbaus wurde ein Auflösungsvermögen erreicht, dass die Abbildung einzelner Atome erlaubt. So ist es nicht verwunderlich, dass Binnig und Rohrer schon 1986 für ihre Erfindung den Nobelpreis der Physik erhielten.

Im Gegensatz zu den bekannten Rastermikroskopen wie Lasermikroskop und Rasterelektronenmikroskop wird beim Tunnelmikroskop die Proben nicht mit einem fokussierten Strahlenbündel, sondern mit einer Sonde meist einer feine Drahtspitze abgetastet.

Für die Abbildung der Oberfläche können verschiedene physikalische Wechselwirkungen herangezogen werden.

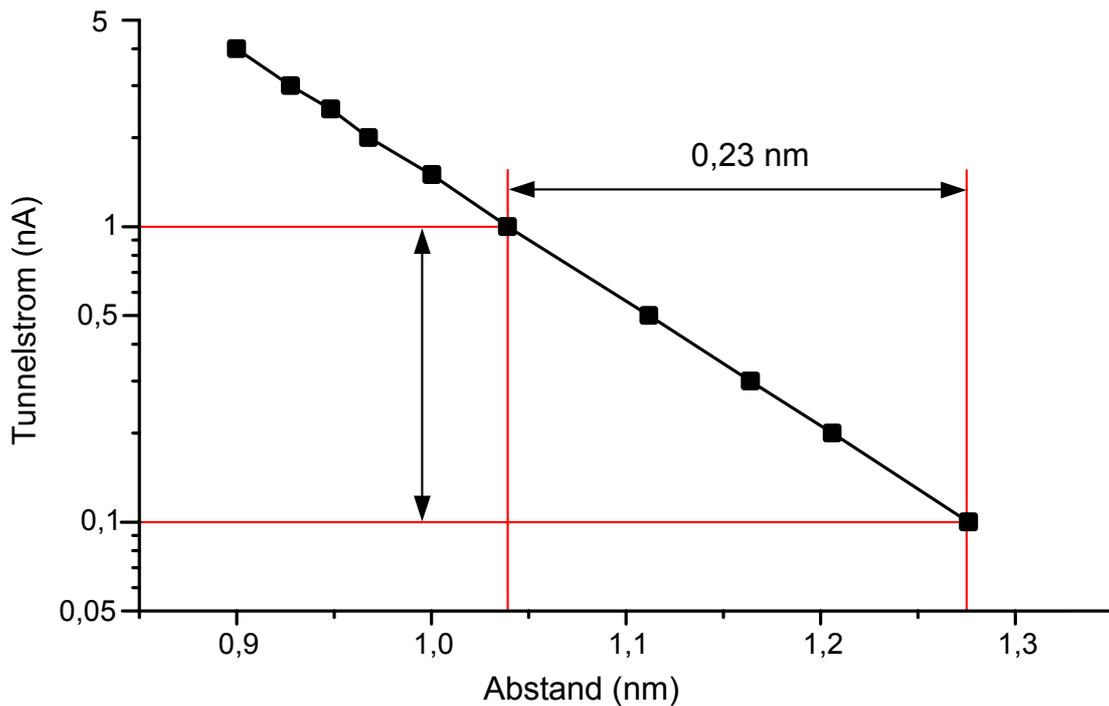
1. der zwischen Sonde und Oberfläche fließende Strom beim Tunnelmikroskop
2. die zwischen Sonde und Oberfläche wirkenden atomaren Kräfte beim Kraftmikroskop
3. magnetische- oder elektrostatische Kräfte beim magnetischen oder elektrostatischen Kraftmikroskop
4. die Kapazität zwischen Sonde und Oberfläche
5. magnetische Feldlinien der Probe beim Hall- und GMR-Mikroskop
6. Potenziale beim Kelvinmikroskop
7. die Wärmeleitung zwischen Sonde und Oberfläche
8. Ionenfluss zwischen einer Hohlspitze und der Oberfläche

Die erste und wohl auch bekannteste Realisierung ist das Tunnelmikroskop. Wie schon der Name sagt, beruht die Arbeitsweise des Tunnelmikroskops auf dem Tunneleffekt. Werden zwei Leiter mit unterschiedlichem Potenzial einander genähert, kann bei einem sehr kleinen Abstand Strom zwischen beiden Leitern fließen, obwohl sie sich noch nicht berühren. Die den Strom verursachenden Elektronen können die Potenzialbarriere zwischen beiden Elektroden durchtunneln. Bildlich gesprochen überlappen sich die Elektronenwolken der äußersten Atome der beiden Leiter, sodass die Elektronen zum anderen Atom übergehen können. Physiker können den Tunneleffekt quantenmechanisch erklären.

#### 1.1.1 Der Tunnelstrom

Um bei üblichen Spannungen einen messbaren Strom zu erhalten, muss der Abstand sehr klein, weniger als ein Nanometern sein.

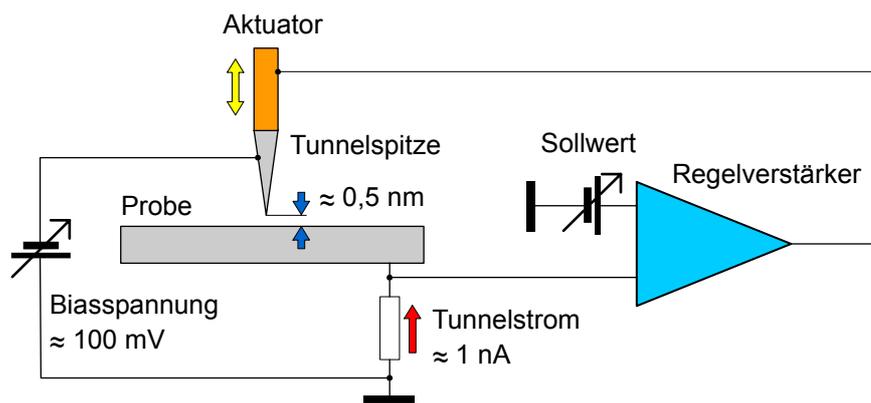
Im konkreten Fall kann man mit einem Strom von einem Nanoampere bei einem Abstand von einem Nanometer rechnen.



**Abb. 1: Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms**

Die Messkurve zeigt die extreme Abhängigkeit des Stromes vom Abstand. Bei einer Abstandsänderung von nur 0,2 Nanometer ändert sich der Strom um eine ganze Größenordnung.

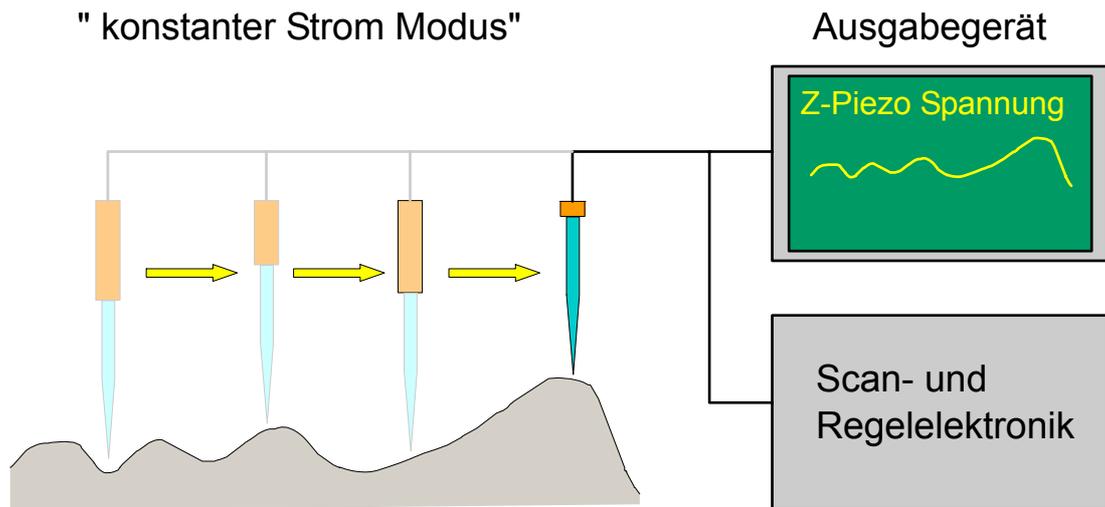
Durch den Tunneleffekt hat man somit ein System, das extrem empfindlich auf kleinste Abstandsänderungen reagiert und dieser Effekt wird für das Tunnelmikroskop genutzt. Durch einen Aktuator wird die Spitze an die Probe angenähert, bis ein Tunnelstrom fließt. Eine Regelschleife sorgt nun dafür, dass der Tunnelstrom und damit der Abstand der Spitze von der Oberfläche konstant bleiben.



**Abb. 2: Aufbau einer geregelten Tunnelstrecke**

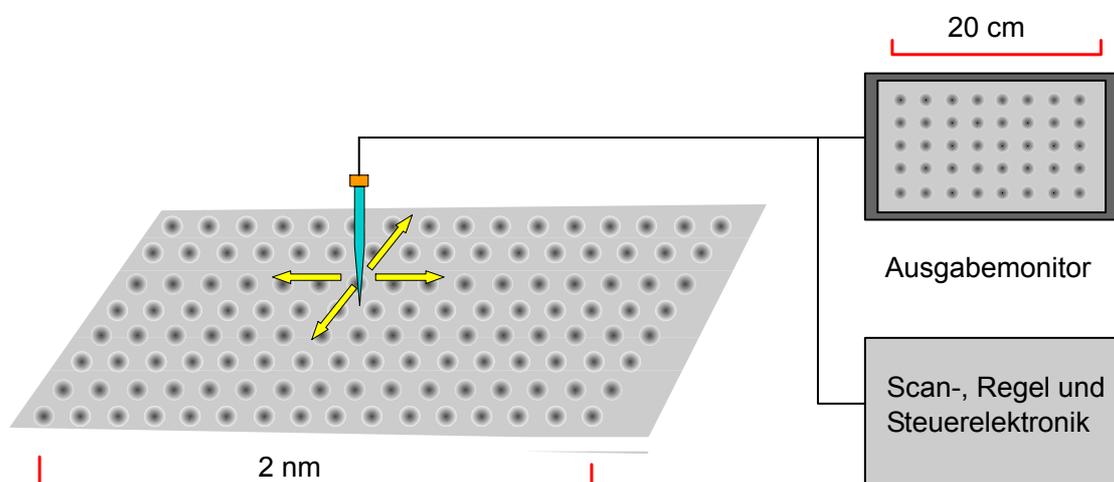
### 1.1.2 Konstantstrom Modus

Um den Tunneleffekt zur Messung zu benutzen, wird die Spitze über die Probenoberfläche gefahren. Bei laufender Regelung folgt dann die Spitze exakt der Oberflächenkontur der Probe und Regelspannung zur Verstellung des Aktuators ist ein Maß für dieses Profil.



**Abb. 3: Abbildung des Oberflächenprofils mit einer Tunnelspitze (konstanter Strom Modus)**

Zur flächenmäßigen Abbildung der Probenoberfläche wird die Tunnelspitze rasterförmig über die Probe gefahren. Die in jedem Rasterpunkt gemessene Regelspannung wird zur Grauwertbildung des entsprechenden Pixels im Ausgabegerät benutzt. Die Grau- oder Farbwerte eines STM-Bildes geben somit die unterschiedlichen Erhebungen und Täler der Probenoberfläche wieder. Im atomaren Bereich werden so die Elektronenhüllen der einzelnen Atome als kleine Hügel sichtbar. Genau genommen sieht man aber nicht die Topographie der Oberfläche, sondern die elektrischen Zustände der äußersten Atome. Allerdings ist in diesem Größenbereich die Frage nach der wirklichen Oberfläche eines Körpers nicht trivial.

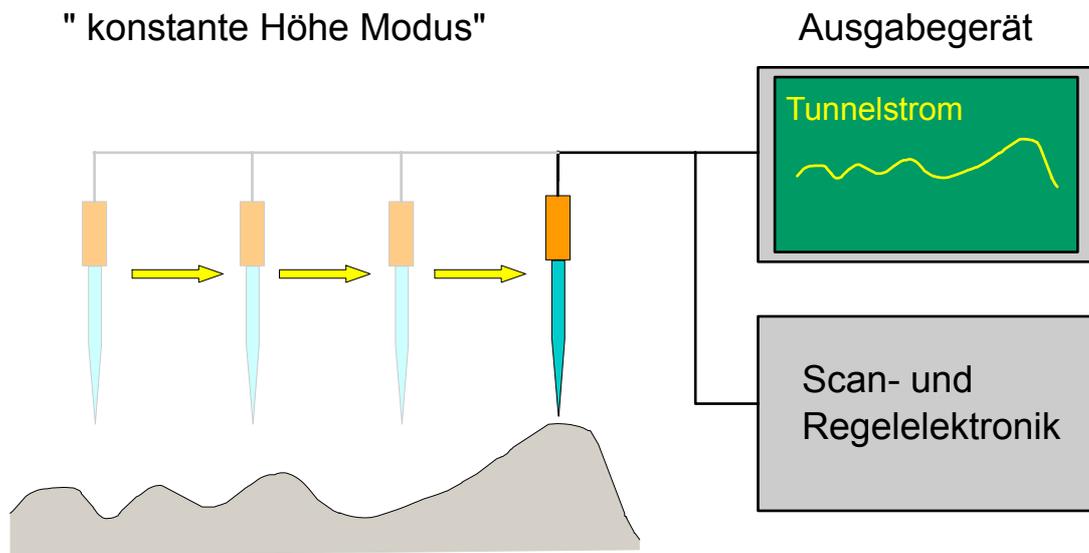


**Abb. 4: Abbildung einer Oberfläche mit atomarer Auflösung mit dem Tunnelmikroskop**

Die Vergrößerung des Mikroskops ist einfach das Verhältnis der abgerasterten Fläche zur Größe des Bildes im Monitor und beträgt im obigen Beispiel  $20 \text{ cm} / 2 \text{ nm} = 100 \text{ millionenfach}$ .

## 1.1.2 Konstanter Abstand Modus

Die beschriebene Art der Abtastung wird „konstanter Strom Modus“ genannt. Der Abstand der Spitze wird so geregelt, dass immer ein konstanter Strom fließt. Aber es gibt noch eine zweite Betriebsart, den „konstante Höhe Modus“. Hierbei wird die Spitze in geringer, konstanter Höhe über der Probe verfahren. Nun wird der sich ändernde Tunnelstrom zum Aufbau des Bildes verwendet. Da der Abstand der Spitze nicht geregelt wird und konstant bleibt, kann dieser Modus nur bei sehr glatten Oberflächen angewandt werden. Bei stark strukturierten Flächen besteht die Gefahr, dass die Spitze in eine Erhebung rammt. Ein großer Vorteil des „konstante Höhe Modus“ ist die Schnelligkeit der Messung, da nicht mehr auf die Regelung gewartet werden muss sondern die Oberfläche mit großer Geschwindigkeit abgerastert werden kann.



**Abb. 5: Abbildung des Oberflächenprofils mit einer Tunnelspitze (konstante Höhe Modus)**

Oft wird auch eine kombinierte Betriebsart angewandt. Der Abstand der Spitze wird mit einer großen Regelzeitkonstante eingestellt, die Abtastung wird aber dennoch mit hoher Geschwindigkeit vorgenommen. So werden kleine Strukturen auf der Oberfläche durch die schnelle Änderung des Tunnelstromes gemessen, aber langsame Änderungen des Abstands durch thermische Drift und Kriechen der Piezos durch die Regelung ausgeglichen.

Diese Aufgabe, den Abstand der Spitze auf weniger als einen Atomdurchmesser konstant zu halten, schien vor den Experimenten von Binnig und Rohrer unmöglich. Und sogar nach der erfolgreichen Demonstration der atomaren Auflösung äußerten Skeptiker Zweifel an den Ergebnissen. Einer der Verdienste der beiden Forscher war es sich über diese Meinung hinweg zu setzen und das Experiment zu versuchen. Tatsächlich war ihr erster Aufbau reichlich kompliziert, da sie versuchten Störungen wie mechanische Schwingungen, Temperaturschwankungen und Einflüsse der Atmosphäre auf ein Minimum zu beschränken. Das Experiment fand deshalb in einer Vakuumkammer bei geringem Druck, tiefer Temperatur und supraleitenden Schwingungsdämpfern statt. Erst später lernte man, dass ein gut gebautes

Tunnelmikroskop auch bei Raumtemperatur und normaler Atmosphäre auf jedem Labortisch zufriedenstellend arbeiten kann. Im Grunde ist das schon erstaunlich, da die meisten Oberflächen in normaler Umgebung mit einem Wasserfilm bedeckt sind. Die Bedingungen sind sogar so unkritisch, dass ein Tunnelmikroskop von jedem halbwegs begabten Bastler gebaut und betrieben werden kann.

Ein Tunnelmikroskop besteht im Wesentlichen aus 5 Hauptkomponenten:

1. Einer feinen Spitze zur Abtastung der Probe
2. Einer Vorrichtung, mit der die Abtastspitze in einem Raster über die Probe bewegt werden kann.
3. Einem Mechanismus mit der Abstand der Spitze von der Probe geregelt werden kann
4. Die zur Ansteuerung der Mechaniken und Auslesen der Daten erforderliche Elektronik.
5. Eine Steuereinheit, meist ein Computer, welche die Abläufe steuert, die Messdaten verarbeitet, speichert und sie zu Bildern konvertiert.

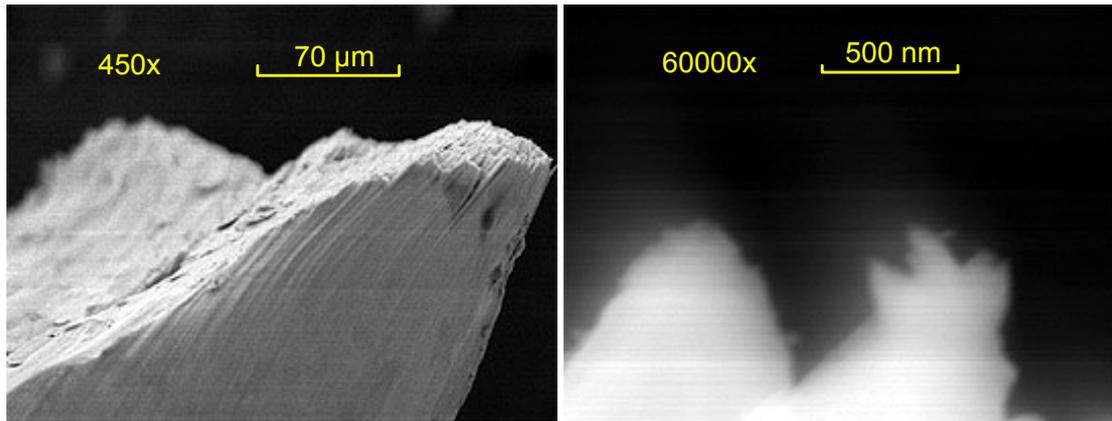
Interessant ist das schon 1972 drei Physiker, Young, Ward und Scire eine Art Tunnelmikroskop bauten, ohne die enormen Möglichkeiten des Geräts wirklich zu erkennen. Ihr Gerät, das sie „Topographiner“ nannten, bestand aus denselben Bestandteilen die heute in einem Tunnelmikroskop zu finden sind. Dass sie nur eine Auflösung von einigen Hundert Nanometer erreichten, hatte die Ursache in dem großen Spitzen-Probenabstand den sie verwendeten. Bei einem Abstand von einigen Hundert Nanometer wird der Strom zwischen Spitze und Probe nicht durch den Tunneleffekt, sondern durch Feldemission der Spitze bestimmt. Versuche mit kleinerem Abstand zu arbeiten scheiterten an der mangelnden Stabilität des Geräts. Nach Meinung des Verfassers hatte diese Instabilität eine Ursache in der Spitzenstromversorgung. Young verwendete eine Konstantstromquelle zur Speisung der Spitze, hätte er eine Konstantspannungsquelle mit niedriger Spannung verwendet, wäre das Tunnelmikroskop und seine atomare Auflösung vielleicht schon 9 Jahre vor Binnig entdeckt worden.

## **1.2. Spitzen für die Tunnelmikroskopie**

Von den vielen Möglichkeiten feine Spitzen herzustellen sind drei für Hausgebrauch geeignet. In Zweien wird von einem dünnen Draht ausgegangen. Geeignete Drähte haben einen Durchmesser von 0,1 bis 0,3 mm und bestehen aus harten Metallen oder Legierungen. Üblich sind Drähte aus Wolfram, Tantal oder Platiniridium. Da man nur kleine Mengen benötigt sind die Drähte trotz der wertvollen Grundmaterialien nicht so teuer, so kostet Platiniridiumdraht mit 0,4 mm Durchmesser 3 Euro pro Zentimeter ([www.reiss-laborbedarf.de](http://www.reiss-laborbedarf.de)).

### **1.2.1. Geschnittene Spitzen**

Zur Erzeugung einer Spitze wird der Draht unter Zug mit einem scharfen Seitenschneider abgezwickelt. An der Trennstelle entsteht dann eine Vielzahl feiner Spitzen, die sich für unsere Zwecke eignen.



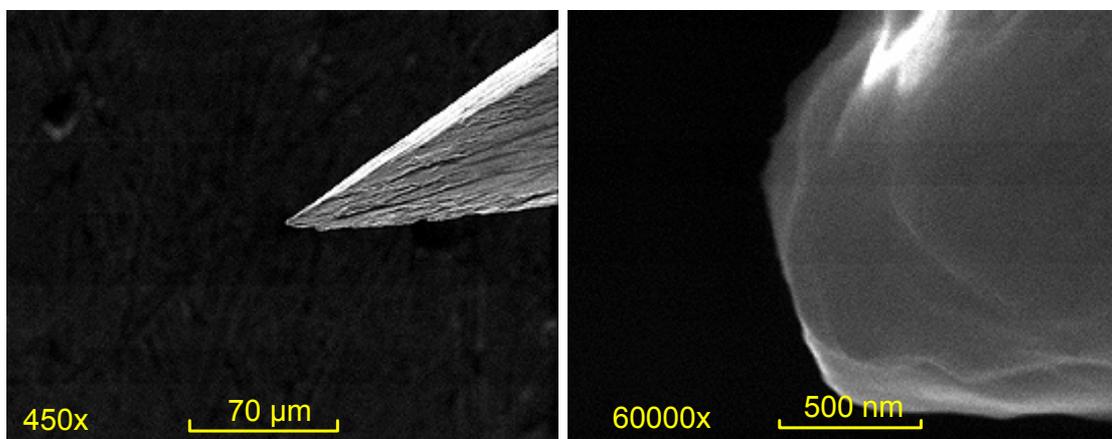
**Abb. 6: Durch Abschneiden erzeugte Mikrospitzen an einem Wolframdraht**

Die Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop zeigt die Verhältnisse an der Trennstelle. Die faserige Struktur des Wolframdrahts unterstützt die Bildung von Spitzen. Durch die extreme Abstandsabhängigkeit des Tunnelstroms trägt nur eine der vielen Spitzen den Hauptteil des Stroms. Eine Spitze, die nur 0,1 Nanometer weiter entfernt ist als die vorderste, trägt nur wenig zum Gesamtstrom bei. Natürlich ist die Entstehung geeigneter Spitzen etwas zufällig aber wegen der Einfachheit des Verfahrens kann man ohne Aufwand viele Versuche unternehmen.

Allerdings eignen sich diese Spitzen nur zur Untersuchung von glatten Oberflächen, schmale Gräben, feine Löcher oder ähnliche Strukturen können nicht aufgelöst werden.

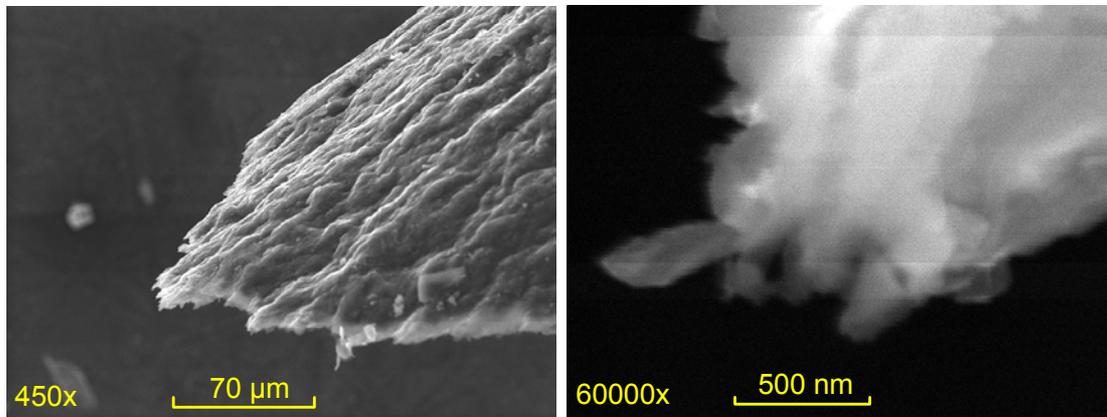
### 1.2.2 Geschliffene Spitzen

Eine zweite, einfache Möglichkeit, zur Spitzenherstellung ist das Schleifen. Hierzu wird mit Schleifpapier ein Drahtende zu einer Spitze angeschliffen. Kaum zu glauben aber selbst mit solchen groben Mitteln erstellte Spitzen erlauben atomare Auflösung. Der Verfasser verwendete mit gutem Erfolg feine Spiralbohrer (Durchmesser 0,8 mm) als Ausgangsmaterial. Der Bohrer wird in das Futter einer Minibohrmaschine (Dremel, Minitool) eingespannt und unter Rotation über eine feine Schleifscheibe gezogen. Auch hier ist das Ergebnis wie bei den geschnittenen Spitzen mehr oder weniger zufällig, aber führt doch nach einigen Versuchen zum Ziel.



**Abb. 7: Durch Abschleifen erzeugte Spitze an einem Bohrer**

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Grafitspitzen (R.J. Colton, S.M. Baker, J.D. Baldeschwieler, W.J. Kaiser). Als Material wird eine 0,5 mm dünne Bleistiftmine verwendet. Die Spitze wird durch einfaches Abbrechen der Mine erzeugt. Abgesehen vom niedrigen Preis haben Grafitspitzen auch den Vorteil, dass sie, im Gegensatz zu Wolframspitzen an der Luft nicht oxidieren.



**Abb. 8: Spitze an einer Bleistiftmine**

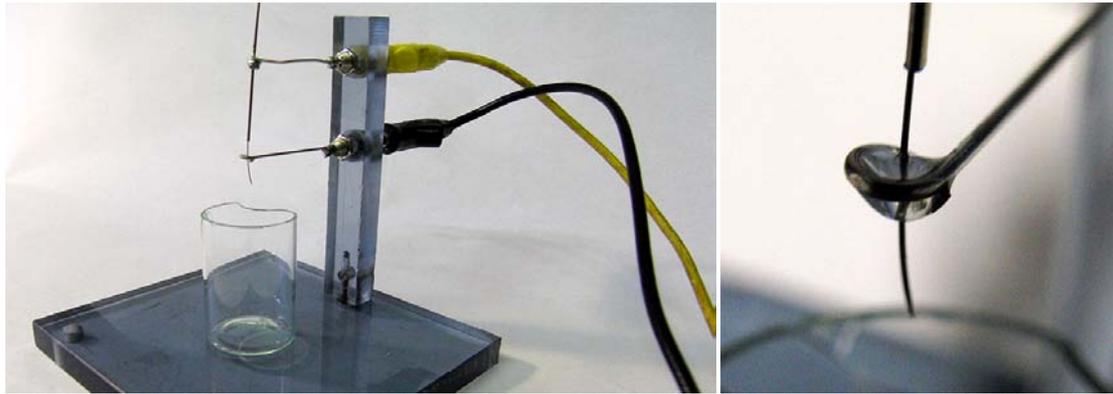
Ein weiterer Vorteil dieser Spitzen ist, dass sie relativ unempfindlich sind. Berührt die Spitze die Probenoberfläche, muss sie deshalb nicht unbedingt unbrauchbar werden. Fährt man die Spitze wieder zurück, bleibt manchmal etwas Probenmaterial an ihr hängen und bildet eine neue Spitze. Vor allem bei weichen Probenoberflächen wie Goldfilmen kann das zum Erfolg führen. Bei Versuchen des Verfassers kam es manchmal vor, dass eine Spitze nach einem „Crash“ bessere Bilder lieferte als vorher. Die im nächsten Kapitel beschriebenen extrem feinen, geätzten Spitzen hingegen überleben eine Berührung mit der Probe meist nicht.

### 1.2.3. Geätzte Spitzen

Sehr feine Spitzen erhält man nach der dritten Methode durch elektrochemisches Ätzen. Schon lange vor der Erfindung des Tunnelmikroskops wurden nahezu atomar feine Spitzen geätzt, die für die Feldemission von Elektronen oder Ionen (Feldelektronen- und Feldionenmikroskopie) gebraucht wurden. Geätzte Spitzen werden am Besten aus Wolframdraht hergestellt. Wolframdraht lässt sich gut mit der relativ harmlosen Natronlauge ätzen, für andere Materialien wie Platiniridium sind weitaus aggressivere Reagenzien nötig. Natronlauge kann entweder aus Natriumhydroxid (NaOH) durch Auflösung in Wasser hergestellt oder als fertige, flüssige Natronlauge bezogen werden ([www.omikron.de](http://www.omikron.de)). Die Konzentration der Lauge soll 2 normal sein, das bedeutet, in einem Liter Wasser müssen 2 Mol Natriumhydroxid gelöst sein. Das Molgewicht von Natriumhydroxid kann leicht aus den Atomgewichten der Elemente berechnet werden.

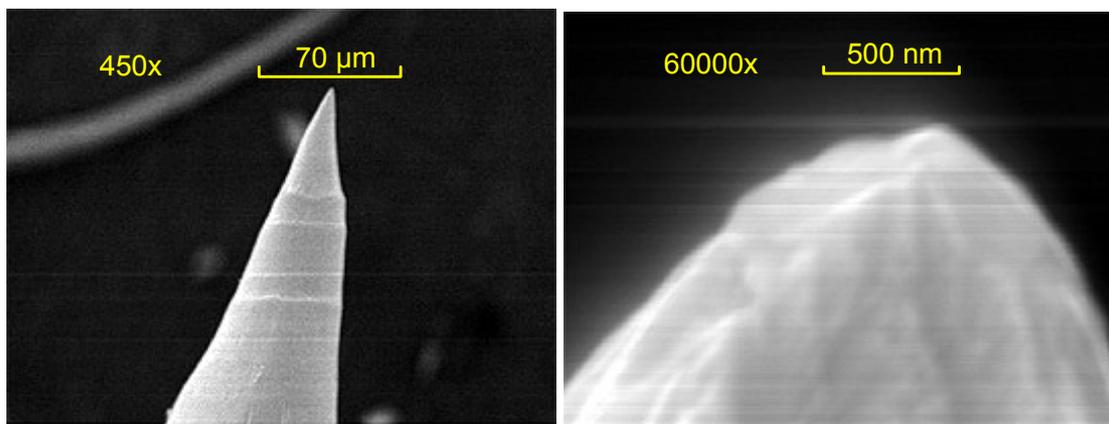
Natrium	Sauerstoff	Wasserstoff	Molgewicht (g)
Na (23) +	O (16) +	H (1) =	40

Demnach müssen 80 Gramm Natriumhydroxid in einem Liter Wasser aufgelöst werden, um 2n Natronlauge zu erhalten. Da man nur kleine Mengen der Ätzflüssigkeit benötigt, reicht es 8 Gramm in 100 ml Wasser zu lösen.



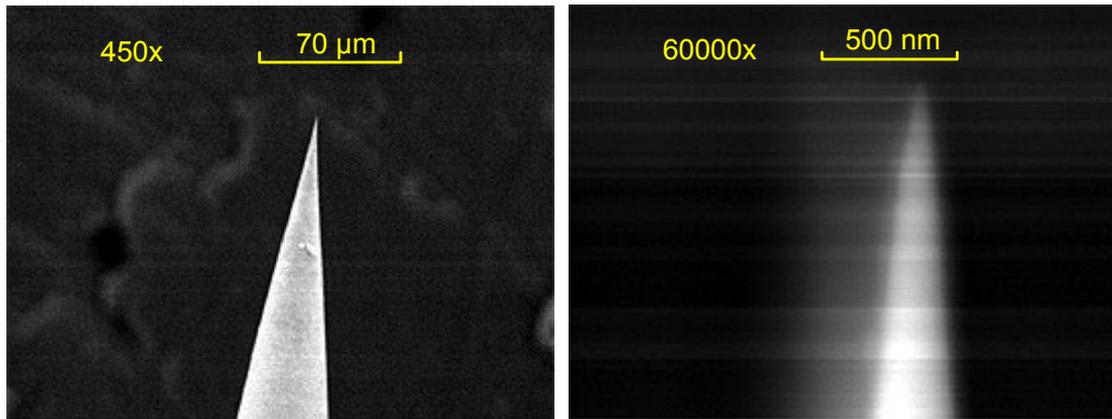
**Abb. 9: Einfache Ätzvorrichtung für Drähte**

Die eigentliche Ätzvorrichtung besteht aus einem Kunststoffständer an dem eine Öse aus Stahldraht und ein feines Röhrchen (Teil einer Injektionsnadel) befestigt sind. In das Röhrchen wird der zu ätzende Draht eingeschoben, sodass er mittig durch die Drahtöse ragt. Auf die Öse platziert man einen Tropfen Natronlauge. Zwischen Öse und Drahthalter wird die Ätzspannung angeschlossen, und zwar der negative Pol der Quelle an die Öse, der positive an das Röhrchen. Die Ätzspannung beträgt zwischen drei und fünf Volt. Der anfänglich hohe Strom von circa 50 mA fällt nach kurzer Zeit auf etwa 1 mA ab und bleibt dann während der ungefähr 20-minütigen Ätzzeit nahezu konstant. Der Ätzvorgang findet vor allem an der oberen Grenzfläche statt, dort wo der Draht in den Tropfen eintaucht. Nach erfolgter Ätzung fällt das untere Drahtstück ab, und wird in einem Schälchen mit Wasser aufgefangen. Man erhält somit zwei Spitzen, eine am abgefallenen Drahtstückchen und eine am oberen, im Röhrchen verbliebenen Ende. Um scharfe Spitzen zu erhalten, ist es entscheidend, dass der Strom nach erfolgter Ätzung augenblicklich abgeschaltet wird. Bei der unteren Spitze geschieht das durch das Abfallen automatisch. Für das obere Ende muss der Strom von Hand oder mit einer Automatik ausgeschaltet werden.



**Abb. 10: Spitze nach dem Ätzen am oberen Draht**

Die elektronenmikroskopischen Bilder zeigen den deutlichen Unterschied zwischen der oberen und unteren Spitze. Während die obere Spitze durch den zu lang andauernden Strom etwas abgerundet ist, hat die untere eine schlanke Form mit einem Krümmungsradius von einigen zehn Nanometern.



**Abb. 11: Spitze am unteren, abgefallenen Drahtende**

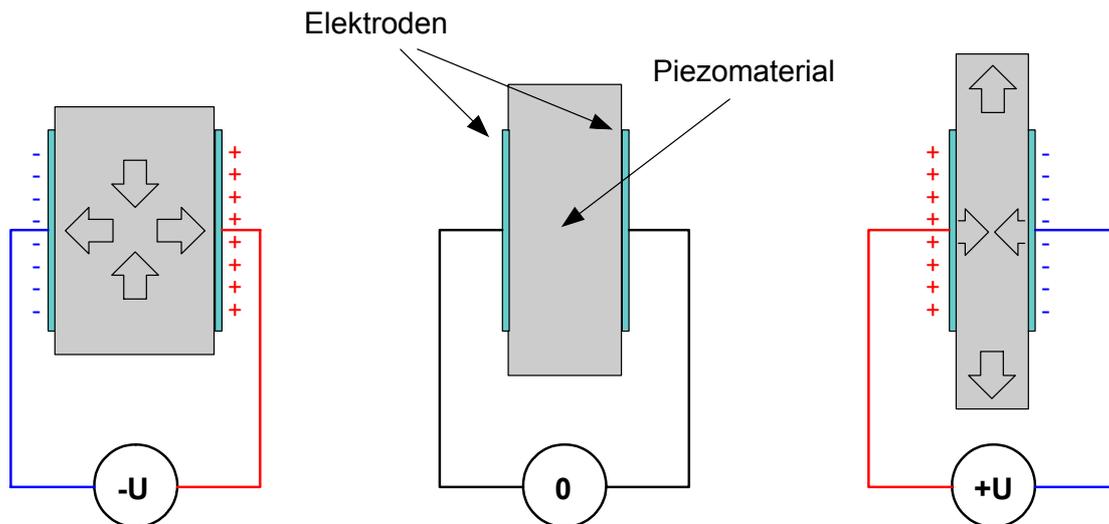
Es versteht sich von selbst, dass diese Spitzen sehr empfindlich sind und nur am hinteren Schaft berührt werden dürfen. Im Gegensatz zu den inerten Spitzen aus Platiniridiumdraht vergammeln Wolframspitzen mit der Zeit durch Oxidation. Möglicherweise ist es besser die geätzten Spitzen unter Alkohol bis zum Gebrauch aufzubewahren.

### **1.3. Piezoscanner**

Ein weiterer, für die Funktion entscheidender Bestandteil des Mikroskops ist die Vorrichtung zur Einstellung des Spitzenabstands. Die dazu notwendigen Längenänderungen bewegen sich im Nanometerbereich. Fast alle Aufbauten verwenden dazu piezoelektrische Stellglieder.

#### **1.3.1 Der Piezoeffekt**

Der bei manchen Stoffen auftretende Piezoeffekt bewirkt eine Volumen, bzw. Längenänderung des Materials unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes und umgekehrt die Entstehung eines elektrischen Feldes durch mechanische Einwirkungen auf das Material. Beide Phänomene werden in der Technik vielfach ausgenützt. Schwingquarze, keramische Filter, Quarzdruckaufnehmer, Ultraschallmikrofone, Feuerzeugzündler, keramische Tonabnehmer, Piezobeeper sind nur einige Beispiele der zahlreichen technischen Anwendungen des Piezoeffekts.



**Abb. 12: Der Piezoeffekt**

Im aktiven Modus, d.h. wenn Spannung an den Piezokörper gelegt wird ändert sich das Volumen je nach der Polarität der Spannung. Die in der Grafik gezeigten Verhältnisse sind aber stark übertrieben. Die Änderungen der Abmessungen sind im Allgemeinen sehr klein und bewegen sich bei 0,1 bis 1 nm/V.

Die Längenänderung  $\Delta l$  des Körpers kann mit folgender Formel bestimmt werden.

$$\Delta l = d_{ij} \cdot E \cdot l_0$$

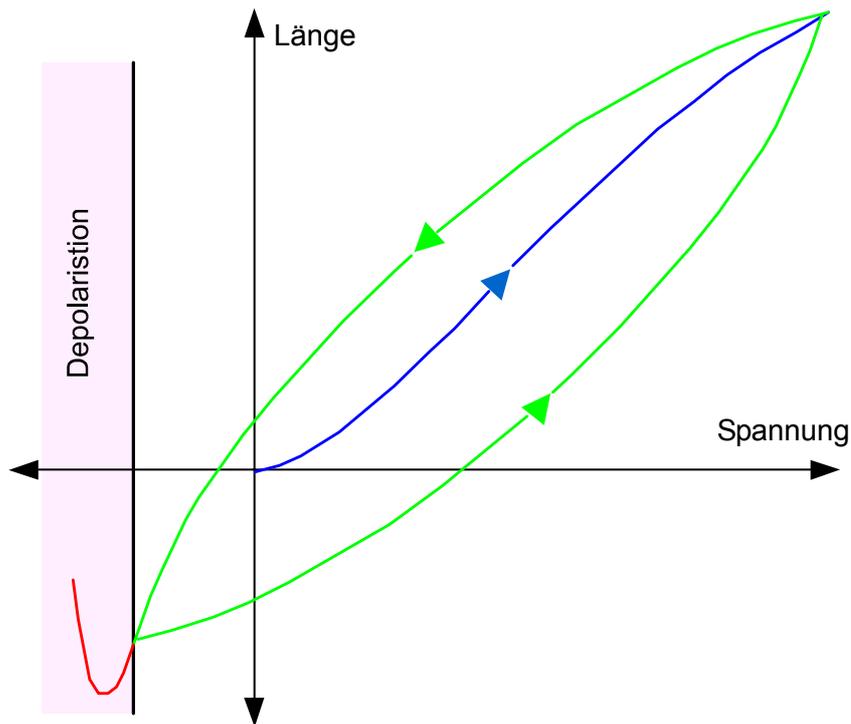
$\Delta l$	=	Längenänderung	(m)
$d_{ij}$	=	Piezomodul	(m/V)
$E$	=	Elektrische Feldstärke	(V/m)
$l_0$	=	Ausgangslänge	(m)

Das Piezomodul  $d_{ij}$  ist eine Konstante des Materials, wobei die Indize  $i$  und  $j$  für die verschiedenen räumlichen Richtungen des elektrischen Feldes und der daraus folgenden Dehnung stehen. Typische Werte für  $d_{31}$  und  $d_{33}$  sind einige Hundert Picometer pro Volt.

Für den Fall das Feld und Dehnung in der gleichen Richtung betrachtet werden, z.B.  $i = 3$  und  $j = 3$  kann die Formel vereinfacht werden. Die Feldstärke  $E$  berechnet sich aus der angelegten Spannung  $U$  und der Ausgangslänge  $l_0$ .

$$E = U / l_0 \quad \rightarrow \quad \Delta l = d_{33} \cdot U \quad U = \text{Angelegte Spannung (V)}$$

Leider haben Piezomaterialien auch Eigenschaften, die sich störend auswirken, und in den obigen Formeln nicht erfasst sind. Darunter fällt die sogenannte Hysterese, d.h., die Längenänderung durchläuft bei zunehmender und abnehmender Spannung unterschiedliche Bereiche.



**Abb. 13: Hysterese und Depolarisation in Piezomaterialien**

Hier zeigt sich die Ähnlichkeit der ferroelektrischen Piezos mit den ferromagnetischen Materialien, deren Magnetisierungsschleife ebenfalls hysterestisch ist. In beiden Fällen sind kleinste Bereiche im Material, sogenannte Domänen, für die Hysterese verantwortlich. In der Grafik ist auch der rosa eingefärbte Bereich, in dem Depolarisation stattfindet, eingezeichnet. Wird die Piezokeramik in diesem Spannungsbereich betrieben, kann sie zerstört werden. Eine weitere Erscheinung ist das Kriechen. Nach einer erfolgten Spannungsänderung verändert sich die Länge des Piezos weiter, obwohl die Spannung konstant bleibt. Beide Effekte machen es unmöglich einer bestimmten Spannung eine bestimmte Länge zuzuordnen.

Für eine genaue Positionierung mit Piezos muss deshalb die Position mit einem zusätzlichen Wegaufnehmer (kapazitiv, induktiv oder optisch) gemessen, und der Piezosteller in eine Regelschleife eingebunden werden.

Bei der Anwendung in einfachen Tunnelmikroskopen brauchen diese Effekte aber nicht berücksichtigt werden. Beachtet werden muss aber eine weitere Eigenart der Piezomaterialien, nämlich die Curietemperatur. Wird diese Temperatur überschritten verschwindet der Piezoeffekt, unter Umständen irreversibel. Bei vielen Materialien liegt diese Temperatur unter 200 °C, sodass beim Lötten auf den metallisierten Keramiken Vorsicht geboten ist. Um kein Risiko einzugehen, kann man die Anschlussdrähte mit Leitsilber oder leitfähigem Epoxid befestigen.

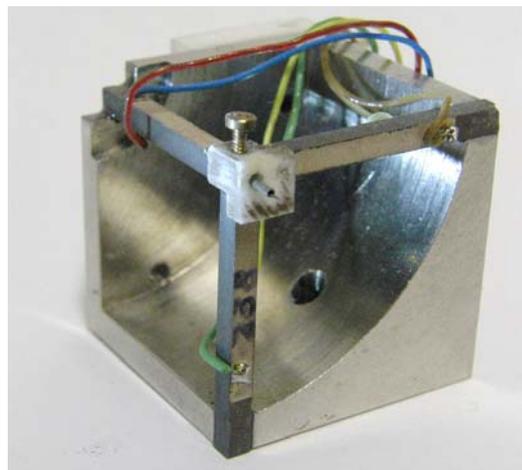
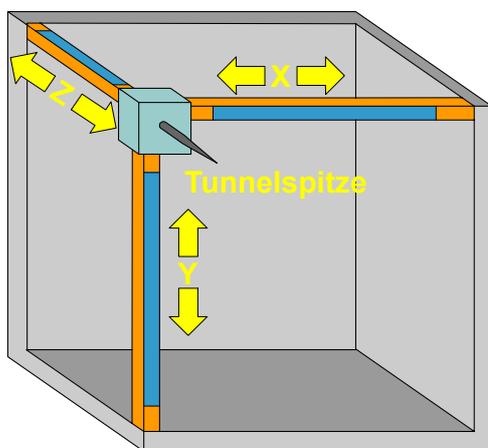
### 1.3.2. Tripod-Scanner

Piezoaktuatoren werden sowohl für die Bewegung der Spitze in der Z-Achse wie auch zum Scannen in der X- und Y-Achse verwendet.

Binnig und Rohrer verwendeten ein sogenanntes Tripod zu diesem Zweck. Das Tripod besteht aus drei Piezostäben, einer für jede Achse, die zu einem Dreibein zusammengeklebt werden. Die drei freistehenden Enden des Dreibeins werden an einen geeigneten Halter geklebt. Am Verbindungspunkt der drei Stäbe sitzt das

Befestigungsklötzchen für die Tunnelspitze. In diesem Halter aus isolierendem Material ist ein dünnes Stahlröhrchen eingeklebt, in welches das Drahtstückchen mit der Spitze eingeschoben wird.

Der Nachteil eines Tripods liegt im kleinen Scan-Bereich der nur einigen 100 Nanometern ist. Auch für diesen kleinen Rasterbereich werden schon Ablenkspannungen von einigen Hundert Volt notwendig. Deshalb müssen für die Ablenkverstärker spezielle Hochspannungsbaueteile verwendet werden. Werden anstelle der massiven Keramikstäbe piezoelektrische Röhrchen eingeklebt, wird die erforderliche Spannung etwas kleiner, bzw. man bekommt bei gleicher Spannung einen größeren Scan-Bereich. Röhrchen haben wegen der kleineren Wandstärke bei gleicher Spannung ein höheres Feld und damit eine größere Längenänderung. Möglicherweise können alte keramische Röhrchenkondensatoren dazu verwendet werden. Die Röhrchen der Kondensatoren, die hohe Kapazitätswerte haben, bestehen oft aus Bariumtitanat oder ähnlichen Piezomaterialien.

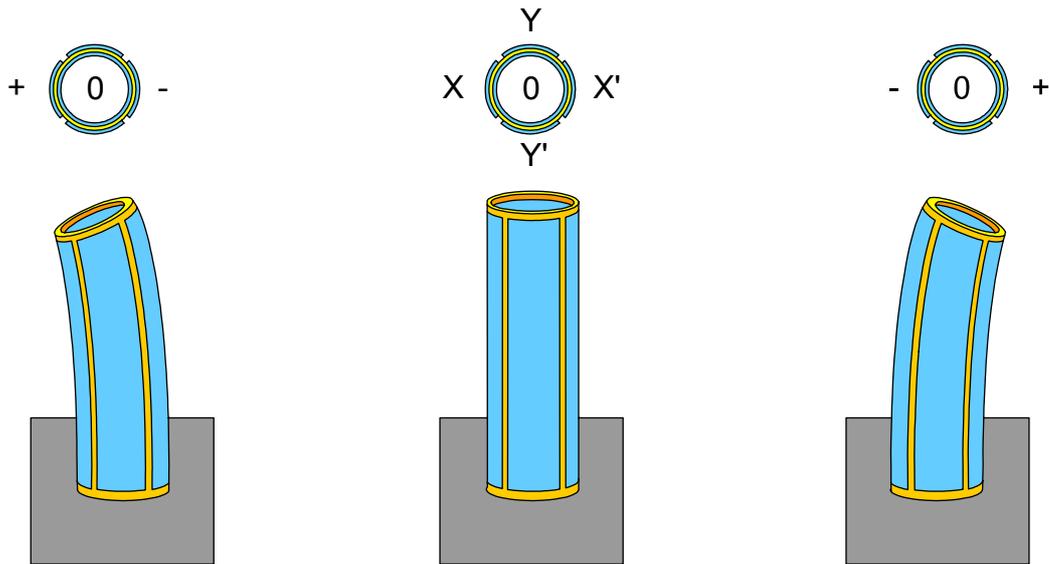


**Abb. 14: Der Tripod-Scanner**

### 1.3.3. Röhrchen-Scanner

In kommerziellen Geräten wird mittlerweile fast ausschließlich der Röhrchenscanner eingesetzt. Der Hauptbestandteil dieses Scanners ist ein Röhrchen aus piezoelektrischem Material das durch entsprechend sektorisierte Elektroden eine Auslenkung in allen drei Achsen erlaubt. Leider sind entsprechende Röhrchen aus Piezokeramik, wenn sie neu gekauft werden, nicht ganz billig, etwa 100 Euro wird man dafür ausgeben müssen und die meisten Hersteller (z.B. Physik Instrumente) haben kaum Interesse Einzelstücke zu verkaufen.

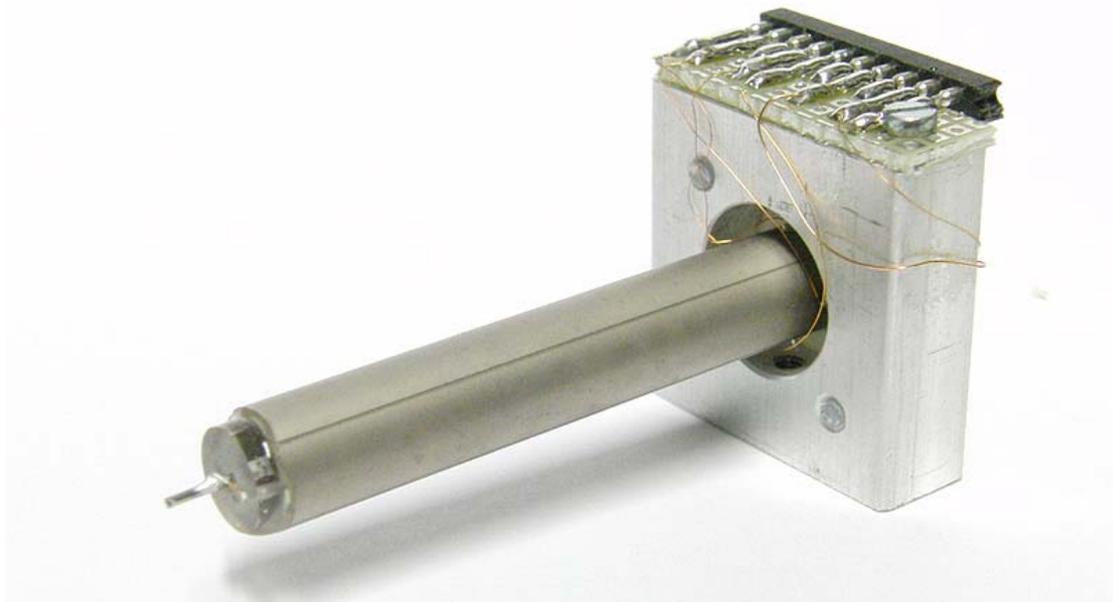
Hat man Piezorohr ergattert, ist der Aufbau eines Scanners einfach. Für die richtige Auslenkung benötigt das Rohr fünf Elektroden. Eine durchgehende Metallisierung auf der Innenseite und vier Elektroden auf der Außenseite. Besitzt man nur ein blankes Piezorohr, kann man die Elektroden mit Leitsilber aufbringen. Zum Betrieb wird der Innenbelag des Rohres geerdet und die vier äußeren Elektroden mit den Ausgängen der Gegentaktverstärker für die Ablenkung in der X- und Y-Achse verbunden.



**Abb. 15: Der Röhrenscanner**

Je nach Polarität und Größe der angelegten Spannung biegt sich das Röhren in die verschiedenen Richtungen. Wird an allen vier äußeren Elektroden die Spannung gleichzeitig verändert, verlängert oder verkürzt sich das Röhren, was einer Verstellung in der Z-Richtung gleichkommt.

Die Auslenkung des Scanners hängt neben den Eigenschaften des Piezomaterials von der Wandstärke des Rohres, seiner Länge und der angelegten Spannung ab. Bei den üblichen Materialien und Wandstärken kann man mit Scan-Weiten von einigen Mikrometern pro Zentimeter Rohrlänge bei 100 Volt Ablenkspannung rechnen.



**Abb. 16: Scanner mit Piezoröhren**

Das Bild zeigt einen Röhrenscanner mit 50 mm langen Rohr. Wegen der großen Länge hat der Scanner einen besonders großen Rasterbereich von 100  $\mu\text{m}$  bei einer

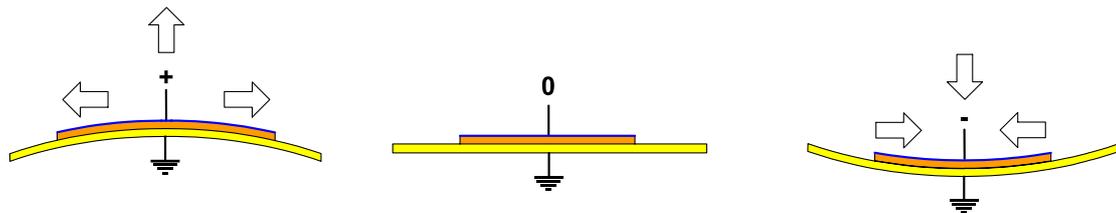
Spannung von 400 Volt. Mit der Länge wachsen allerdings auch die Probleme, die von der thermischen Drift und dem Kriechen des Piezomaterials herrühren.

#### 1.3.4. Bimorph-Scanner

Besonders große Auslenkungen ergeben sogenannte Bimorph-Piezos. Hier sind zwei Piezoschichten mit gegenphasiger Polarität verbunden, ähnlich der bekannten Bimetalstreifen aus Thermostaten. Wird an das Doppelpack Spannung angelegt verkürzt sich das eine Plättchen, während sich das andere verlängert. Als Resultat erhält man eine Biegung des gesamten Streifens und eine starke Auslenkung eines Endes.

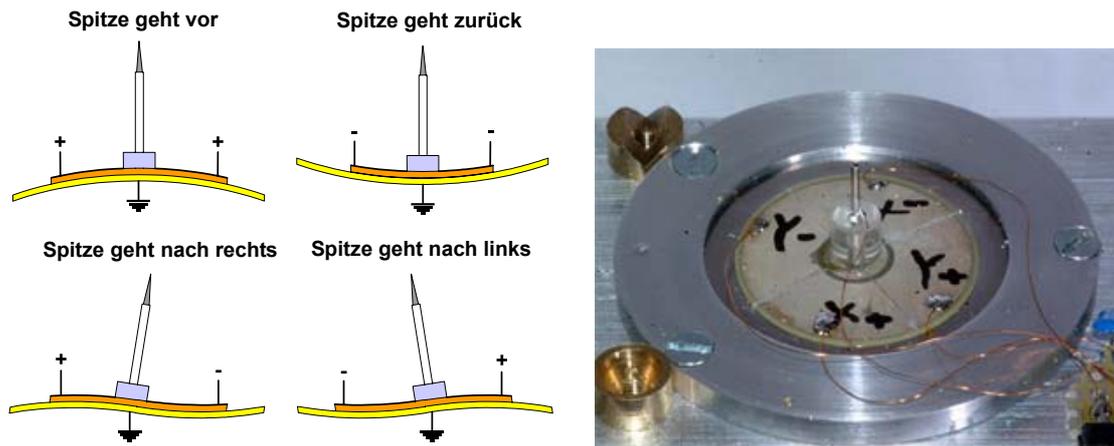
Wird ein Streifen aus Piezomaterial mit einem solchen aus Metall verbunden, bekommt man ein ähnliches Verhalten. Durch das Anlegen einer Spannung verändert sich der Piezostreifen, während die Länge des Metallstreifens gleich bleibt und auch hier resultiert eine Biegung.

Piezo-Beeper, die als Alarmgeber in vielen Geräten verbaut sind, arbeiten genau nach diesem Prinzip. So ein Beeper besteht aus einer dünnen Metallscheibe auf die ein Piezoplättchen aufgeklebt wird. Beim Anlegen einer Spannung wölbt sich die Scheibe je nach Polarität in der einen oder der anderen Richtung. Wird eine Wechselfspannung angelegt, gerät die Scheibe in Schwingungen und Schall wird abgestrahlt, der Beeper piept.



**Abb. 17: Bewegungen eines Piezobeeper unter dem Einfluss einer Spannung**

Nach einer genialen Idee von John Alexander kann aus einem Piezobeeper auf einfache Weise ein Scanner gebastelt werden, der für die Tunnelmikroskopie geeignet ist. Dazu muss die Elektrodenfläche auf der Piezoscheibe in vier Quadranten unterteilt werden. Mit einer starken, spitzen Nadel oder einem Skalpell ist es möglich die Versilberung durchzuritzen. Nach der Operation dürfen die vier Einzelflächen keine leitende Verbindung mehr haben, was mit dem Multimeter kontrolliert wird. Anschließend werden die vier Quadranten durch das Anlöten dünner Drähte kontaktiert. Wie immer bei Lötten auf Piezomaterial sollte das schnell gehen, ohne die Unterlage zu stark zu erwärmen, da Piezo wie durch Überhitzung wie durch zu hohe Spannung ihre Polarisierung verlieren können und dadurch unbrauchbar werden. Wer sichergehen will, kann die dünnen Anschlussdrähtchen auch mit Leitsilber befestigen. Auf die Mitte der Scheibe klebt man ein Klötzchen aus Isoliermaterial z.B. Plexiglas, in das in einer Bohrung ein dünnes Stahlröhrchen befestigt ist. In dieses Röhrchen, aus der Nadel einer Injektionsspritze gefertigt, wird dann die eigentliche Abtastspitze aus dünnem Draht eingeschoben. Auch der Nadelhalter wird mit einem dünnen Draht kontaktiert, über den die erforderliche Biasspannung an die Spitze gelegt wird.

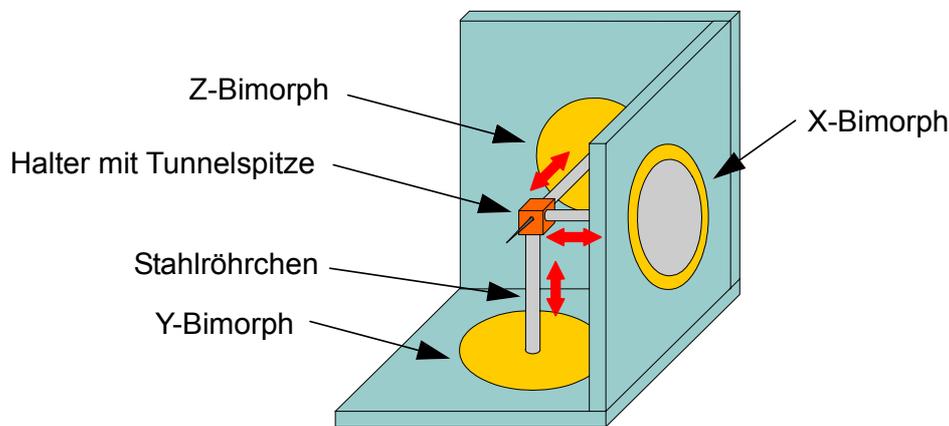


**Abb. 18: 3-D Scanner aus einem Piezobeeper**

Der Scanner zeigt eine hohe Empfindlichkeit und hat schon bei kleinen Spannungen von etwa  $\pm 15$  V eine Auslenkung von etwa 2 Mikrometern.

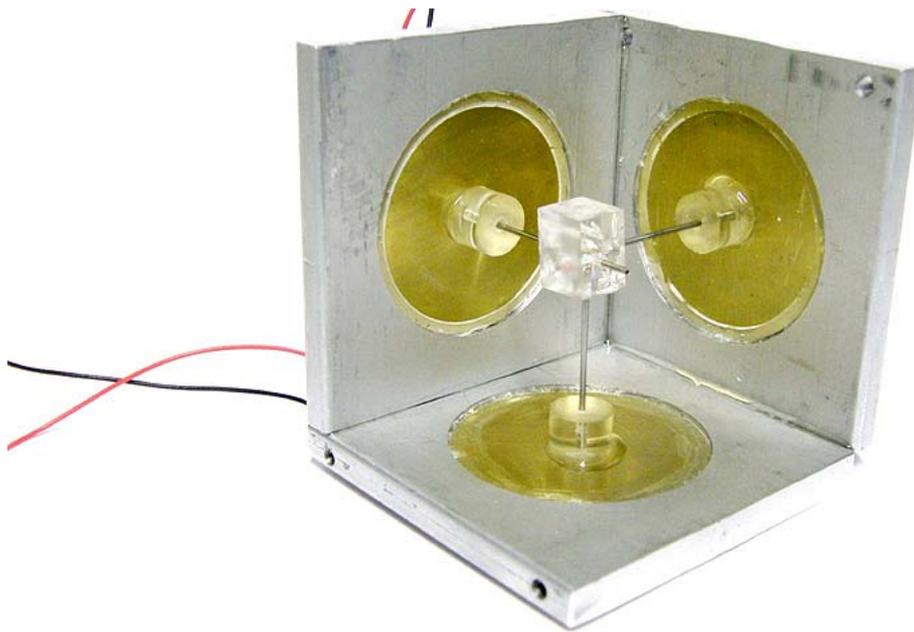
### 1.3.5. TripodScanner mit Bimorph-Antrieb

Die große Auslenkung der Bimorph-Scheiben kann auch in Verbindung mit einer Tripodanordnung genutzt werden. Als Halterung wird ein Eckwinkel aus Metall verwendet. Dieser Winkel erhält drei Löcher in die die Bimorphscheiben eingeklebt werden. Im Zentrum der Scheiben werden drei dünnen Röhrchen aufgeklebt, an deren zusammenlaufende Enden der Nadelhalter sitzt. Die Röhrchen sind aus dünnen Kapillaren von Injektionsnadeln die in der Längsrichtung sehr steif sind aber trotzdem in der Querrichtung elastisch biegsam sind.



**Abb. Tripod-Scanner mit Bimorph-Antrieb**

Gegenüber dem Quadrantenscanner hat der Tripod-Scanner den Vorteil, dass die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Scan-Achsen kleiner ist. Außerdem ist Ansteuerung etwas einfacher, da nur drei, statt vier Kanäle benötigt werden.



**Abb. 19: Tripod-Scanner mit Piezo-Beeper**

Der Scanner 35 mm großen Beeperscheiben erreicht schon bei  $\pm 15$  V Steuerspannung Ausschläge von 20  $\mu\text{m}$ .

## 1.4. Scannertreiber

### 1.4.1. Hochspannungstreiber

Für hohe Spannungen geeignete Operationsverstärker sind sehr teuer und kosten 200 Euro oder mehr pro Stück, eindeutig zuviel für Bastelprojekte. Wer dennoch günstig an diese Teile kommt, wird den Treiber mit diesen aufbauen.

Hochspannungs-Operationsverstärker				
Typ	Hersteller	max. Betriebsspannung	Ruhestrom	
OPA 445	Burr-Brown	$\pm 45$ V	4,5 mA	
3584	Burr-Brown	$\pm 150$ V	6,5 mA	
PA 88	Apex	$\pm 225$ V	2 mA	

**Tab. 1: Parameter verschiedener HV-Operationsverstärker**

Der OPA 445 gehört eigentlich nicht zu den wirklichen Hochspannungstypen, weder vom Preis (ca. 10 €) noch von der Ausgangsspannung, wird er aber in einer Brückenschaltung verwendet, ist ein Ausgangsspannungshub von immerhin 90 Volt möglich. Die wirklichen Hochspannungstypen sind meist in ein 8-poliges TO-3 Gehäuse verpackt, das auf einen Kühlkörper geschraubt werden muss. Obwohl der, für die Piezos, notwendige Ausgangsstrom sehr klein, fast Null ist, müssen die Verstärker gut gekühlt werden, da durch den Ruhestrom schon eine erhebliche Leistung von einigen Watt freigesetzt wird. Durch die hohe Spannung sind die Bauteile auch sehr empfindlich und vertragen keinesfalls auch nur kurzzeitige Kurzschlüsse. So können innerhalb von Millisekunden Bauteile im Wert von einigen

Hundert Euro vernichtet werden. Es empfiehlt sich erst die gesamte Schaltung mit niedriger Spannung zu testen, bevor die Hochspannung angelegt wird. Abgesehen von den Hochspannungsverstärkern weist die Schaltung keine Besonderheiten auf. Da die Ausgangsspannung der meisten DA-Wandler unipolar ist, wird sie in einer Stufe durch die Addition einer Offsetspannung zu Null symmetrisch gemacht. Die Stufen für den X- und den Y-Kanal sind identisch aufgebaut. Der Z-Kanal hat neben dem Signal vom Z-DAC ein weiteres Signal von der Regelschaltung, die den Tunnelstrom und somit den Abstand der Spitze zur Probenoberfläche konstant hält. Der Z-DAC erzeugt die Sägezahnspannung, die zur automatischen Annäherung der Spitze an die Probe benötigt wird. Die Ausgangsspannung des Z-Kanal wird über einen Spannungsteiler mit AD-Wandler Eingang verbunden. Dieses Signal enthält die Bildinformation.

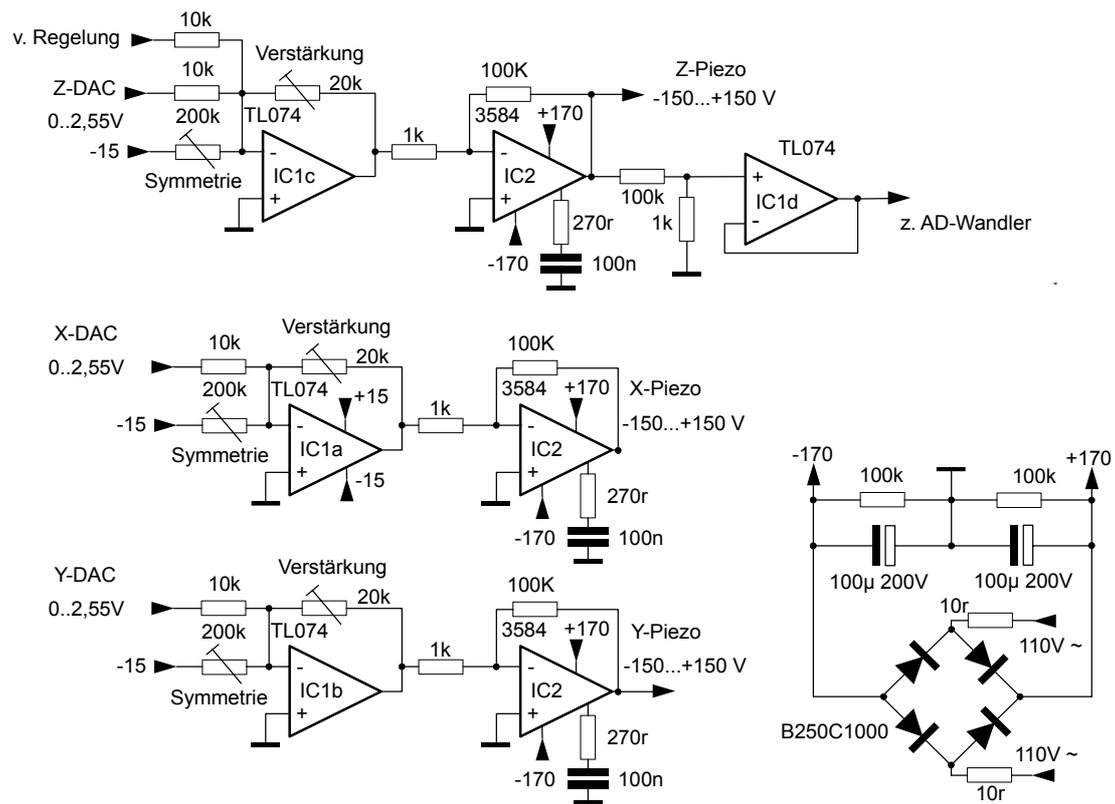
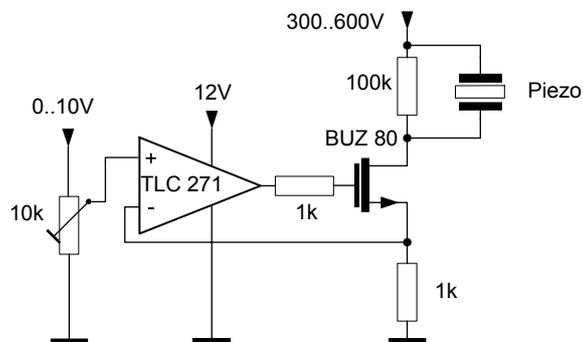


Abb. 20: Hochspannungstreiber mit Operationsverstärkern



**Abb. 21: HV-Treiber auf einer Eurokarte. Auf der Karte ist noch genügend Platz für weitere Stufen**

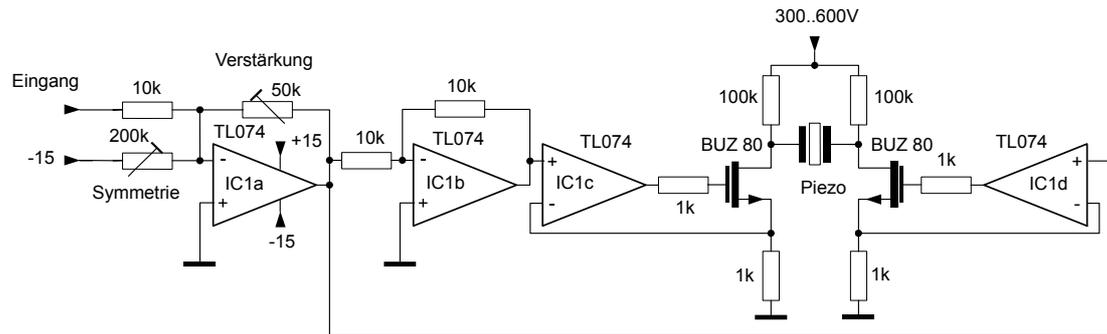
Noch einfacher ist der Aufbau einer Hochspannungsstufe mit einem V-Mosfet. Dieser wird zusammen mit einem einfachen Operationsverstärker zu einer gesteuerten Stromquelle geschaltet. Die Stromquelle arbeitet auf einen hohen Widerstand von 100 KOhm an dem dann die Hochspannung abfällt. Abhängig vom verwendeten Feldeffekttransistor kann man so Ausgangsspannungen von mehreren hundert bis zu tausend Volt erreichen. Abgesehen von Isolationsproblemen ist aber auch die maximale Betriebsspannung der Piezosteller begrenzt. Durch zu hohe Spannungen werden sie zerstört bzw. unbrauchbar, 600 V bis 800 V ist etwa die Obergrenze des Zumutbaren.



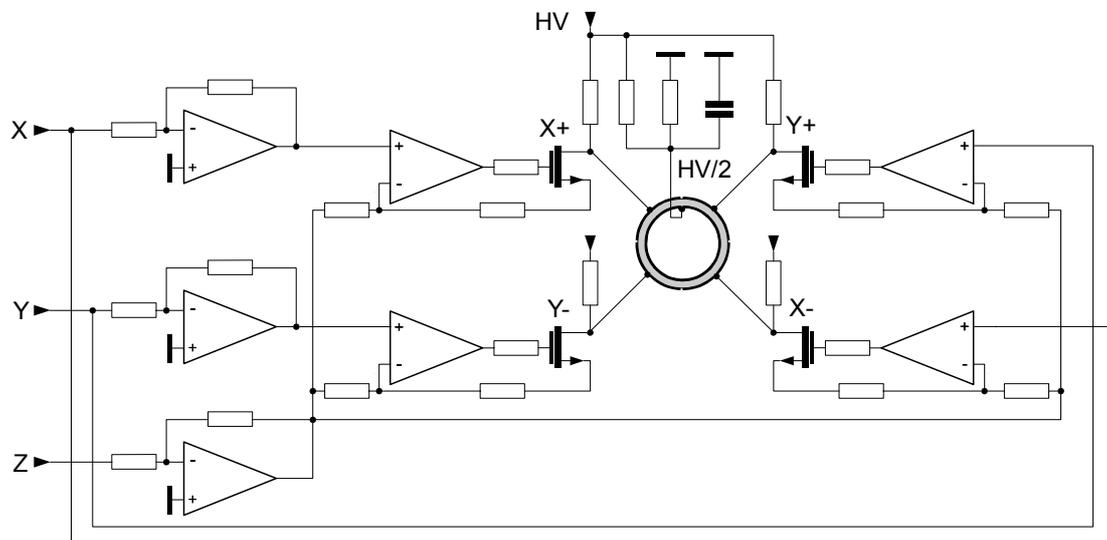
**Abb. 22: einfache Hochspannungsstufe zur Ansteuerung von Piezos**

Diese einfache Schaltung hat noch einige Nachteile. Zum einen ist die Ausgangsspannung nicht bipolar, sodass der mögliche Verstellweg der Piezos nur zur Hälfte ausgenutzt wird. Zum anderen ist der Ausgangswiderstand des Treibers relativ hoch. Dieser Widerstand bildet zusammen mit der Eigenkapazität der Piezos einen Tiefpass, welcher die maximale Scan-Frequenz begrenzt. Des Weiteren addieren sich Änderungen der Betriebsspannung auf die Ausgangsspannung. Bessere Ergebnisse erhält man, wenn die Schaltung zu einer Brücke erweitert wird. Dazu wird eine zweite identische Schaltung aufgebaut, die gegenphasig angesteuert wird. Der Piezo liegt dann zwischen den Drains der beiden V-Mosfets. Änderungen der Betriebsspannung wirken sich nun weniger aus, da sie auf beiden Stufen gleich wirken und am Piezo nur die Differenz zur Geltung kommt. Ein weiterer Vorteil der

Brückenschaltung ist der verdoppelte Längenhub der Piezos durch die nun bipolare Ansteuerung.



**Abb. 23: Schaltung des HV-Treiber mit diskreten Transistoren**



**Abb. 24: Schaltung des HV-Treiber für Röhrenscanner**

Mit zwei Brückenstufen kann der Scannertreiber für einen Röhrenscanner aufgebaut werden. Für jeden der vier Quadrantenelektroden auf dem Röhren arbeitet eine eigene Ausgangsstufe. Zwei Inverterstufen erzeugen die gegenphasigen Signale für die X- und die Y-Achsensteuerung. Die Z-Spannung wird an alle vier Quadranten gleichphasig angelegt. Die innere Elektrode des Röhrens wird mit einem Spannungsteiler auf die halbe Hochspannung gelegt, sodass trotz der unipolaren Versorgung eine symmetrische Ansteuerung möglich ist.

Zum Betrieb der vorgehenden Schaltungen wird ein Hochspannungsnetzteil benötigt, für die Schaltung mit Operationsverstärker ein bipolares, für die beiden anderen genügt eine einfache Ausgangsspannung im Bereich von 200 bis 300 Volt. Am einfachsten wird die Hochspannung mittels eines Netztrafos mit anschließender Gleichrichtung und Siebung erzeugt. Leicht erhältlich sind kleine Trenntrafos mit 220V Primär- und 220 V Sekundärwicklung. Nach der Gleichrichtung sind am Siebkondensator dann etwa 300 V zu erwarten. Während die Treiberschaltung mit Operationsverstärker und symmetrischer Ausgangsstufe Änderungen der Betriebsspannung gut ausgleichen, ist das bei der dritten, einfachen Schaltung nicht der Fall. Vor allem diese Schaltung verlangt eine gute Siebung der Betriebsspannung. Die Sieb- und Glättungskondensatoren dürfen nicht zu kleine

Werte aufweisen und sollten mindestens 100  $\mu\text{F}$  haben und eine Siebdrossel kann auch nicht schaden, um den 50Hz-Anteil klein zu halten.

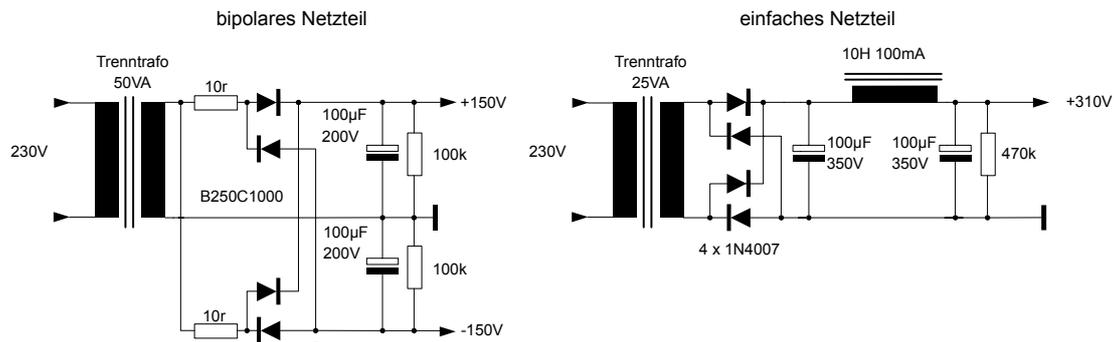


Abb. 25: Hochspannungsnetzteile

### Warnung!!!

Durch die hohen Kapazitäten haben die geladenen Elkos einen hohen Energieinhalt und können starke Stromschläge austeilen.

Wer sich den Umgang mit diesen Spannungen nicht zutraut, der sei auf das Tunnelmikroskop mit Piezobeeper-Scanner verwiesen, das ausschließlich mit niedrigen Spannungen arbeitet.

### 1.4.2. Niedervolt-Treiber

Scanner mit Bimorph-Piezo erreichen schon bei niedrigen Spannungen große Auslenkungen, deshalb können für die Ansteuerung normale Operationsverstärker eingesetzt werden. Wird anstelle des TL074 Verstärkers in der Endstufe der Typ OPA 445 eingesetzt, kann die Betriebsspannung sogar bis auf  $\pm 45\text{V}$  gesteigert werden. Inwieweit diese hohe Spannung den Piezo depolarisiert wurde noch nicht geprüft.

Für den Bimorph-Tripod-Scanner benötigt man drei identische Stufen zur Ansteuerung der X-, Y- und Z-Achse.

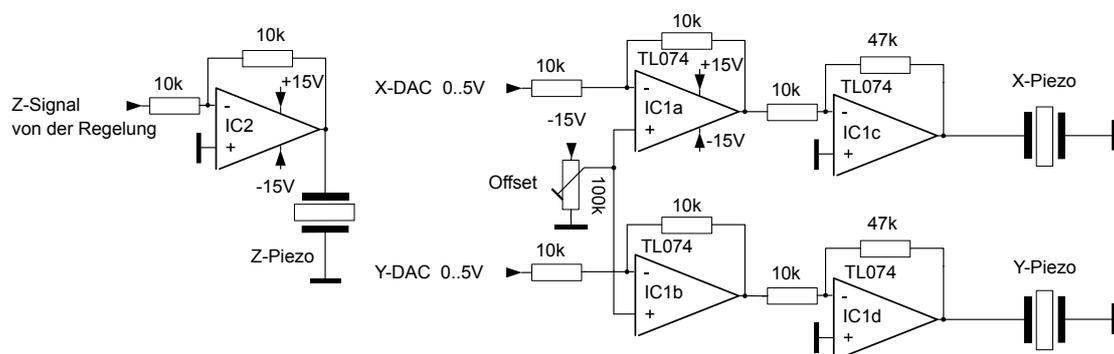
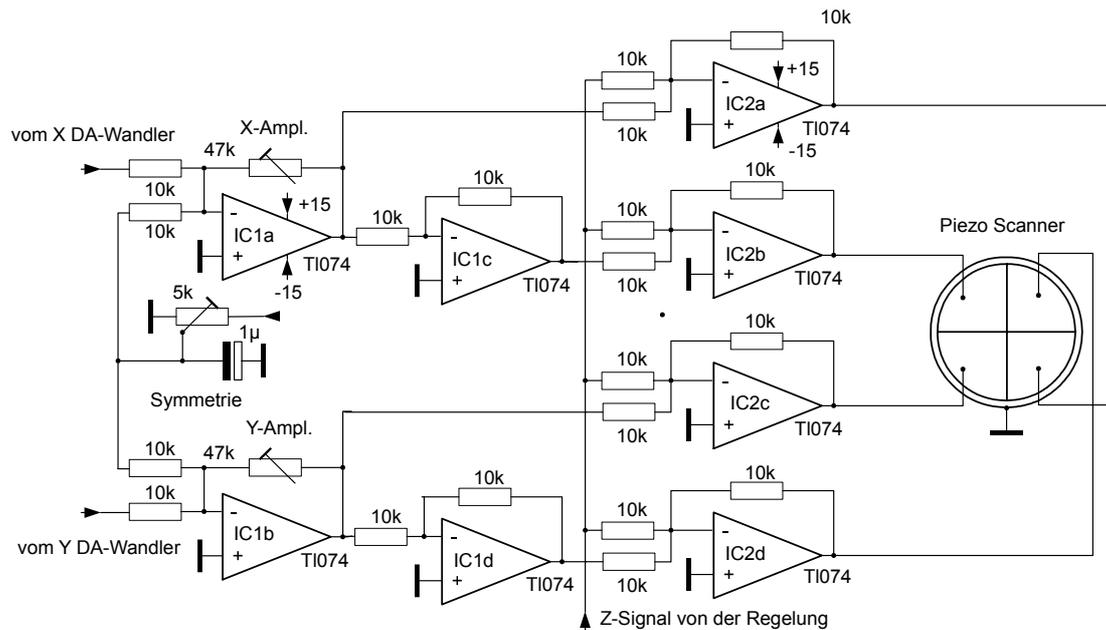


Abb. 26: Ansteuerung des Bimorph-Tripod-Scanners

Will man einen Röhren- oder Quadrantenscanner betreiben werden vier Steuerstufen benötigt, um die notwendigen gegenphasigen Signale zu erzeugen.



**Abb. 27: Ansteuerung des Quadranten- oder Röhrensanners**

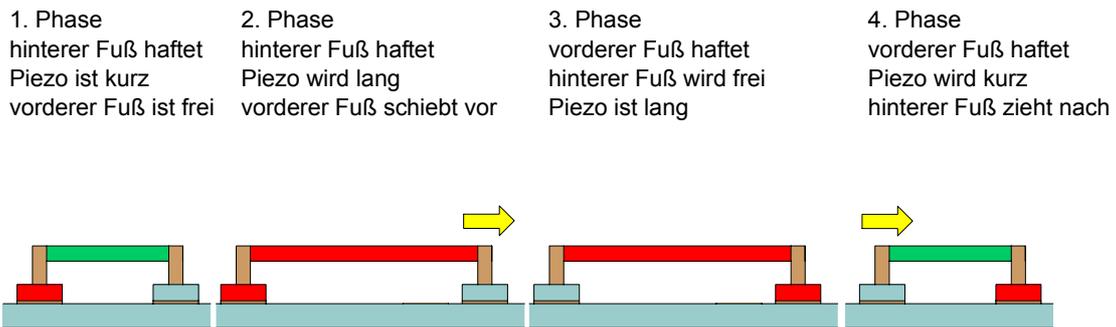
## 1.5. Grobannäherung

Die eben beschriebenen Scanner haben in der Z-Richtung einen Verstellweg von höchstens einigen Mikrometern. Damit die Regelung der Z-Achse überhaupt arbeiten kann, muss die Spitze der Probe auf diesen Abstand angenähert werden. Dabei darf die empfindliche Spitze auf keinen Fall die Probe berühren, da sie sonst leicht beschädigt wird. Für diese Grobannäherung wurden verschiedene Mechanismen entwickelt.

Binnig und Rohrer verwendeten eine elektronische „Laus“. Wie dieses Gerät zu seinem seltsamen Namen kam, ist dem Verfasser nicht bekannt, sinnvoller wäre die Bezeichnung „Raupe“ oder „Wurm“ weil die Bewegungen eher denen dieser Tiere ähneln.

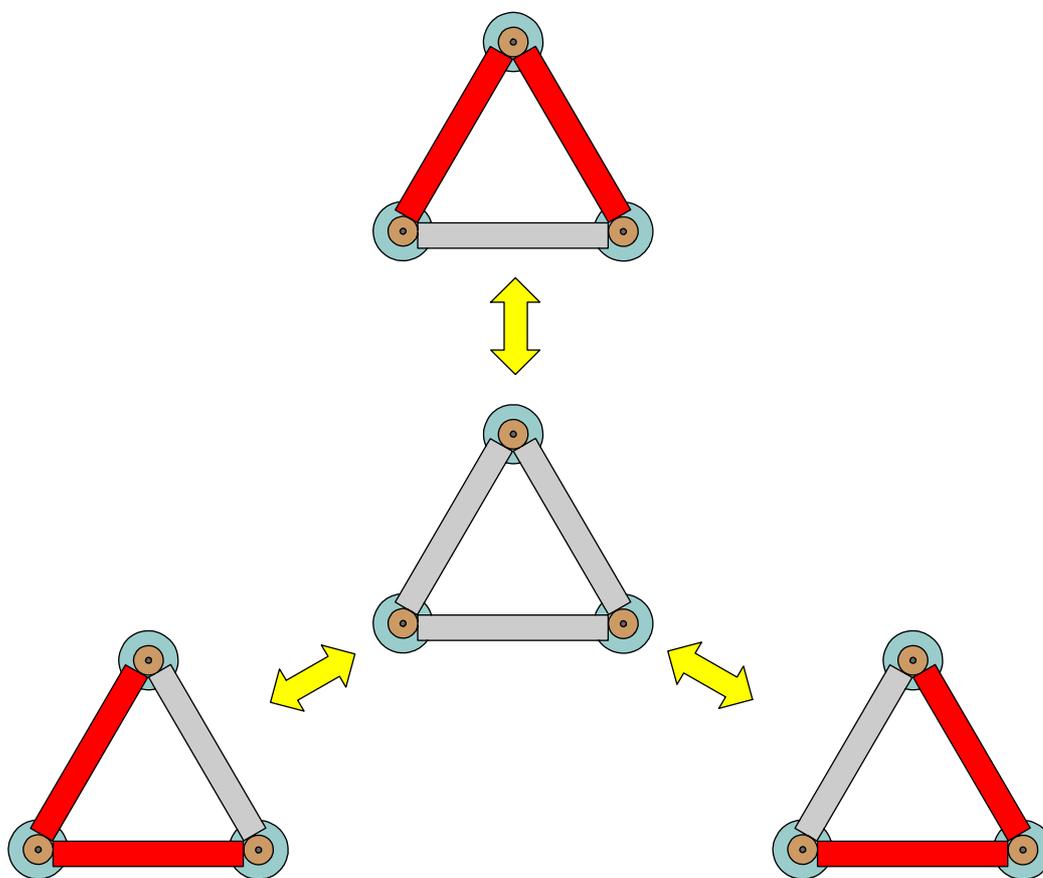
### 1.5.1. Elektrische Laus

Im einfachsten Fall besteht die „Laus“ aus zwei Füßen, die durch einen Stab aus piezoelektrischem Material verbunden sind. Die Füße sind aus Metall und von der ebenfalls metallischen Unterlage durch eine sehr dünne Isolierschicht getrennt. Um die Laus vorwärts zu bewegen, wird an den hinteren Fuß eine hohe Spannung angelegt, durch die elektrostatische Anziehung haftet der Fuß nun fest auf der Unterlage. Nun wird an den Piezostab Spannung gelegt, wodurch er länger wird und den freien, vorderen Fuß verschiebt. Anschließend wird der vordere Fuß durch Spannung fixiert, und der hintere Fuß freigegeben. In der letzten Phase der Bewegung wird die Spannung am Piezo umgepolt, der Stab verkürzt sich und der hintere Fuß wird nachgezogen. Für den nächsten Schritt werden die drei Phasen wiederholt. Die Schrittweite kann einfach über die an den Piezo angelegte Spannung eingestellt werden.



**Abb. 28: Funktion einer elektronischen Laus**

Wird die Laus mit drei Füßen gebaut, die durch drei Piezostäbe zu einem Dreieck verbunden sind, kann sie sich durch entsprechende Ansteuerung der Füße und Stäbe in alle Richtungen bewegen.



**Abb. 29: Laus mit drei Piezos die in alle Richtungen fahren kann**

Damit die Laus einwandfrei funktioniert, müssen sowohl die Oberfläche der Unterlage und die „Sohlen“ der Füße sehr glatt und die Isolierschicht dazwischen sehr dünn sein, eine Forderung, die beim Selbstbau nicht leicht zu erfüllen ist. Einfacher ist die Realisierung von elektromagnetischen Füßen, die auf einer Eisenplatte haften können. In diesem Fall bestehen die Füße aus halben Schalenkernen mit eingelegter Wicklung. Die Schalenkerne konzentrieren die magnetischen Feldlinien der Spulen und erhöhen so die Haftkraft. Auch für die elektromagnetischen Füße muss die Lauffläche sehr glatt sein, am besten hochglanzpoliert.

### 1.5.2. Elektromagnetischer Stepper

Einen nahezu unbegrenzten Verstellweg bei trotzdem kleiner Schrittweite haben auch Stepper. Im Folgenden wird ein elektromagnetisches Modell beschrieben, das leicht zu bauen ist und recht zuverlässig arbeitet. Das bewegliche Teil ist ein Schlitten, der auf drei Stahlkugeln steht und über eine ebene Glasfläche gleitet. Die glatte Glasoberfläche ist für die einwandfreie Funktion sehr wichtig damit Bewegung des Schlittens nicht durch örtliche Unebenheiten gestört wird. Der Antrieb des Schlittens besteht aus einem auf ihm befestigten Permanentmagneten und einer feststehenden Spule. Durch das Magnetfeld der Spule wird der Magnet und mit ihm der Schlitten in die Spule gezogen oder von ihr weg gedrückt. Wird das Magnetfeld der Spule durch kurze Strompulse erregt bewegt sich der Schlitten in kleinen Schritten vorwärts oder rückwärts. Die Schrittweite wird durch die Länge der Pulse und deren Amplitude bestimmt. Bei jedem Schritt muss erst die Haftreibung zwischen Schlitten und Glasplatte überwunden werden. Je kleiner die Reibung desto kleinere Schritte werden möglich.

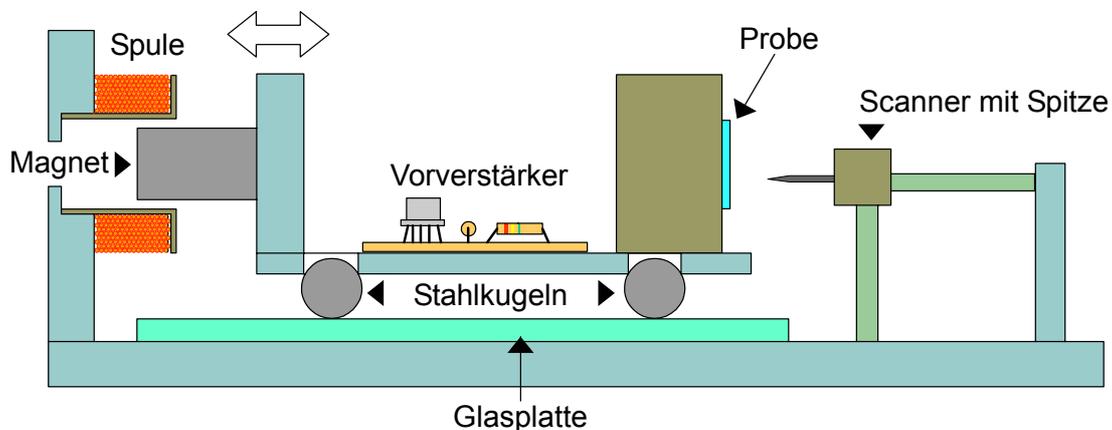
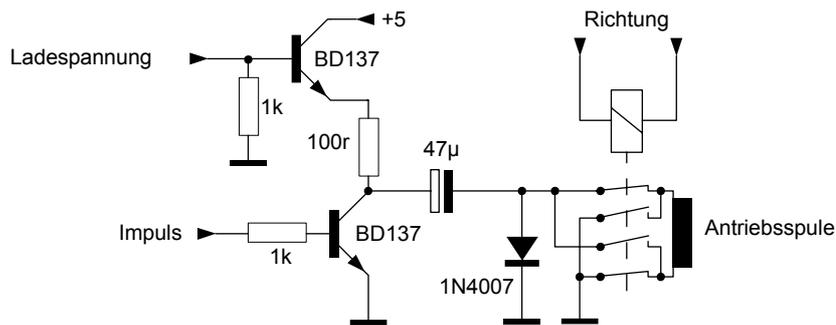


Abb. 30: Tunnelmikroskop mit elektromagnetischem Stepper

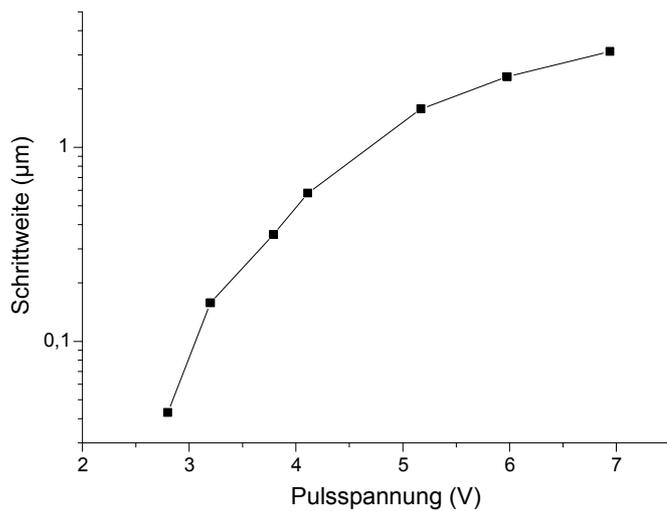
Ein großer Vorteil dieses Aufbaus ist die Möglichkeit der automatischen Ansteuerung. Dazu werden die Strompulse vom Steuerrechner erzeugt. Nach jedem Schritt wird mit einem Scan des Z-Piezos geprüft, ob der Spitzen-Probe-Abstand im Regelbereich liegt. Wenn dem so ist, kann der Scan des Rasterbildes begonnen werden, ansonsten wird ein weiterer Schritt ausgeführt. Auf diese Weise erfolgt die Grobannäherung automatisch und die Gefahr eines Spitzencrashes ist wesentlich geringer als bei einer Annäherung von Hand.

Der Magnet hat Zylinderform mit 10 mm Durchmesser und 10 mm Länge ([www.supermagnete.de](http://www.supermagnete.de)). Der Spulenkörper mit 13,5 mm Innendurchmesser und 9 mm Länge ist mit etwa 500 Windungen 0,2 mm CuL-Draht bewickelt. Der Wicklungswiderstand beträgt 12 Ohm. Der einfache Aufbau funktioniert überraschend gut.



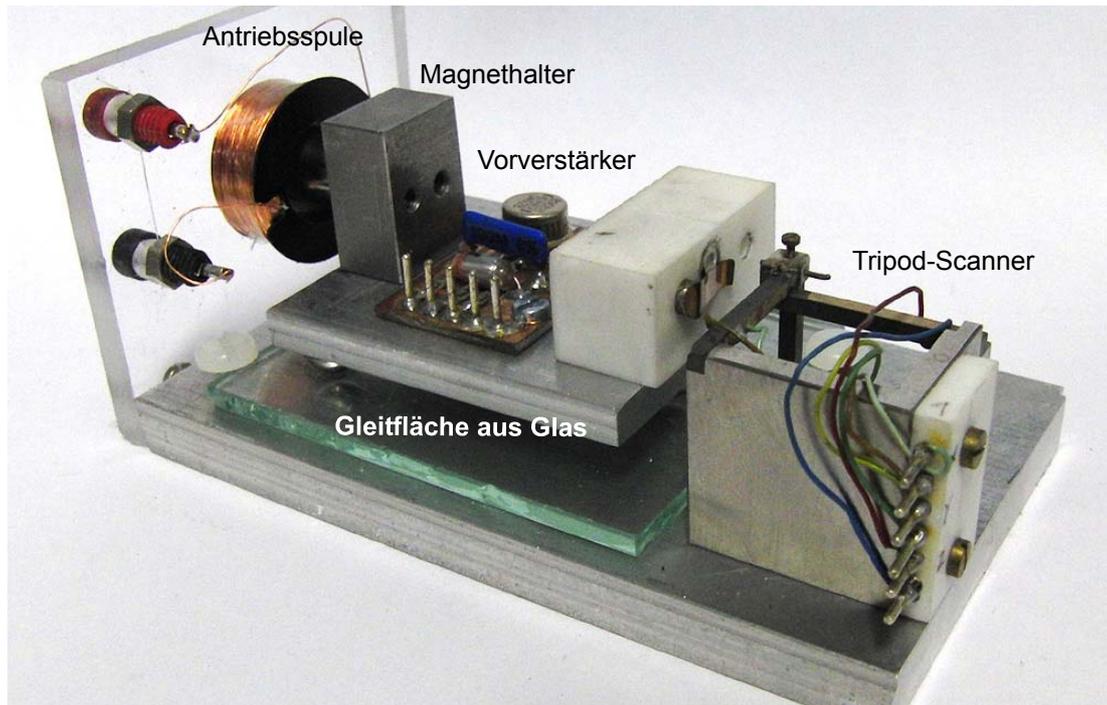
**Abb. 31: Schaltung der Steppersteuerung**

Die Strompulse werden mit einem 47  $\mu\text{F}$  Kondensator erzeugt. Der geladene Kondensator wird mit einem Transistor auf die Spule geschaltet. Ab einer Ladespannung von etwa 2,6 bis 2,7 Volt beginnt sich der Schlitten zu bewegen. Die Schrittweite hängt stark von der Ladespannung ab. Mit einer Spannung von 2,8 Volt macht der Stepper 43 Nanometer weite Schritte, bei 3,2 Volt sind es 158 Nanometer. Mit einem Relais kann die Strom- und damit die Verfahrrichtung umgeschaltet werden.

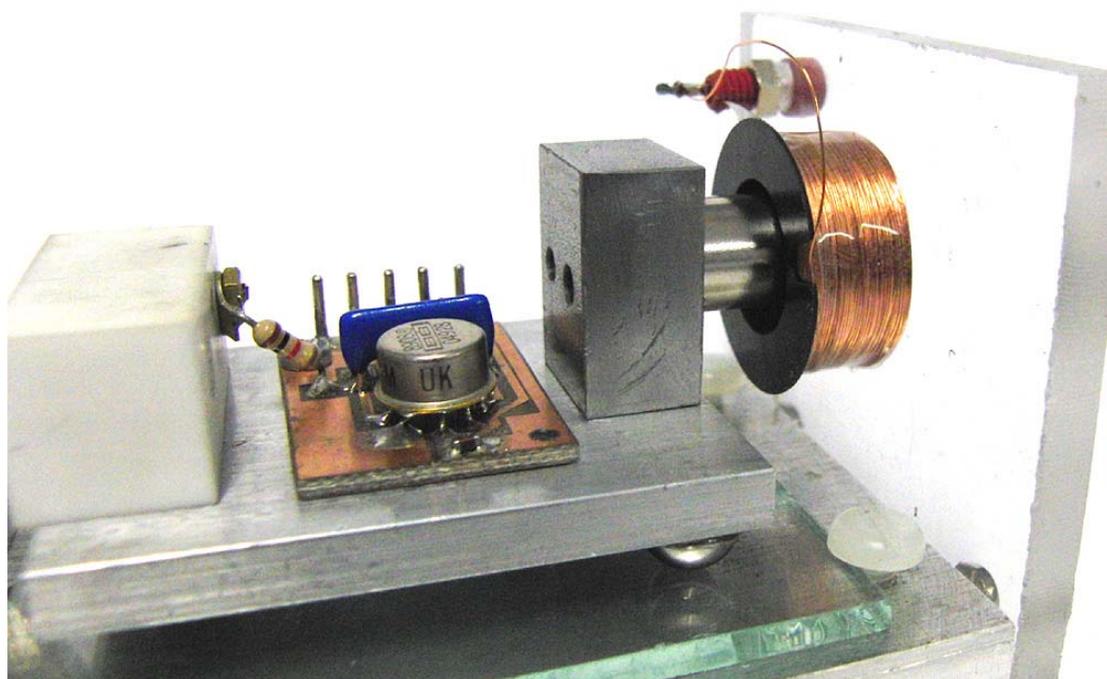


Pulsspannung	Schrittweite
2,8 V	0,043 $\mu\text{m}$
3,2 V	0,158 $\mu\text{m}$
3,8 V	0,356 $\mu\text{m}$
4,1 V	0,581 $\mu\text{m}$
5,1 V	1,579 $\mu\text{m}$
5,9 V	2,308 $\mu\text{m}$
6,9 V	3,125 $\mu\text{m}$

**Abb. 32: Spannungsabhängigkeit der Schrittweite**



**Abb. 33: Tunnelmikroskop mit Stepper und Tripod-Scanner**

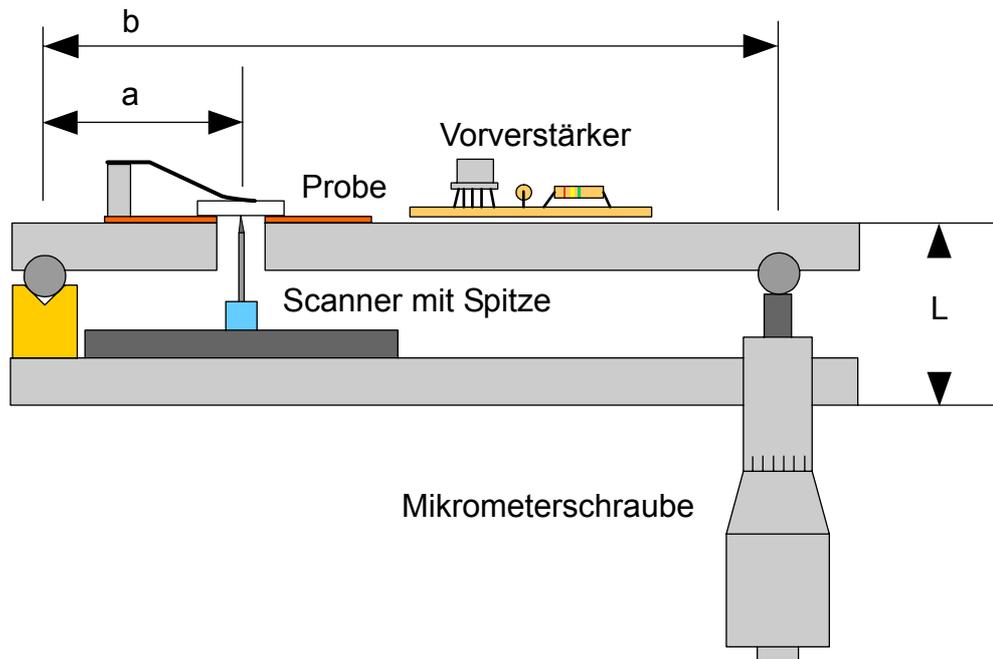


**Abb. 34: Der Magnet taucht in die Spule ein ohne sie zu berühren**

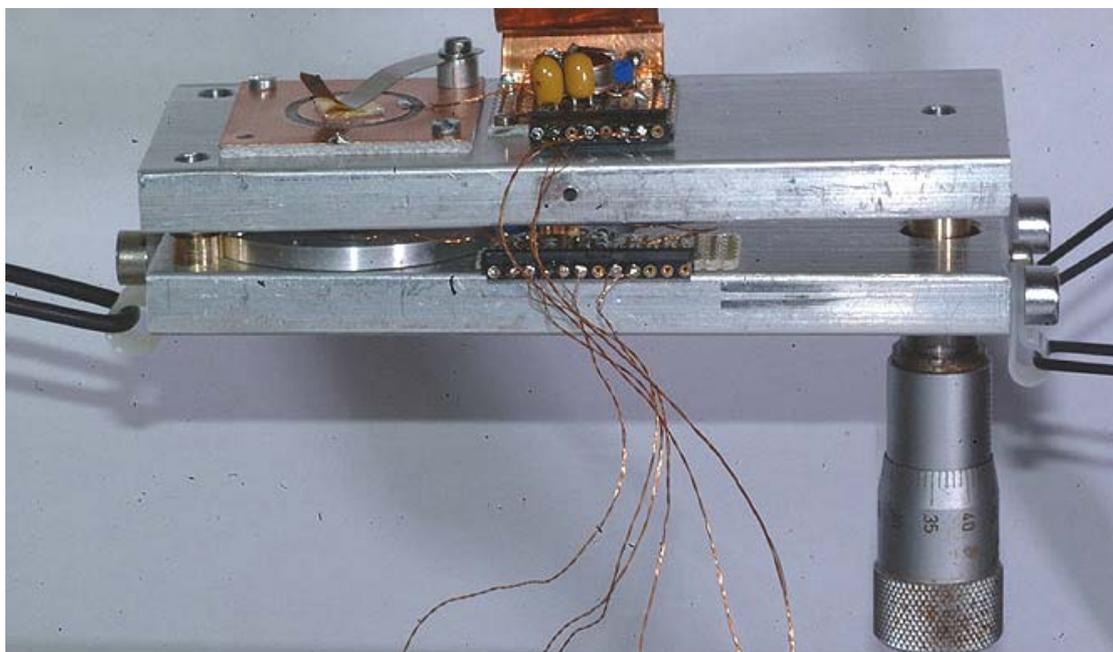
### **1.5.3. Hebeluntersetzung**

Relativ einfach ist der Aufbau einer Hebeluntersetzung.  
 Der Hebel wird mit einer Mikrometerschraube eingestellt. Übliche Mikrometerschrauben haben eine Steigung von 0,5 d.h. der Trieb bewegt sich um 0,5 mm bei

einer Umdrehung der Trommel. Durch die Hebeluntersetzung wird diese Bewegung um das Verhältnis der beiden Hebelarme verkleinert.



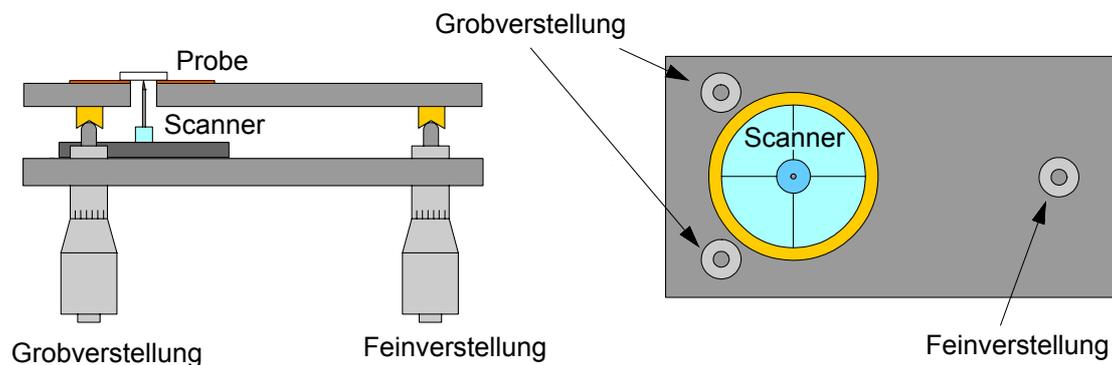
**Abb. 35: Hebeluntersetzung mit Mikrometerschraube**



**Abb. 36: Tunnelmikroskop mit Hebeluntersetzung**

Ein Nachteil dieser Mechanik ist der kleine Verstellweg. Je höher die Untersetzung und feinfühlicher die Einstellung umso kleiner wird der Verstellweg. Bei dem gezeigten Modell ist die Untersetzung etwa 10fach und der maximale Verstellweg der Spitze ein Millimeter. Mit einiger Sorgfalt lässt sich die Spitze in Mikrometerschritten verstellen. Besser ist ein Aufbau mit drei Mikrometerschrauben. Zwei der Schrauben sitzen nahe der Spitze, die dritte ist weiter entfernt. Werden alle drei Schrauben

gemeinsam verstellt, kann die Spitze bis auf einige hundertstel Millimeter angenähert werden. Zur Feinannäherung wird dann nur die dritte Schraube, die über die Hebeluntersetzung wirkt, allein gedreht.

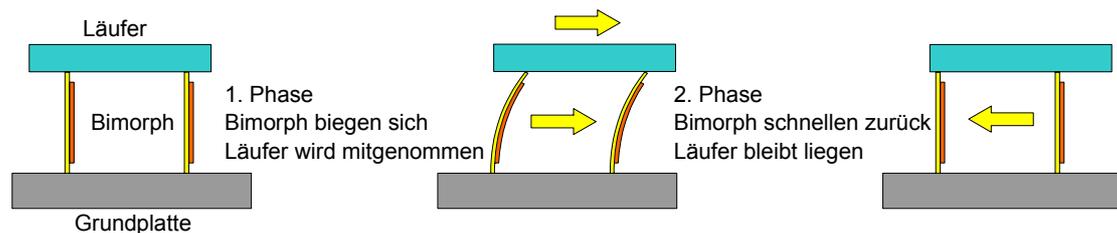


**Abb. 37: Tunnelmikroskop mit Hebeluntersetzung**

Besser wäre natürlich eine motorische Verstellung der Mikrometerschraube. Mikrometerschrauben mit eingebautem Motor, sogenannte Motormikes, kann man kaufen sind aber nicht gerade billig. Ein Selbstbau ist für Bastler mit feinmechanischem Geschick und den nötigen Werkzeug möglich aber nicht einfach. Es muss vor allem sichergestellt werden, dass Erschütterungen des Motors nicht auf den Hebelmechanismus übertragen.

#### 1.5.4. Feinverstellung durch Massenträgheit

Weit verbreitet sind heute Motoren, die mit der Massenträgheit arbeiten. In der einfachsten Form besteht so ein Motor aus einem schweren Läufer, der auf zwei Bimorphstützen liegt. Durch eine langsam ansteigende Spannung werden die Stützen gekrümmt und bewegen dadurch den Läufer in eine Richtung. Lässt man nun die Spannung an den Stützen schnell abfallen, schnellen sie in Ausgangsposition zurück. Der schwere Läufer bleibt jedoch durch seine Trägheit an seiner Position liegen.

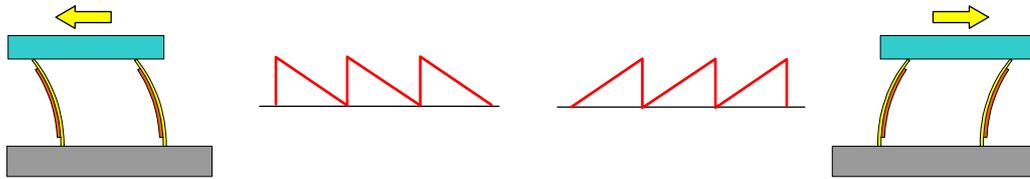


**Abb. 38: Massenträgheitsversteller**

Durch die Ansteuerung der Bimorphstützen mit einer Sägezahnspannung kann der Läufer in die eine oder andere Richtung verfahren werden.

negative Sägezahnspannung  
Läufer bewegt sich nach links

positive Sägezahnspannung  
Läufer bewegt sich nach rechts



**Abb. 39: Ansteuerung des Verstellers**

Die Amplitude der Sägezahnspannung bestimmt die Schrittweite des Verstellers. Durch die Verwendung von Bimorphpiezos können schon bei niedrigen Spannungen große Schrittweiten erreicht werden. Sind das Gewicht des Läufers, die Reibung auf den Stützen und die Sägezahnfrequenz gut aufeinander abgestimmt funktioniert der Trägheitsmotor recht zuverlässig.

Der praktische Aufbau besteht aus zwei Beeperscheiben, die auf eine Verbindungsplatte geschraubt sind. Wichtig ist natürlich, dass sich die Scheiben bei gleicher Polarität der Steuerspannung in die gleiche Richtung bewegen. Zwischen den oberen Enden der Scheiben wird ein Alustreifen eingeklebt, der wiederum vier kleine Stahlkugeln trägt. Diese Kugeln bilden die reibungsarmen Auflagepunkte für den rohrförmigen Läufer. Dieser besteht aus einem möglichst glatt polierten Metallrohr ausreichenden Gewichts. Auf einer Stirnseite des Rohrs wird der Probenhalter befestigt. Der Vorverstärker befindet sich, gut abgeschirmt im Rohr.



**Abb. 40: Trägheitsmotor mit Piezo-Beepern**

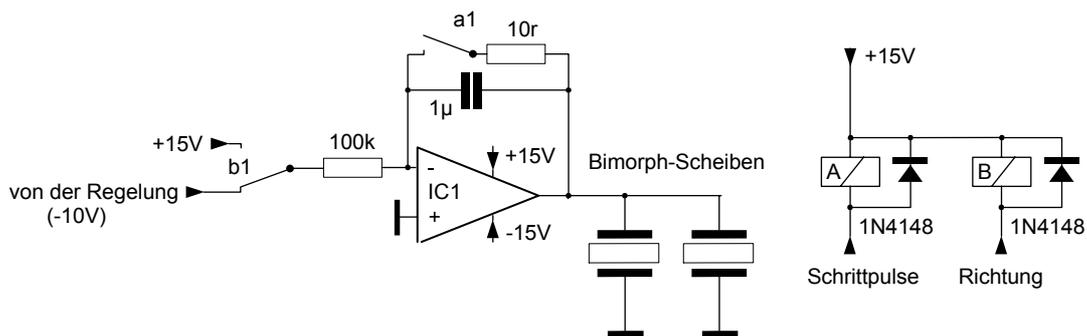
Die elektrischen Verbindungen des Vorverstärkers im Läufer müssen aus dünnem, weichen Draht sein, um die Bewegung nicht zu behindern. Ein Vorteil gegenüber dem elektromagnetischen Stepper ist, dass die die Vorwärtsbewegung langsam ist und jederzeit abgebrochen werden kann. So ist die Gefahr eines Spitzencrash wesentlich kleiner. Zudem ist mit dem Aufbau eine, langsame, Regelung der Z-Achse möglich.

Eine Messung ergab folgende Schrittweiten:

Sägezahnamplitude	Schrittweite
8 V	0,2 $\mu\text{m}$
10 V	0,5 $\mu\text{m}$
12 V	0,7 $\mu\text{m}$
14 V	1,3 $\mu\text{m}$

**Tab. 2: Abhängigkeit der Schrittweite von der Sägezahnamplitude**

Die Schaltung verwendet einen Integrator zur Erzeugung der Sägezahnspannung. Im Vorwärtsbetrieb wird der Ausgang der Regelung an den Eingang des Integrators gelegt. Die Regelspannung hat den negativen Maximalwert, da noch kein Tunnelstrom detektiert wird und am Ausgang des Integrators entsteht eine positive Rampe. Das Rücksetzen des Integrators und Zurückschnellen der Piezos erfolgt durch das Ansteuern des Relais A durch den Steuerrechner. Anschließend kann eine neue Rampe erzeugt werden. Ist die Spitze nahe der Probe, beginnt Tunnelstrom zu fließen, die Regelspannung geht zurück und die Vorwärtsbewegung wird gestoppt. Um zurückzufahren, wird der Eingang des Integrators an eine positive Spannung gelegt, sodass eine negative Rampe entsteht.

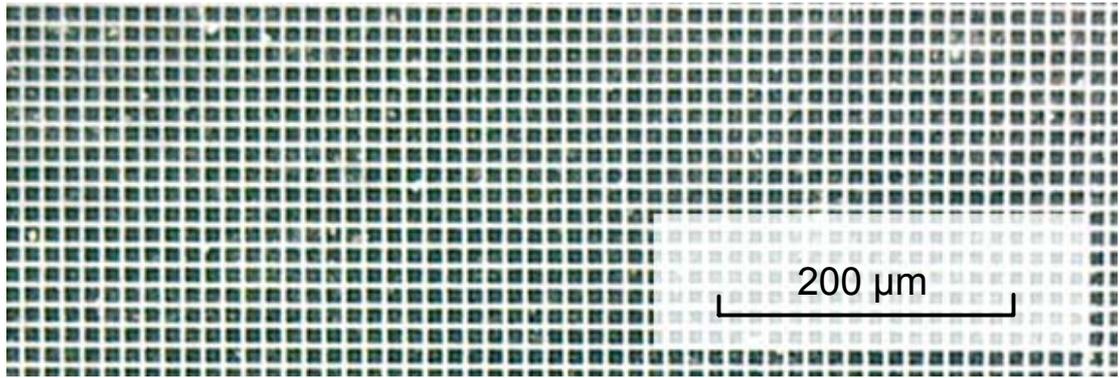


**Abb. 41: Schaltung des Piezomotors**

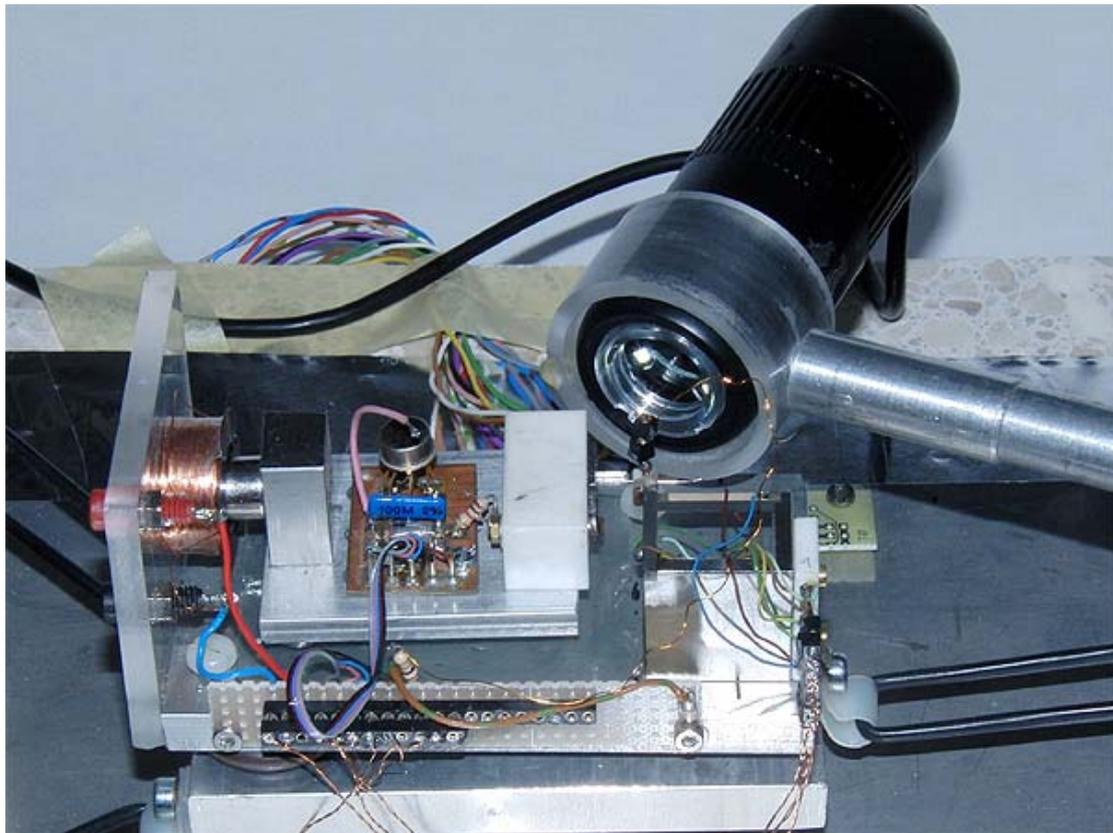
Zur Überwachung der Grobannäherung ist die Betrachtung der Spitze mit einem Mikroskop sehr nützlich. Bei reflektierenden Proben sieht man neben der Spitze auch das Spiegelbild der Probe auf der Oberfläche. So lässt sich der Abstand der Spitze von der Oberfläche ganz gut kontrollieren.

Die mittlerweile recht preiswerten USB-Mikroskope (Conrad, Best. Nr. 191220, 59.-€) eignen sich sehr gut zu diesem Zweck, da sie mit eingebauter LED-Beleuchtung geliefert werden.

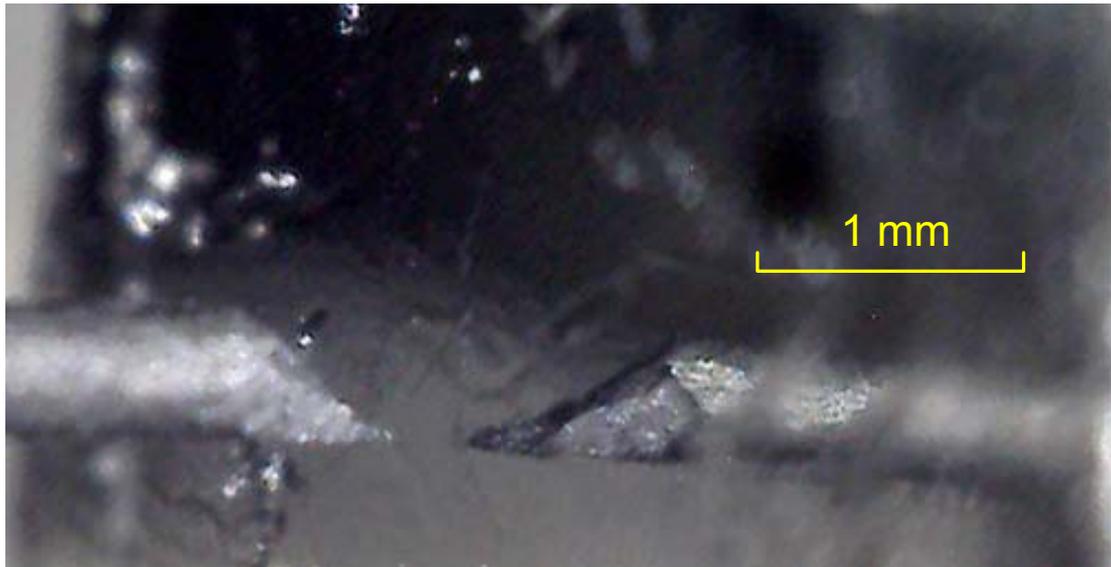
Auch ist die Qualität der einfachen Optik erstaunlich gut, wie eine Aufnahme eines Testgitters zeigt. Dieses Gitter hat ein Rastermaß von 12,5  $\mu\text{m}$ , die einzelnen Flächen haben eine Kantenlänge von 10  $\mu\text{m}$ .



**Abb. 42: Bild des Testgitters mit dem USB-Mikroskop**



**Abb. 43: USB-Mikroskop am Tunnelmikroskop**



**Abb. 44: Annäherung einer Grafitspitze an die HOPG-Probe**

## 1.6. Regelverstärker

Mit dem Regelverstärker wird der Abstand der Tunnelspitze von der Probenoberfläche konstant gehalten. Dazu wird der Tunnelstrom gemessen und mit einem Referenzwert verglichen. Die Differenz der beiden Werte ist die Regelabweichung. Sie wird nach Verstärkung und Filterung zur Einstellung der Z-Achsen Piezos verwendet.

Die üblichen Tunnelströme sind sehr klein, meist im Nanoamperebereich. Um diese kleinen Ströme störungsfrei messen zu können, wird ein Vorverstärker nahe der Tunnelstrecke platziert. Dieser Vorverstärker ist als Stromspannungswandler geschaltet. Für den hier eingesetzten Operationsverstärker kommt nur ein hochwertiger Typ infrage. Der Verfasser verwendet hierfür den zwar schon etwas älteren aber nach wie vor gut erhältlichen OPA 111 von Burr-Brown. Der OPA 111 besticht durch einen kleinen Biasstrom, Rauschmut und hohe Verstärkung bei großer Geschwindigkeit.

Der Gegenkopplungswiderstand von 47 Megaohm bestimmt den Wandlungsfaktor, der damit bei 0,047 V/nA liegt. Der 47 pF Kondensator trägt zur Stabilität bei, dieses Bauteil muss von hoher Qualität sein, geeignet sind Styroflex-Typen. Ein 1 kOhm Widerstand vor dem negativen Eingang schützt den Verstärker vor zu hohen Eingangsspannungen bei versehentlichen Spitzencrashes.

Die Biasspannung, welche für die Tunnelstrecke die Werte von einige zehn bis hundert Millivolt aufweisen sollte, werden mit einem Spannungsteiler aus einer stabilisierten Spannung erzeugt.

Abgesetzt vom Vorverstärker werden die weiteren Stufen der Regelung auf einer Eurokarte verschaltet. Mit dem auf die Eingangsstufe folgenden Instrumentenverstärker AD 524 wird das Signal weiter verstärkt und kann im Bedarfsfall invertiert und der Polarität der Biasspannung an der Spitze angepasst werden. Die Regelstufe mit einem TL 072 Verstärker vergleicht den Tunnelstrom mit dem einstellbaren Sollwert und erzeugt das eigentliche Regelsignal. Auf die Regelstufe folgt ein Integrator, dessen Zeitkonstante ein wichtiger Parameter zur Einstellung der Regelgenauigkeit und der Stabilität ist. Die korrekte Zeitkonstante hängt von den Parametern der Piezostellern und der Spitzencharakteristik ab und muss durch

Versuche ermittelt werden. Es empfiehlt sich die Kapazität nicht in die Platine, sondern auf Lötstiften zu befestigen, sodass sie leicht ausgewechselt werden kann. Ein günstiger Startwert ist 10 ms ( $100 \text{ k}\Omega \times 0,1 \mu\text{F}$ ), bei kleineren Werten kann die Regelung instabil werden und schwingen, größere Werte beeinträchtigen die maximale Scan-Geschwindigkeit.

Der Ausgang des Integrators steuert den Treiber für den Z-Piezo und auch den AD-Wandler zur Bilderzeugung. Die Stellung des Z-Piezo bestimmt den Grauwert der Pixel. Da die Ausgangsspannung des Integrators positive und negative Werte annehmen kann, der AD-Wandler aber nur positive Werte verarbeitet, ist eine Stufe zur Offset-Korrektur zwischengeschaltet.

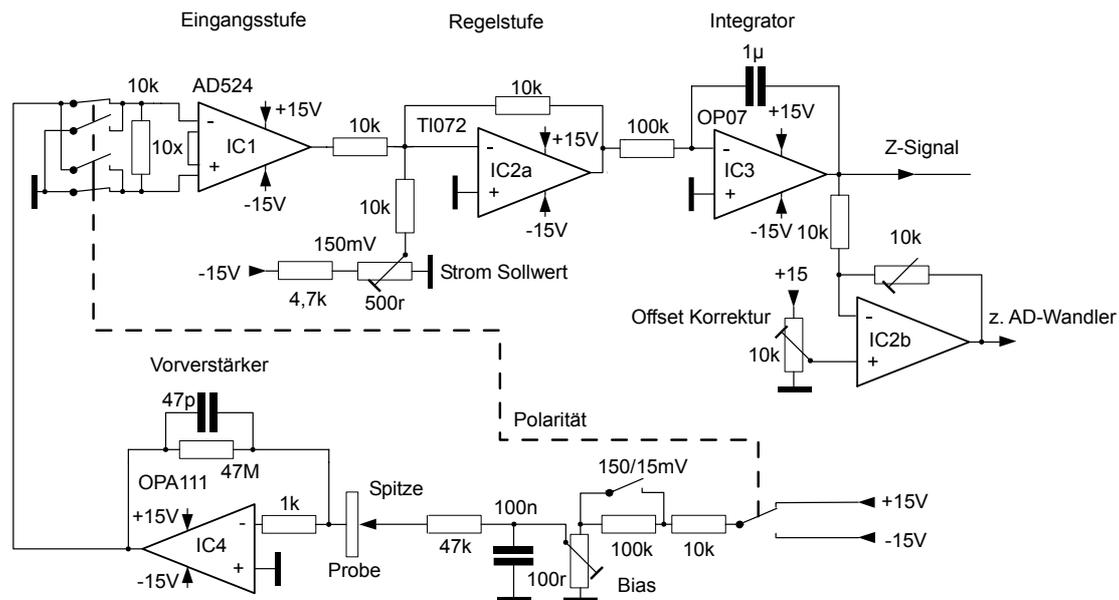
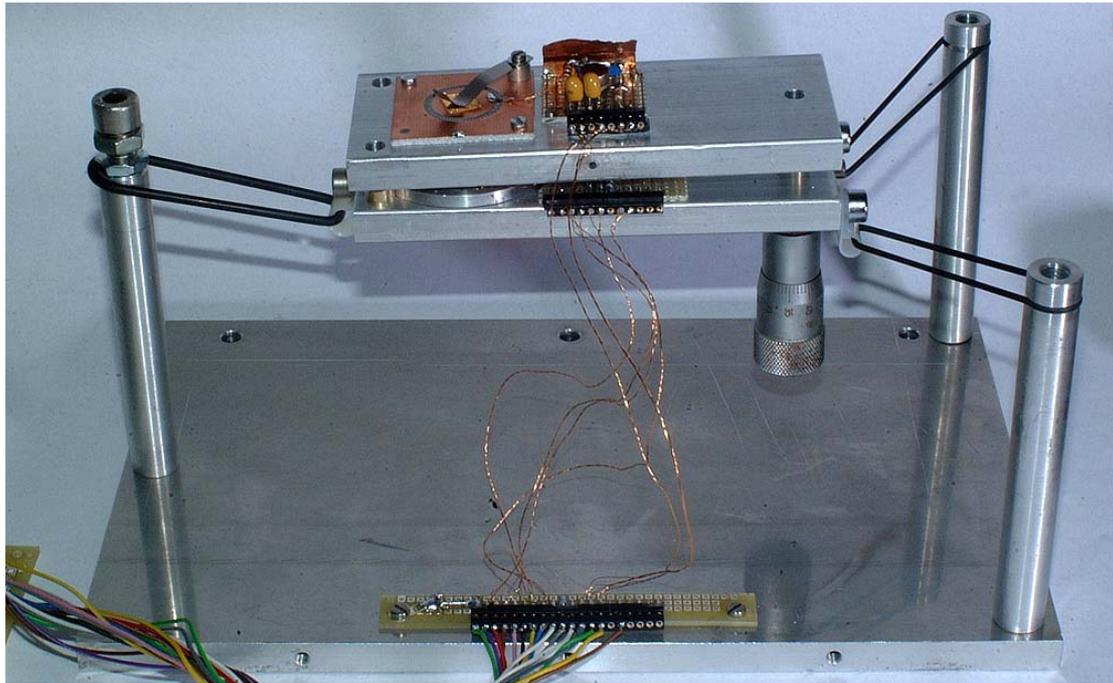


Abb. 45: Schaltung der Regelelektronik

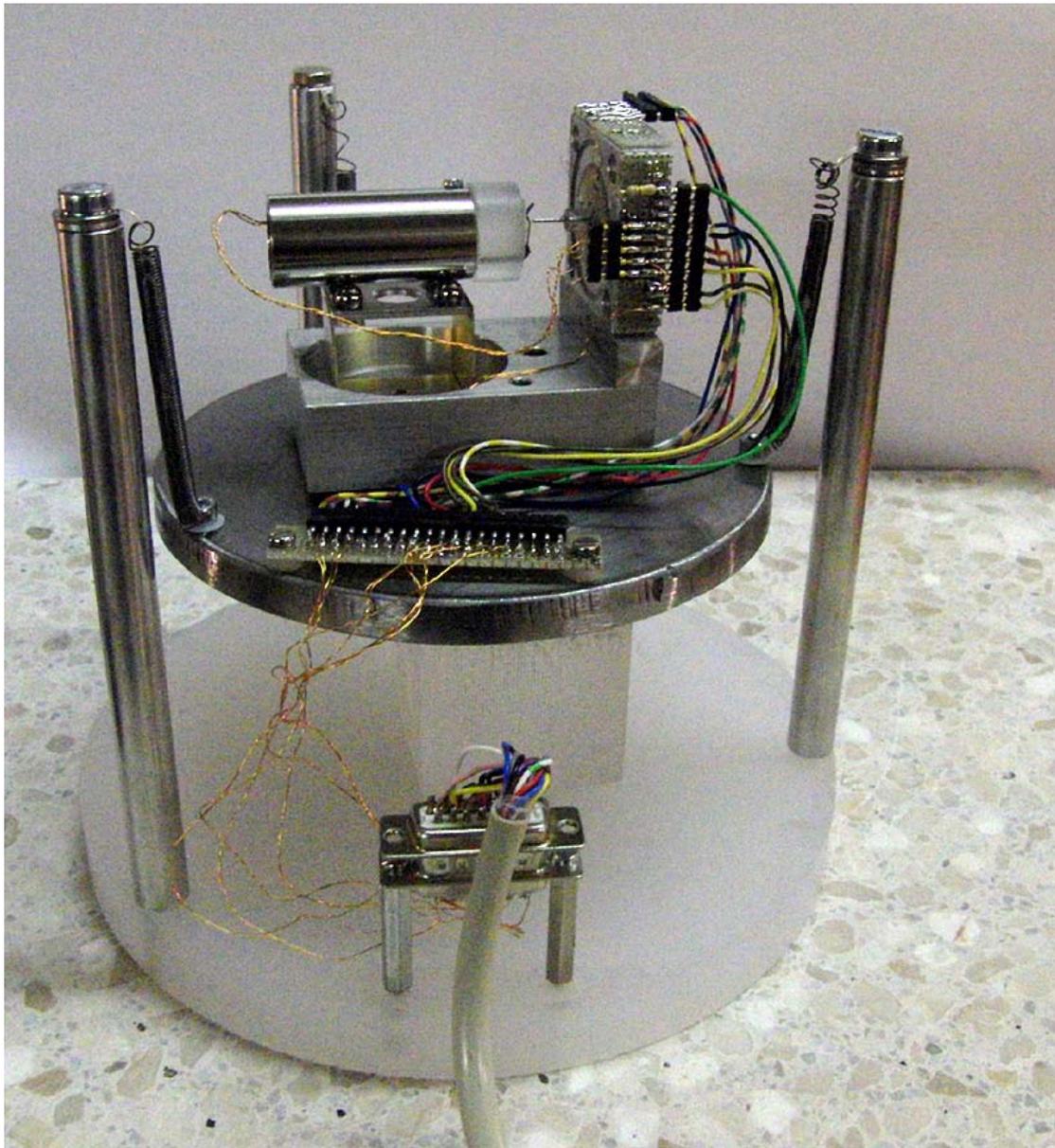
## 1.7. Schwingungsdämpfung

In den Anfängen der Tunnelmikroskopie wurde ein sehr großer Aufwand zur Dämpfung mechanischer Schwingungen getrieben. Das erste Tunnelmikroskop von Binnig wurde frei schwebend gelagert. Dazu hatte das Gerät Füße aus Permanentmagneten, die über einer supraleitenden Bleischale schwebten (magnetische Levitation). Natürlich funktioniert das nur bei sehr tiefen Temperaturen, die Sprungtemperatur von Blei liegt bei 7,2 Kelvin.

Für einfache Mikroskope reicht eine elastische Lagerung der Basisplatte mit Federn oder Gummiringen. Die Wahl der Federspannung ist ein Kompromiss. Sind die Federn nur schwach gespannt hat das System eine niedrige Grenzfrequenz, nur tiefe Frequenzen werden als Störung übertragen. Das ist an sich wünschenswert, aber weiche Federn haben auch den Nachteil einer geringen Dämpfung, das System schwingt nach einer Störung lange nach. In diesem Sinn ist die Verwendung von Gummiringen besser als die von Federn, da die innere Reibung im Gummi die Schwingungen schneller abbaut. Wichtig ist natürlich, dass nicht durch die Zuleitungen Schwingungen auf das Mikroskop übertragen werden. Deshalb müssen diese aus möglichst dünnem, weichem Kupferlackdraht sein. Um trotz der fehlenden Abschirmung keine elektrischen Störungen einzufangen, werden die Leitungen verdrillt.



**Abb. 46: Aufhängung mit Gummiringen zur Schwingungsdämpfung**



**Abb. 47: Aufhängung an Federn**

Eine besonders gute Entkopplung von Gebäudeschwingungen wird durch folgende Anordnung erreicht. Das Mikroskop steht auf einer möglichst schweren Platte, z. B. einer Terrassenplatte vom Baumarkt. Diese Platte wiederum ruht auf einem kleinen Fahrradschlauch.

### **1.8. Hochspannungsmikroskop**

Die folgende Beschreibung zeigt ein Tunnelmikroskop, das als Scanner einen Hochspannungstripod benützt.

### 1.8.1. Scankopf

Der Scanner besteht aus drei Piezostäbchen, die zu einem Tripod zusammengeklebt wurden. Die Ablenkempfindlichkeit beträgt 0,6 nm/V. Da die Ausgangsspannung der Treiber 300 Volt beträgt, ergibt sich ein Scan-Bereich von 180 nm in der X- und der Y-Richtung. Für die Z-Ablenkung wurde ein Brückentreiber verwendet, sodass sich hier eine Verfahrrweite von  $\pm 180$  nm, d.h. 360 nm ergibt. Am Verbindungspunkt der drei Piezostäbchen ist ein Isolator aus Macor aufgeklebt, in dem eine Stahlkapillare zur Befestigung der Spitze sitzt. Über diese Kapillare wird auf die Spitze die erforderliche Biasspannung gelegt. In der Biasleitung ist ein 10 kOhm Widerstand eingeschleift. Durch diesen Widerstand wird verhindert, dass sich im Berührungsfall die Zuleitungskapazität mit hohem Strom entladen kann.

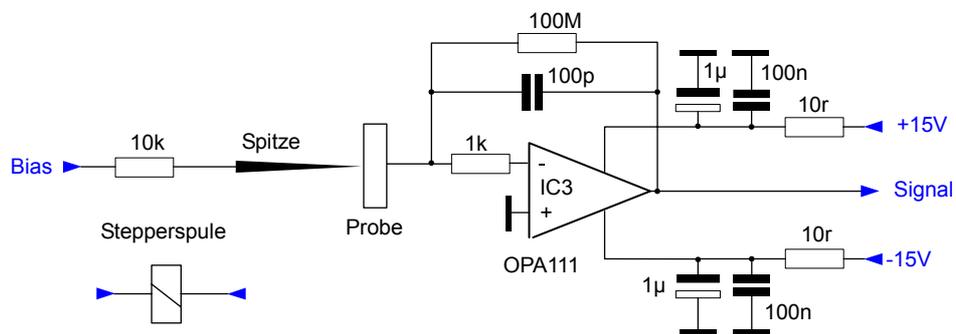


Abb. 48: Schaltung des Scan-Kopfes

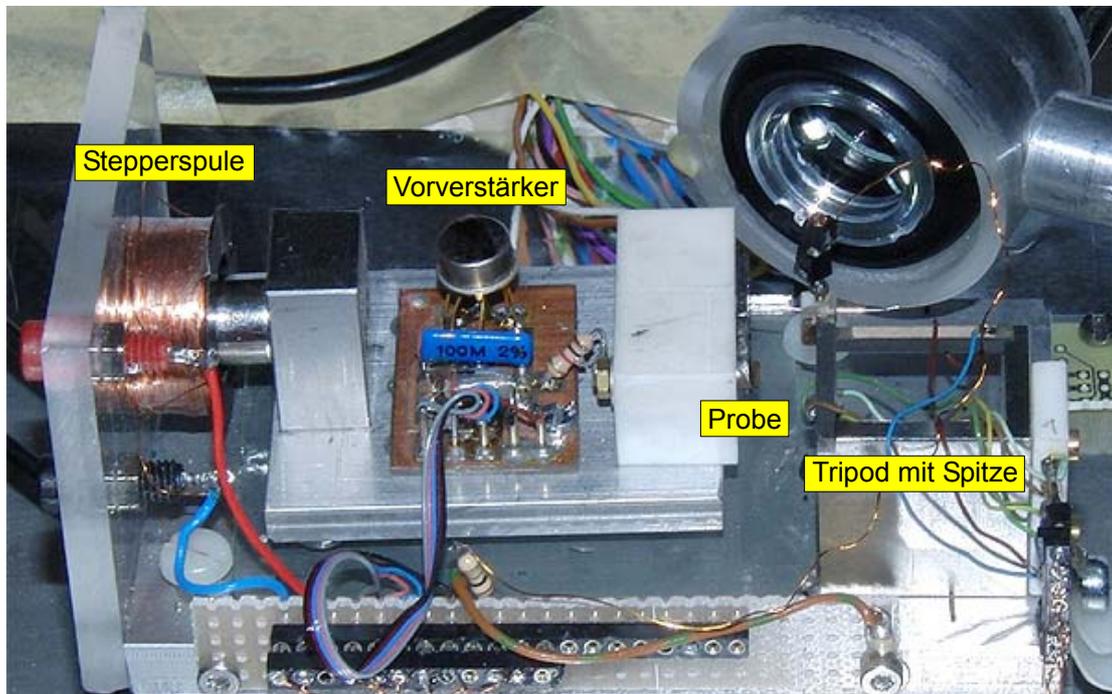


Abb. 49: Aufbau des Scan-Kopfes

Die Grobannäherung bewerkstelligt ein elektromagnetischer Stepper. Durch das Magnetfeld einer Spule wird ein Gleittisch mit einem Permanentmagneten bewegt. An der Vorderseite des Gleittischchens wird auf einem Isolatorblock die zu untersuchende Probe befestigt. Im vorliegenden Gerät besteht der Block aus Macor, genauso gut kann aber auch Plexiglas verwendet werden. Die Befestigung erfolgt mit einer kleinen Klemme aus Federbronze. Über diese Klemme ist Probe mit dem Eingang des Vorverstärkers verbunden. Der Vorverstärker ist mit einem OPA 111 bestückt und als Stromspannungswandler geschaltet. Der Gegenkopplungswiderstand von 100 M $\Omega$  bestimmt den Konversionsfaktor der 0,1 V/nA beträgt. Der 100 M $\Omega$  Widerstand ist mit einem 100 pF Styroflexkondensator überbrückt. Der Kondensator begrenzt die Bandbreite des Verstärkers und unterdrückt Störspitzen und Rauschen. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit sollte der gesamte Scankopf mit Alublech oder improvisiert mit Alufolie abgeschirmt werden. Die Grundplatte des Scan-Kopfes aus Aluminium ist mit Gummiringen an vier Stäben aufgehängt.

### 1.8.2. Hauptplatine

Auf dieser Platine ist die gesamte Schaltung außer dem Scankopf, dem Interface und dem Netzteil aufgebaut.

Das Tunnelnsignal vom Vorverstärker wird mit einem Instrumentenverstärker (IC1 AD524) zehnfach, bzw. einfach verstärkt. Die Wahl der Verstärkung geschieht mit einer Steckbrücke. Die Biasspannung an der Tunnelstrecke kann durch ein Potentiometer und einer Steckbrücke im Bereich von 0..100 mV und 0..1V eingestellt werden. Ein Umschalter gestattet die Wahl der Polarität der Biasspannung. Zwei weitere Ebenen dieses Schalters invertieren die Polarität des Tunnelnsignals, damit die korrekte Regelrichtung erhalten bleibt.

Auf den Instrumentenverstärker folgt die Eingangsstufe des Regelverstärkers (IC2a TL072). In dieser Stufe wird das Tunnelnsignal mit dem Sollwert verglichen und das Regelsignal generiert. Der Sollwert kann mit einem Poti im Bereich von 0..0.6 V verändert werden. Je nach Verstärkung von IC1 wird auf einen Tunnelstrom von 0..0,6 nA bzw. 0..6 nA geregelt.

Das Regelsignal wird mit getrennten Stufen für den Integral- (IC3 OP07) und Proportionalanteil (IC2b TL072) weiter verstärkt. In der folgenden Stufe (IC4a TL074) werden beide Anteile kombiniert. Durch Änderung der Gegenkopplung kann die Regelverstärkung eingestellt werden. Das Ausgangssignal dieser Stufe steuert den Hochspannungsverstärker für den Z-Piezo und wird auch über eine Anpassstufe (IC 7b) dem AD-Wandler zugeführt. Durch die Anpassstufe wird das Signal an den Eingangsbereich des AD-Wandlers angeglichen. Über den zweiten AD-Kanal wird parallel das Tunnelstromsignal aufgezeichnet. Auch in diesem Signalverlauf ist eine Verstärkerstufe (IC 7a) zur Anpassung eingefügt.

Der Hochspannungsverstärker zum Antrieb des Z-Piezos ist als Brückenstufe ausgeführt. Der gegenüber einer einfachen Stufe etwa doppelte Bauteilumfang ist durch mehrere Vorteile gerechtfertigt. Zum einen werden durch die symmetrische Schaltung Einflüsse von Betriebsspannungsschwankungen verringert und zum anderen wird durch die bipolare Ansteuerung des Piezos dessen mögliche Längenänderung verdoppelt. Der richtige Arbeitspunkt der Brückenstufe wird mit zwei Potentiometern auf die halbe Betriebsspannung an den Drainanschlüssen der BUZ 80 Transistoren eingestellt.

Auch die beiden Verstärker (IC 5) für die Ablenkung in X- und Y-Richtung sind in den Endstufen mit VMos-Fet Transistoren ausgestattet. Allerdings wird hier, um Bauteile und Platz zu sparen nur eine einfache, unsymmetrische Variante der Schaltung verwendet. Beide Kanäle werden durch DA-Wandler angesteuert. Zwei

Potentiometer passen die Ausgangssignale der DA-Wandler an die Aussteuerbereiche der Hochspannungsstufen an.

Der elektromagnetische Stepper wird mit Transistoren gesteuert. Zur Erzeugung des Strompulses wird ein geladener Kondensator mit einem Transistor auf die Treiberspule geschaltet. Durch diese Schaltung ist die Dauer des Pulses nicht von der Zeitdauer des Ansteuerpulses abhängig. Zum Ändern der Schrittrichtung wird der Stromfluss in der Treiberspule mit einem Relais umgepolt. Ein weiterer Kontaktsatz des Relais verändert auch die Ladespannung und damit der Schrittweite. So können für den Vor- und Rücklauf unterschiedliche Schrittweiten eingestellt werden. Für den Vorlauf sollten kleine Schrittweiten eingestellt werden, damit nicht die Spitze in die Probe gerammt wird. Bei einer Schrittfrequenz von 10 Hertz und einer Schrittweite 50 nm dauert es über eine halbe Stunde, um die Spitze aufzusetzen, wenn sie am Anfang einen Abstand von einem Millimeter hatte. Zum Abheben der Spitze kann man viel größere Schritte einstellen.

Die letzte zu besprechende Baugruppe auf der Platine ist die Referenzspannungsquelle. Hier wird die stabile Spannung einer Zenerdiode mit einem Operationsverstärker (IC6a TL072) gepuffert und in einer weiteren Stufe (IC6b TL072) eine Referenzspannung invertierter Polarität erzeugt.

Nicht im Schaltplan eingezeichnet sind die Kondensatoren (10µf, 0,1 µF), die an passenden Stellen zur Pufferung der Betriebsspannung eingelötet sind.



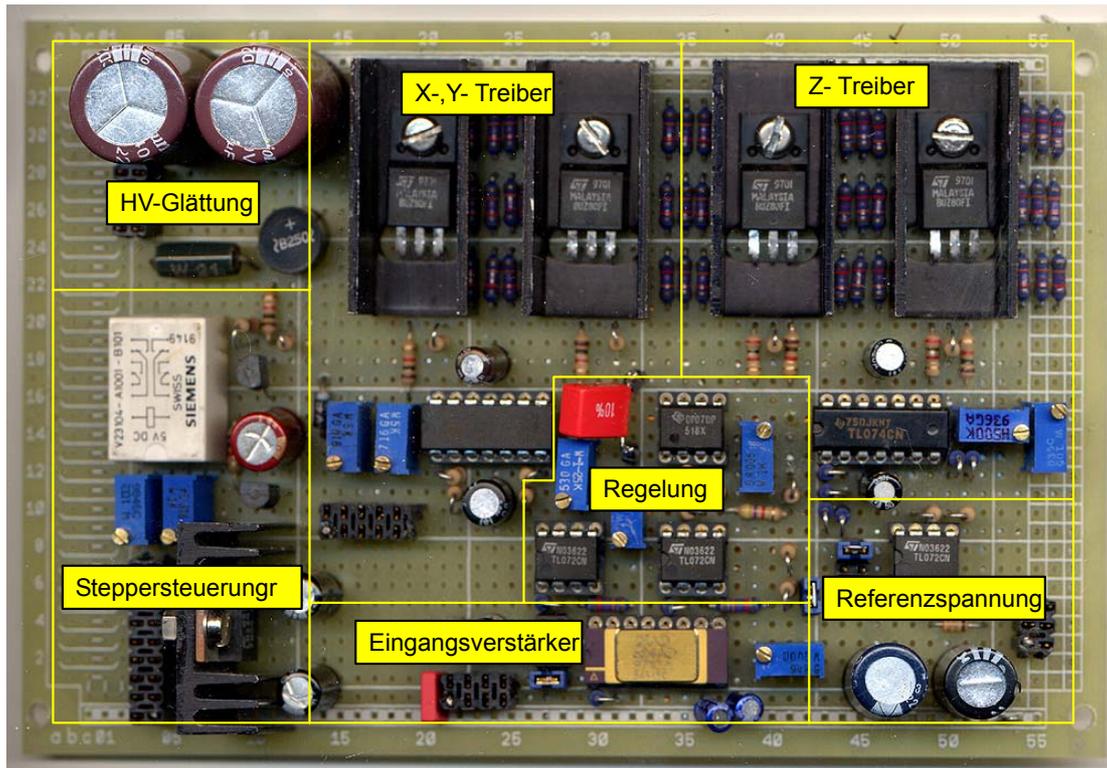
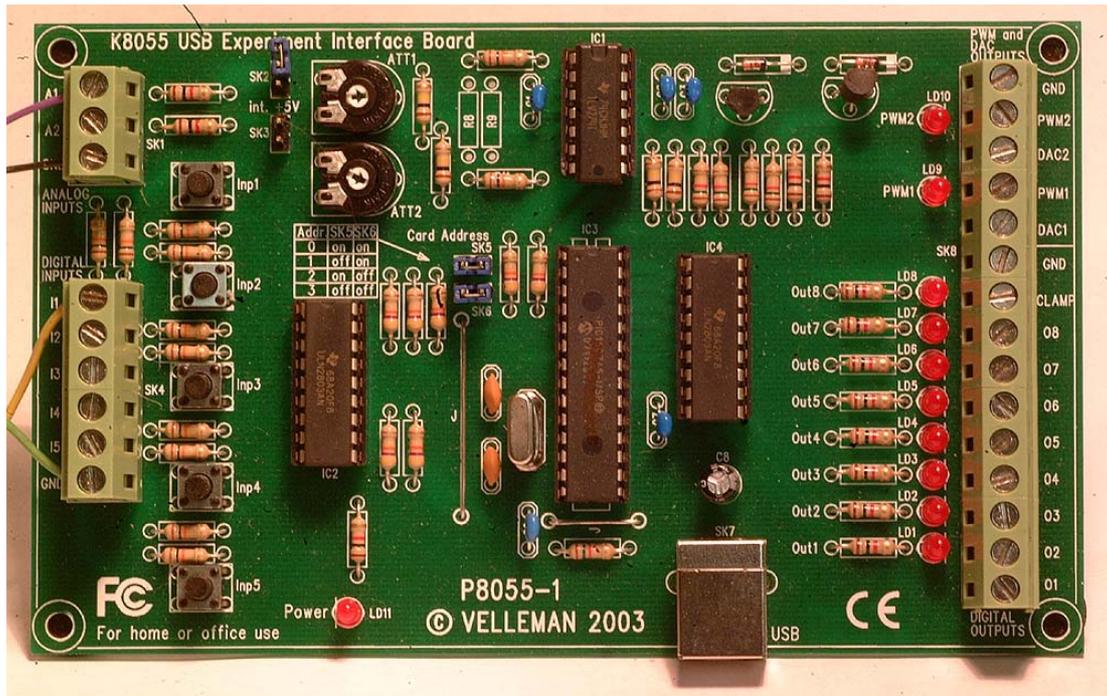


Abb. 50: Aufbau der Schaltung auf einer Lochrasterplatine

### 1.8.3. Betriebsprogramm

Wie schon erwähnt werden die folgenden Mikroskope mit einem PC gesteuert, der die X- und Y-Achsenablenkung übernimmt und auch die Regelspannung der Z-Achse und den Tunnelstrom aufzeichnet. Die Verbindung zwischen PC und Mikroskop erfolgt über ein USB-Interface, welches mindestens zwei Analogausgänge, zwei Analogeingänge und zwei Digitalausgänge hat. Der Verfasser verwendet die preisgünstige USB-Interfacekarte K8055 von Velleman. Ein einfaches Einbinden der Karte in eigene Software ist durch die mitgelieferten DLL's (dynamic link libraries) gewährleistet. Das eigentliche Betriebsprogramm ist in der Pascal-Sprache Delphi geschrieben.



**Abb. 51: USB-Interface Karte von Velleman**

Die Spannungen für das Scan-Raster werden durch zwei geschachtelte Schleifen erzeugt. Die äußere Schleife steuert den DA-Wandler für die Y-Achse, die innere die X-Achse. In der inneren Schleife werden für jeden Rasterpunkt der zugehörige Wert der Z-Piezospaltung und der Tunnelstrom gemessen, angezeigt und aufgezeichnet. Wichtig ist das nach einer gescannten Zeile die Scan-Spannung nicht auf den Anfangswert springt, sondern diesen Wert langsam erreicht. Ein Spannungssprung würde die Z-Achsenregelung stark stören. Die Scan-Spannung muss statt einem Sägezahn- eine Dreiecksform haben.

Ein weiteres Programmmodul besorgt die Grobannäherung der Spitze mit dem elektromagnetischen Stepper. Hierzu werden über einen Digitalausgang Impulse erzeugt, die den Stepper in kleinen Schritten vorwärts bewegen. Nach jedem Schritt wird gemessen ob schon Tunnelstrom fließt. Ist ein Tunnelstrom messbar, wird der Vorgang beendet, ansonsten ein weiterer Schritt generiert.

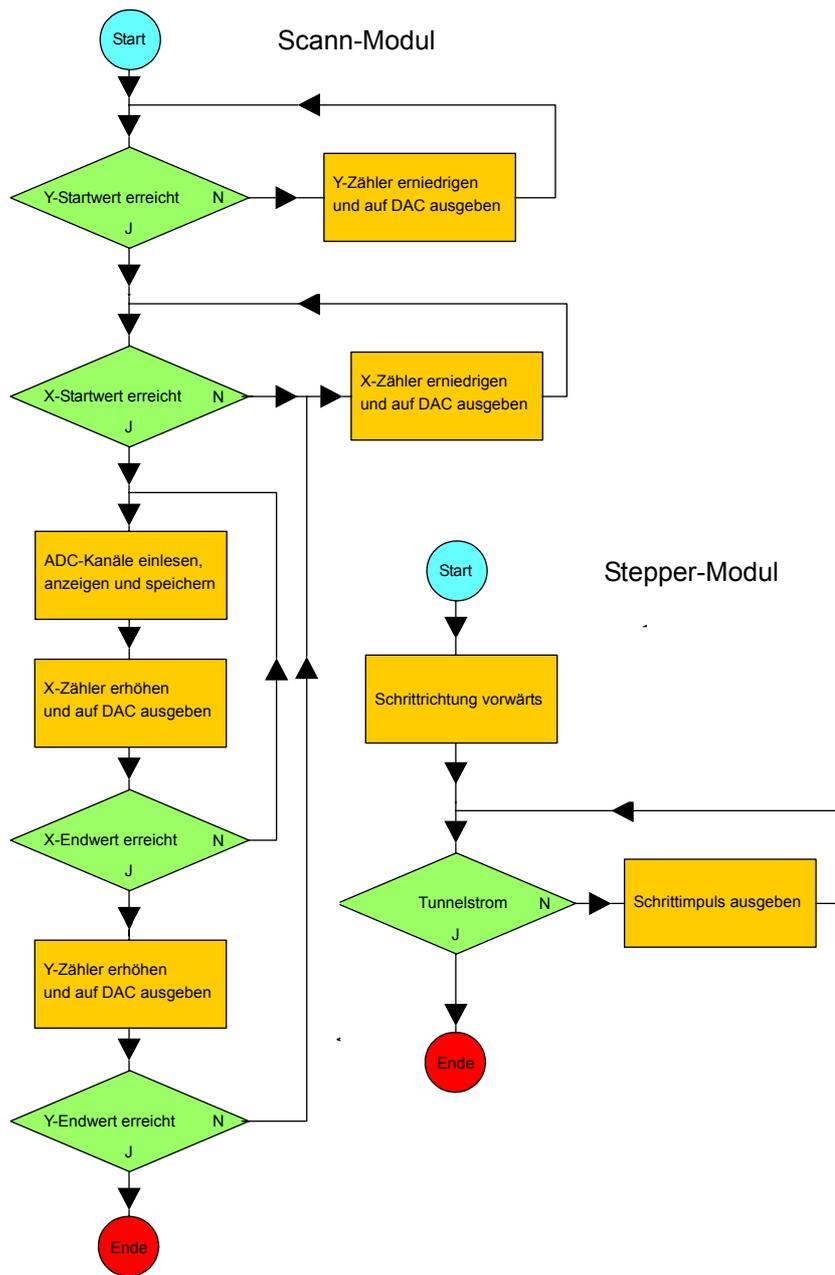


Abb. 52: Ablaufdiagramm des Messprogramms

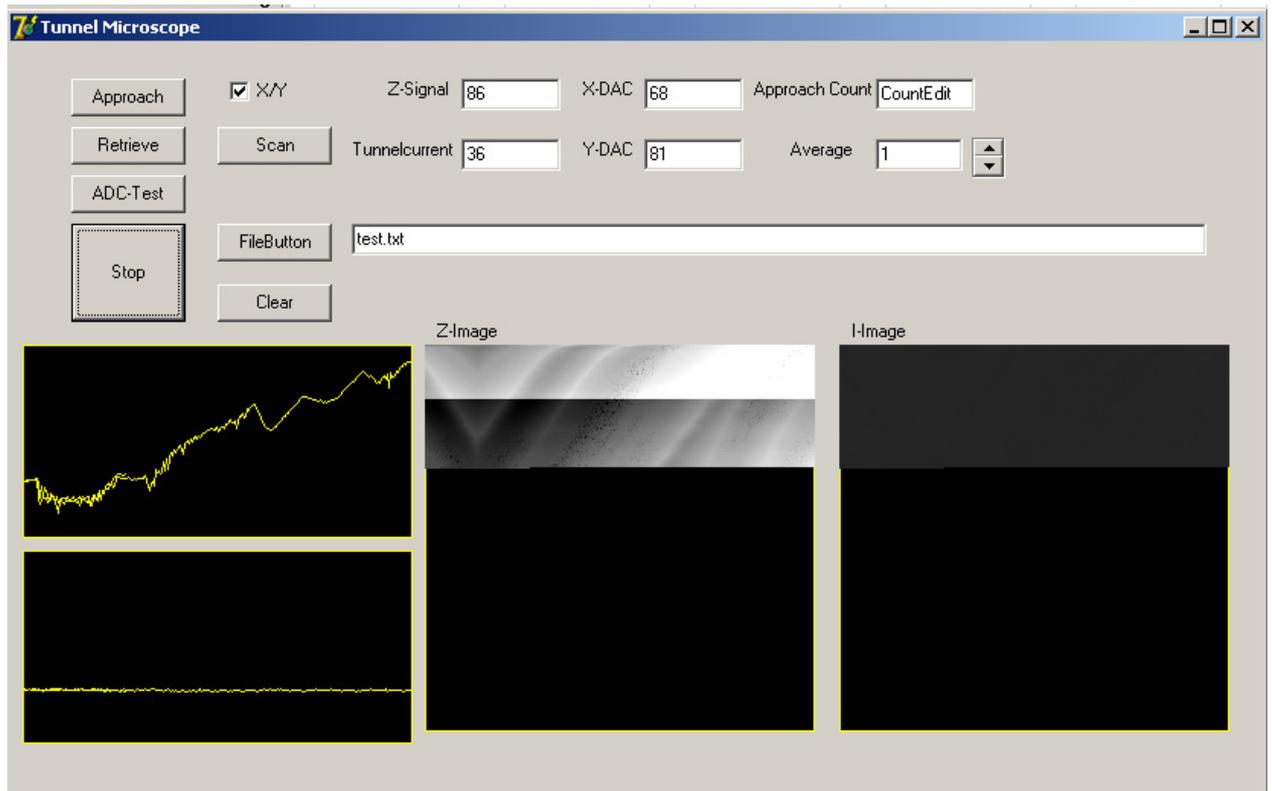


Abb. 53: Screenshot des Betriebsprogramms

#### 1.8.4 Betrieb des STMs

Hat man alles zusammengebaut, kann man das Mikroskop in Betrieb nehmen. Als erstes müssen die Arbeitspunkte der Hochspannungstreiber eingestellt werden. Dazu werden die Messpunkte MP 4 und MP 5 mit Masse verbunden. Mit dem Arbeitspunkt-Potentiometer wird nun am Messpunkt MP 6 bzw. MP 7 die halbe Betriebsspannung (ca. 155 Volt) eingestellt.

Die Treiber für die X- und Y-Achse werden mit den Scanbereichs-Potenziometern eingestellt. Dazu wird die maximale Spannung über die DA-Wandler ausgegeben und die Potentiometer so justiert, dass an den Messpunkten MP 8 und MP 9 etwa 10 Volt anliegen.

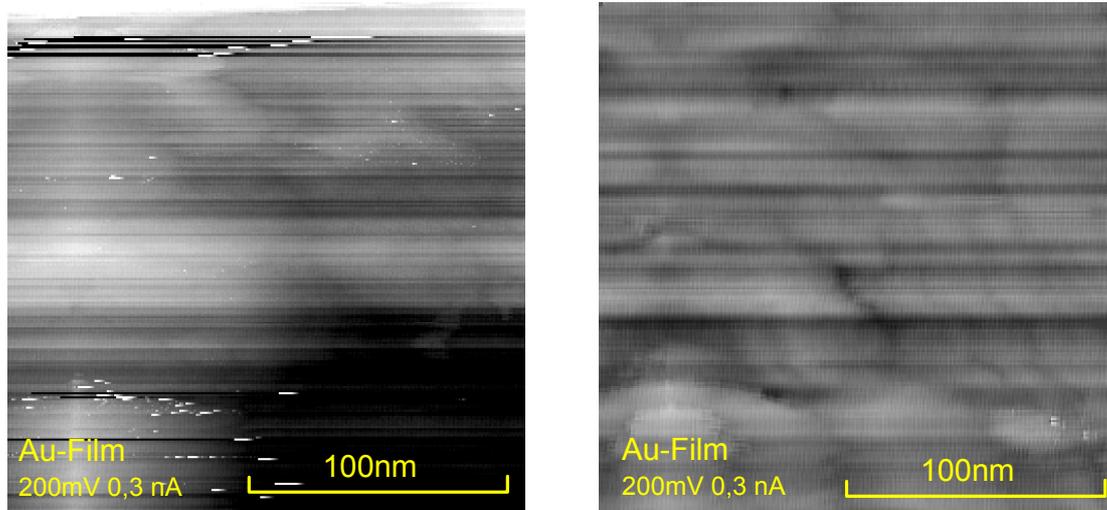
Für den ersten Test werden nun folgende Parameter eingestellt.

Grundeinstellungen und Messwerte			
Poti,		Messpunkt	
Tunnelstrom	0,5 nA	MP 2	500 mV
Verstärkung	10x		
Bias	100 mV	MP 3	100 mV
Regelverstärkung	Max.		
		MP 1	0 V
		MP 4	~ +14 V
		MP 5	~ -14 V
		MP 6	~ 300 V
		MP 7	~ 10 V

Tab. 3: Einstellung der Betriebsparameter

Als Probe hat sich ein mit Metall belegtes Glasplättchen bewährt. Das kann ein Stück von einem Oberflächenspiegel sein. Man muss sich nur durch eine Messung vergewissern, dass die spiegelnde Schicht leitend ist. Der Verfasser verwendete mit Gold bedampfte Glasplättchen. (Kleine Mengen dieser Proben können auf Anfrage vom Verfasser erhalten werden).

Nachdem die Probe befestigt worden ist, kann die Annäherungsroutine gestartet werden. Der Schlitten mit der Probe fährt nun in kleinen Schritten zur Spitze. Die Annäherung wird abgebrochen sobald Tunnelstrom detektiert wird. Die Probe ist in der richtigen Position, wenn am Messpunkt MP 1 eine Spannung von 0,5 Volt zu messen ist und die Spannung am Z-Piezo im Aussteuerbereich (MP 6 – MP 7 < 100 Volt) liegt. War die Annäherung erfolgreich, kann die Bildaufnahme gestartet werden. Es kann aber auch passieren, dass die Spitze auf der Probe aufsitzt. Der Eingangsverstärker ist dann übersteuert, die Spannung am Messpunkt MP3 liegt bei 10 Volt. In diesem Fall fährt man wieder ein paar Schritte zurück und versucht eine erneute Annäherung. Bevor man einen XY-Scan startet, muss der Tunnelstrom einen konstanten Wert aufweisen. Bei starken Schwankungen kann man die Regelparameter verändern, z.B. den Proportionalanteil verringern. Bringt auch das keinen Erfolg, kann man die Spitze zurückfahren und eine neue Annäherung starten. Ist der Tunnelstrom ausreichend konstant, kann die Bildaufnahme gestartet werden. Die ersten Bilder werden wahrscheinlich undeutlich und gestört sein. Das kann an einer schlechten Spitze oder auch an einer ungünstigen Parameterwahl liegen. Aber verständlicherweise ist es auch nicht ganz so einfach Bilder mit einer millionenfachen Vergrößerung zu machen. Hier ist die Geduld des Experimentators gefragt. Manchmal hilft es die Probe wieder zurückzufahren und erneut anzunähern. Dieser Vorgang kann öfters wiederholt werden, bis man einen stabilen Arbeitspunkt erreicht.



**Abb. 54: die ersten Bilder von einem Goldfilm**

Wahrscheinlich wird sich der Arbeitspunkt des Z-Piezo während eines Scans stark ändern. Das kann am thermischen Driften, Vorgänge im Piezomaterial oder auch an Änderungen der Spitze liegen. Diese Änderung wird mit dem Offset-Potentiometer im ADC-Verstärker ausgeglichen, um im Eingangsbereich des AD-Wandlers zu bleiben. Durch diese Einstellung entstehen unschöne Streifen im Tunnelbild die aber mit einer passenden Software leicht beseitigt werden können.

### 1.8.5. Bildverarbeitung

Der Verfasser empfiehlt das Programm **WSxM** von Nanotech das man kostenlos im Internet ([www.nanotec.es](http://www.nanotec.es)) downloaden kann. Das Programm ist von Praktikern speziell für die Verarbeitung von STM- und AFM-Bildern geschrieben. Die Bedingung zur Verwendung des Programms in Publikationen ist die Angabe des Herstellers.



**Abb. 55: Das Logo des WSxM-Programms**

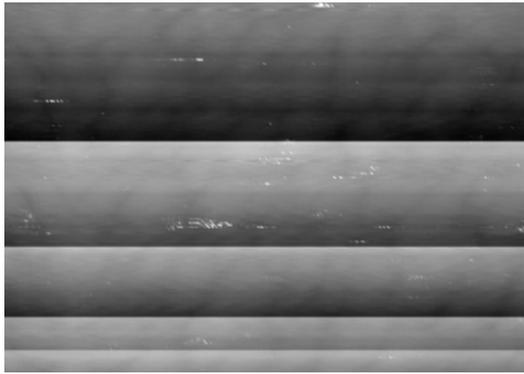
Um eigene Messdateien laden zu können, müssen diese einige spezielle Kopfzeilen beinhalten. Die eigentlichen Messewerte sind in einer dreispaltigen Tabelle (X-,Y- und Z-Werte) abgelegt.

Aufbau einer Datendatei zur Verwendung mit dem WSxM-Programm		
WSxM file copyright Nanotec Electronica		
WSxM ASCII XYZ file		
X[nm]	Y[nm]	Z[nm]
0	0	56
1	0	57
2	0	54
3	0	58
4	0	57
5	0	53
..	..	..

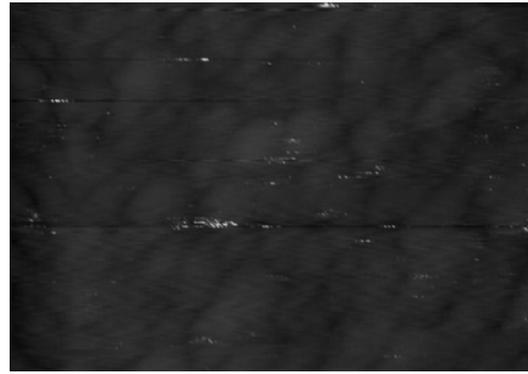
**Tab. 4: Aufbau einer Datei**

Das Programm bietet eine Vielzahl von Operationen zur Verbesserung und Auswertung von Rasterbildern.

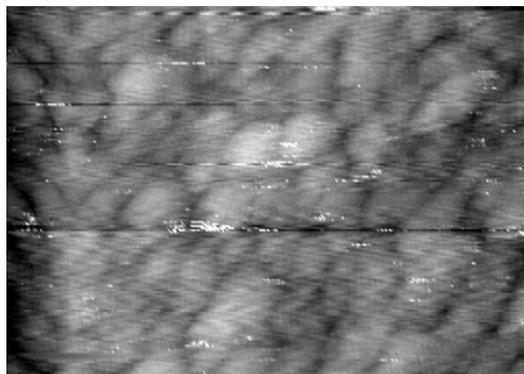
Im folgenden Beispiel ist das Bild durch die Nachstellung die Drift des Z-Piezos und das Nachstellung des Offset-Potentiometers stark gestört. Durch die Anwendung der „Flatten“-Funktion werden die Grauwerte geebnet und die folgende „Equalizer“-Funktion skaliert den Grauwertbereich auf günstige Werte. Auch können einzelne gestörte Bildzeilen entfernt werden.



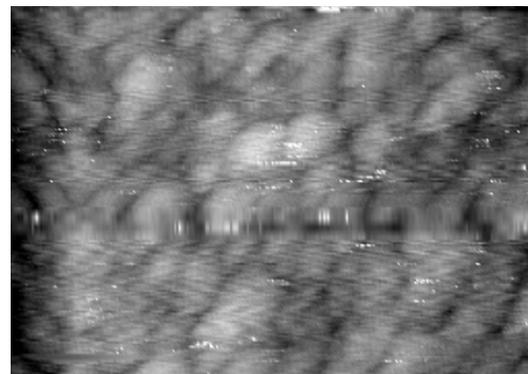
Original-Messbild



nach der "Flatten"-Funktion



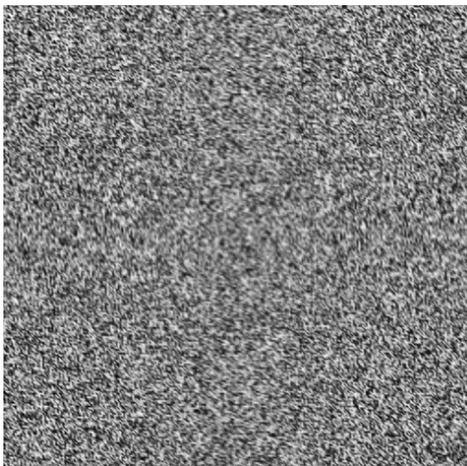
nach der "Equalize"-Funktion



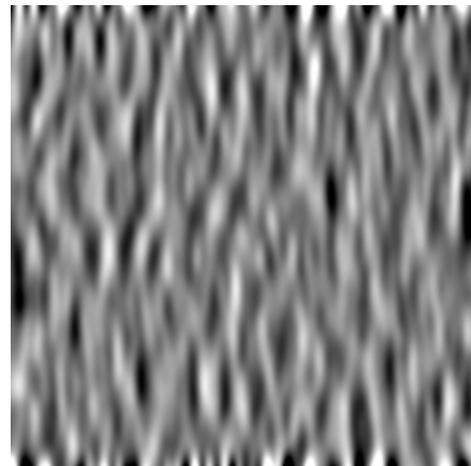
Entfernung gestörter Zeilen

**Abb. 56: Bildverarbeitung mit dem WSxM-Programm**

Allerdings darf man die Anwendung der Bildverarbeitung nicht übertreiben. So können in einem vollkommen verrauschten Bild durch Filterung Strukturen sichtbar werden die nichts mit der Messung zu tun haben sondern allein durch die angewendeten mathematischen Operationen entstehen.



synthetisches Rauschbild



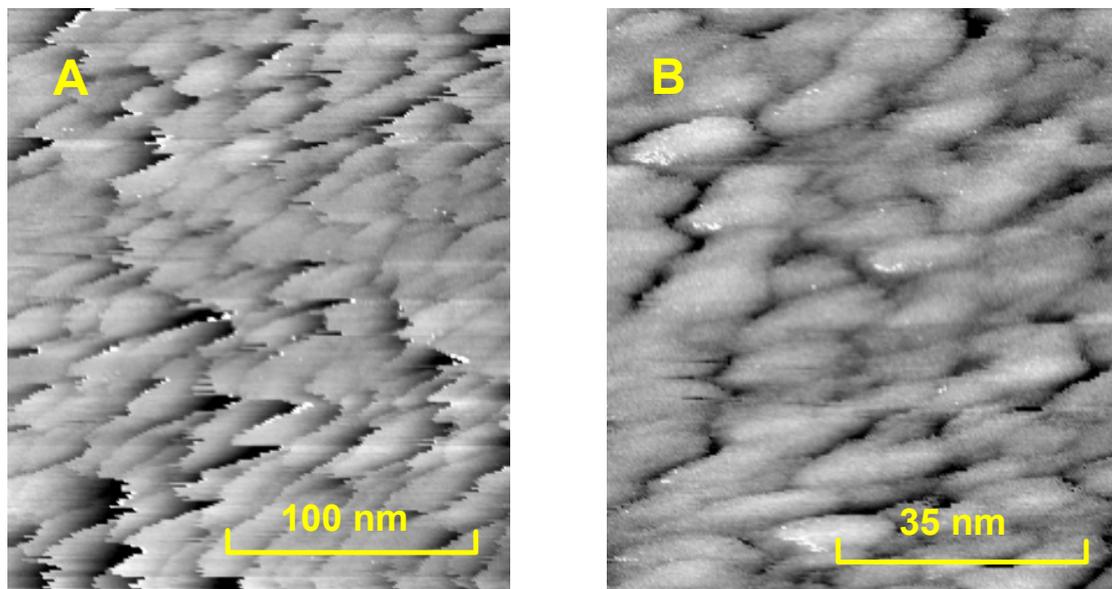
durch Filterung erzeugte Pseudostrukturen

**Abb. 57: Durch Filterung entstandene Pseudostrukturen**

Ebenso können durch eine ungünstige Regeleinstellung Strukturen vorgetäuscht werden, die nicht real vorhanden sind.

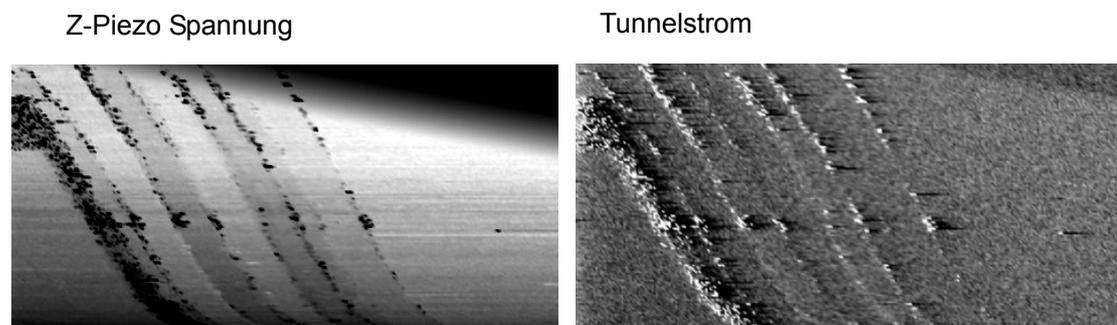
### 1.8.6. Bilder von Metallfilmen

Die beiden folgenden Bilder zeigen eine chemisch polierte Siliziumoberfläche bei verschiedenen Vergrößerungen aber sonst gleichen Einstellungen. Beim Bild A wird eine Fläche von 200 x 200 nm abgerastert, beim Bild B eine Fläche von 70 x 70 nm. Da die Messzeit in beiden Fällen gleich ist, bewegte sich die Spitze bei der Aufnahme des ersten Bildes dreimal so schnell wie beim zweiten. Im Bild A sind an den Strukturen scharf begrenzte Kanten sichtbar, die aber nur durch die langsame Regelung und eine daraus folgende Übersteuerung entsteht. Bild B zeigt die wahren Verhältnisse, hier kann die Regelung den Signaländerungen schnell genug folgen.



**Abb. 58: Siliziumoberfläche bei verschiedenen Abtastgeschwindigkeiten**

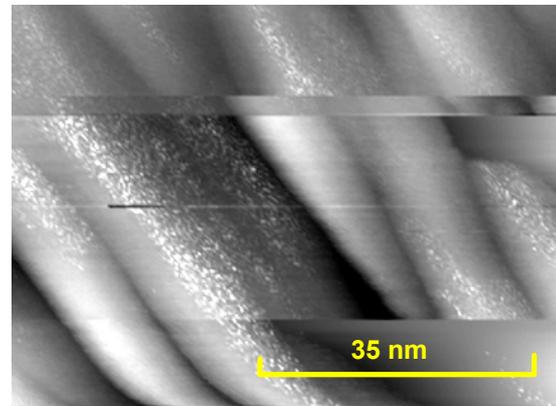
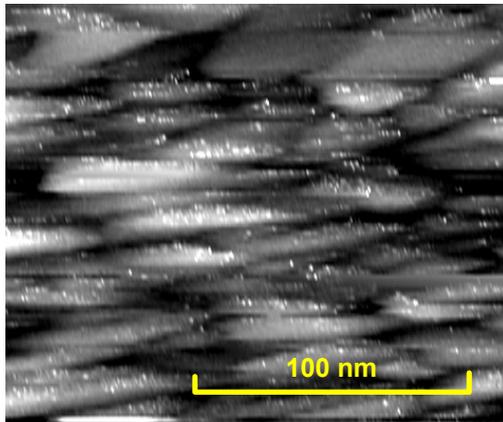
Deutlich werden die Grenzen der Regelung, wenn man sich auch ein Bild des Tunnelstroms erstellt. Bei korrekt arbeitender Regelung sollte der Tunnelstrom konstant bleiben, dessen somit eine gleichmäßig graue Fläche sein und keine Struktur aufweisen. Die folgenden Bilder einer Grafitoberfläche zeigen die wahren Verhältnisse.



**Abb. 59: Artefakte durch Übersteuern der Regelung**

Die Oberfläche besteht aus terrassenförmigen Grafitsschichten, wobei die einzelnen Terrassenflächen atomar glatt sind. Während auf den ebenen Flächen der Tunnelstrom weitgehend konstant bleibt, sind an den Stufen Störungen zu sehen. Hier kann die Regelung der abrupten Höhenänderung nicht folgen.

Nach einigen Versuchen wird es sicher gelingen schöne Bilder vor allem von Metallfilmen aufzunehmen.



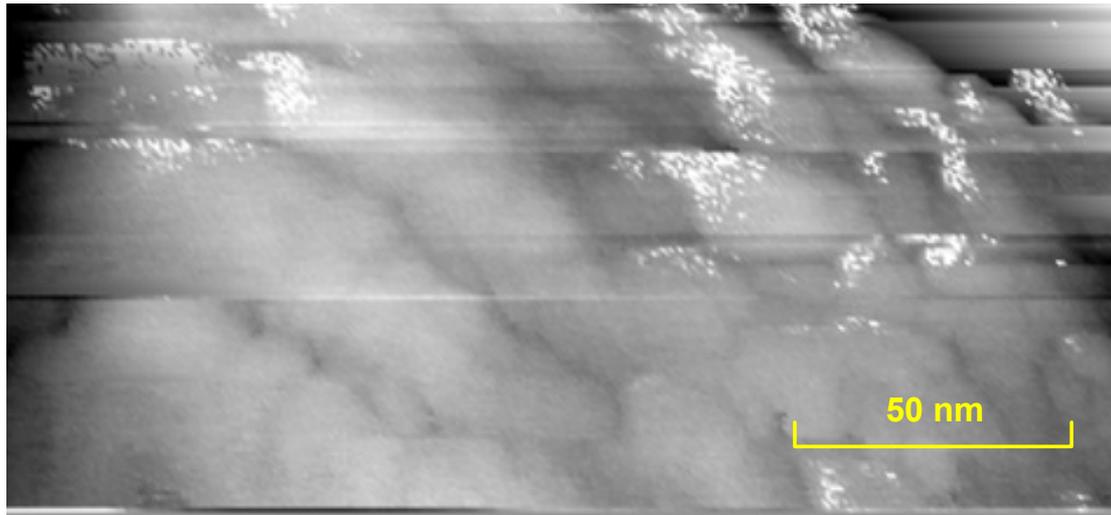
Tunnelstrom: 300 pA  
Bias: 100mV

**Abb. 60: Goldfilm auf Glasplatte**

Abbildungen von Metallfilmen gelingen am Besten mit kleinen Biasspannungen und niedrigen Tunnelströmen. Dabei konnte der Verfasser keinen Unterschied zwischen geschnittenen Wolframdraht- oder Platiniridiumdraht-Spitzen feststellen. Sogar kommerzielle, geätzte Spitzen brachten keine besseren Erfolge.

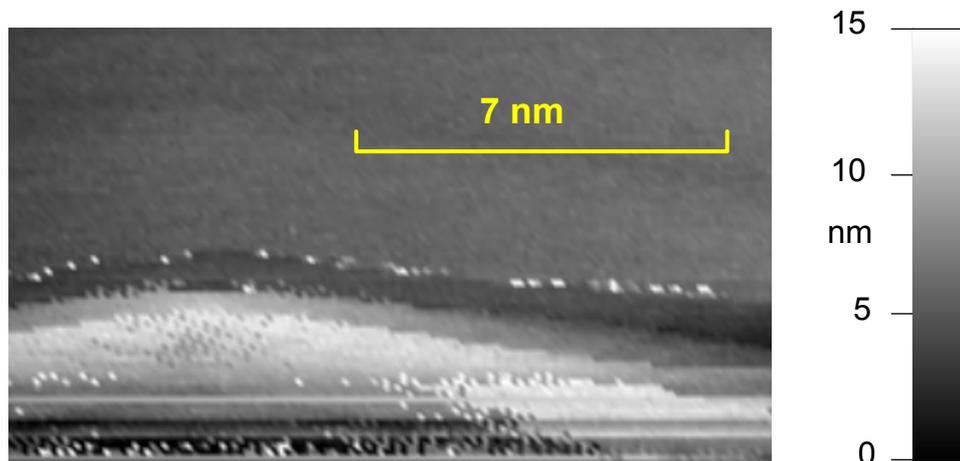
### 1.8.7. Bilder von Halbleiteroberflächen

Etwas schwieriger ist die Abbildung von Halbleiteroberflächen. Passende Proben, Ausschuss aus der Chipproduktion, werden hin und wieder bei Ebay angeboten. Auch die Chips aus großflächigen Fotodioden oder die Germaniumfenster von Infrarotdetektoren eignen sich zu diesem Zweck. Wichtig ist natürlich das die Proben leitfähig sind, was mit einem Multimeter leicht getestet werden kann. Im Gegensatz zu metallischen Proben verlangen Halbleiter eine höhere Biasspannung, günstig sind Werte von ein bis zwei Volt.



Tunnelstrom: 300 pA  
Bias: 1V

**Abb. 61: Chemisch-polierete Siliziumoberfläche**



Tunnelstrom: 300 pA  
Bias: 1V

**Abb. 62: Chemisch-polierete Siliziumoberfläche**

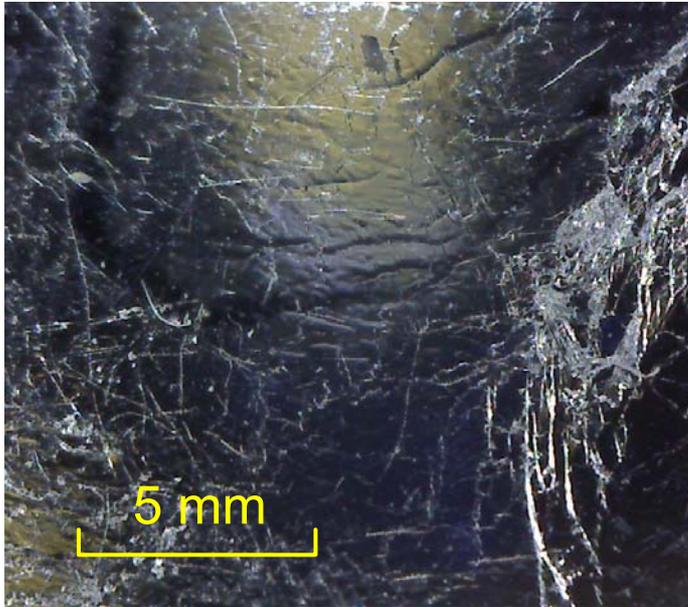
Auf dem Ausschnittsbild sind einzelne Terrassen zu sehen, die möglicherweise atomare Stufen sind.

### 1.8.8. HOPG-Grafit

Das Standardtestmaterial zur Charakterisierung von Tunnelmikroskopen ist Grafit. Grafitkristalle sind aus einzelnen Ebenen aufgebaut. Die Bindungskräfte zwischen en einzelnen Atomen einer Ebene sind sehr stark, während die Bindung zwischen den Ebenen nur schwach ist. Daraus resultiert die leichte Spaltbarkeit des Materials. Die beim Spalten zutage tretenden Oberflächen sind über kleine Flächen atomar glatt und können deshalb gut mit dem Tunnelmikroskop gemessen werden. Ein weiterer Vorteil ist die niedrige Haftzahl des Grafits, weshalb Fremdstoffe schlecht auf der Oberfläche haften. So kann mit Grafitproben in normaler Atmosphäre atomare

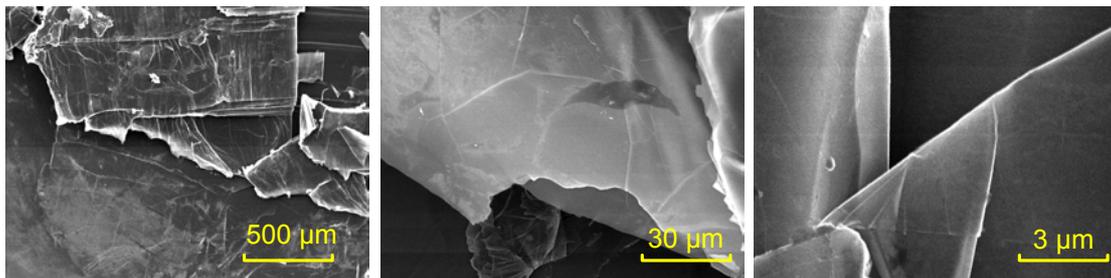
Auflösung erreicht werden. Für viele andere Materialien wie Silizium ist hierfür ein sauberes, gutes Ultrahoch-Vakuum notwendig.

Grafit tritt in vielen Erscheinungsformen auf, von der Bleistiftmine bis zur Anode in Batterien. Für die Tunnelmikroskopie eignen sich aber nur kristallisierte Modifikationen. An erster Stelle steht hier das „HOPG“ (highly oriented pyrolytic graphite). Dieses Material wird auf künstlichem Wege im CVD-Verfahren (chemical vapor deposition) erzeugt.



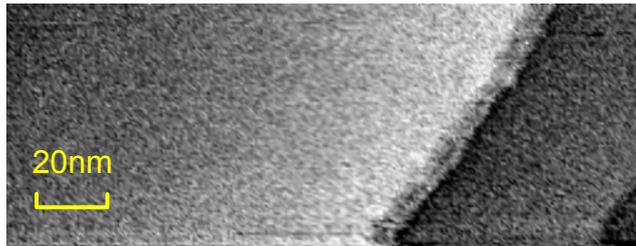
**Abb. 63: Hochorientierter Pyrolytischer Grafit**

Die Oberfläche einer HOPG-Probe ist glatt und stark glänzend. Bei mäßiger Vergrößerung unter dem USB-Mikroskop zeigt eine leichte Wellung. Bevor die Probe mit dem Tunnelmikroskop untersucht wird, sollte sie gereinigt werden. Dazu wird ein Stück Tesafilm auf die Oberfläche geklebt und wieder abgezogen. Durch die leichte Spaltbarkeit des Materials bleibt die oberste Schicht HOPG am Tesafilm kleben und darunter kommt eine frische Oberfläche zutage.



**Abb. 64: REM-Aufnahmen der HOPG Oberfläche**

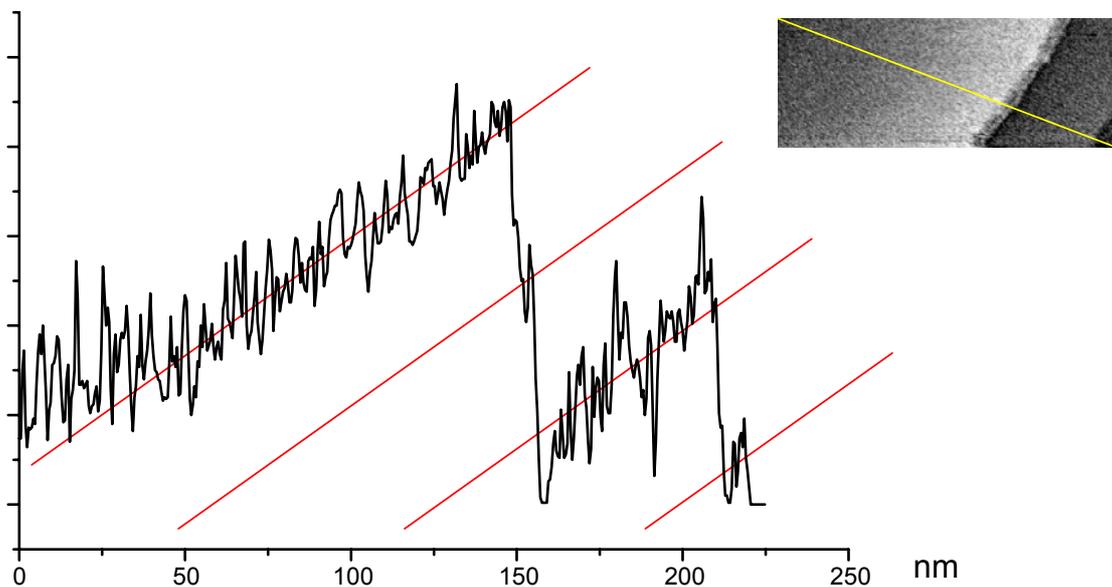
Dieses Material wird von verschiedenen Herstellern angeboten und ist nicht ganz billig. Das billigste Angebot fand der Verfasser bei der Firma NT-MDT (Integrated Solutions for Nanotechnology, <http://www.ntmdt.com>), in deren Onlineshop HOPG mittlerer ZYB-Qualität für 37,50 € angeboten wird.



Scanner: Tripod  
 Spitze: Bleistiftmine  
 $I_t$ : 0.5 nA  
 $U_b$ : -50 mV

**Abb. 65: STM-Aufnahme der HOPG Oberfläche**

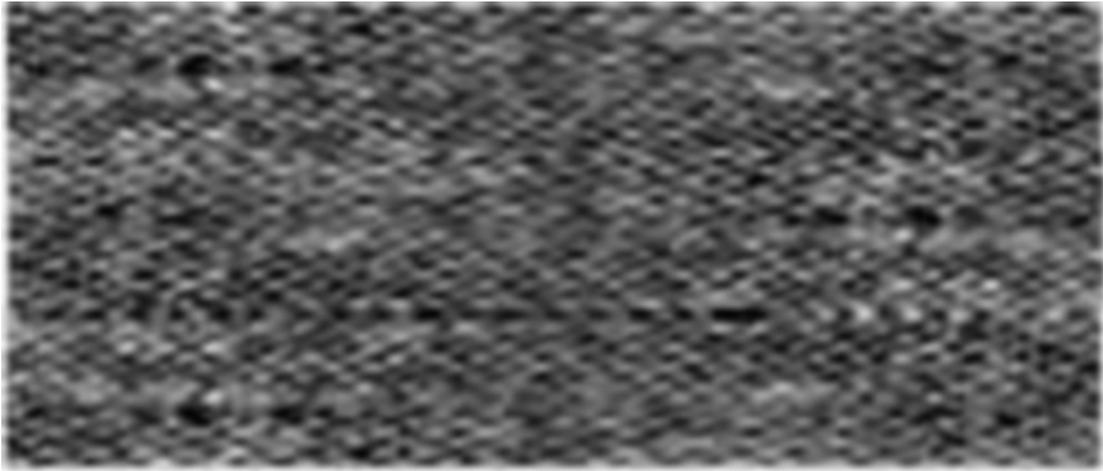
Das STM-Bild zeigt die atomar glatten Flächen des HOPG. Das Bild wurde mit einer Spitze aus Grafit (Bleistiftmine) aufgenommen. Diese Spitzen gestatten einen sehr störungsarmen Betrieb und haben eine lange Lebensdauer, vorausgesetzt die Spitze wird sanft angenähert und nicht in die Probe gerammt.



**Abb. 66: Atomare Stufen auf der HOPG-Oberfläche**

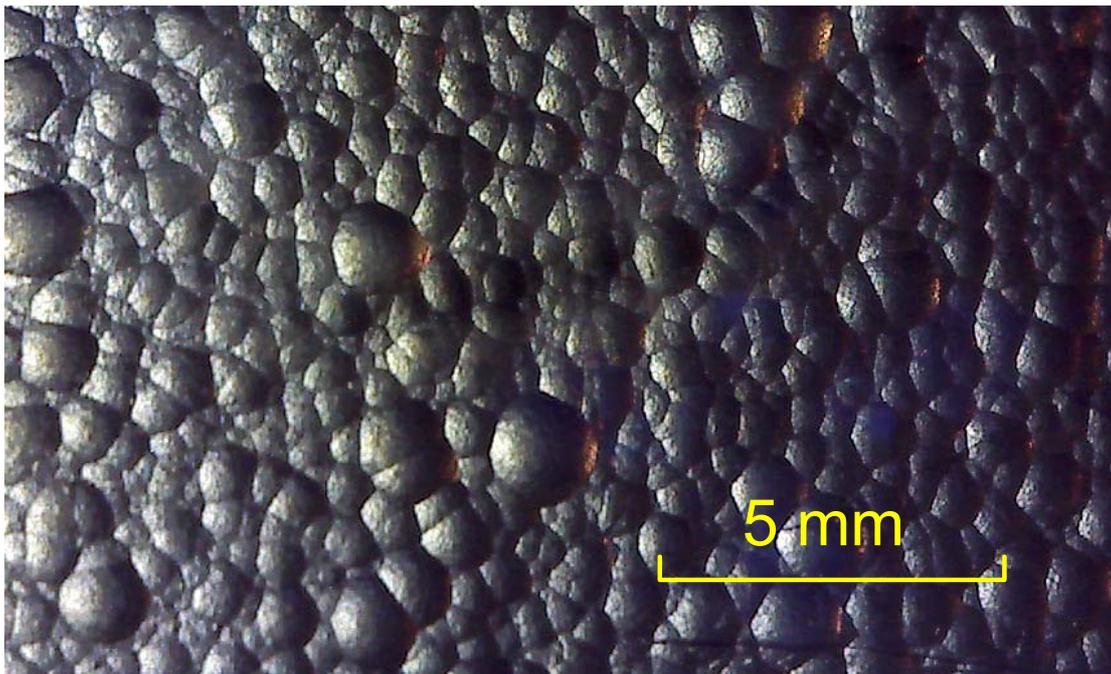
Ermittelt man das Profil der Grauwerte entlang der im Inlet gezeigten gelben Linie, findet man vier einzelne Stufen auf der gescannten Oberfläche. Da die Stufen etwa die gleiche Höhe haben, kann man mit einiger Sicherheit annehmen, dass sich hierbei um einzelne Atomlagen handelt.

Wird nun die Ablenkspannung an den X- und Y-Piezos weiter reduziert wird endlich das atomare Gitter des Grafits sichtbar.

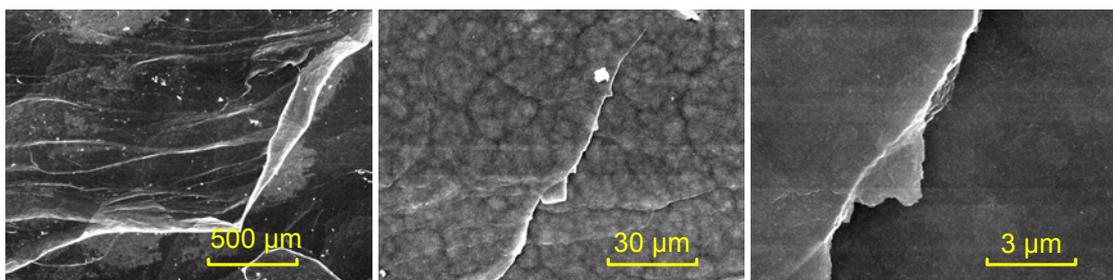


**Abb. 67: Atomare Auflösung auf der HOPG-Oberfläche**

Wesentlich billiger aber nicht so geordnet ist normales pyrolytisches Grafit. Aber obwohl dieses Material bei oberflächlicher Betrachtung wenig glatt sondern sehr wellig aussieht können mit dem Tunnelmikroskop und sehr viel Geduld Stellen gefunden werden auf denen atomare Auflösung erreicht wird.

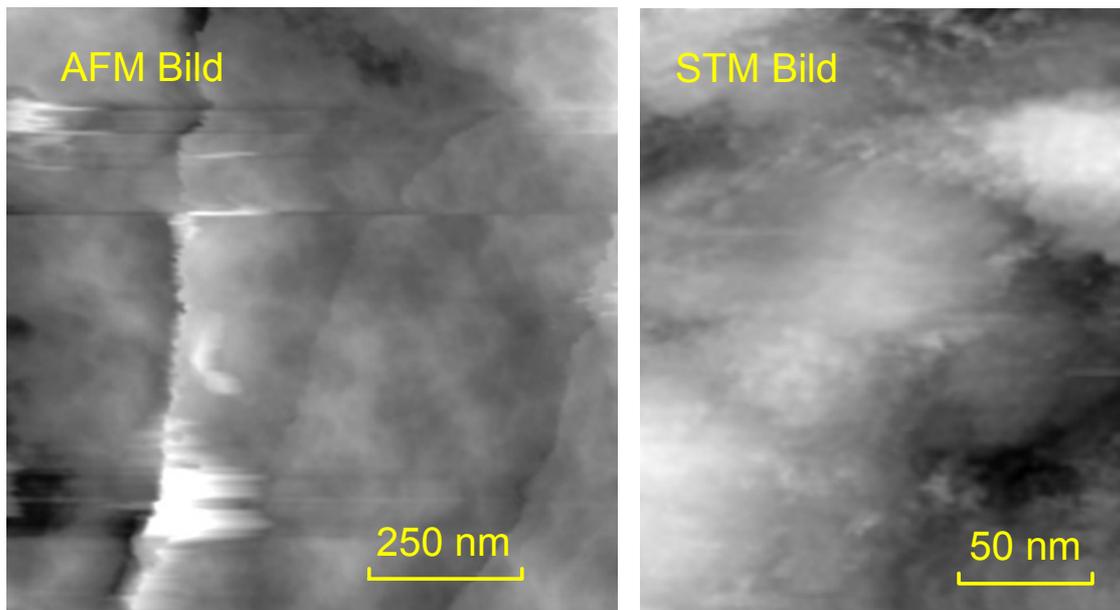


**Abb. 68: Pyrolytischer Grafit**



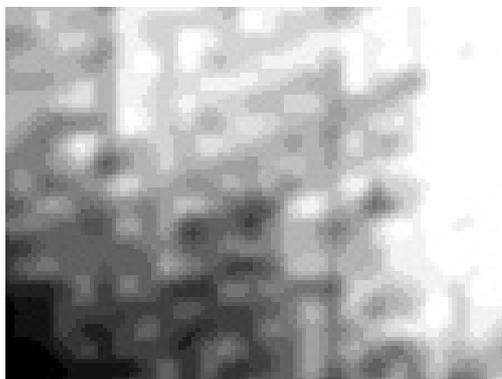
**Abb. 69: Pyrolytischer Grafit unter dem REM**

Eine Vorabuntersuchung mit einem kommerziellen AFM zeigt die wellige Struktur der Oberfläche des pyrolytischen Graphits.



**Abb. 70: Pyrolytischer Graphit unter dem AFM und STM**

Ein stärker vergrößertes Bild liefert das Eigenbau-STM, aber natürlich noch keine Spur des atomaren Graphitgitters mit einem Gitterabstand von etwa 0,25 Nanometern. Mit viel Geduld und Ausdauer ist es jedoch auch beim pyrolytischem Graphit möglich die atomare Struktur darzustellen.



**Abb. 71: Atomare Strukturen auf der Graphitoberfläche**

### 1.8.9. Poröses Aluminiumoxid

Ein weiteres Testpräparat wäre poröses Aluminiumoxid. Schon seit langer Zeit ist die Versiegelung von Aluminiumoberflächen durch die Eloxierung bekannt und ein weitverbreitetes Verfahren. Durch ein elektrochemisches Verfahren wird die empfindliche Aluminiumoberfläche mit einer sehr harten und stabilen Schicht aus Aluminiumoxid überzogen. Wenn man bedenkt, dass Aluminiumoxid und Korund, der nach Diamant der härteste Stein, chemisch gesehen das gleiche sind, kann man sich vorstellen, wie gut diese Schicht das an sich weiche und empfindliche Aluminium schützt. Die Oxidschichten sind je nach Herstellungsparameter mehr oder weniger

porös, weshalb sie gut eingefärbt werden können und jeder kennt die bunt eloxierten Gegenstände des täglichen Bedarfs.

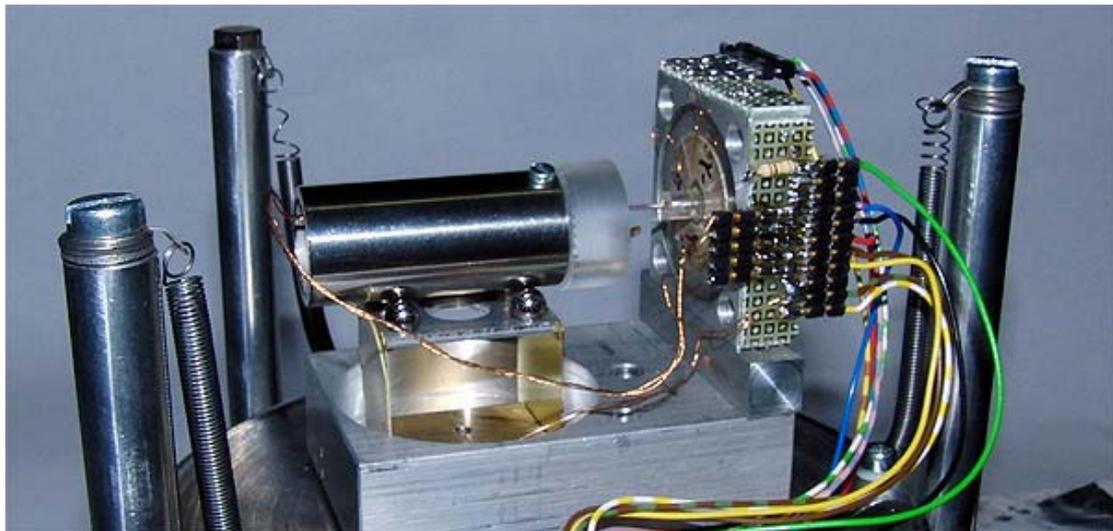
In neuerer Zeit hat man festgestellt, dass sich diese Schichten gut für verschiedene Zwecke in der immer wichtiger werdenden Nanotechnologie eignen.

Eloxalschichten sind wie erwähnt porös und die Löcher in der Schicht können eine hohe Ordnung zeigen. Bei dünner Schichtdicke kann man erwarten, dass trotz der isolierenden Eigenschaften des Oxidfilms ausreichend Tunnelstrom für eine Abbildung zustande kommt.

### 1.8.10. Kolloidale Metalle

Vor allem Silber und Gold lassen sich einfach in kolloidaler Form herstellen. Je nach Herstellungsparameter entstehen dabei Metallpartikel mit Größen zwischen 1 -100 Nanometern. Werden diese Nanoteilchen auf einer geeigneten Oberfläche, z.B. HOPG aufgebracht, sollten sie sich gut mit dem Tunnelmikroskop untersuchen lassen.

## 1.9. Tunnelmikroskop mit Beeper-Scanner



**Abb. 72: Der Scan-Kopf des Niederspannungsmikroskops**

Der Scan-Kopf des Niederspannungsmikroskops verwendet einen Scanner mit Piezobeepern zur Abtastung und einen Trägheitsmotor, ebenfalls mit Piezobeepern zur Grobannäherung. Auch hier ist der erforderliche Vorverstärker direkt hinter der Probe eingebaut, um die Gefahr von Störeinstrahlungen zu vermeiden, wobei das Stahlrohr des Läufers eine gute Abschirmung bietet.

Für den Betrieb des Mikroskops wurde eine auf dem Atmel Mega 32 Prozessor basierende Interfaceschaltung entwickelt. Der Prozessor steuert alle zum Betrieb des Mikroskops notwendigen Funktionen, sodass der Hostcomputer nur zur Anzeige und Speicherung der gewonnenen Daten dient. Die Verbindung zwischen Interface und Hostcomputer erfolgt über eine RS-232 Schnittstelle.

Die Messdaten wie Tunnelstrom, Z-Piezo Spannung und Walkerspannung werden über die im Mega 32 vorhandenen AD-Wandler erfasst. Die analogen Spannungen für den X- und Y-Scanner und die Tunnelbiasspannungen werden mit externen DA-Wandler vom Typ LTC 1257 erzeugt. Die Ausgangsspannungen der X- und Y-Da-Wandler werden zusammen mit der Z-Regelspannung durch Operationsverstärker zu

den Quadrantenspannungen für den Beeperscanner verknüpft. Für die Ausgangsstufen wird ein Vierfachoperationsverstärker TL074 eingebaut. Damit kann eine Scan-Spannung von  $\pm 15$  V und ein Scan-Bereich  $\pm 1$   $\mu\text{m}$  erreicht werden. Werden an dieser Stelle spezielle Operationsverstärker vom Typ OPA 445 eingesetzt, beträgt die maximale Ausgangsspannung  $\pm 45$  V und somit der Scan-Bereich  $\pm 3$   $\mu\text{m}$ . In der Regelschaltung wird die dem Tunnelstrom proportionale Spannung vom Vorverstärker mit dem Sollwert verglichen. Die Abweichung steuert über einen Verstärker zum einen die Z-Bewegung des Scanners und zum anderen über einen Integrator die beiden Piezos des Trägheitsmotors. So werden schnelle Änderungen des Tunnelstroms mit einer Bewegung der Spitze ausgeregelt, langsame Änderung biegen die Piezos des Trägheitsmotors und verstellen die Lage der Probe. Zur Grobannäherung der Probe wird mit dem Integrator eine Sägezahnspannung erzeugt, welche die Vorwärtsbewegung des Läufers verursacht.



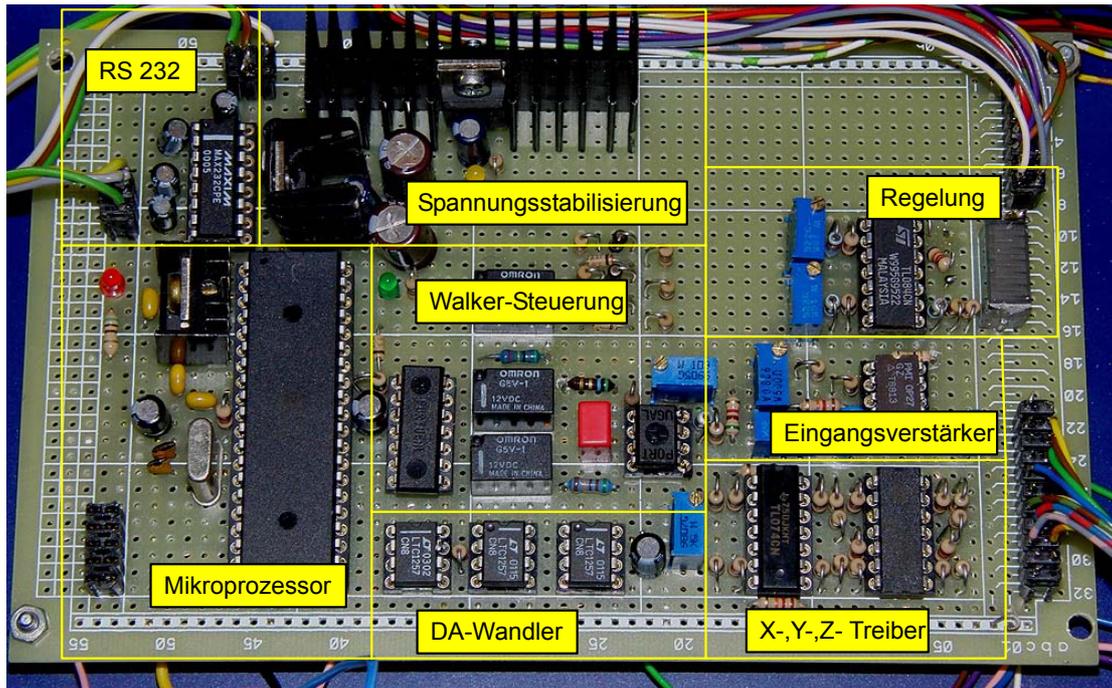


Abb. 74: Platine des Niederspannungs-Mikroskops

### 1.9.2. Betriebsprogramm

Das Betriebsprogramm für den Atmel Prozessor ist in Basic mit einem Bascom-Compiler erstellt. Das Interface erhält die verschiedenen Befehle per RS 232. Um die übertragene Datenmenge zu begrenzen, wurden für die Kodierung nur einzelne Buchstaben verwendet. Die Parameter und Rückgabewerte sind Zahlen im 12 Bit Format und werden als Ascii Zeichen übertragenen.

#### Befehl A (65 Dez.)

Mit diesem Befehl werden die Anzahl der Mittelungen (Variable: Aver\_var) der ADC-Messungen eingestellt. Je größer diese Zahl ist, um so genauer werden die gemessenen Werte, allerdings braucht die Messung entsprechend länger. Die Grundeinstellung beträgt 1. Der erlaubte Wertebereich ist liegt zwischen 1 und 4095.

#### Befehl B (66 Dez.)

Einstellung der Scanbereiche nach folgender Tabelle

256 x 256 Pixel				
Kode	DAC-Werte	Increment	Scanbereich	Auflösung
1	1920..2175	1	63 nm	0,2 nm/Pixel
2	1537..2557	4	250 nm	1 nm/Pixel
3	0007..4086	16	1 µm	4 nm/Pixel

#### Befehl C (67 Dez.)

Durch diesen Befehl werden die Defaultwerte des Interfaces gesetzt und eine Begrüßungsmeldung gesendet.

#### Befehl D (68 Dez)

Die Funktion setzt den Walker in Bewegung, sodass sich die Spitze an die Probe annähert. Sobald Tunnelstrom messbar ist, bricht die Annäherung ab. Der Schwellwert zum Abbruch wird der Funktion als Parameter übergeben. Durch Senden einer Null (48 Dez) kann die Funktion vorzeitig abgebrochen werden.

#### Befehl E (69 Dez)

Die Funktion hebt die Spitze von der Probe ab. Wird sie nicht vorzeitig durch Senden einer Null (48 Dez) abgebrochen werden 500 schritte ausgeführt.

#### Befehl F (70 Dez)

ADCs auslesen. Durch diesen Befehl werden die vier ADC Kanäle ausgelesen. Die Anzahl der Mittelungen wird durch die Variable Aver\_Var bestimmt. Die Ausgabe des Befehls sind vier Zahlenwerte, die durch Kommas getrennt sind.

#### Befehl G (71 Dez)

Durch diesen Befehl wird eine Schleife gestartet, die laufende ADC-Messungen und die Ausgabe der Messwerte veranlasst. Zum Beenden der Schleife muss die Null (48 Dez) gesendet werden. Das Interface antwortet mit dem Abbruchzeichen B (66 Dez).

#### Befehl H (72 Dez)

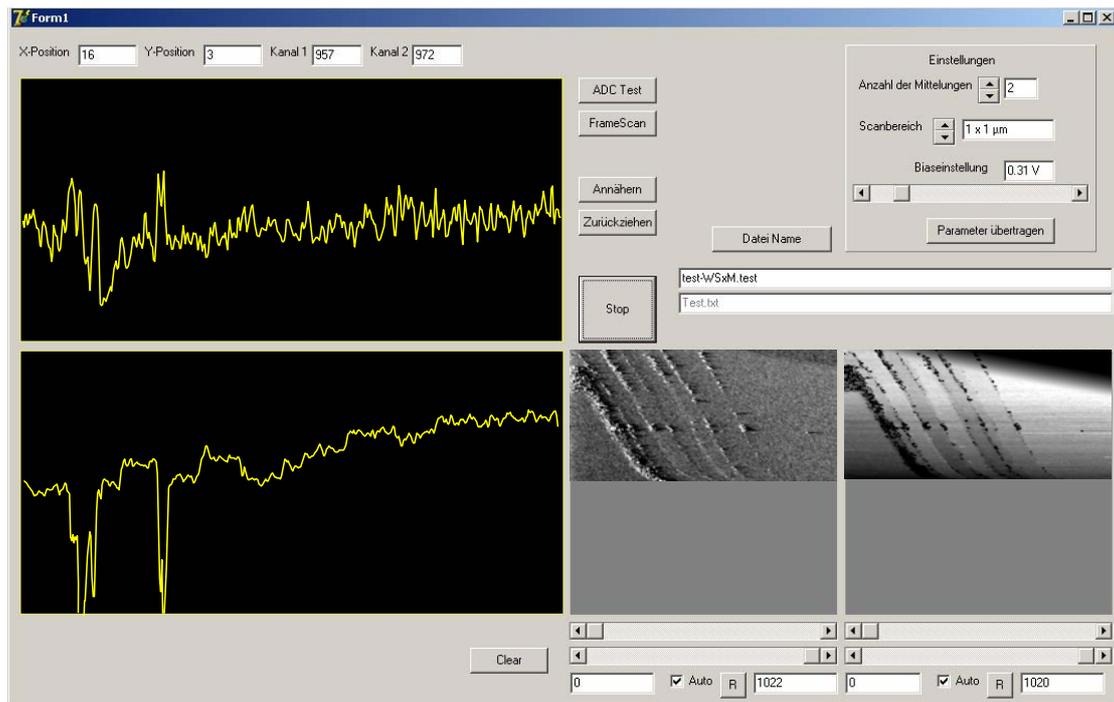
Mit diesem Befehl wird die Aufnahme eines Rasterbildes gestartet. Für jeden Messpunkt werden die X- und die Y-Koordinate sowie der Tunnelstrom und der Wert der Z-Spannung ausgegeben. Die Messung kann durch Senden einer Null (48 Dez) vorzeitig abgebrochen werden.

#### Befehl I (73 Dez)

Auch dieser Befehl startet die Aufnahme eines Rasterbildes. Im Gegensatz zum Befehl H wird eine Zeile in kurz möglicher Zeit gescannt. Dieser schnelle Modus ist sinnvoll, wenn nicht im „konstanten Strom“, sondern „konstanten Höhen“ Modus gearbeitet werden soll. Um hohe Geschwindigkeit zu erreichen, werden die Messwerte einer Zeile zwischengespeichert und erst nach erfolgter Messung einer Zeile, über die langsame RS-232 Schnittstelle ausgegeben. Auch diese Funktion kann durch Senden einer Null (48 Dez) vorzeitig abgebrochen werden.

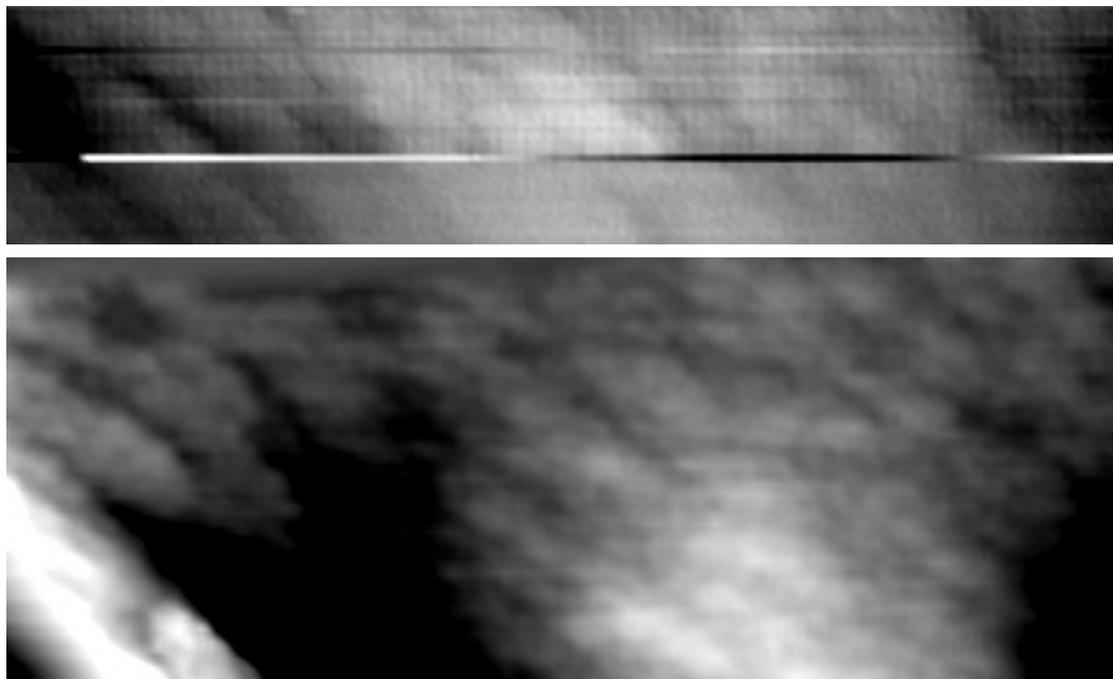
#### Befehl J (74 Dez)

Einstellung der Biasspannung. Zulässige Werte 0..4095, entsprechend 0...2,55 V.



**Abb. 75: Screenshot des Messprogrammes**

### 1.9.3. Betrieb



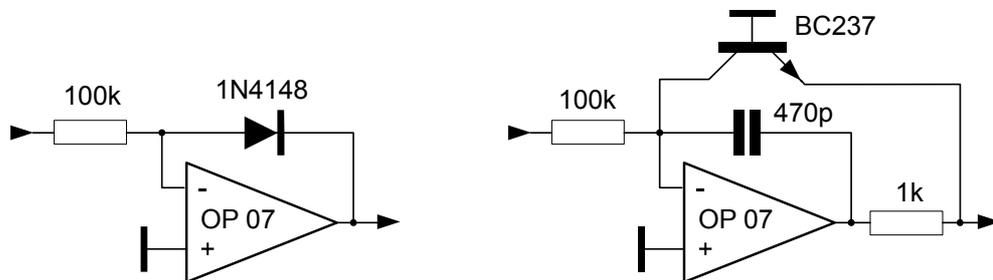
**Abb. 76: Die ersten Bilder eines Goldfilms mit dem Beeper-Scanner**

Die ersten Bilder eines Goldfilms auf Glas zeigen zwar die typischen Strukturen sind aber noch stark gestört. Im Vergleich zum Tripodscanner ist es hier wesentlich schwieriger die richtige Einstellung der Regelelektronik zu finden.

### 1.9.4. Logarithmischer Verstärker

Vorteile kann die Einfügung eines Logarithmierers in den Signalzweig bringen. Durch dieses Bauteil wird die exponentielle Kennlinie der Tunnelstrecke linearisiert, wodurch eine stabile Regelung erleichtert wird. Logarithmierbausteine verwenden die exponentielle Kennlinie von Halbleiterdioden zur Erzeugung der Ausgangsspannung. Da diese Kennlinien aber eine große Temperaturabhängigkeit aufweisen, sind aufwändige Schaltungen zur Kompensation notwendig. Ein geeigneter Baustein ist der AD 579 von Analog Device. Der AD 579 wird zwar nicht mehr gefertigt kann aber mit etwas Glück noch aufgetrieben werden. Inwieweit sich die modernen Logarithmierer (z.B. AD 8307) die eigentlich zur Gleichrichtung für Hochfrequenzsignalen gedacht sind im Gleichspannungsbetrieb eignen wurde noch nicht geprüft.

Verzichtet man auf hohe Genauigkeit, kann ein logarithmischer Verstärker auch mit einem Operationsverstärker und einer Diode oder einem Transistor in der Gegenkopplung realisiert werden.

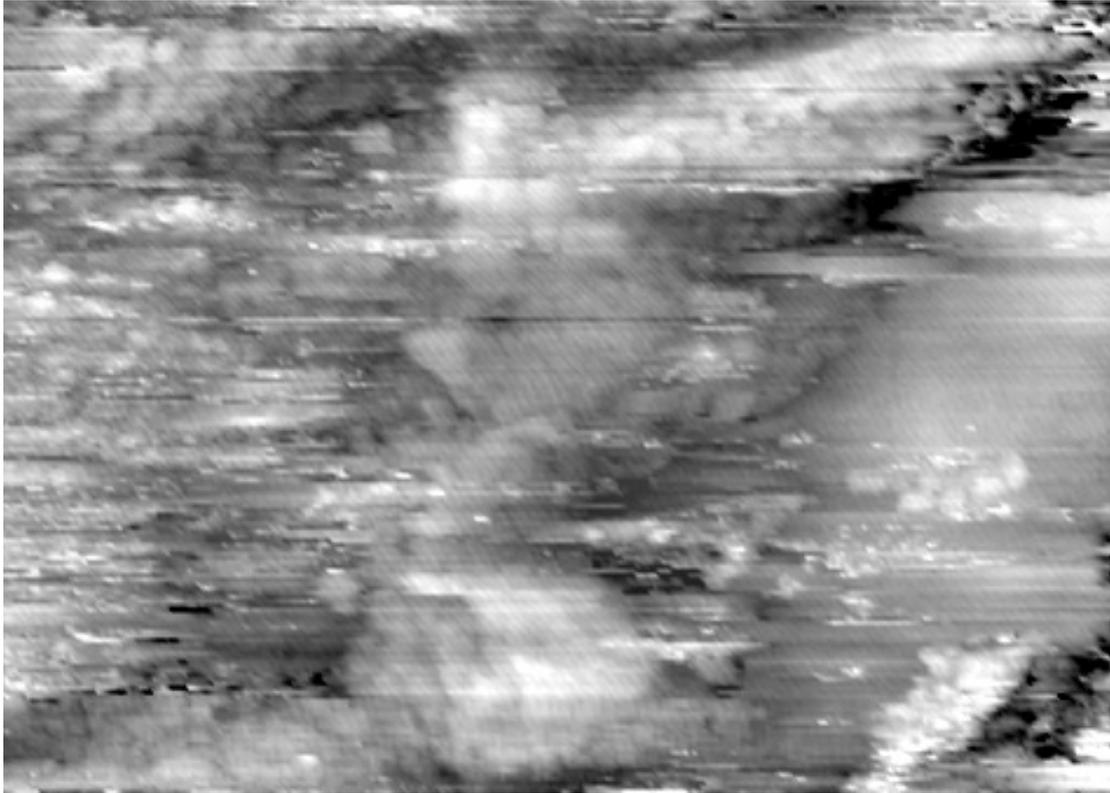


**Abb. 77: Einfache Logarithmierschaltungen**

Die Logarithmierschaltung mit Transistor kann über einen größeren Eingangsspannungsbereich arbeiten. Beide Schaltungen benötigen eine positive Eingangsspannung. Bei negativer Eingangsspannung muss die Diode umgepolt, bzw. ein pnp-Transistor verwendet werden.

Das folgende Bild wurde mit einem Diodenlogarithmierer und der sehr langsamen Scangeschwindigkeit von etwa einer Minute pro Zeile aufgenommen. Beide Maßnahmen erhöhen die Stabilität der Regelung.

### 1.9.5. Bilder von Metalloberflächen



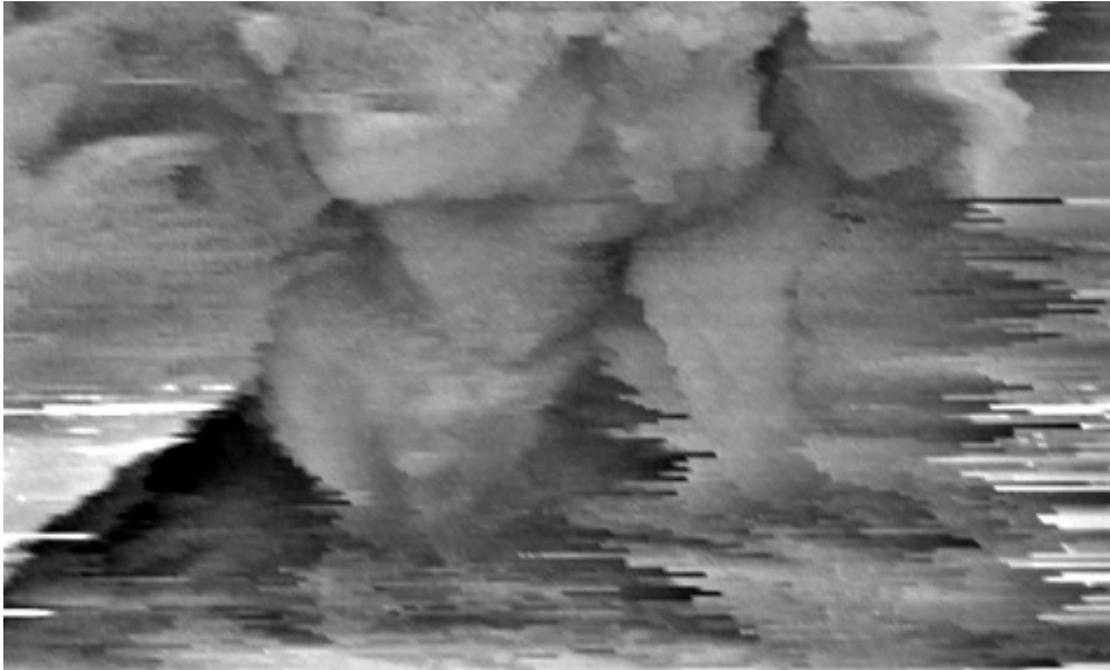
**Abb. 78: Körniger Goldfilm auf Glasoberfläche**

Neben Metallfilmen, Silizium- und Grafitoberflächen ist auch das Metall Wismut gut für Untersuchungen mit dem Tunnelmikroskop geeignet. Obwohl Wismut ein ziemlich weiches Material ist, lässt es sich mit einer scharfen Klinge gut spalten. Die so erzeugten Flächen sind oberflächlich glatt, zeigen aber bei Betrachtung unter dem Tunnelmikroskop kleine Kristalle.



**Abb. 79: Wismutkristall**

Der Wismutkristall wird mit etwas Leitsilber auf ein Stück Kupferblech oder dünnes Platinmaterial geklebt.



**Abb. 80: Kristalle auf Wismutspaltfläche**

Neben Wismut ist auch Pyrit ein mögliches Testobjekt. Dieses auch als Katzensgold bekannte Eisensulfid  $\text{FeS}_2$  hat halbleitende Eigenschaften und wurde deshalb in den Anfängen der Radiotechnik als Detektorkristall verwendet. Pyrit ist für wenig Geld in Form kubischer Kristalle bei Mineralienhändlern zu bekommen. Wie bei anderen Halbleitern ist es günstig mit einer hohen Biasspannung von etwa einem Volt zu arbeiten.

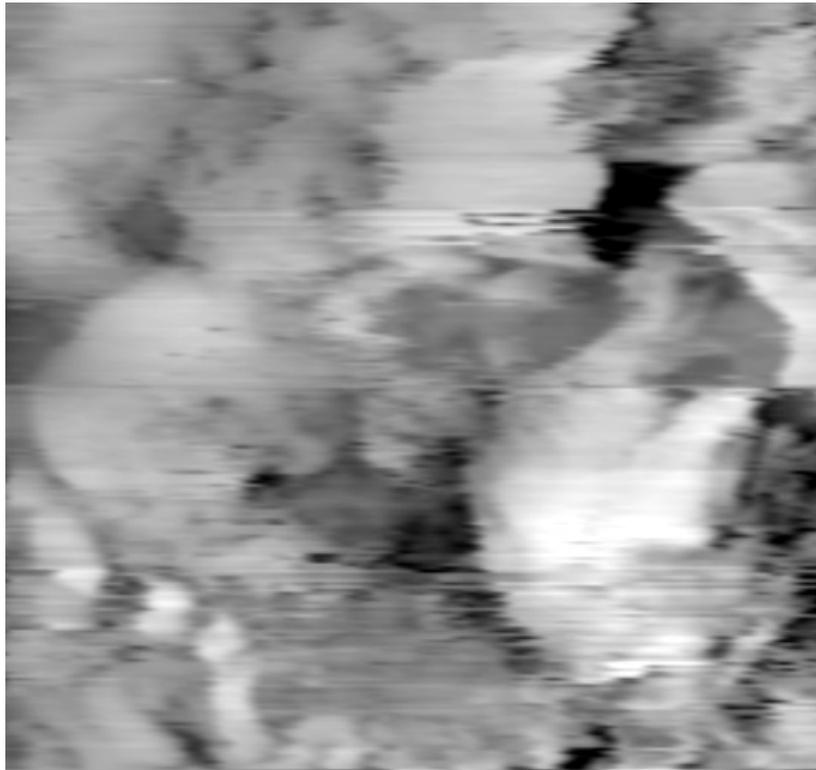


**Abb. 81: Pyritwürfel vom Mineralienhändler**

Mit einem Hammer und einem kleinen Meisel lässt sich ein Stück vom Pyritwürfel abtrennen und zur Untersuchung mit Leitsilber auf ein Blech kleben.



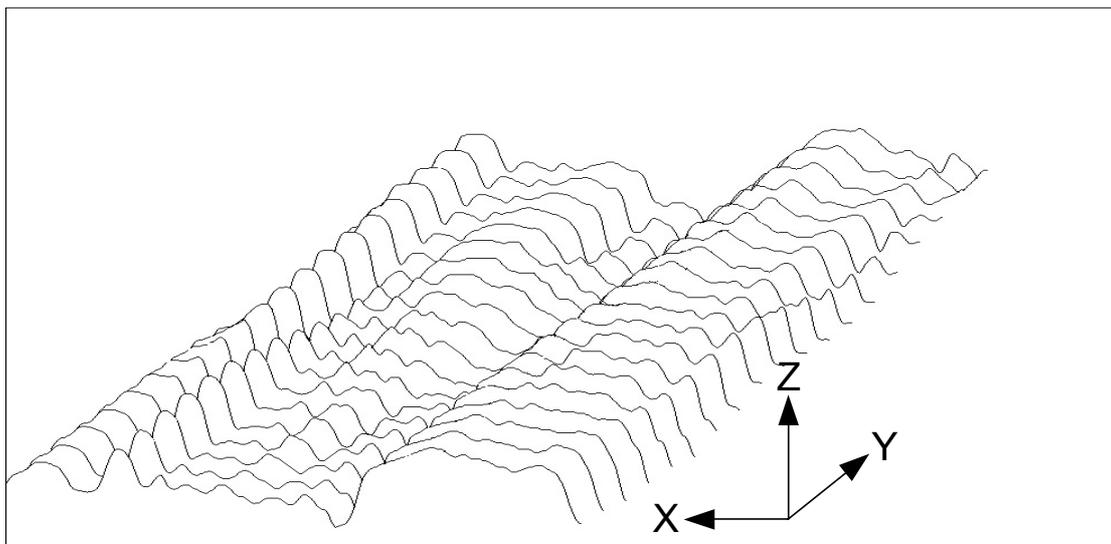
**Abb. 82: Kristallsplitter vom Pyritwürfel**



**Abb. 83: Pyrit-Oberfläche**

Obwohl das Bild der Pyritoberfläche stark gestört ist, sind doch reale Strukturen zu erkennen. Ein guter Test ist die Betrachtung einzelner Scan-Zeilen. Wiederholt sich das Profil in aufeinanderfolgenden Zeilen kann man sicher sein, dass man nicht nur Störungen abbildet, sondern wirklich existierende Oberflächenstrukturen.

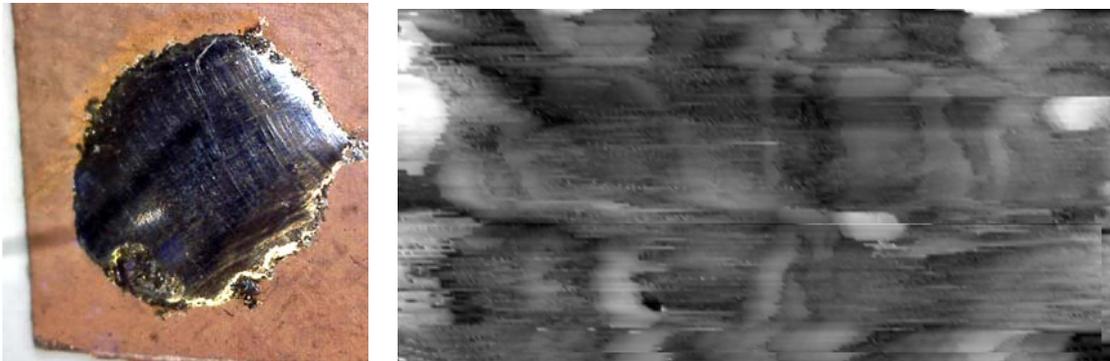
#### 1.9.6. Liniendarstellung der Messwerte



**Abb. 84: Liniendarstellung der Messwerte**

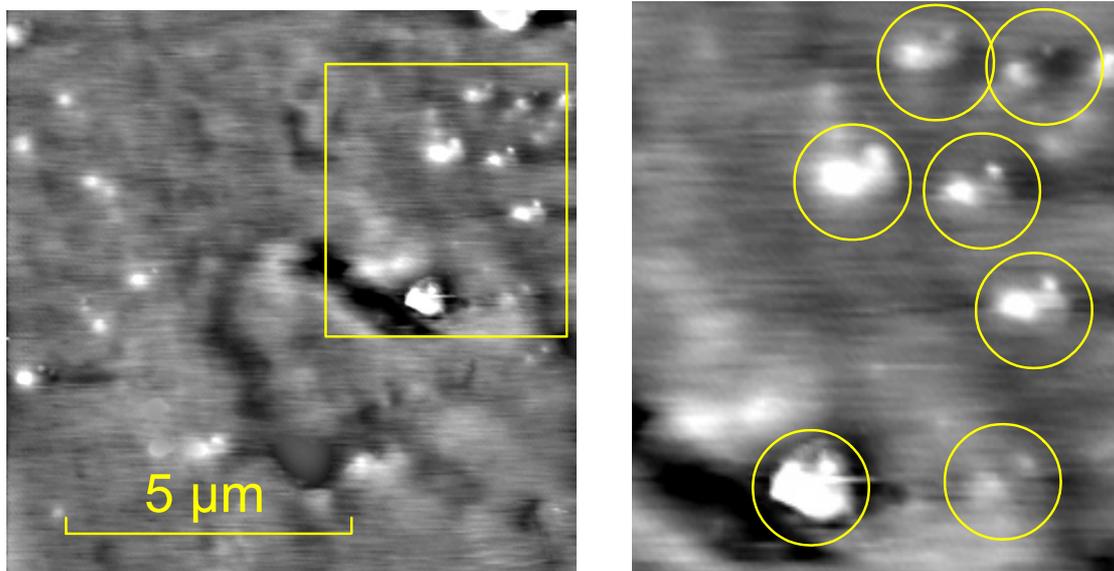
In den Anfängen der Tunnelmikroskopie wurden die Messwerte meist in dieser Form mit analogen XY-Schreibern dargestellt, da noch keine leistungsfähigen Grafikausgabegeräte zur Verfügung standen.

Auch ein einfacher Klecks aus Lötzinn eignet sich zum Test des Mikroskops.



**Abb. 85: Lötzinnklecks unter dem Tunnelmikroskop**

Übrigens liefert auch ein sehr teures kommerzielles Gerät auf Anhieb nicht unbedingt bessere Bilder. Das folgende Bild vom Lötzinnklecks wurde mit dem schon mehrfach erwähnten Park Scientific Instruments Mikroskop „Autoprobe LS „ im „contact“ AFM-Modus aufgenommen.



**Abb. 86: Lötzinnklecks unter dem kommerziellen Kraftmikroskop**

Interessant sind die Strukturen im oberen Teil des Bildes die rechts vergrößert dargestellt sind. Die Ähnlichkeit und die Wiederholung der Struktur weist darauf hin, dass hier die Spitze abgebildet wird und nicht die Oberfläche. Sowohl beim Tunnel- wie auch bei Kraftmikroskop ist die Abbildung eine Kombination der Oberflächen- und der Spitzenstruktur. Das bedeutet, wenn auf der Oberfläche feine Spitzen oder scharfe Kanten sind, wird die Struktur der Spitze abgebildet und nicht die der Oberfläche. So einfach der Bau und Betrieb eines Spitzenrastermikroskop ist, so schwierig ist in manchen Fällen die Interpretation der Bilder.

### 1.9.7. Bilder eines Halbleiterspeichers

Die nächste Probe ist ein Siliziumwafer, auf dem ein Ramspeicher prozessiert war. Um eine gute Leitfähigkeit zu erreichen, wurde der Wafer mit einer sehr dünnen, ca. 10 nm dicken, Goldschicht bedampft. Unter dem AFM sind bei kleiner Vergrößerung gut die Speicherzellen zu sehen.

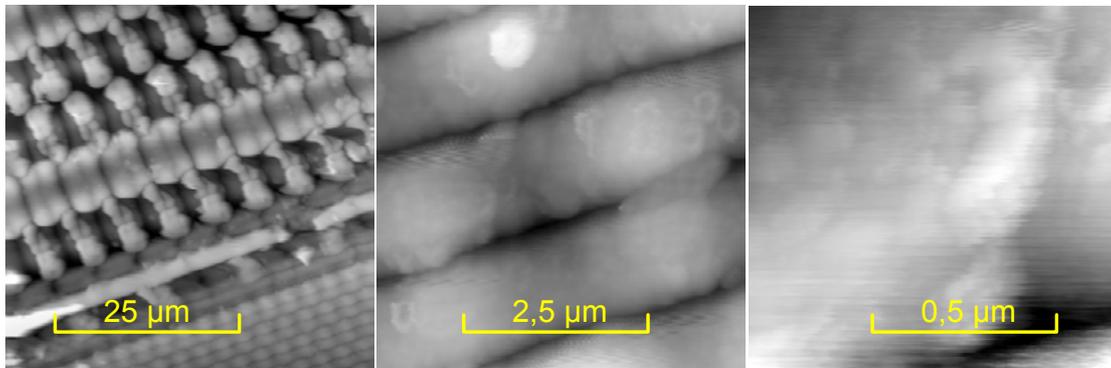


Abb. 87: Ramspeicher unter dem AFM

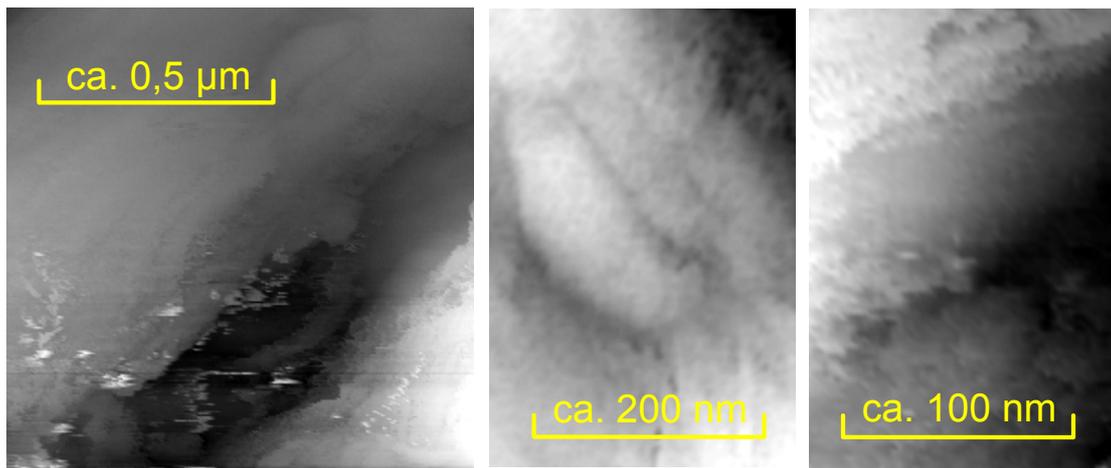
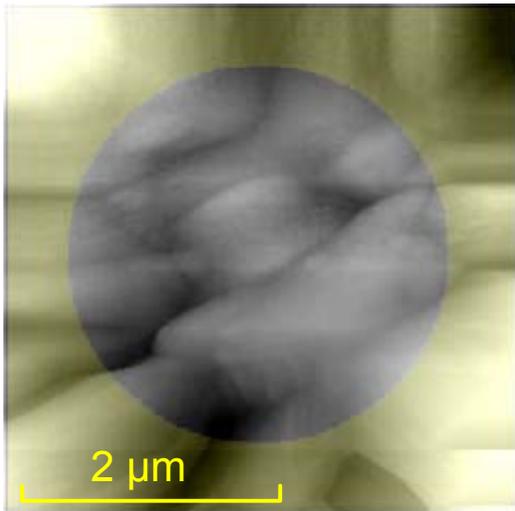


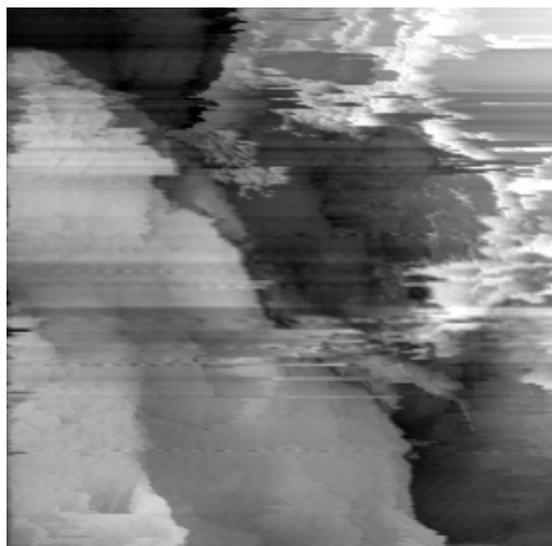
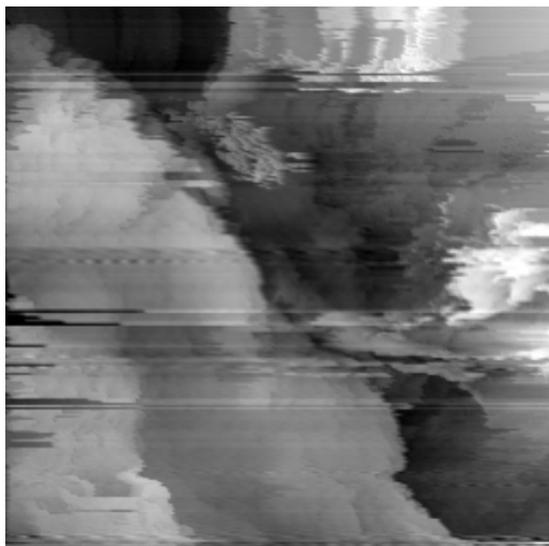
Abb. 88: Ramspeicher unter dem STM

Wird der Beeperscanner mit einer Spannung von  $\pm 37$  V betrieben, kann der Scan-Bereich bis auf etwa  $5 \mu\text{m}$  vergrößert werden. Allerdings ist dann mit größeren Verzerrungen zu rechnen, sodass meist nur das Zentrum des Bildes brauchbar ist.



**Abb. 89: Ramspeicher unter dem STM**

Allerdings bleibt es trotz Logarithmierung nicht leicht die richtigen Regelparameter zu finden. Je strukturierter die abzutastende Oberfläche ist, desto schwieriger wird es für die Spitze der Kontur zu folgen.

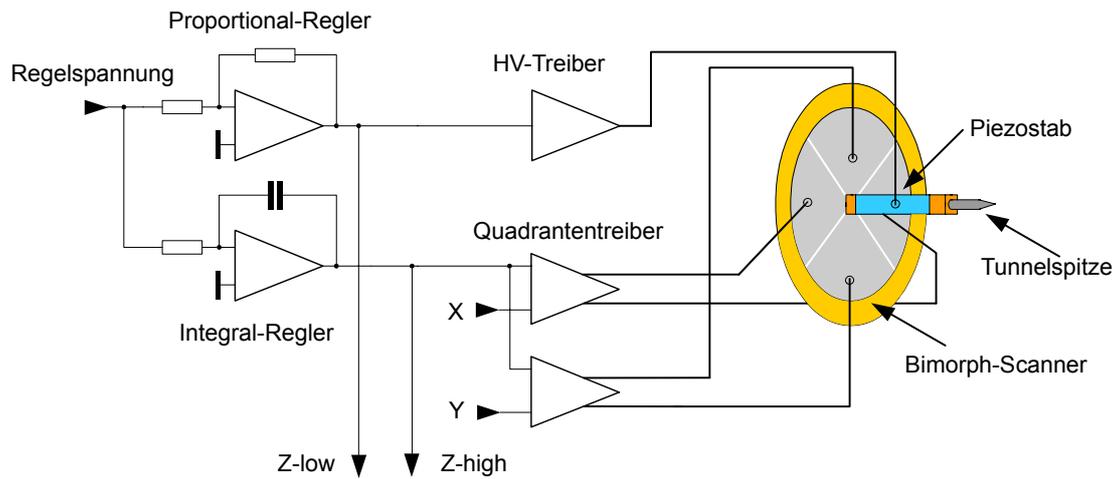


**Abb. 90: Reproduzierbarkeit der Messungen**

Der Betrieb eines Tunnelmikroskops mit einem großen Scanbereich von mehr als einigen Mikrometern gestaltet sich schwierig.

Eine Möglichkeit der Optimierung der Regelstrecke wäre eine Auftrennung in zwei Kanäle und zwei mechanisch in Reihe geschaltete Aktuatoren.

Ein Aktuator mit großem Verstellbereich wird über eine langsame Integralregelung gesteuert und gleicht große Unebenheiten und Verkippungen der Probe aus. Der andere Aktuator mit kleinem Verstellbereich wird durch eine Proportionalregelung angetrieben und besorgt die Abtastung im Nahbereich. Beide Regelspannungen werden in getrennten AD-Wandlerkanälen aufgezeichnet und durch die Mess-Software in geeigneter Weise kombiniert.



**Abb. 91: Scanner mit Grob- und Feinregelung der Z-Achse**

Wie man aus den vorgehenden Seiten sieht, ist zumindest für den Bastler eine der Hauptschwierigkeiten bei der Tunnelmikroskopie weniger der Bau des Geräts sondern die Beschaffung geeigneter Proben. Mehr Auswahl bietet das im nächsten Kapitel vorgestellte Kraftmikroskop.

## 2. AFM, Atomic Force Microscope

### 2.1. Grundlagen

Trotz der sagenhaften Auflösung die, dass Rastertunnelmikroskops bietet, konnte es sich in der Analysetechnik nur wenig etablieren. Zum Teil liegt das daran, dass nur leitfähige Proben untersucht werden können. Vor allem die Zellbiologen, die sich große Fortschritte bei der Untersuchung kleinster biologischer Strukturen erhofft hatten, wurden enttäuscht. Zwar gelang es isolierte Chromosomen auf einer leitfähigen Unterlage abzubilden aber die Ergebnisse waren bescheiden.

Diese Einschränkung auf leitfähige Proben wurde durch die Erfindung des Kraftmikroskops aufgehoben. Das Kraftmikroskop (AFM atomic force microscope) wurde ebenfalls erstmals von Binnig gebaut.

Auch das AFM arbeitet mit einer feinen Spitze, welche die Probe abtastet. Allerdings wird hier kein Tunnelstrom gemessen, sondern die Kraft, mit welcher die Spitze von der Probe abgestoßen, oder auch angezogen wird. Dazu sitzt die Spitze auf einem feinen Federblättchen (Kantilever), welches durch die Kräfte verbogen wird. Aus dieser Verbiegung gewinnt man das Messsignal, das wiederum den Spitzenabstand regelt. Wird die Spitze der Probe genähert, kann man den im folgenden Diagramm skizzierten Kraftverlauf messen.

Im Abstand von einigen 10 Nanometern wird die Spitze von der Oberfläche angezogen. Dafür verantwortlich sind die sogenannten Van der Waals Kräfte, die elektrostatische Anziehung der Atome und Moleküle. Wird die Spitze weiter angenähert, vergrößert sich diese anziehende Kraft aber bei weiterer Annäherung nimmt sie wieder ab um in einem Abstand von etwa 0,1 Nanometer in eine abstoßende Kraft überzugehen. Im Bereich der abstoßenden Kraft sitzt die Spitze auf der Probe auf, deshalb wird er „contact mode“ genannt. Im Bereich der Van der Waals Kräfte dagegen berührt die Spitze die Probe noch nicht, folgerichtig wird er „non-contact mode“ genannt.

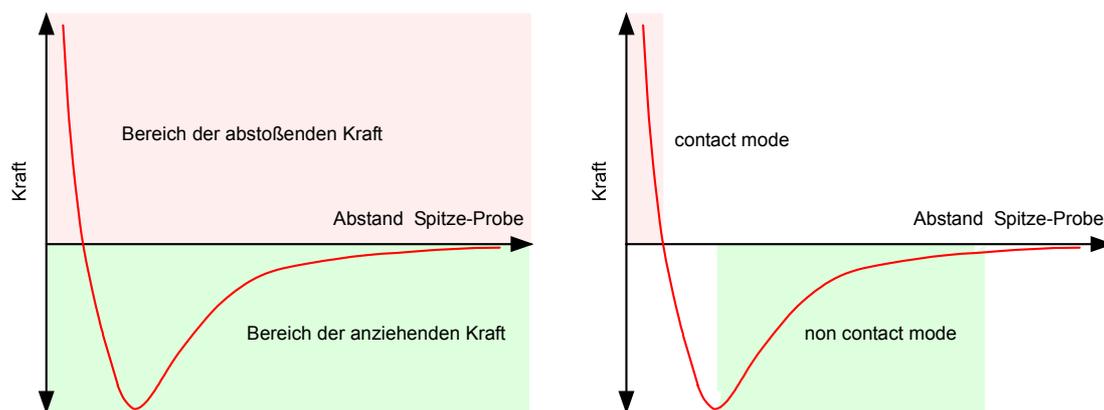
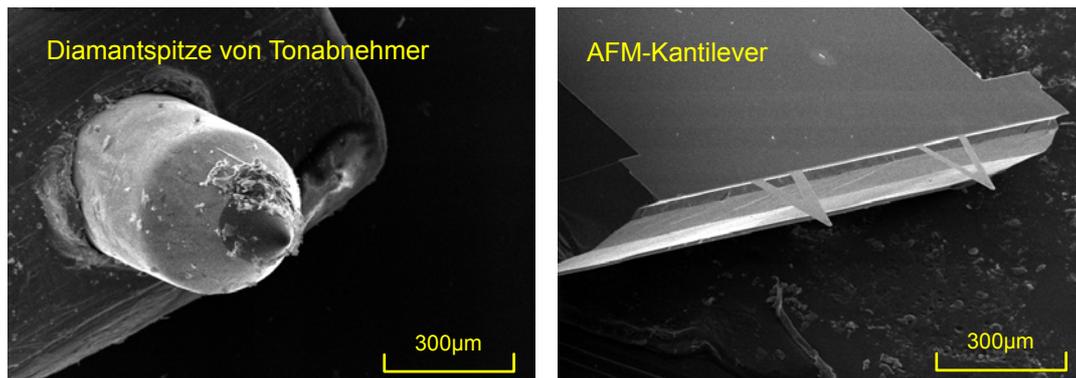


Abb. 92: Verlauf der Kräfte beim Annähern der Spitze an eine Oberfläche

Außerdem kann das Mikroskop noch im „tapping mode“ betreiben. Hier lässt man die Spitze mit kleiner Amplitude schwingen, sodass sie während kurzer Zeit die Probe berührt.

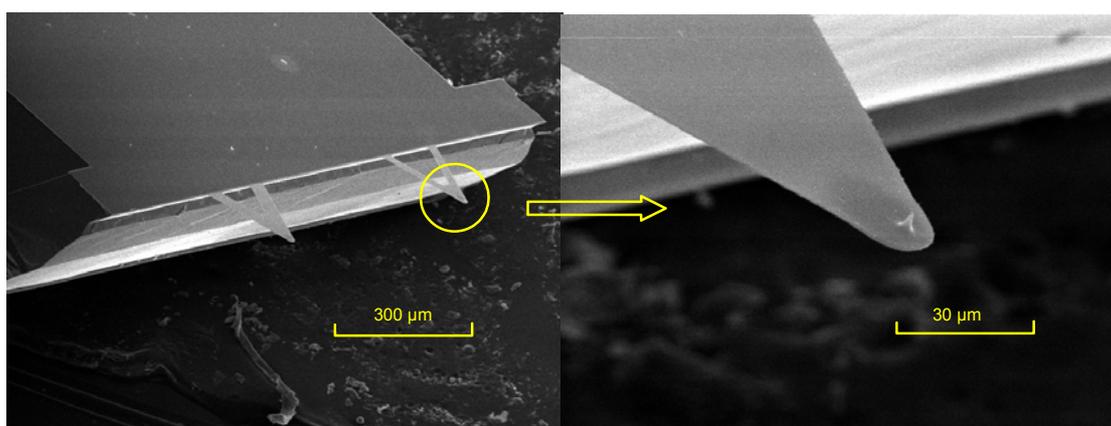
## 2.2. Spitzen für das AFM

So genannte Profilometer, bei denen eine Messsonde mit konstanter Kraft über eine Oberfläche gezogen wird, sind schon seit langer Zeit bekannt. Sogar der altbekannte Plattenspieler arbeitet nach diesem Prinzip. Hier wird die Oberflächenwelligkeit der Plattenrinne mit dem Tonabnehmer in ein elektrisches Signal, das Tonsignal umgesetzt. Tatsächlich gelang es italienischen Technikern, mit einem simplen Kristalltonabnehmer, Ausschläge von weniger als 0,01 Nanometer zu messen. Der Unterschied zwischen Profilometern und Atomkraftmikroskopen liegt somit nicht in der Auflösung von Höhenunterschieden, sondern in der lateralen Auflösung, die durch die extrem feine Spitze bei Kraftmikroskopen wesentlich höher ist.



**Abb. 93: Diamantnadel eines Tonabnehmers und AFM-Kantilever**

Während Binnig bei seinen ersten Versuchen den Kantilever aus einer dünnen Metallfolie und einem als Spitze aufgeklebten winzigen Diamantsplitter noch selbst fertigte, werden sie heute auf mikromechanischem Weg aus Silizium kommerziell hergestellt. Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Diamantnadel eines Tonabnehmers und kommerzieller AFM-Kantilever zeigen den Unterschied. Während bei 100facher Vergrößerung die Diamantnadel schon ziemlich plump wirkt, sind die feinen Spitzen der Kantilever noch nicht mal zu erkennen.



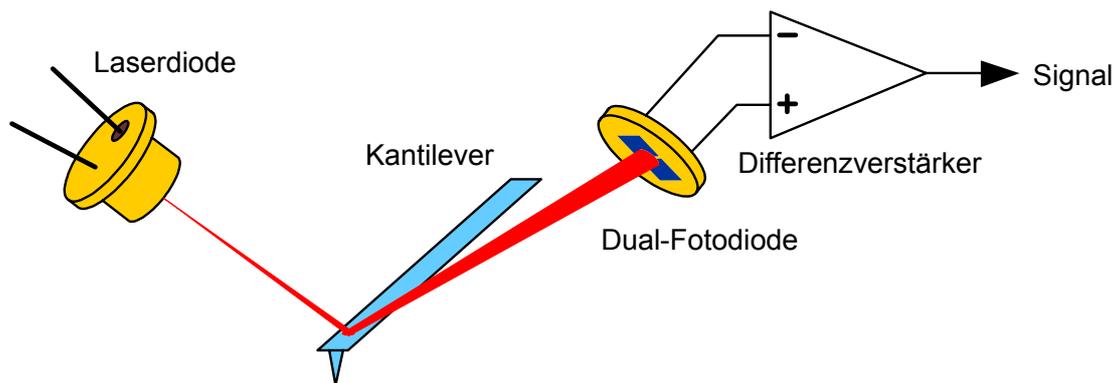
**Abb. 94: Die feine Spitze auf den Kantilevern**

Erst bei 1000facher Vergrößerung ist die feine Spitze am Ende des Federblättchens zu sehen. Durch die Kraftwirkung zwischen Spitze und Probe wird der Kantilever verbogen. Diese Verbiegung ist ein Maß für die wirkende Kraft und wird gemessen. Für diese Messung werden verschiedene Verfahren verwendet. Binnig benützte

hierfür das Tunnelprinzip und montierte eine zweite Spitze einige Angström hinter dem Kantilever. Durch die Messung des Tunnelstroms konnte er feinste Auslenkungen des Kantilevers messen. So empfindlich dieses Prinzip ist, so schwierig sind die Einstellung und der Betrieb, deswegen ist es für den Nachbau nicht zu empfehlen.

### 2.3. Messung der Kraft

In den meisten käuflichen Kraftmikroskopen kommt ein Lichtzeiger zur Anwendung. Beim Lichtzeiger wird die Auslenkung eines Laserstrahls, der vom Kantilever auf eine Fotodiode reflektiert wird, gemessen.



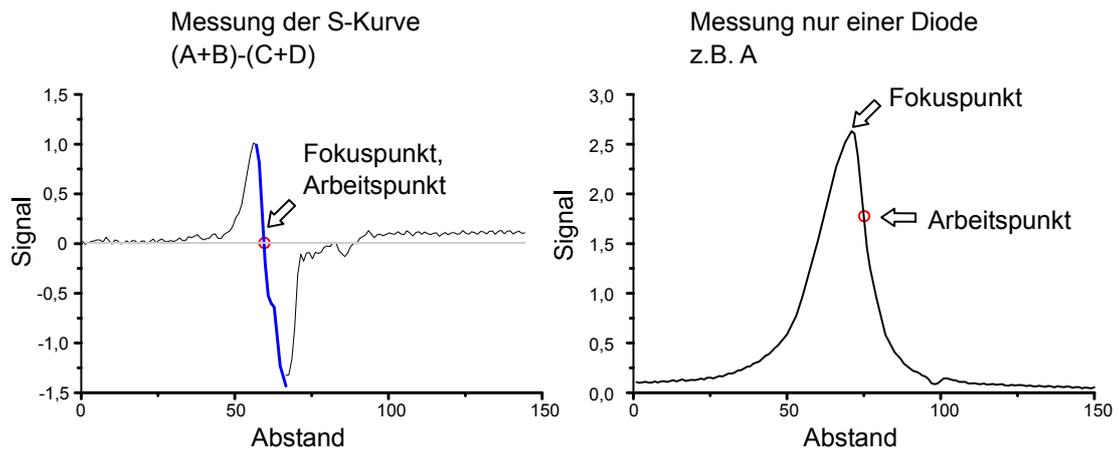
**Abb. 95: Prinzip der Lichtzeigermessung**

Die Fotodiode ist eine Duodiode und hat zwei getrennte lichtempfindliche Flächen, die durch einen schmalen Spalt getrennt sind. Der Strahlengang ist so justiert, dass der Laserstrahl auf Flächen gleichzeitig fällt, sodass beide Fotodioden den gleichen Fotostrom erzeugen. Ändert sich die Lage des reflektierenden Kantilevers, ändert sich auch die Lage des Lichtflecks auf den Fotodioden und am Ausgang des Differenzverstärkers entsteht ein Signal, das in einem kleinen Bereich der Auslenkung des Kantilevers proportional ist.

Die Anordnung ist trotz des einfachen Aufbaus sehr empfindlich und kann auch selbst aufgebaut werden.

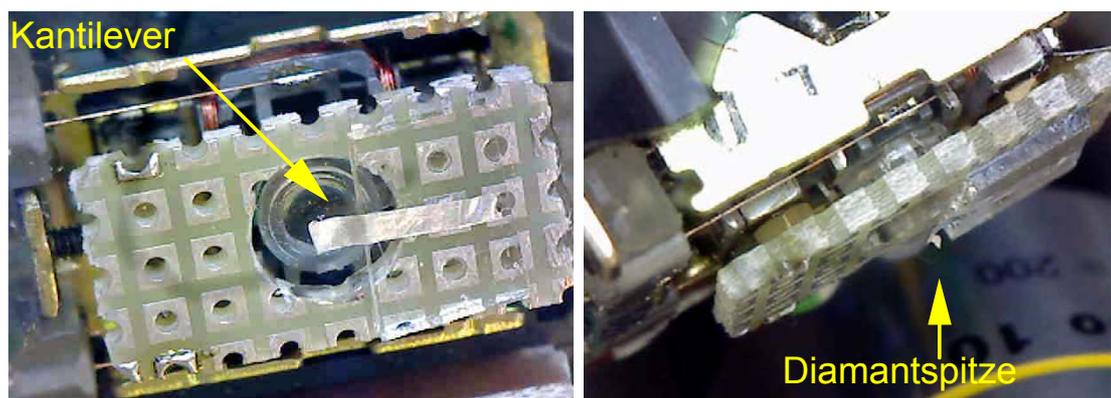
### 2.4. Kraftmikroskop aus einem CD-Lesekopf

Für einfache Versuche eignet sich der Lesekopf eines CD- oder DVD-Players. Dazu wird vor die Linse des Kopfes ein selbst gefertigter Kantilever aus dünner Metallfolie montiert. Die Ausgangsspannung der Fotodioden des Lesekopfes hängt empfindlich vom Abstand der reflektierenden Folie von der Linse ab und ändert sich, wenn die Folie etwas verbogen wird. Bei geeigneter Beschaltung der Fotodioden entsteht bei Änderung des Abstandes des reflektierenden Kantilevers ein S-förmiges Ausgangssignal. Im normalen Betrieb des CD-Lesekopfes dient dieses Signal zur Einstellung des Laserpunktes auf der CD-Speicherschicht. Im Nulldurchgang der Signalspannung ist der Laserspot exakt fokussiert. Eine genaue Beschreibung dieser Fokusregelung findet sich im ersten Teil (Laser Scanning Mikroskop) des Buches. Wird auf höchste Auflösung kein Wert gelegt, kann die Ausleselektronik auch einfacher ausgelegt werden.



**Abb. 96: Ausgangssignal eines Lesekopfes in Abhängigkeit vom Abstand der reflektierenden Fläche**

Wird nur das Signal einer Fotodiode ausgewertet, legt man den Arbeitspunkt etwas neben dem Fokuspunkt auf die steile Flanke der Messkurve. So ist ein eindeutiger Verlauf des Signals gewährleistet.



**Abb. 97: Testaufbau**

Für einen ersten Test wurde ein Stück Lochrasterplatine auf den Lesekopf geklebt. Darauf ein Glasplättchen und auf dieses Glasplättchen ein Streifen dünner Alufolie, welche als Kantilever dient. Auf das Ende des Folienstreifens wurde ein kleiner Diamantsplitter als Spitze geklebt. Natürlich ist diese Anordnung noch ziemlich grob, zur Demonstration des Prinzips aber gut geeignet.

### 2.4.1. Elektronik für den CD-Lesekopf

Aus den Signalen der vier Fotodioden A bis D im Fotosensor werden in einer Auswerteschaltung verarbeitet, um die Information über die Verbiegung des Kantilevers zu erhalten. Dazu werden die Signale der Dioden A und C, sowie B und D in zwei Summationsverstärkern addiert. Die beiden Summen werden dann in einem Differenzverstärker voneinander abgezogen. Am Ausgang des Differenzverstärkers erhält man das gewünschte S-Kurven-Signal  $(A+C) - (B+D)$ . Zur Kontrolle wird auch noch das RF-Signal  $(A+B+C+D)$  des Sensors verstärkt und aufgezeichnet. Der Laser des Lesekopfs erhält seinen Betriebsstrom von circa 40 mA aus einer Stromquelle mit dem Transistor BD138. Der Strom zur Verstellung der Fokussierspule wird von einem einfachen Emitterfolger bereitgestellt.

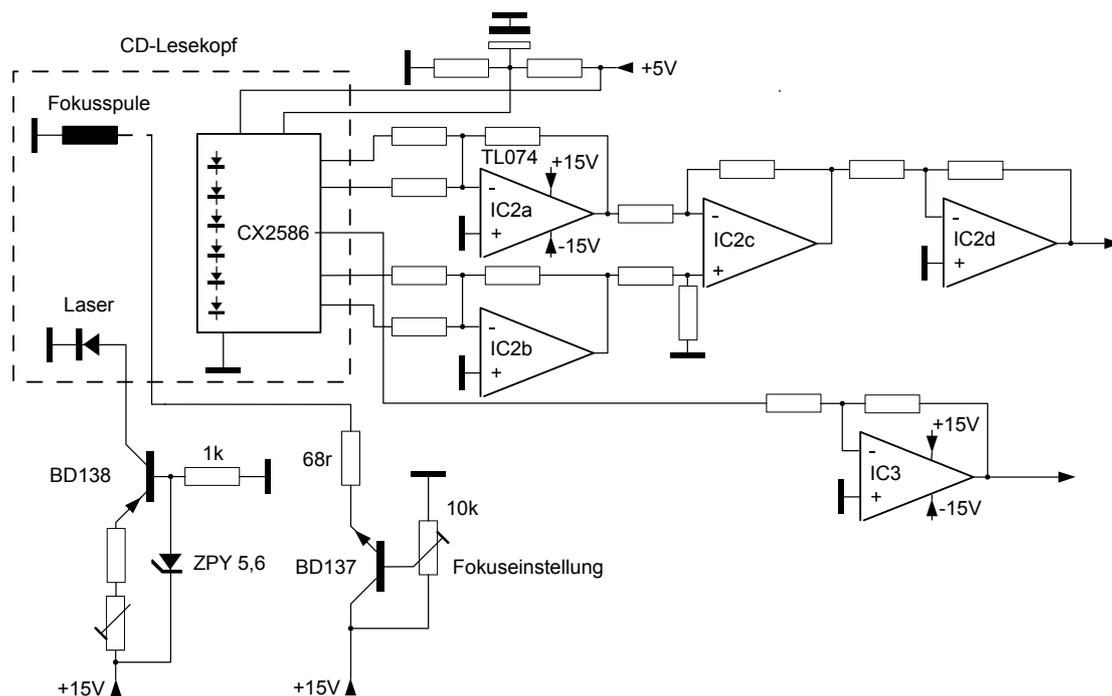
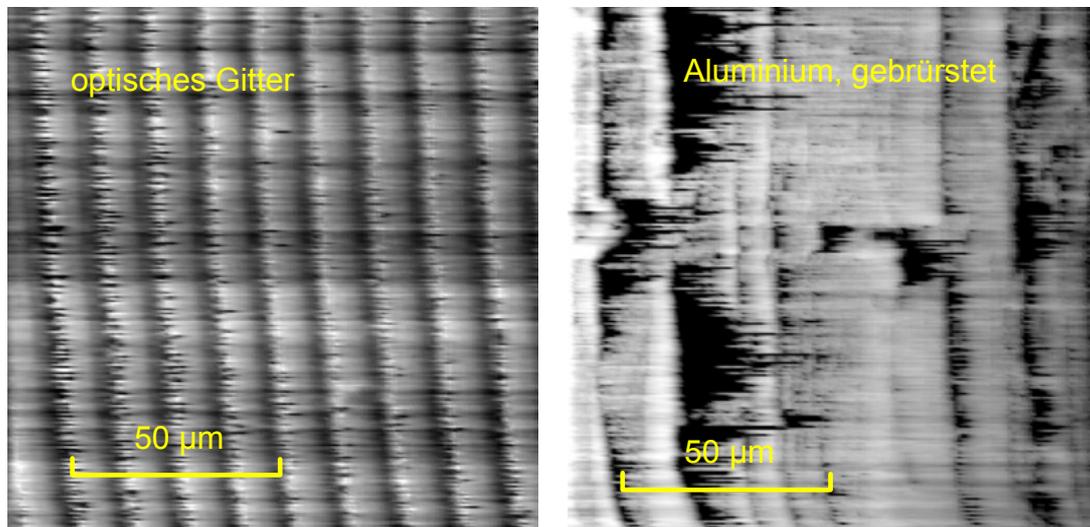


Abb. 98: Auswerteschaltung für den CD-Lesekopf

Da von dem einfachen Aufbau keine besonders hohe Auflösung zu erwarten ist, wird die Abtastung der Probe von einem Scanner mit großem Rasterbereich vorgenommen. Der Verfasser verwendete dazu wieder den Scanner mit Lautsprechern wie der schon beim Lasermikroskop erfolgreich eingesetzt wurde. Auf eine Verstellung in der Z-Achse wurde verzichtet. Das Gerät wurde im „konstante Höhe Modus“ betrieben, d.h., die Grauwerte im Bild werden das Ausgangssignal des Sensors, das Differenzsignal  $(A+C) - (B+D)$  bestimmt. Die Grobannäherung des Messkopfes an die Probe wird mit einer Mikrometerschraube vorgenommen. Zur Aufnahme eines Bildes wurde erst der Arbeitspunkt mit dem Fokusregler auf den Nulldurchgang der S-Kurve eingestellt. Dann wurde der Messkopf soweit angenähert, bis eine Veränderung des Differenzsignals festgestellt werden konnte und dann der Rasterscan gestartet.

### 2.4.2. Abbildung von Oberflächen

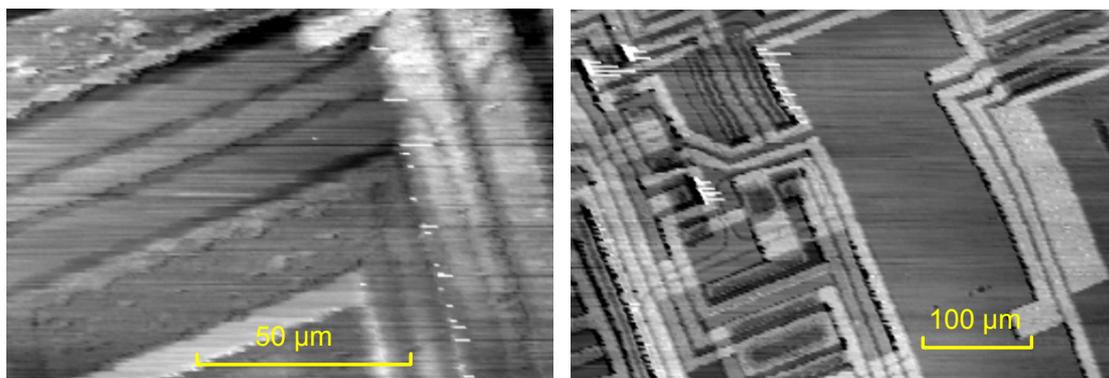
Als erste Probe dient ein optisches Gitter mit einer Gitterkonstante von 13 Mikrometern. Das Bild zeigt zwar Störungen an den steilen Gitterflanken, ist im Großen und Ganzen brauchbar. Ähnliches zeigt auch das Bild einer gebürsteten Aluoberfläche. Eine Regelung des Abstands „konstante Kraft Modus“ würde diese Fehler wohl beseitigen.



**Abb. 99: Die ersten Bilder vom CD-Kantilevermikroskop**

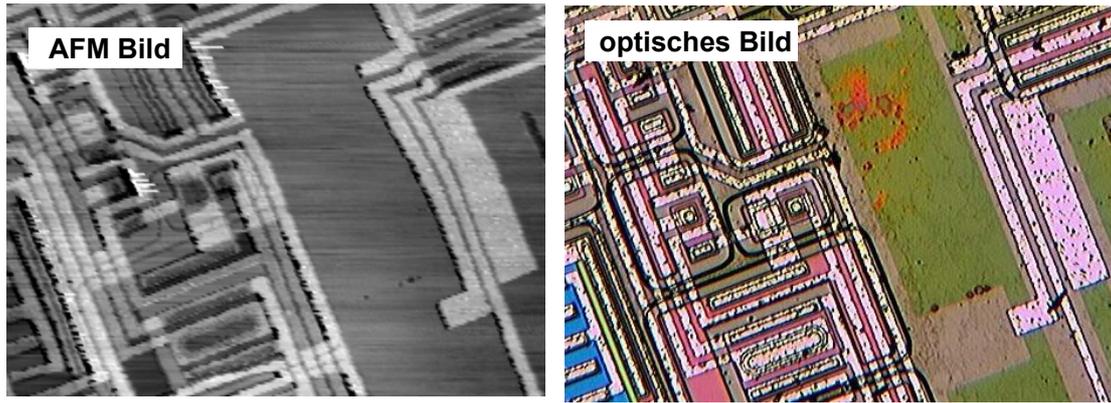
### 2.4.3. Abbildung einer integrierten Schaltung

Besser werden die Abbildung des Chips eines Operationsverstärkers OP 07. Da hier von der Spitze nur geringe Höhenunterschiede zu überwinden sind, treten an den Kanten kaum Störungen auf und die Topologie der Oberfläche wird gut wiedergegeben.



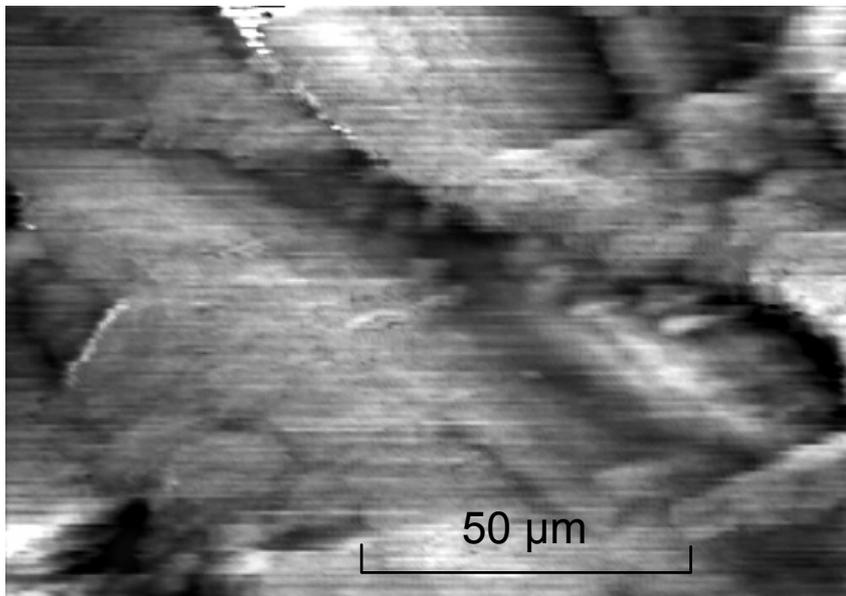
**Abb. 100: Chip des Operationsverstärkers OP07**

Interessant ist auch der Vergleich des AFM-Bildes mit einem optischen Mikroskopbild der gleichen Stelle des Chips. Die Grauwerte im AFM-Bild werden durch Höhenunterschiede bestimmt. Besonders gut ist das an Stellen zu sehen, an denen sich zwei Leiterbahnen kreuzen.



**Abb. 101: Chip des Operationsverstärkers OP07**

Ein großer Vorteil des Kraftmikroskops gegenüber dem Tunnelmikroskop ist die größere Freiheit in der Wahl der Proben, die nicht leitfähig sein müssen. Deshalb auch biologische Präparate untersucht werden. Nicht besonders beeindruckend ist der Rasterscann einer Papieroberfläche (Briefmarke).



**Abb. 102: Papieroberfläche unter dem AFM**

#### 2.4.4. Abbildung von Pflanzenzellen

Besser werden die Abbildungen der Zellen in einer Zwiebelhaut.

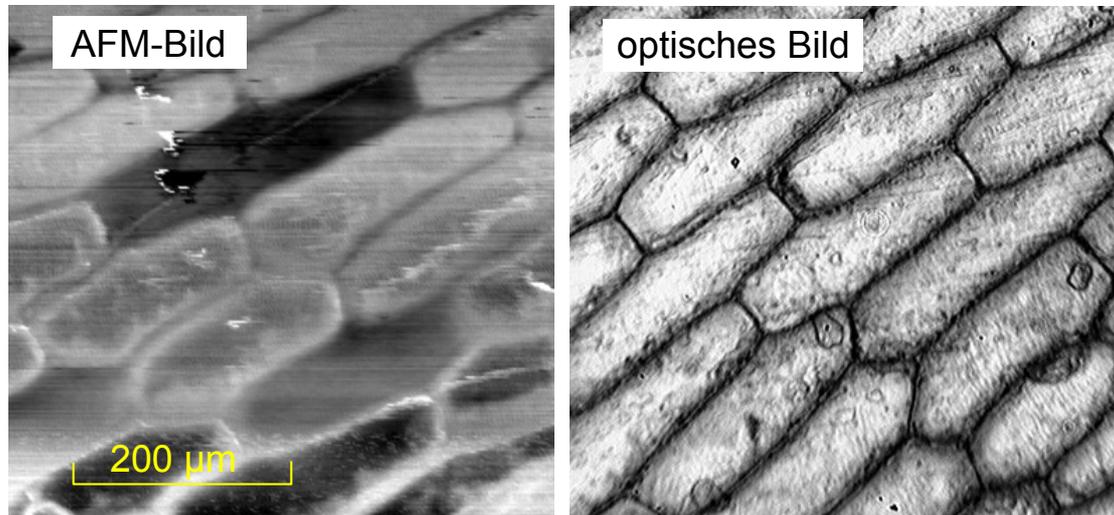


Abb. 103: Zellen in einer Zwiebelhaut

#### 2.4.5. Abbildung von roten Blutkörperchen

Etwas schwieriger ist die Untersuchung von roten Blutkörperchen. Das Blut muss in einer sehr dünnen Schicht auf eine Unterlage gebracht werden.

Im linken Bild wurde die Schicht zu dick aufgetragen, deshalb sind die einzelnen Blutkörperchen kaum zu trennen. Im rechten Bild, mit der doppelten Vergrößerung gelang das besser. Die Schicht muss so dünn sein, dass keine rötliche Färbung mehr wahrnehmbar ist. Am Besten kontrolliert man das Präparat erst unter dem Lichtmikroskop.

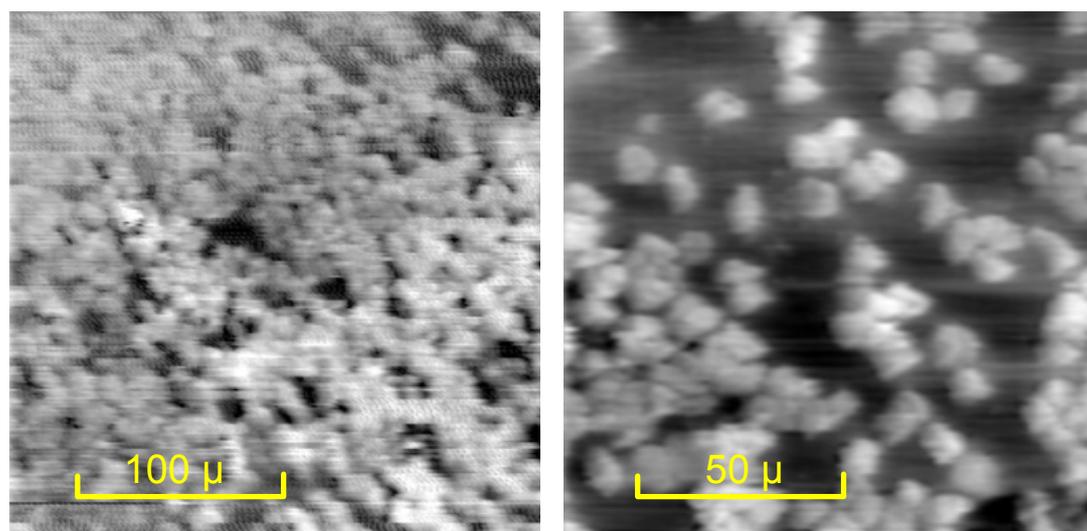


Abb. 104: Rote Blutkörperchen unter dem AFM

## 2.5. Kraftmikroskop mit Uhrenquarzsensoren

Vor allem für im „non contact mode“ arbeitende Mikroskope werden schwingende Sensoren verwendet. Wird ein in seiner natürlichen Resonanzfrequenz schwingender Kantelever einer Oberfläche genähert, ändert sich durch die anziehenden Van der Waals Kräfte diese Frequenz. Diese Änderung kann zur Kraftmessung herangezogen werden. Je höher die Güte des Schwingers ist, desto genauer kann natürlich die Frequenzänderung und damit Kraft gemessen werden. So liegt es nahe für diese Aufgabe Schwingquarze mit ihren extrem hohen Güte zu verwenden. Im einfachsten Fall dient hierzu ein handelsüblicher Uhrenquarz. Solche Quarze mit einer nominellen Frequenz von etwa 32 kHz haben die Form einer kleinen U-förmigen Stimmgabel. Mit einem Kraftmikroskop, das einen modifizierten Stimmgabelquarz als Sensor verwendet, gelingt nicht nur die Abbildung einzelner Atome, sondern sogar die Auflösung innerer Strukturen im Siliziumatom. Auch wenn der Bastler solche extremen Resultate nicht erhoffen kann, lohnt es sich mit den billigen und leicht erhältlichen Uhrenquarzen zu experimentieren. Die Quarze sind in einem etwa 3 Millimeter dicken Metallröhrchen eingebaut, das erst entfernt werden muss. Das geschieht am Besten mit einer feinen Feile, mit der das Röhrchen nahe der Drahtdurchführung geöffnet und dann abgezogen wird. Weil die kleinen Quarze sehr zerbrechlich sind, kann es leicht passieren, dass man ihn beim Öffnen zerbricht. Bei dem niedrigen Preis der Quarze spielt das aber keine große Rolle.



Abb. 105: Uhrenquarz

Zum Antrieb des Quarzes wird ein Frequenzgenerator verwendet, dessen Ausgangsfrequenz über die Resonanzkurve des Quarzes in feinen Schritten verstimmbar ist. Der Verfasser verwendete hierzu einen DDS-Generator (ELV Elektronik AG, 89,50 €), der eine sehr feine Frequenzverstellung von 0,1 Hz erlaubt. Zur Messung der Resonanzkurve wurde der Quarz in eine einfache Schaltung eingebaut. Wegen der niedrigen Frequenz können einfache Operationsverstärker hierfür verwendet werden.

### 2.5.1. Elektronik des Uhrenquarzsensors

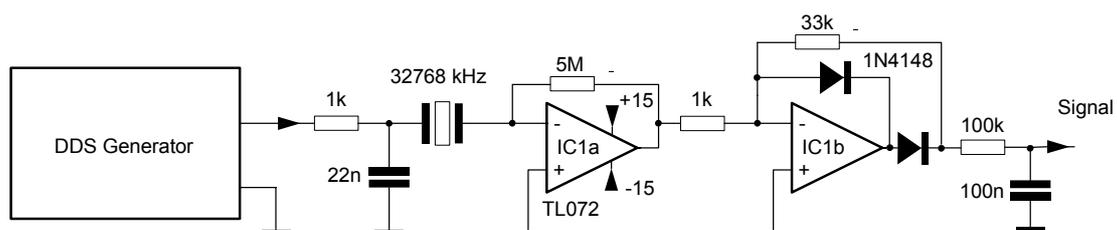
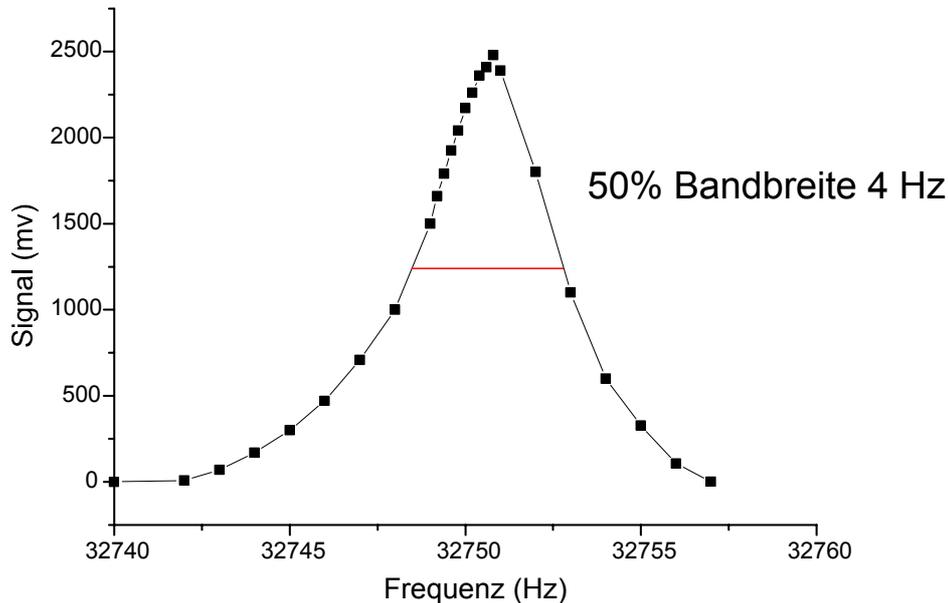


Abb. 106: Schaltung zum Betrieb des Uhrenquarzes

Auf den Ausgang des Generators folgt ein Tiefpass (1k, 22nF), der hier als Abschwächer arbeitet. Der Schwingquarz liegt in der Eingangsleitung eines Strom-Spannungs-Wandlers, dessen Ausgangssignal mit einem Aktivgleichrichter gleichgerichtet wird. Am Ausgang eines weiteren Tiefpasses (100k, 100nF) kann die Signalspannung abgegriffen werden.



**Abb. 107: Gemessene Resonanzkurve eines geöffneten Uhrenquarzes**

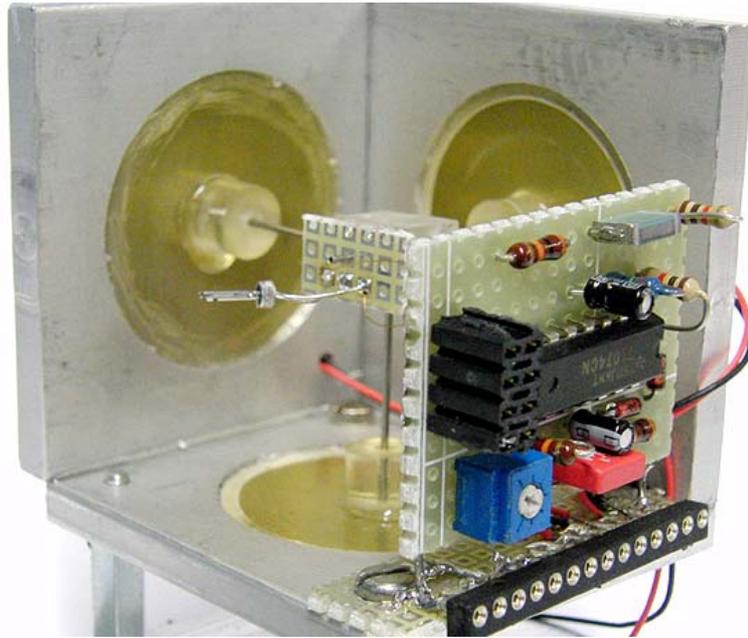
Auffällig ist, dass die gemessene Resonanzfrequenz um circa 15 Hz neben der nominellen Frequenz von 32768 kHz liegt. Möglicherweise liegt das an dem Betrieb in Luft, anstatt in der ursprünglichen evakuierten Kapsel.

Mit der Schaltung kann auch schon die große Empfindlichkeit demonstriert werden. Dazu wird auf das Maximum der Resonanzkurve abgestimmt und die Ausgangsspannung am Tiefpass beobachtet. Berührt man nun eine der beiden Zinken des Quarzes mit einem Haar oder einem hauchdünnen Draht, fällt durch die Dämpfung der Stimmgabelschwingungen die Spannung sofort ab.

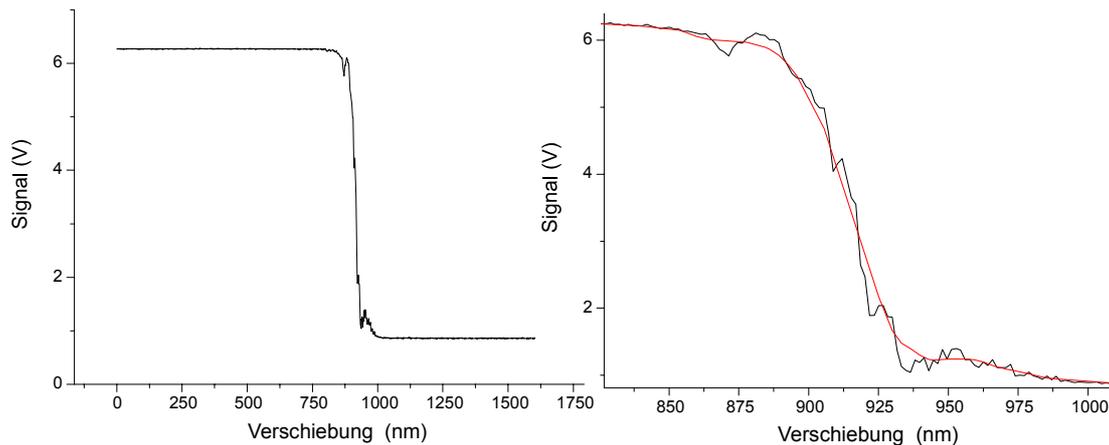
In der Anwendung als Kraftmikroskop wird die Ausgangsspannung am Tiefpass als Regelgröße zur Einstellung des Abstands des Quarzes von der Messoberfläche benutzt.

### 2.5.2. Test des Uhrenquarzsensors

Für einen Test wurde der Quarz auf dem Bimorph-Tripod-Scanner montiert. Eine Messoberfläche wird bis zum Kontakt angenähert und dann wieder etwas zurückgezogen. Nun kann der Quarz mit einer an den Z-Piezo angelegten Spannung bis zum Kontakt angenähert werden und durch Messen der Z-Piezo- und Ausgangsspannung des Quarzverstärkers die Berührungskurve aufgenommen werden.



**Abb. 108: Testaufbau des Quarzes am Bimorph-Tripod-Scann**

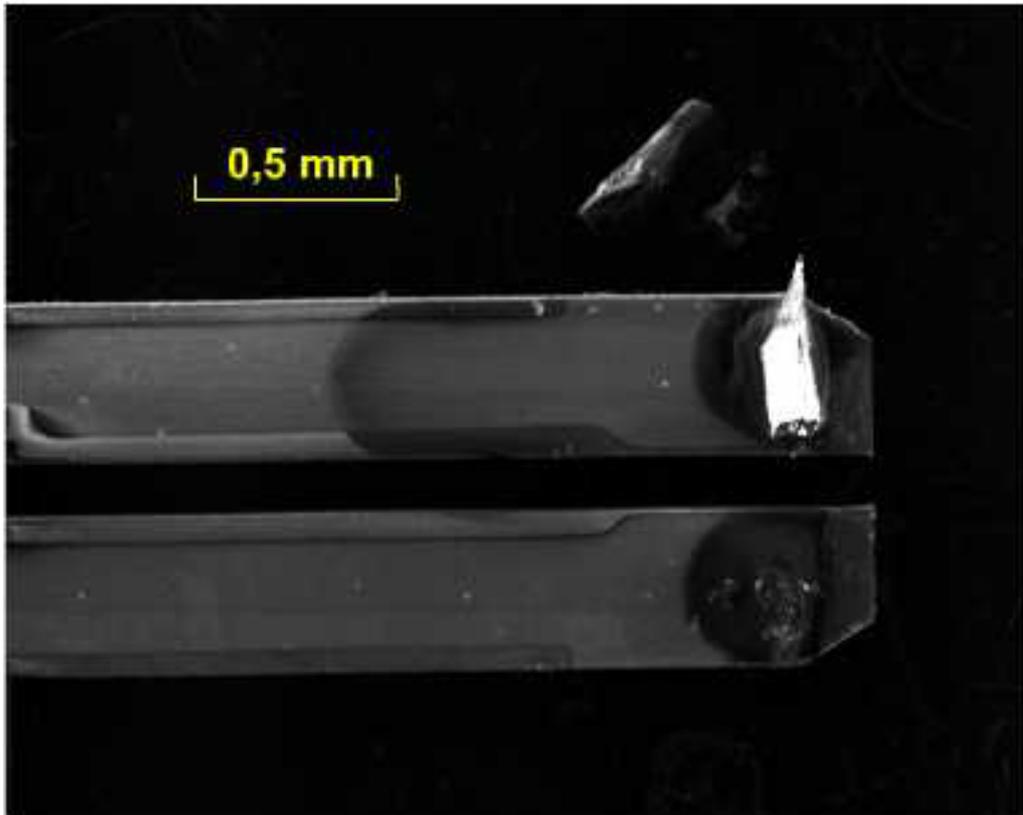


**Abb. 109: Messung der Annäherungskurve**

Die Kurve zeigt die abrupte Änderung der Schwingamplitude bei der Annäherung an die Oberfläche. Aus der Steilheit der Kurve ergibt sich Empfindlichkeit mit etwa 250 mV pro Nanometer, angesichts des einfachen Aufbaus ein ausgezeichneter Wert.

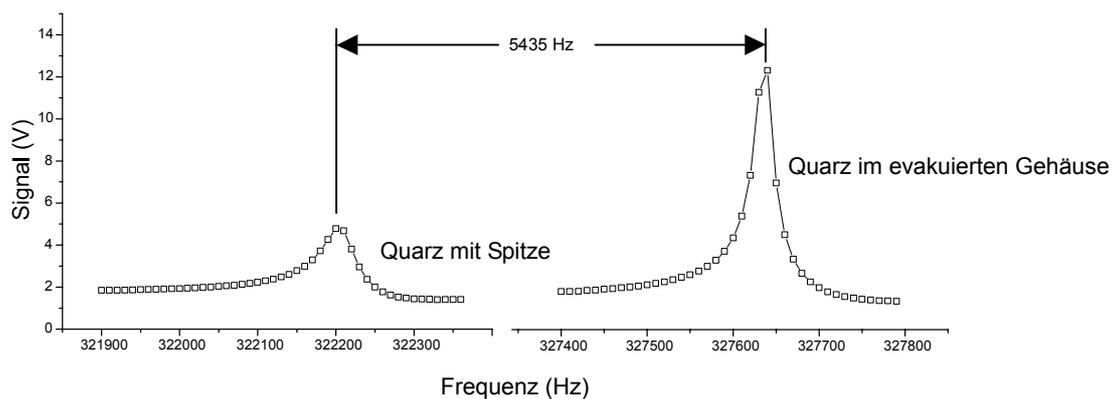
Für eine gute laterale Auflösung sollte der Schwingquarz mit einer feinen Spitze versehen werden. Schon Binnig verwendete wegen ihrer Härte feine Diamantsplitter als Spitzen. Der Verfasser versuchte sein Glück erst mit Glas.

Ein kleines Glasstück wurde mit dem Hammer zertrümmert und dann unter dem Mikroskop ein geeigneter Splitter ausgesucht. Das Aufkleben unter dem Stereomikroskop ist zwar etwas knifflig aber mit ruhiger Hand und etwas Übung durchaus machbar. Mit einem Zahnstocher wird etwas Sekundenkleber auf den Schwingquarz gebracht und mit einem zweiten, angefeuchteten Zahnstocher der Glassplitter aufgenommen und auf der Stimmgabel platziert.



**Abb. 110: REM-Bild des Stimmgabelquarzes mit aufgeklebtem Splitter**

Durch die zusätzliche Masse der Spitze werden Frequenz und Güte des Quarzes stark verändert. Deshalb ist es wichtig, dass die Spitze so klein und leicht wie nur eben machbar ist, um eine möglichst hohe Güte zu erhalten und damit eine hohe Empfindlichkeit zu erreichen.



**Abb. 111: Frequenz- und Güteänderung durch die aufgeklebte Spitze**

Mit einer Glasspitze versehenen Quarz wurden die ersten Testbilder im AFM-Modus gemacht. Als Testobjekt dient ein optisches Beugungsgitter mit einer Gitterkonstante von 1200 Linien / Millimeter, der Abstand der Gitterfurchen beträgt somit 833 Nanometer.

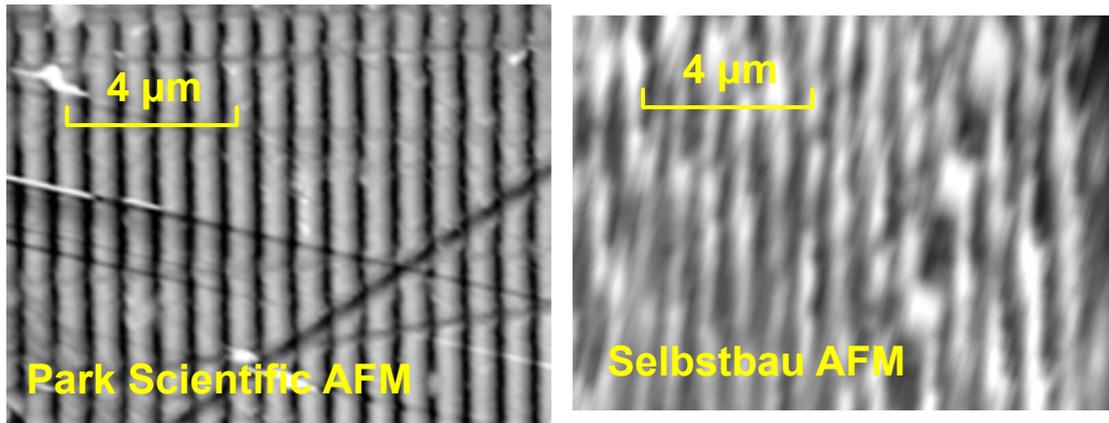


Abb. 112: AFM-Bilder des optischen Gitters

Wie man sieht, ist das Bild des Gitters mit dem Selbstbau-AFM zwar noch verbesserungswürdig, aber immerhin sind die Gitterfurchen eindeutig zu erkennen. Durch Änderungen an der Regelung und dem Einsatz einer anderen Spitze kann man auch mit diesem einfachen Gerät ganz anständige Ergebnisse erreichen.

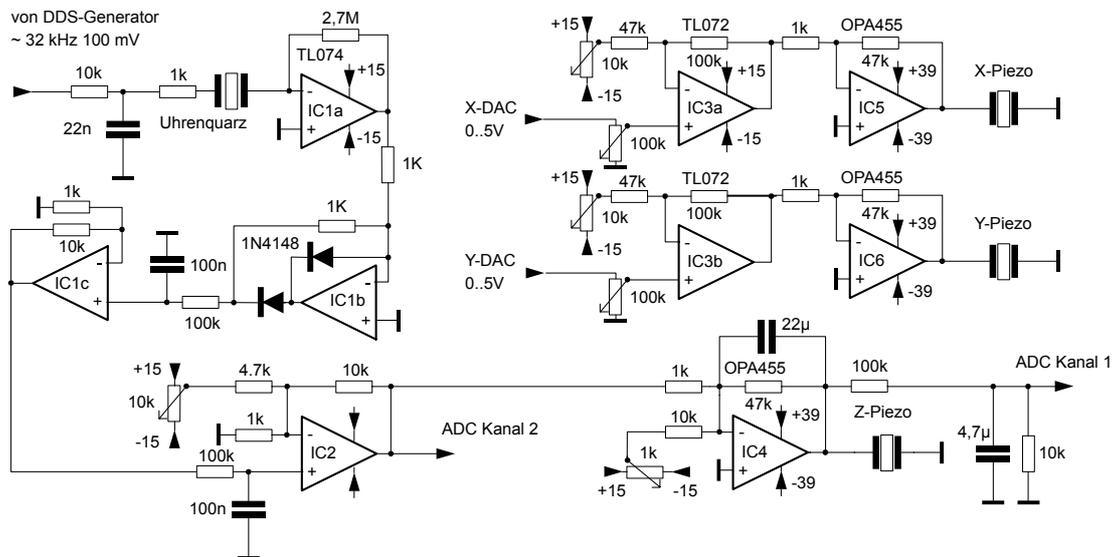
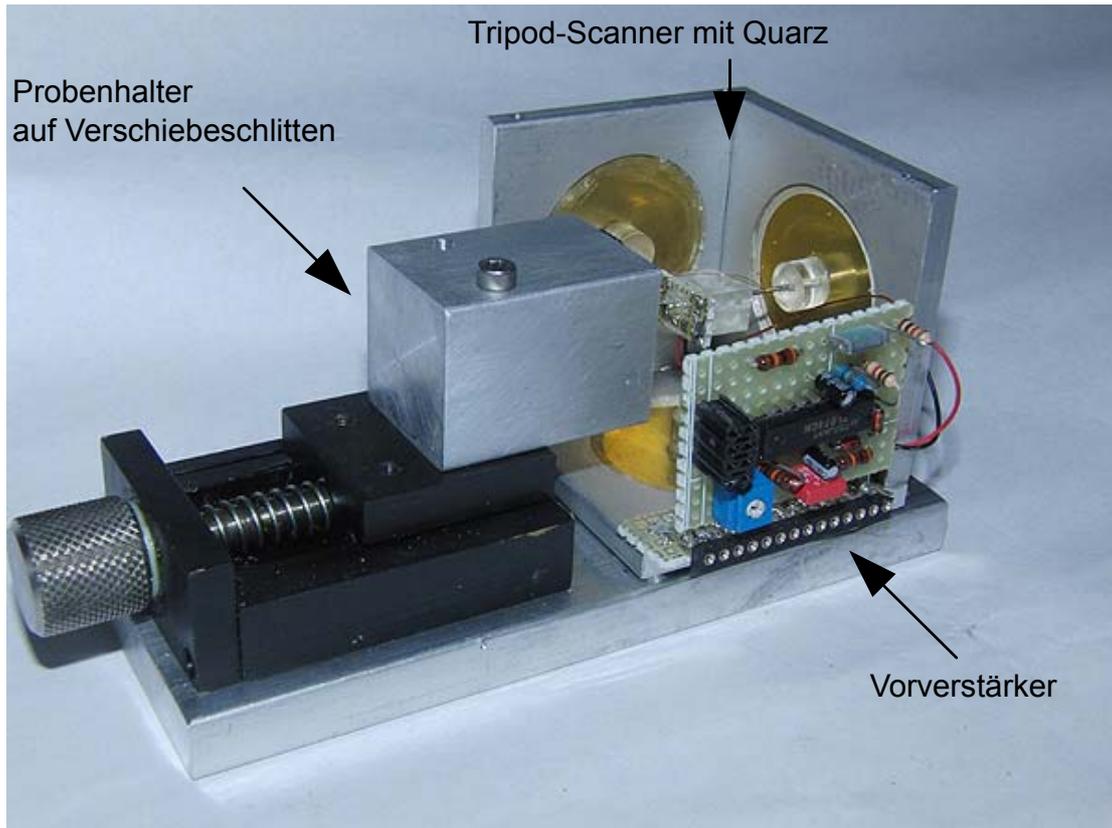


Abb. 113: Schaltung des einfachen Kraftmikroskops

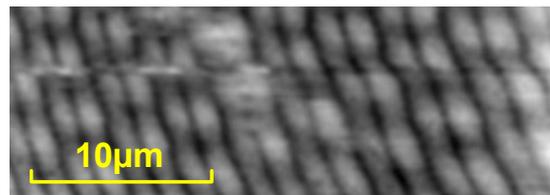
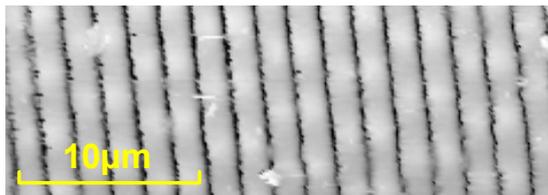


**Abb. 114: Aufbau des Kraftmikroskops**

Für weitere Versuche wurde als Spitze ein elektrochemisch geätzter Wolframdraht verwendet. Das folgende Bild von einem Ram-Speicher Chip zeigt die verbesserte Auflösung, die schon fast das Niveau des kommerziellen Geräts erreicht.

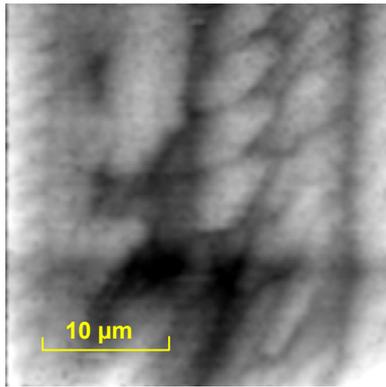
Park Scientific ASM

Selbstbau ASM

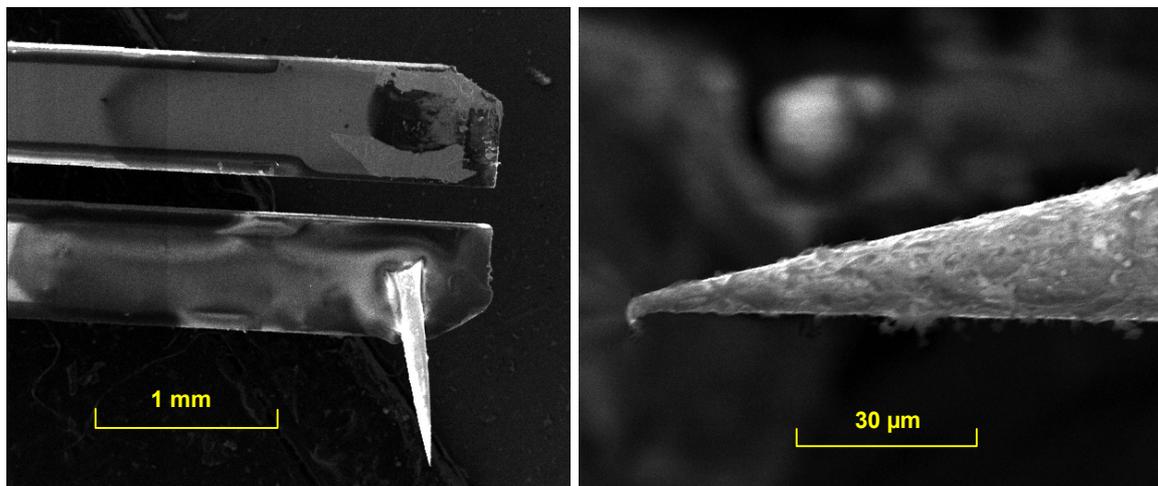


**Abb. 115: AFM-Bilder eines Ram-Speichers**

Allerdings war die Freude nur von kurzer Dauer, da die Bilder zunehmend schlechter wurden.



**Abb. 116: Schlechte Auflösung durch deformierte Spitze**



**Abb. 117: Verbogene Wolframspitze**

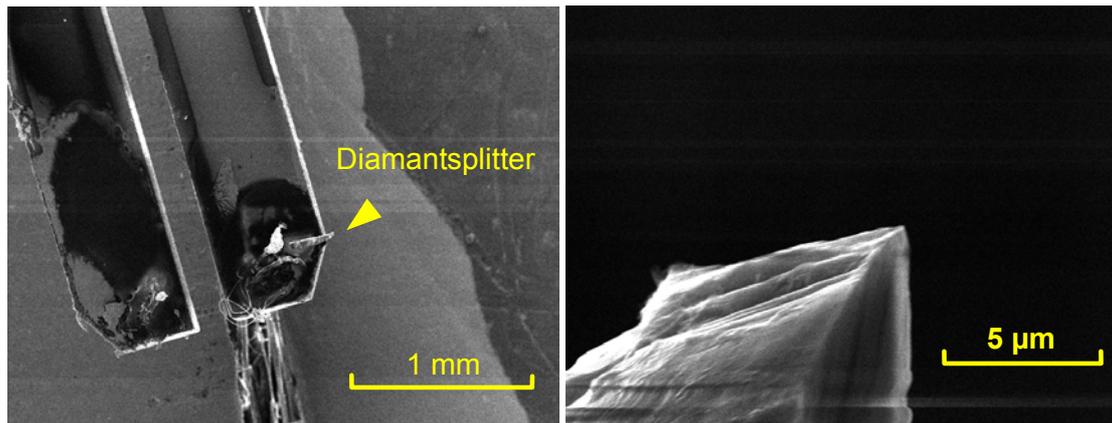
Nachdem der Quarz mit der Spitze ausgebaut und unter dem Mikroskop untersucht wurde, zeigte sich der Grund für die schlechte Auflösung. Durch den Kontakt der Spitze war diese verbogen worden. Die extrem schlanken Spitzen die durch elektrolytisches Ätzen erhalten werden, eignen sich weniger für die Anwendung in der Kraftmikroskopie. Zumindest bei Selbstbaugeräten kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Spitze auf der Probe aufsitzt und verbogen wird.

### 2.5.3. Herstellung einer Diamantspitze



**Abb. 118: Kleine Diamanten**

Bessere Ergebnisse verspricht die Verwendung von Diamanten als Spitzenmaterial. Kleine Diamanten sind gar nicht so teuer, für einige Euros erhält man kleine Diamanten von 0,01 bis 0,03 Karat und einer Größe von einem Millimeter. Etwa 30 kleine Diamanten wurden bei Ebay für 20 € gekauft. Erstaunlicherweise sind diese Winzlinge mit 0,5 bis 1 mm Durchmesser sogar zum Teil mit einem Brillantschliff versehen, für unsere Anwendung spielt das aber keine Rolle. Zur Herstellung der Spitze wird wie bei der Glasspitze vorgegangen und der Diamant mit einem mäßigen Hammerschlag zertrümmert. Unter dem Mikroskop wird ein geeigneter Splitter gesucht und auf die Spitze geklebt. Zur Handhabung wird wieder ein Zahnstocher verwendet, der am Besten mit einer Rasierklinge angespitzt wird. Mit einiger Übung geht das ganz gut und man kann sogar schlechte Spitzen wieder entfernen, ohne den Quarz zu zerstören. Dazu wird kurz mit dem heißen LötKolben über den Quarz gestrichen. Der Sekundenkleber wird dann weich und die alte Spitze bleibt am LötKolben hängen.



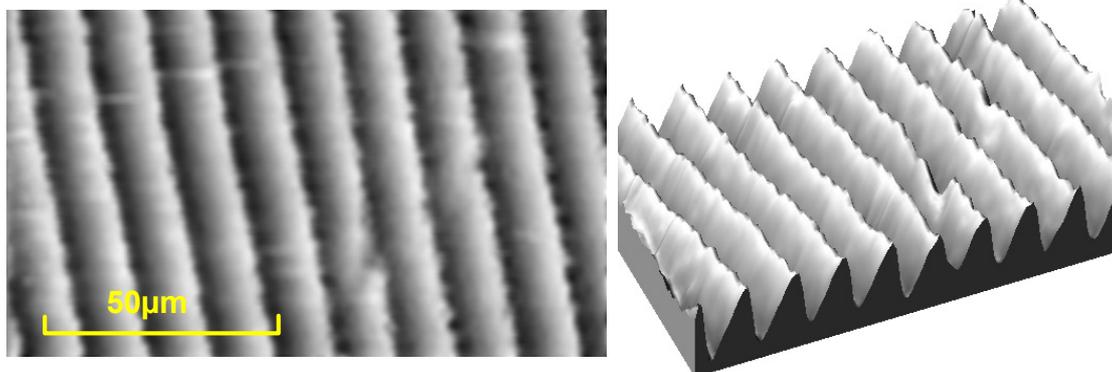
**Abb. 119: Diamantspitze**

Der kleine Splitter hat an der Spitze einen Krümmungsradius von einigen Hundert Nanometern.

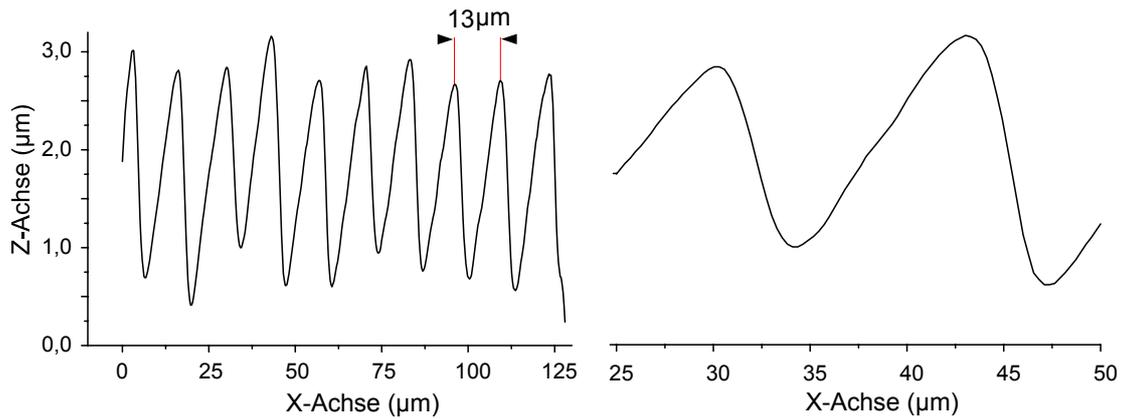
#### **2.5.4. Abbildung eines optischen Gitters**

Mit dem Kraftmikroskop können auch größere Flächen abgetastet werden falls entsprechende Scanner verwendet werden. Deshalb wurde der Quarz auf einen Lautsprecherscanner (siehe Teil 1, Lasermikroskop) montiert. Die Lautsprecher besorgen die Ablenkung in der X- und der Y-Achse. In der Z-Achse wird nach wie vor mit einem Piezobeeper verfahren.

Als erstes Testobjekt dient wieder ein optisches Gitter, diesmal mit einer Gitterkonstante von 13 µm (Infrarotgitter aus einem CO<sub>2</sub> Laser).



**Abb. 120: Bild eines Infrarot-Gitters**

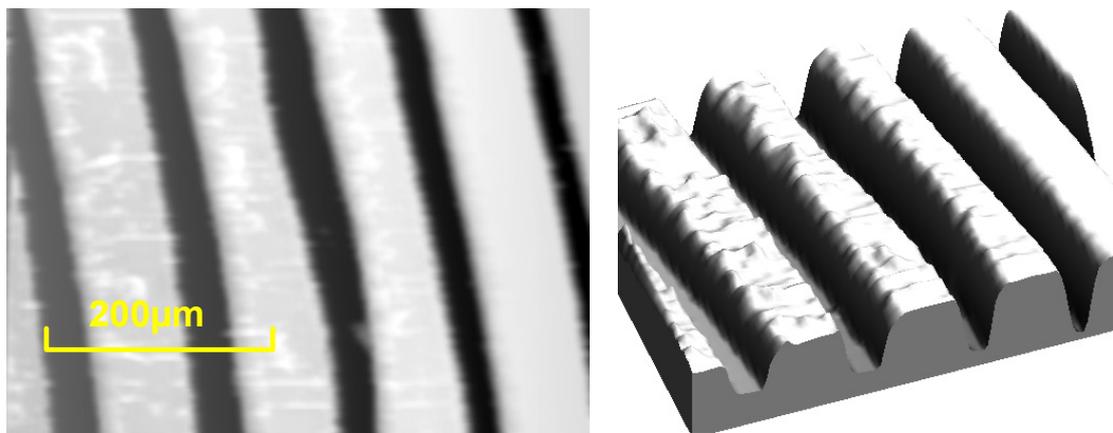


**Abb. 121: Gemessenes Höhenprofil des Gitters**

Das Höhenprofil, das aus der Messung gewonnen wird, zeigt schön die Sägezahn-Form der Gitterfurchen. Das dient bei optischen Gittern dem Zweck möglichst viel Licht in eine bestimmte Richtung zu reflektieren.

### 2.5.5. Abbildung einer Schallplatte

Auch noch größere Bereiche können abgetastet werden wie z.B. eine Schallplatte.



**Abb. 122: Bild einer Langspielplatte**

Allerdings reicht die Diamantspitze nicht bis zum Grund der Plattenrillen, wie die 3D-Darstellung zeigt.

Natürlich darf auch eine integrierte Schaltung nicht fehlen. Das folgende Bild zeigt die Oberfläche eines Ram-Speichers.

### 2.5.6. Abbildung eines Ram-Speichers

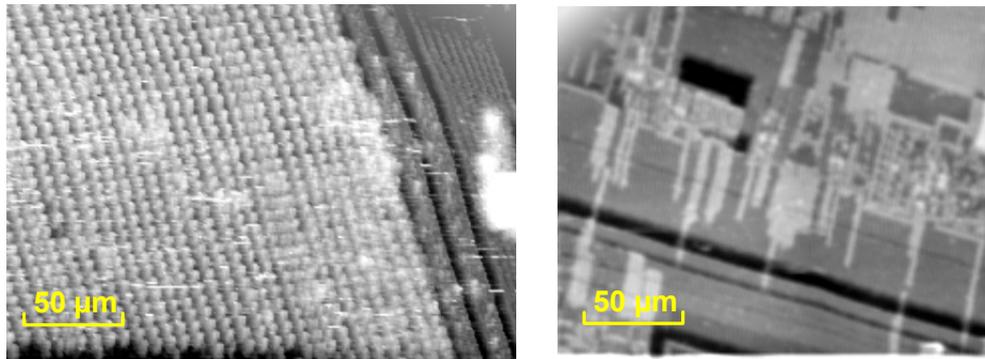


Abb. 123: Abbildung eines Ram-Speichers

### 2.5.7. Abbildung von dünnen Metallschichten

Der nächste Test zeigt die Höhengauflösung des Geräts. Hierfür wurde ein Testgitter verwendet, das aus kleinen Metallquadraten auf einer Glasplatte besteht. Die Metallschichten haben eine Kantenlänge von  $35 \times 35 \mu\text{m}$  und eine Dicke von 60 Nanometern, die mit dem kommerziellen Kraftmikroskop gemessen wurde.

optisches Bild

AFM-Bild (Park Scientific Gerät)

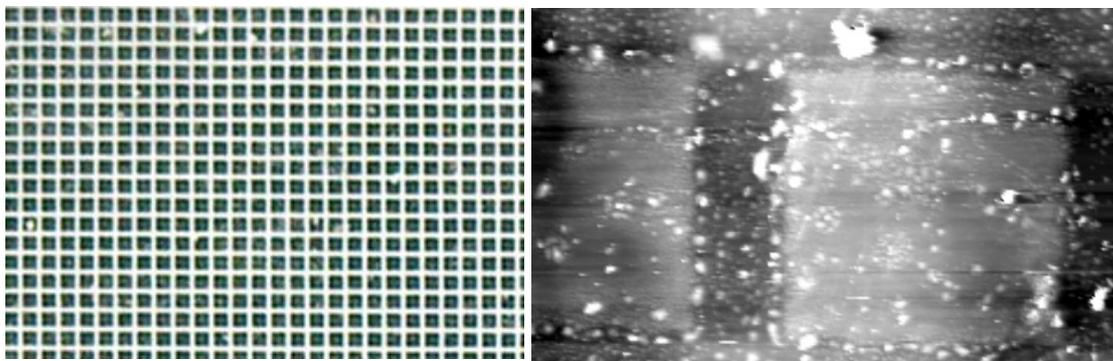


Abb. 124: Optisches- und AFM-Bild der Testfläche

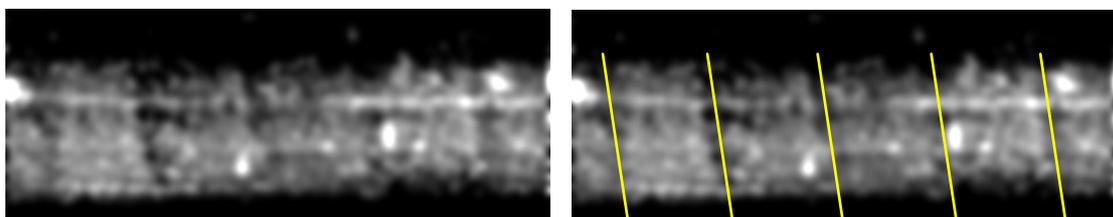
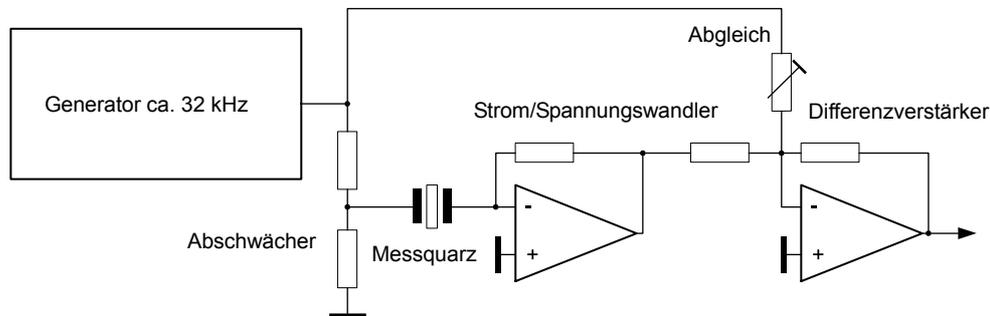


Abb. 125: Bild der Testfläche mit dem Eigenbau-Mikroskop

Auch das Eigenbau-AFM zeigt zwar undeutlich aber doch eindeutig die Stufen an den Quadratflächen, obwohl diese nur 60 Nanometer hoch sind.

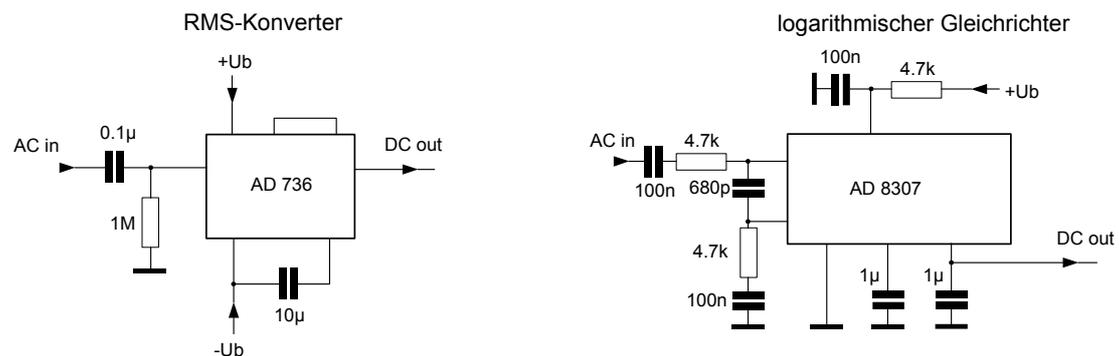
## 2.5.8. Verbesserte Elektronik zum Betrieb der Quarze

Das AFM mit Uhrenquarz bietet noch viele Verbesserungsmöglichkeiten. Eine höhere Empfindlichkeit könnte durch eine andere elektronische Beschaltung erreicht werden. Günstig wäre der Aufbau einer Brückenschaltung.



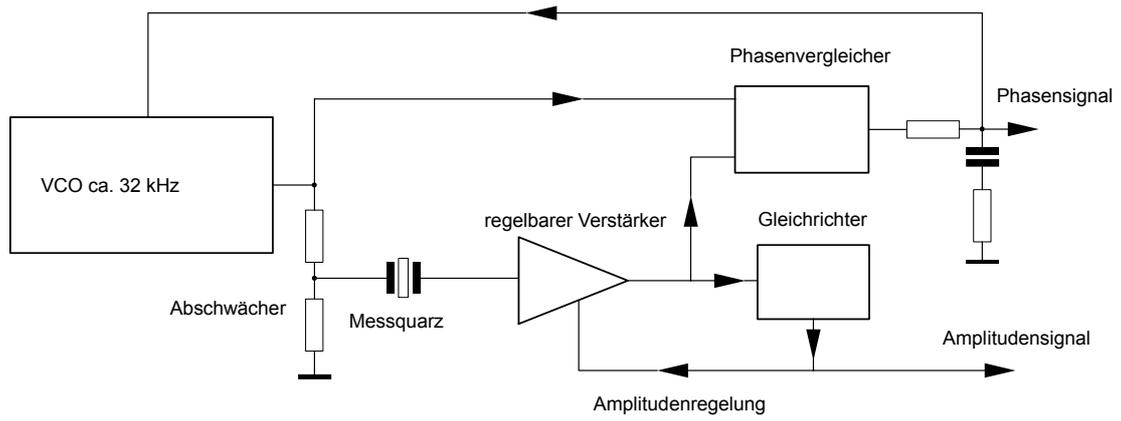
**Abb. 126: Messen der Quarzresonanz in einer Brückenschaltung**

Statt des aktiven Gleichrichters kann ein RMS-Modul (AD AD736, Analog Device) zur Gewinnung der Gleichspannung dienen. Des Weiteren könnte geprüft werden in wie weit der Einbau einer Logarithmierstufe das Regelverhalten verbessert. Gleichrichter und Logarithmierer werden dann in einer Stufe zusammengefasst. Hierzu können Bausteine dienen, die zur Feldstärkemessung entwickelt wurden, wie der AD 8307 von Analog Device.



**Abb. 127: RMS-Konverter und logarithmischer Gleichrichter (Quelle: Analog Device)**

Anstatt die Veränderung der Schwingungsamplitude zu messen, könnte man auch die Änderung des Phasenverlaufs auswerten. Dazu müsste der Quarz in einer Phasenregelschleife (PPL) arbeiten. Änderungen der Resonanzfrequenz und damit der Phase werden dann durch die Steuerspannung des VCO's wiedergegeben. Der Verfasser hat die folgende Schaltung nicht getestet. Sie ist nur ein Experimentiervorschlag. Schwierigkeiten könnten durch die stark wechselnde Amplitude der Schwingung auftreten, sodass evtl. noch eine Amplitudenregelung eingebaut werden müsste.



**Abb. 128: Auswertung des Phasengangs**

### **3. Magnetisches Kraft-Mikroskop**

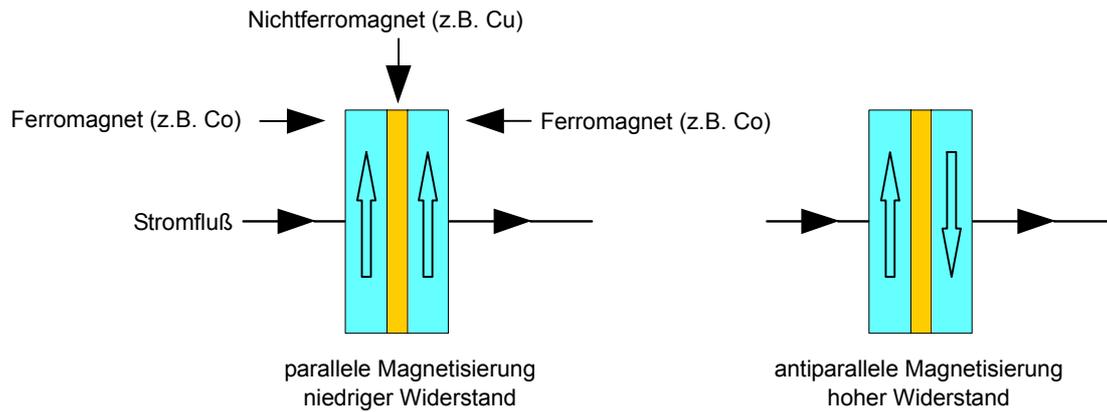
Das Magnetische Kraft-Mikroskop, kurz MFM (magnetic force microscope) besitzt eine Spitze aus ferromagnetischem Material. Durch die magnetische Kraftwirkung der Probe auf die Spitze können die magnetischen Eigenschaften der Probe gemessen werden. Das funktioniert natürlich nur im „non contact Modus“, sitzt die Spitze wie im „contact Modus“ auf der Probe kann diese Kraft nicht mehr gemessen werden. Die Herstellung magnetischer Spitzen und die Messung der sehr kleinen Kräfte im „non contact Modus“ sind nicht trivial, einfacher wird die Messung der magnetischen Eigenschaften einer Probe mit einer anderen Methode.

#### **3.1. Der GMR-Effekt**

Man misst die Magnetfelder nicht über ihre Kraftwirkung, sondern auf elektrischem Weg mit Magnetfeldsensoren. Sind diese Sensoren sehr klein, kann auch eine große örtliche Auflösung erreicht werden. Zwei Messmethoden werden üblicherweise angewandt. Zum einen der Halleffekt und zum anderen der magnetoresistive Effekt. Die üblichen Hallsensoren sind aber für eine hohe Auflösung viel zu groß. Besser ist die Situation bei den magnetoresistiven Sensoren. Die Sensoren sind in den Leseköpfen moderner Festplatten verbaut. Um eine hohe Speicherdichte zu erreichen, müssen die Lesesensoren sehr klein und trotzdem hochempfindlich sein. Bis etwa 1990 waren die Lesespulen in Festplatten im Prinzip wie die Tonköpfe eines Kassettenrecorders aufgebaut. Mit diesen Köpfen konnte eine Speicherdichte von etwa 1 Megabit /mm<sup>2</sup> Plattenfläche geschrieben und gelesen werden. Mit der Einführung der kleineren und empfindlicheren MR-Köpfe war eine Verdopplung der Speicherdichte der Platten verbunden. Eine weitere drastische Steigerung der Kapazität wurde durch die Einführung der GMR-Köpfe erreicht. Hier werden Werte von 31 Megabit / mm<sup>2</sup> erreicht. Die Entdeckung des GMR-Effekts (giant magnetoresistance effect) durch P. Grünberg und A. Fert im Jahre 1988 wurde 2007 mit dem Nobelpreis geehrt. Der GMR-Effekt wird durch eine Quanteneigenschaft der Elektronen, dem Spin verursacht. Durch diesen Spin haben Elektronen ein magnetisches Moment und können durch ein äußeres Magnetfeld beeinflusst werden.

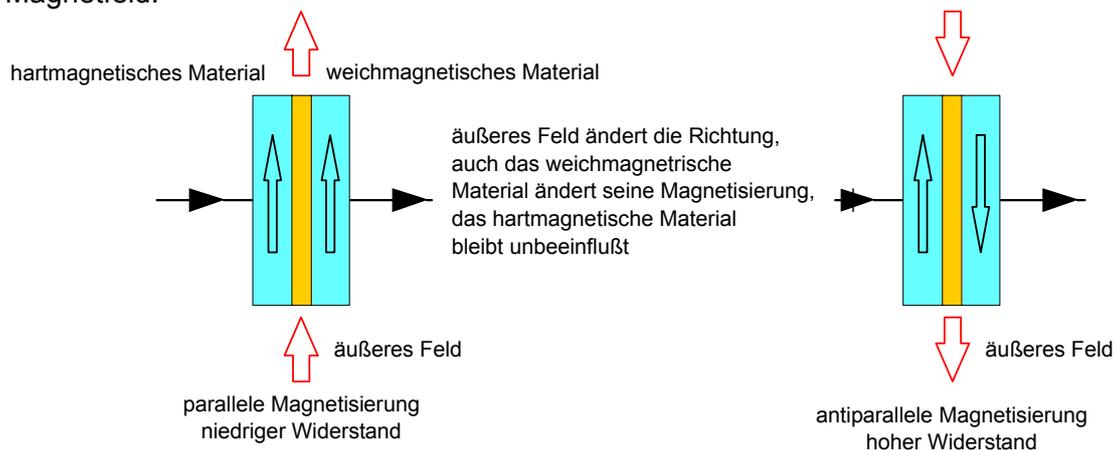
#### **3.2. Aufbau von GMR-Sensoren**

Im einfachsten Fall bestehen GMR-Sensoren aus zwei ferromagnetischen Schichten, die durch eine dünne, leitende aber nicht ferromagnetische Schicht getrennt sind.



**Abb. 129: Der GMR-Effekt an dünnen Schichten**

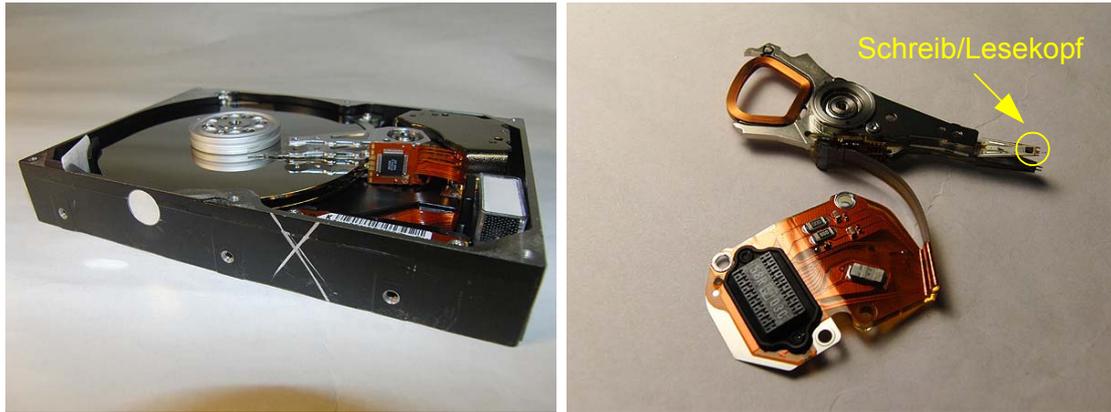
Um den GMR-Effekt technisch nutzen zu können, werden die beiden ferromagnetischen Schichten aus unterschiedlichem Material hergestellt. Eine Schicht besteht aus hartmagnetischen, die andere aus weichmagnetischem Material. Durch den Einfluss eines äußeren Magnetfelds wird die Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht verändert, die der hartmagnetischen Schicht bleibt unverändert. So ändert sich der Widerstand des Schichtpaktes durch ein äußeres Magnetfeld.



**Abb. 130: Die Funktion des Spinventils**

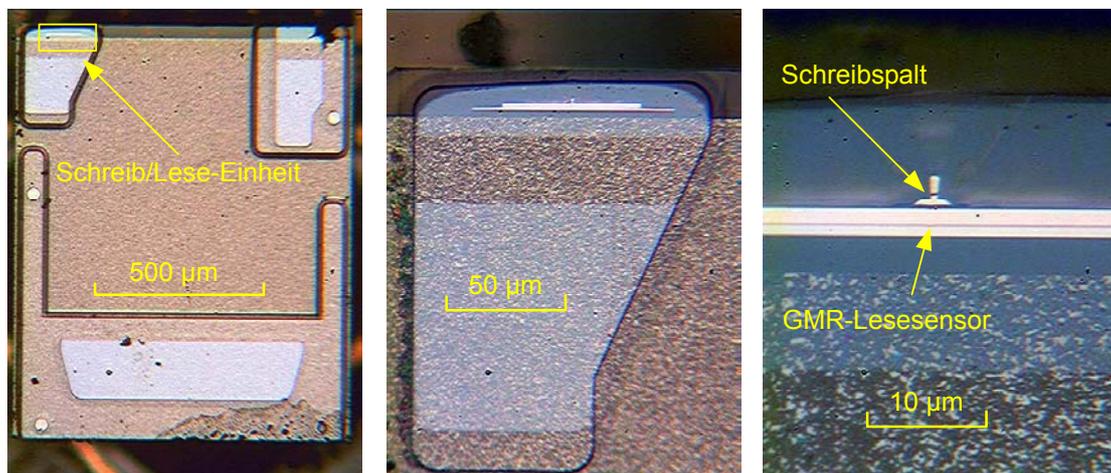
### 3.3. Ausbau von GMR-Sensoren aus Festplatten

Der GMR-Lesekopf einer Festplatte ist sehr gut zum Abtasten lokaler Magnetfelder geeignet. Man kann davon ausgehen, dass Festplatten, die nach dem Jahr 2000 hergestellt wurden, GMR-Sensoren im Lesekopf verwenden. Alte Platten dieser Größe sind für wenig Geld zu kaufen, sodass die Beschaffung der Sensoren einfach ist.



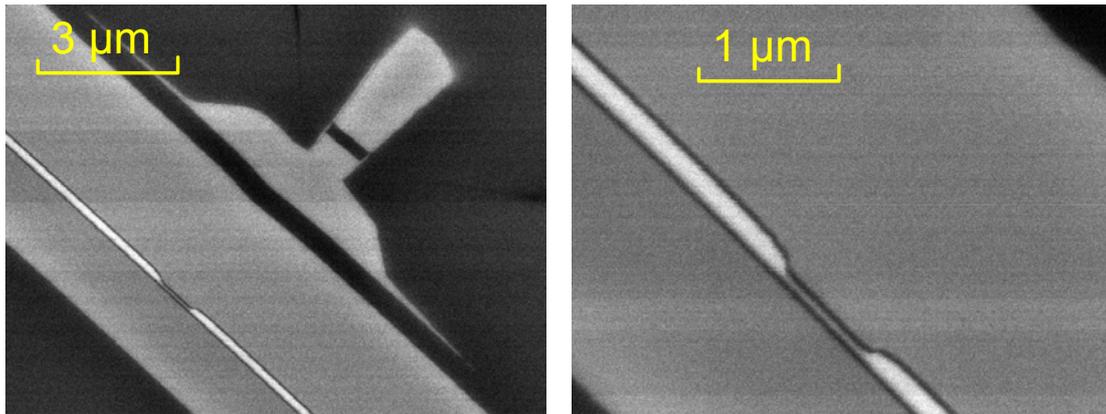
**Abb. 131: Geöffnete Festplatte und der ausgebaute Kopfträger mit Vorverstärker**

Der Schreib/Lesekopf auf dem Kopfträger ist ein etwa 1 x 1 mm kleines Plättchen, die eigentliche Lese- und Schreibeinheit aber noch viel kleiner. Für die weitere Betrachtung ist ein gutes Mikroskop notwendig.



**Abb. 132: Lichtmikroskopische Abbildungen eines GMR-Kopfes**

Bei tausendfacher Vergrößerung wird der Schreibspalt gerade sichtbar. Das interessierende GMR-Leseelement ist aber noch viel kleiner und wird erst unter dem Elektronenmikroskop sichtbar. Der Schreibspalt ist 300 nm breit, das GMR-Element hat die Abmessungen 100 x 800 nm.



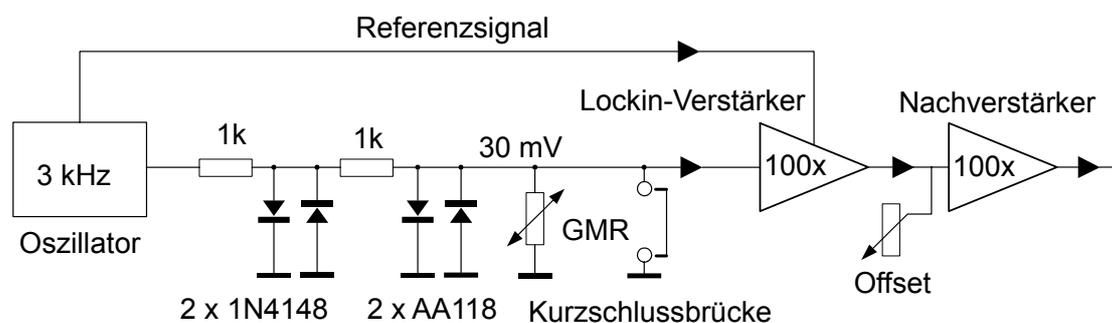
**Abb. 133: REM-Abbildungen eines GMR-Kopfes**

Der praktischen Verwirklichung stehen aber zwei Schwierigkeiten im Wege. Zum einen sind die Bauteile sehr klein, sodass es schwierig sein kann sie zu kontaktieren und zum anderen sind sie sehr empfindlich, was Überspannungen und Überströme betrifft. Schon eine kleine statische Ladung reicht aus den GMR-Sensor dauerhaft zu zerstören. Ebenso tödlich können elektromagnetische Impulse sein. Schon der Einschaltstromstoss eines benachbarten Geräts, wie zum Beispiel einer Lötstation kann schädlich sein, vor allem wenn der Sensor mit längeren Leitungen kontaktiert ist. Auch bei der Widerstandsmessung am Sensor mit einem Multimeter muss gewährleistet sein, dass Messspannung und Messstrom im zulässigen Rahmen bleiben.

Zur Warnung sei gesagt das Experimente mit GMR-Leseköpfen ziemlich frustrierend sein können. Der Verfasser musste mehr als fünf Festplatten zerlegen bis endlich ein Lesekopf den Ausbau und die Kontaktierung überlebte. Üblicherweise führen vom Vorverstärker vier Leitungen zum Schreib/Lesekopf, zwei für den GMR-Sensor und zwei für die Schreibspule. Unterscheidbar sind die Anschlüsse anhand des Widerstands, der bei der Schreibspule bei 10 bis 20 Ohm und beim Sensor 30 bis 100 Ohm beträgt.

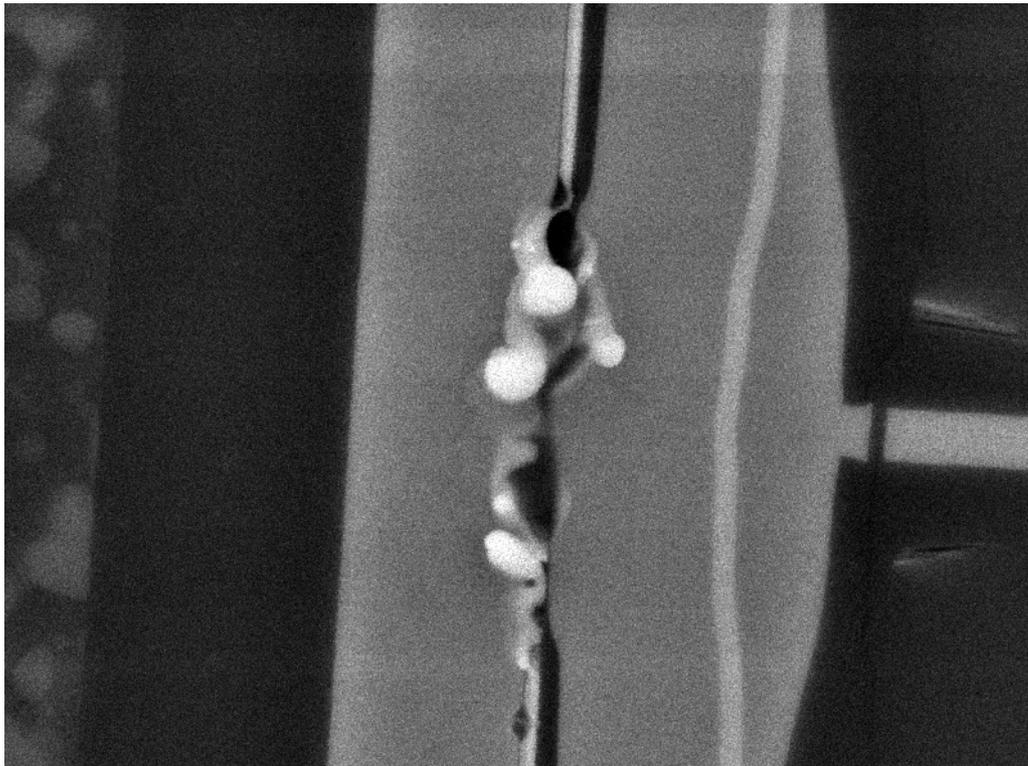
Vor dem Ausbau sollte man den Sensor an den Pins des Vorverstärkers kontaktieren und kurzschließen. Dann kann der Kopfträger ausgebaut und mit einem geeigneten Scanner verbunden werden. Anschließend wird der Kurzschluss beseitigt und der Sensor an die Auswerteelektronik angeschlossen. Der Vorverstärker kann an Ort und Stelle bleiben, er stört den Messvorgang nicht.

### 3.4. Beschaltung von GMR-Sensoren aus Festplatten



**Abb. 134: Beschaltung des GMR-Sensors**

Gemessen wird mit einem Lockin-Verstärker. Die Ausgangsspannung des Referenzoszillators mit etwa 3 kHz wird über eine Schutzschaltung aus Widerständen und Dioden als Biasspannung für den GMR-Sensor verwendet. Die Spannung am Sensor sollte etwa 30 mV betragen und wird durch die Dioden auf maximale 100 mV begrenzt. Ein weiterer Schutz ist durch die Kurzschlussbrücke gewährleistet, die nur zur Messung geöffnet wird, bei Manipulation an der Schaltung oder am Scanner aber geschlossen bleibt. Die GMR-Spannung wird mit dem Lockin-Verstärker 100fach auf 3 Volt verstärkt. Die eigentliche Signalspannung beträgt nur etwa 1 % dieser Spannung, sodass zur Auswertung eine Nachverstärkung notwendig ist. Im Nachverstärker wird auch die konstante Offsetspannung von 3 Volt kompensiert.



**Abb. 135: Durch Überspannung zerstörtes GMR-Element**

### **3.5. Abbildung von Oberflächen mit dem GMR-Sensor**

Als erstes Untersuchungsobjekt eignen sich die Platten des Laufwerks, aus dem der Kopf ausgebaut wurde. Schafft man es die Bitstrukturen wieder sichtbar zu machen, ist man auf dem richtigen Weg.



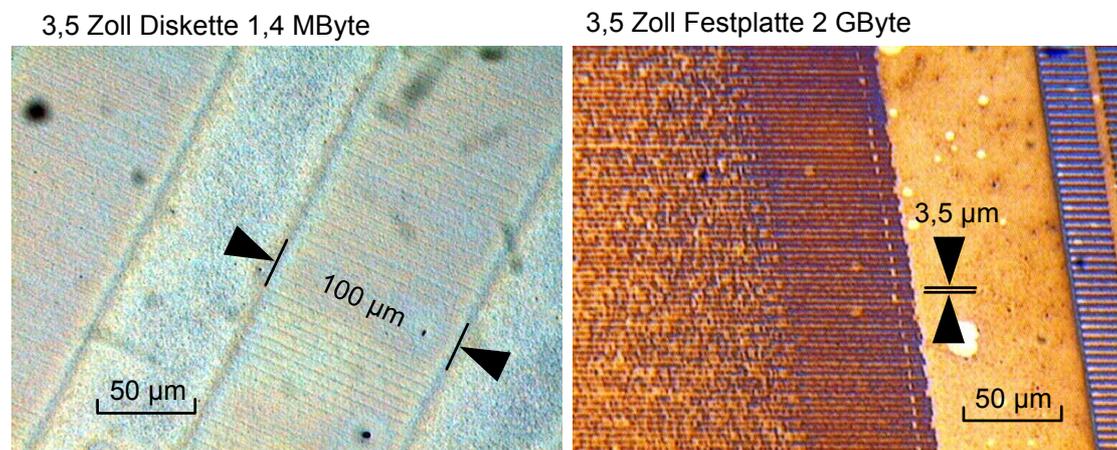
**Abb. 136: Durch erste Signale von der Festplatte**

### 3.5.1. Abbildung von Oberflächen mit der Bittermethode

Zur Prüfung der Methode ist es gut, wenn man die magnetischen Strukturen auch auf andere Weise sichtbar macht um so die Bilder vergleichen.

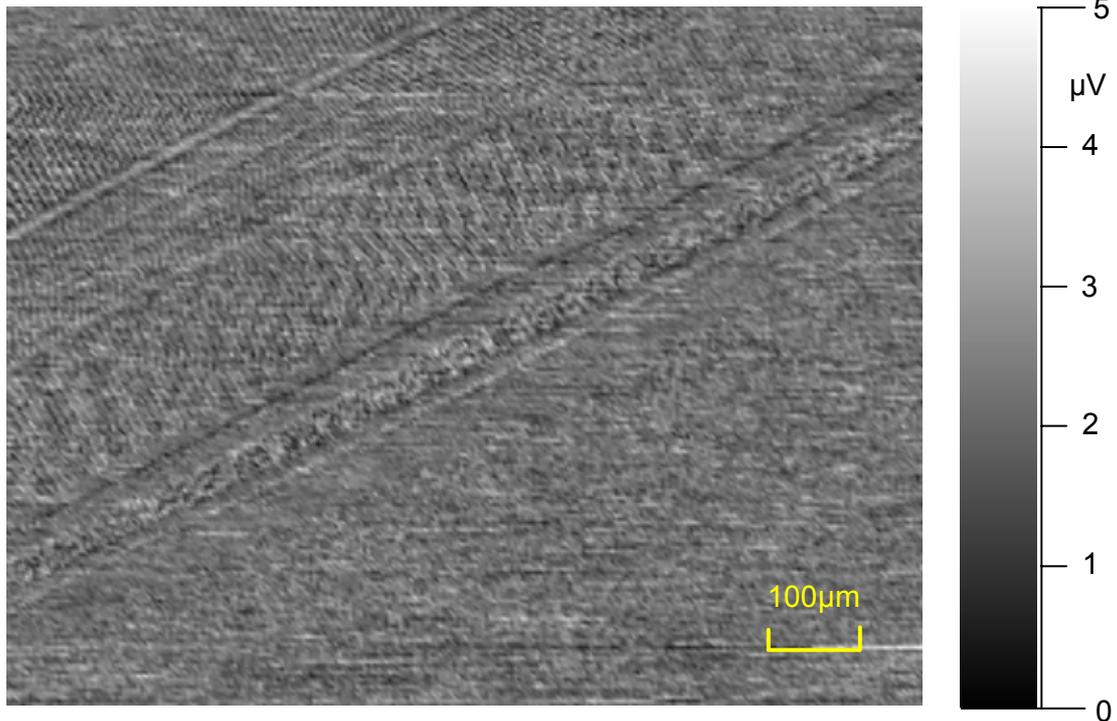
Eine einfache Methode ist die Bittertechnik. Die funktioniert ähnlich wie die bekannte Sichtbarmachung von Magnetfeldern mit Eisenfeilspänen. Nur werden hier kleinste Eisenteilchen auf der Oberfläche verteilt, die sich dann entsprechend der Feldlinien anordnen. So werden die magnetischen Felder sichtbar und können mit dem Mikroskop fotografiert werden. Ferrofluids, magnetische Flüssigkeiten, enthalten solche kleinen ferromagnetischen Partikel in einer Ölsuspension (Ferrofluid 10ml, 10.45€ [www.supermagnete.de](http://www.supermagnete.de)).

Bringt man eine kleine Menge der Flüssigkeit in einer sehr dünnen Schicht auf die Festplatte, werden unter dem Mikroskop die magnetischen Strukturen sichtbar.



**Abb. 137: Sichtbarmachung von magnetischen Strukturen durch Ferrofluid**

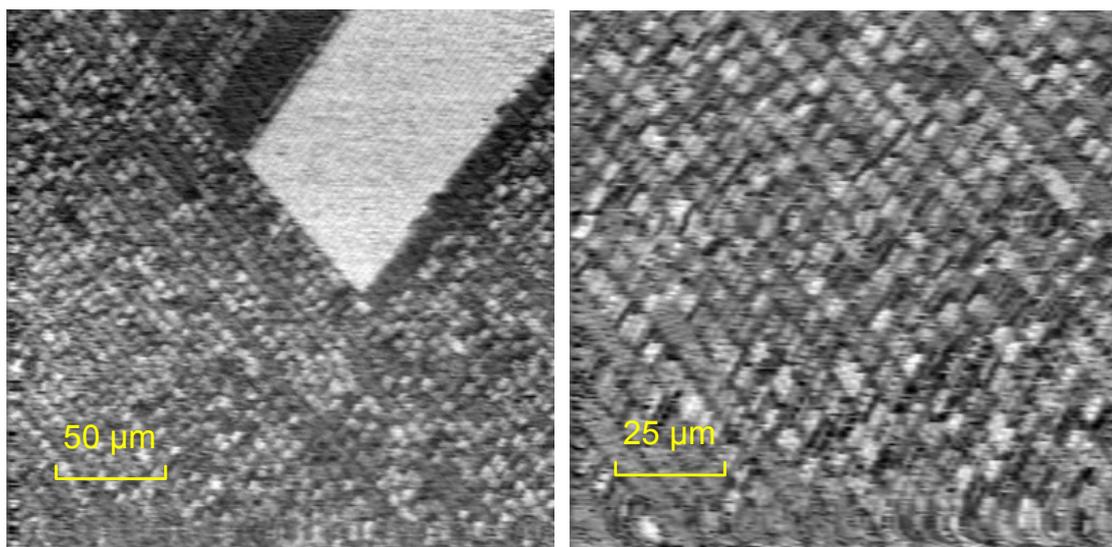
Das Bild zeigt die mit Ferrofluid sichtbar gemachten magnetischen Informationen auf einer Diskette und einer älteren Festplatte. Während bei der Diskette die Spurbreite noch 100 Mikrometer beträgt, ist sie bei der Festplatte auf etwa 3,5  $\mu\text{m}$  geschrumpft. Heutige (Frühjahr 2010) Festplatten haben Spurbreiten von weniger als 100 Nanometer, zu klein um noch mit optischen Mitteln aufgelöst werden zu können. Auch aus diesem Grund ist die Entwicklung eines hoch auflösenden magnetischen Mikroskops von großer Wichtigkeit.



**Abb. 138: Datenstrukturen auf einer Festplatte**

Die Größe des Signals hängt stark vom Abstand des Sensors von der Oberfläche ab. Im Normalbetrieb gleitet der Lesekopf auf einem Luftpolster in 10 bis 20 Nanometer Abstand über der Festplatte. Dieses Luftpolster entsteht durch die hohe Geschwindigkeit, mit der sich die Festplatte dreht. Beim Scannen bewegt sich der Kopf natürlich wesentlich langsamer, sodass sich das Luftpolster nicht aufbaut und der Kopf in Kontakt zur Oberfläche steht.

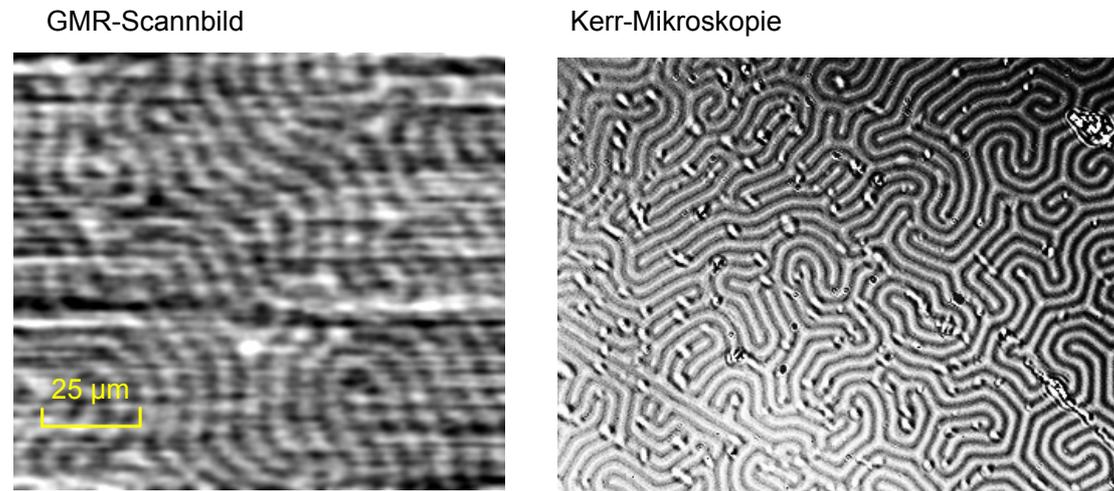
### 3.5.2. Abbildung einer Festplatte mit dem GMR-Sensor



**Abb. 139: Datenspuren auf einer 635 Megabyte Festplatte**

### 3.5.3. Abbildung der magnetischen Domänen in einer YIG-Schicht

Mit dem GMR-Kopf lassen sich natürlich nicht nur Festplatten untersuchen, sondern auch andere magnetische Materialien. Sehr interessant ist YIG (Yttrium-Iron-Garnet). Dieser Kristall hat ferromagnetische Eigenschaften, kann also magnetisiert werden. Wird YIG wieder entmagnetisiert, bilden sich im Kristall magnetische Bereiche, sogenannte Domänen, mit wechselnder Magnetisierung. Diese kleinen Bereiche können mit dem GRM-Kopf sichtbar gemacht werden.



**Abb. 140: Magnetische Domänen in YIG**

Das erhaltene Bild ist zwar nicht so gut aufgelöst wie das mit Kerr-Mikroskopie doch die Domänenstrukturen sind deutlich zu sehen. Mit einem kleineren GMR-Kopf aus einer Festplatte mit höherer Kapazität könnte die Auflösung noch weiter gesteigert werden.

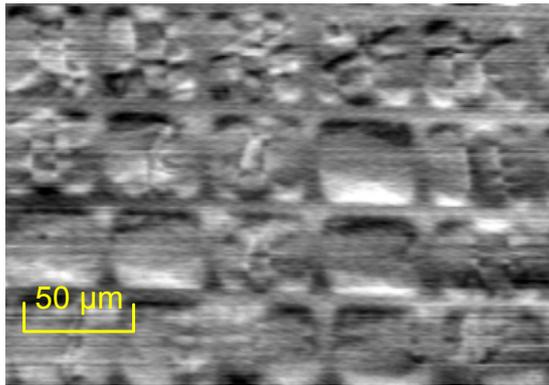
Wie man einfach an das seltene Material YIG gelangt und Einzelheiten zur Kerr-Mikroskopie sind im ersten Band beschrieben.

### 3.5.4. Abbildung der magnetischen Domänen in einer Eisenschicht

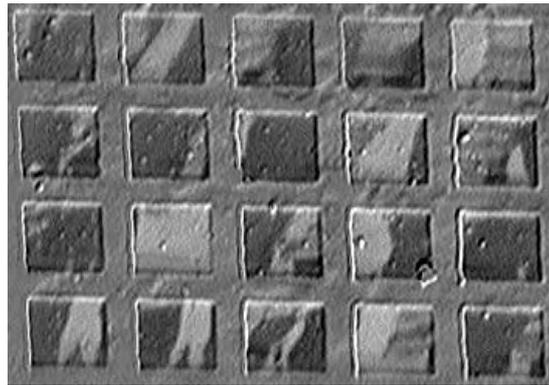
Auch die üblichen ferromagnetischen Metalle wie Eisen, Nickel und Kobalt bilden Domänen, die sichtbar gemacht werden können.

Im nachfolgenden Bild sieht man einen Eisenfilm, der in kleine Quadrate aufgeteilt ist. Auch hier ist es interessant das GMR-Scannbild mit einem auf optischen Weg gewonnenen Bild zu vergleichen.

GMR-Scannbild



Moke-Mikroskopie



**Abb. 141: Magnetische Domänen in einem Eisenfilm**

## 4. Kapazitätsmikroskop

### 4.1. Grundlagen

Eine weitere Möglichkeit der Abbildung von Oberflächen ist die Auswertung der Kapazität zwischen einer Messsonde und der Oberfläche. Diese Kapazität hängt maßgeblich vom Abstand zwischen Sonde und Oberfläche und somit bietet sich eine weitere Möglichkeit zur Messung der Topologie. Da die Sonde sehr klein sein sollte, ist auch die zu messende Kapazität sehr klein.

Die Messung kleiner Kapazitäten kann mit einem Resonanzkreis erfolgen. Um eine hohe Empfindlichkeit zu erreichen, wird man eine möglichst hohe Betriebsfrequenz anstreben, weil sich dann schon kleine Kapazitätsänderungen stark auswirken. Günstige Werte liegen im Bereich von einem Gigahertz. Bei diesen Frequenzen haben Resonatoren mit hoher Güte handliche Abmessungen. Infrage kommen sowohl koaxiale Topfkreise wie planare Striplineresonatoren. Die Hochfrequenz eines Oszillators wird lose an den Kreis gekoppelt, ebenso lose gekoppelt wird ein Diodendetektor an den Kreis. Die abtastende Spitze sitzt am Resonatorelement im Bereich der höchsten Feldstärke.

Diese Art der Messtechnik wurde schon 1960 von Ingenieuren der Firma RCA bei einem Bildplattenspieler eingesetzt.

### 4.2. Aufbau eines Kapazitätssensors

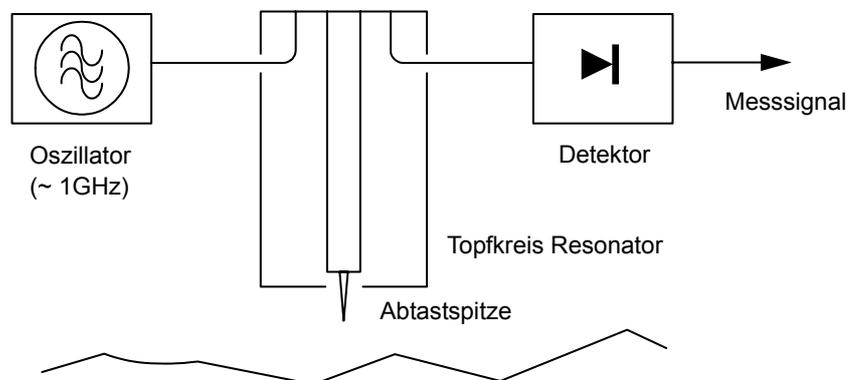


Abb. 142: Kapazitätsmessung mit Topfkreis

Statt eines Topfkreises kann man auch mit einem Kabelschwingkreis arbeiten. Italienische Techniker verwendeten einen  $\lambda/2$  Kabelkreis.

### 4.3. Elektronik des Kapazitätssensors

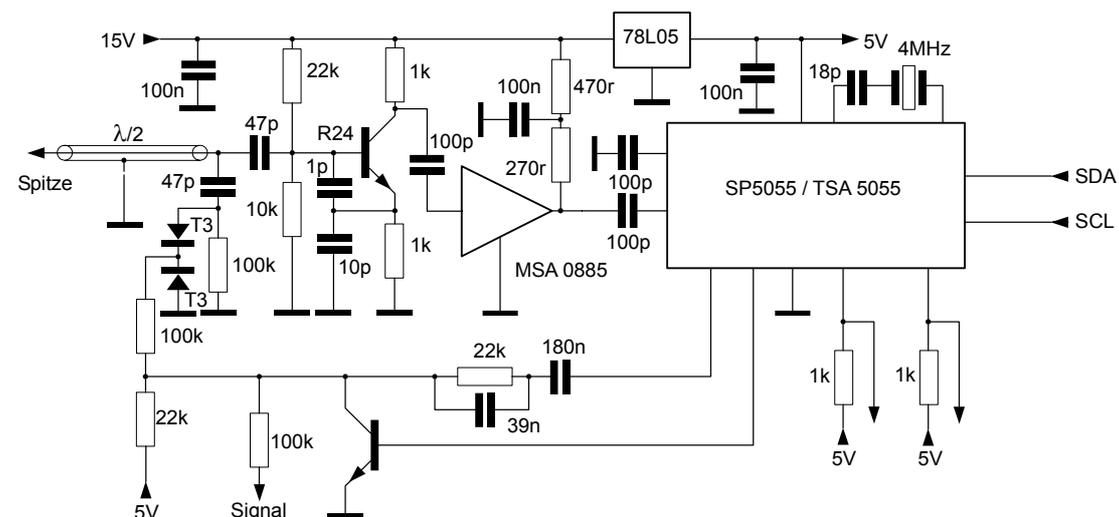
Der Verfasser testete eine ähnliche Schaltung. Statt eines Koaxkabels wurde aber eine Semirigidleitung verwendet. Diese Leitungen haben statt eines Drahtgeflechts ein Kupferrohr als Außenleiter und eine etwas höhere Güte als normale Koaxkabel. Die Bauteile des Oszillators wurden fast ausnahmslos aus einem Satellitentuner gewonnen. Der eigentliche Oszillator ist als Colpitt-Schaltung ausgelegt, die bei guter Dimensionierung eine hohe Frequenzstabilität aufweist. Als Transistor wurde ein SMD-Typ R24 (2SC3356) aus dem Sat-Tuner verwendet. Die Frequenz des

Oszillators wird mittels Kapazitätsdioden T3 (Sat-Tuner) durch eine PLL-Schaltung nachgeregelt. In der PLL arbeitet ein TSA 5055 IC, ebenfalls aus dem Sat-Tuner. Zwischen Oszillator und PLL-Schaltung ist ein MMIC Verstärker MSA 0885 eingefügt. Später stellte sich heraus, dass hier eine zusätzliche Verstärkung nicht notwendig ist. Der Eingang des TSA 5055 ist empfindlich genug, um direkt vom Oszillator angesteuert werden zu können. Die Programmierung des TSA 5055 erfolgt über den I2C-Bus Anschluss. Zwei Pins des IC's können als Testausgänge programmiert werden. An P6 liegt dann die interne, geteilte Referenzfrequenz und an P7 die geteilte Eingangsfrequenz an. An beiden Ausgängen müssen im eingelockten Zustand der Schaltung Rechteckpulse mit einer Frequenz von 7,8125 kHz zu messen sein. Die Schaltung wurde freitragend auf ein Stück Platinenmaterial aufgebaut. Das sieht zwar nicht besonders schön aus, damit werden aber die bei dieser hohen Frequenz notwendigen kurzen Leitungswege erreicht. Mit einer 70 mm langen Leitung beträgt die natürliche Schwingfrequenz des Oszillators etwa 880 MHz. Der Teiler in der PLL muss somit auf einen Wert von 7000 eingestellt werden, damit der Regelbereich erreicht wird. Der eingebaute Vorteiler mit dem Faktor 16 ist hierbei schon berücksichtigt.

Programmiercode für TSA 5055		
1. Byte	C2	Schreibadresse von TSA 5055
2. Byte	1B	1B80 Hex = 7040 Dez Teilverhältnis
3. Byte	80	
4. Byte	EE	220µA CP, P6, P7 Frequenz Ausgang, Regelung an
5. Byte	00	Alle Ausgänge hochohmig

**Tab. 5: Einstellung des PLL-ICs TSA 5055**

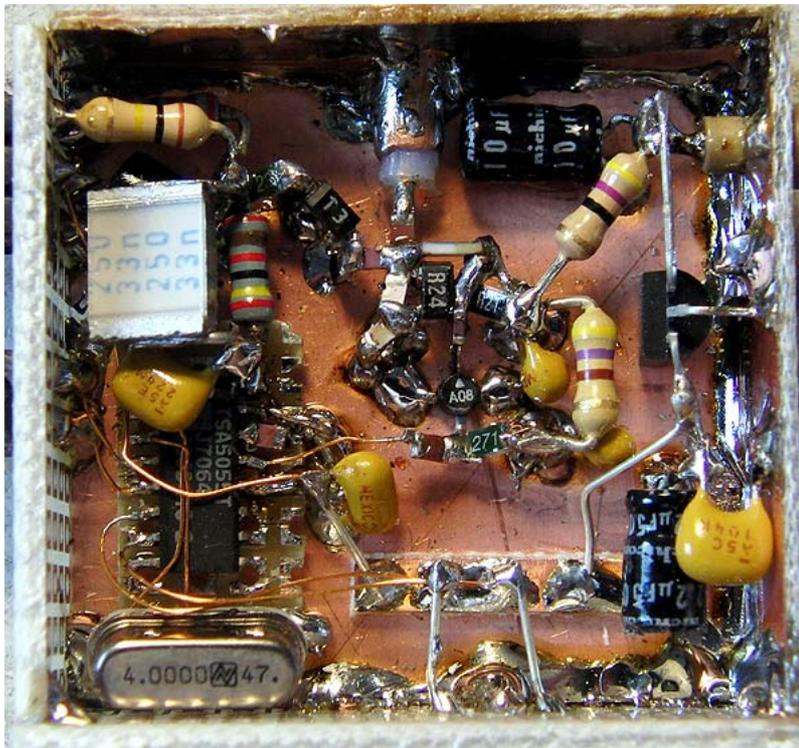
Für eine ordnungsgemäße Funktion müssen dem TSA 5055 fünf Bytes übermittelt werden. Der Verfasser verwendete dazu eine Schaltung mit dem Atmel Mega 32 Prozessor und ein kurzes Basic-Programm. Der Bascom-Compiler hat die erforderlichen Routinen zur I2C-Ein und Ausgabe implementiert.



**Abb. 143: Schaltung des Oszillators**

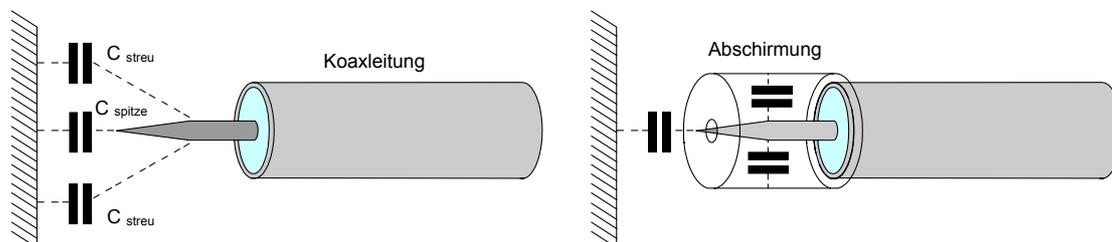
Da die am Oszillator angeschlossene Leitung in  $\lambda/2$  Resonanz schwingt, bilden sich an beiden Enden ein Spannungsbauch, sodass eine zusätzliche Kapazität am offenen Ende (an der Spitze) die Resonanzfrequenz ändert. Die PLL-Schaltung gleicht die

Frequenzänderung durch Ansteuerung der Kapazitätsdioden aus. Die Steuerspannung an den Kapazitätsdioden ist somit ein Maß für Kapazität an der Messspitze.

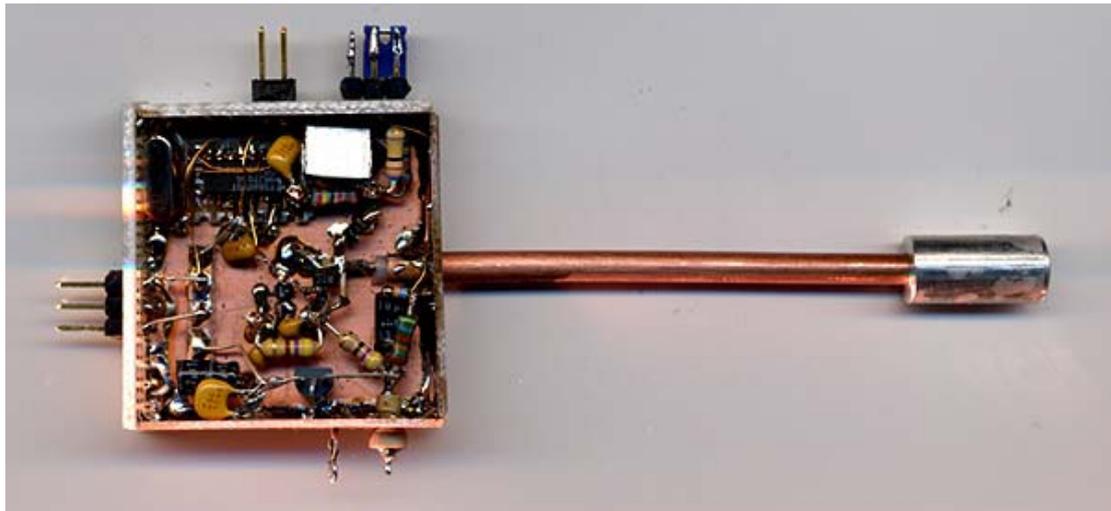


**Abb. 144: Nicht schön, aber funktionell, die Oszillatorschaltung**

Wird die Messspitze frei auf den Innenleiter der Koaxleitung aufgesetzt, wirkt nicht nur die Kapazität der Spitze, sondern auch die unvermeidlichen Streukapazitäten vom Schaft der Spitze. Durch diese Streukapazitäten wirken sich nicht nur der, der Spitze gegenüberliegende, Teil der Oberfläche, sondern auch weiter entfernt liegende Fläche auf die Gesamtkapazität aus. Ein Umstand, der die laterale Auflösung sehr verschlechtert. Eine Verbesserung wird durch eine Abschirmung der Spitze erreicht. Dadurch werden zwar die Streukapazitäten nicht beseitigt, sie bleiben aber, unabhängig von der Oberfläche, konstant. Nur der kleine Teil der Spitze, der durch ein kleines Loch ragt, trägt zur Messung bei, d.h., das laterale Auflösungsvermögen wird verbessert.

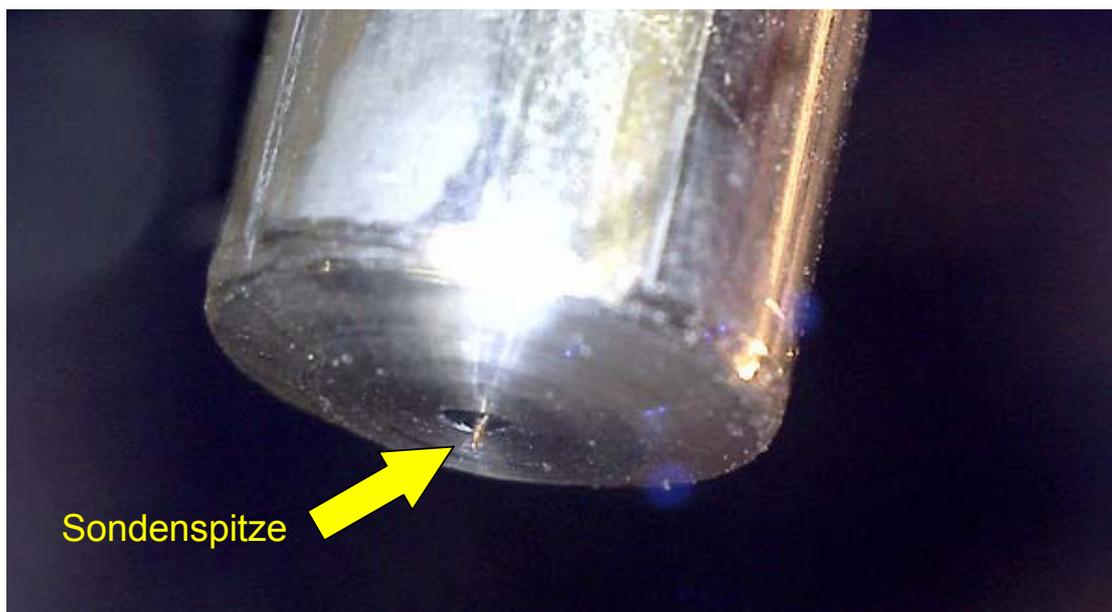


**Abb. 145: Abschirmung der Streukapazitäten**



**Abb. 146: Oszillator, Messleitung und Spitzenabschirmung**

Als Spitze wurde ein Stück dünner Kupferlackdraht (0,1 mm Durchmesser) auf den Innenleiter der Semirigid-Leitung gelötet. Dann wird der Draht durch das Loch der Spitzenabschirmung gezogen und diese auf die Leitung aufgesetzt. Der überstehende Draht kann nun unter leichtem Zug direkt über der Abschirmung angeschnitten werden.

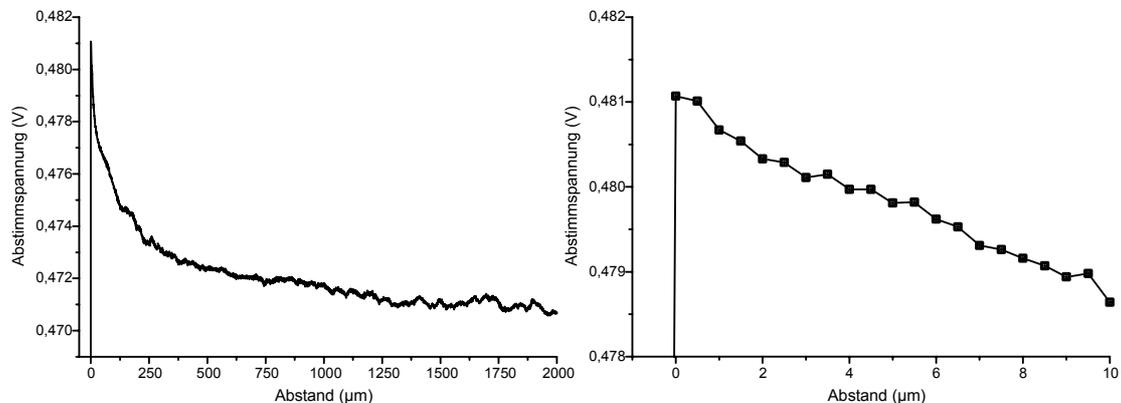


**Abb. 147: Die Messspitze ragt aus der Abschirmung**

#### **4.4. Test des Kapazitätssensors**

Ein erster Test dient zur Bestimmung Empfindlichkeit der Kapazitätssonde. Dazu wird die Sonde in kleinen Schritten an eine Oberfläche herangefahren und die Abstimmspannung an den Kapazitätsdioden gemessen. Je näher die Spitze an die Oberfläche kommt desto höher wird die Kapazität zwischen Spitze und Oberfläche. Im gleichen Maß sorgt die PLL-Schaltung für eine Erhöhung der Abstimmspannung, um die Kapazitäts- und damit Frequenzänderung auszugleichen. Die Diagramme

zeigen, dass schon bei einem Abstand von einem Millimeter die Kapazität etwas ansteigt. Wird der Abstand kleiner als 250 Mikrometer, steigt die Kapazität stark an. Beim Kontakt der Spitze zur Oberfläche setzt der Oszillator und damit die Regelung aus, was durch den abrupten Abfall der Abstimmspannung zu sehen ist.

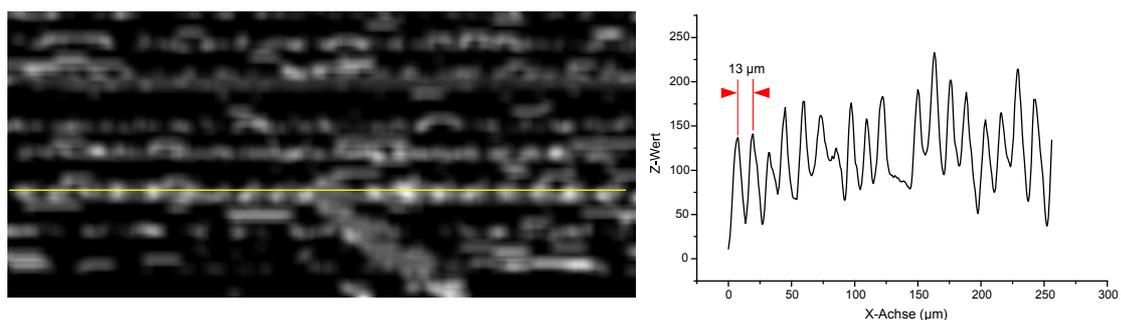


**Abb. 148: Annäherung der Spitze an eine Messfläche**

Leider konnten die Daten der Kapazitätsdiode T3 nicht ermittelt werden. Aber durch den Vergleich mit anderen in Sat-Tunern üblicherweise verwendeten Dioden z.B. der Siemestyp BB837 kann die Kapazitätsänderung bestimmt werden. Die Abstimmspannung ändert sich auf den letzten 3 Mikrometern bis zu Kontakt von 0,480 V auf 0,481 V um ein Millivolt. Bei der BB837 entspräche das einer Kapazitätsänderung von 1,5 fF (Femtofarad). Der Rauschpegel der Abstimmspannung zeigt, dass man mit der Schaltung Kapazitätsänderungen von weniger als einem Femtofarad messen kann.

#### 4.5. Abbildung mit dem Kapazitätssensor

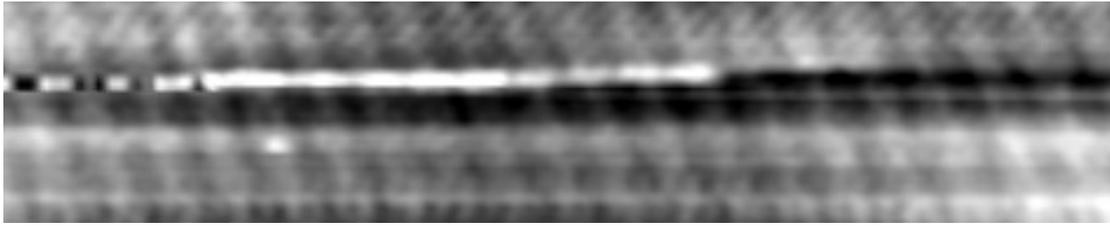
Als erstes Testobjekt wurde das, schon bewährte 13 µm Gitter ausgewählt.



**Abb. 149: Erstes Kapazitätsbild des 13 µm Gitters**

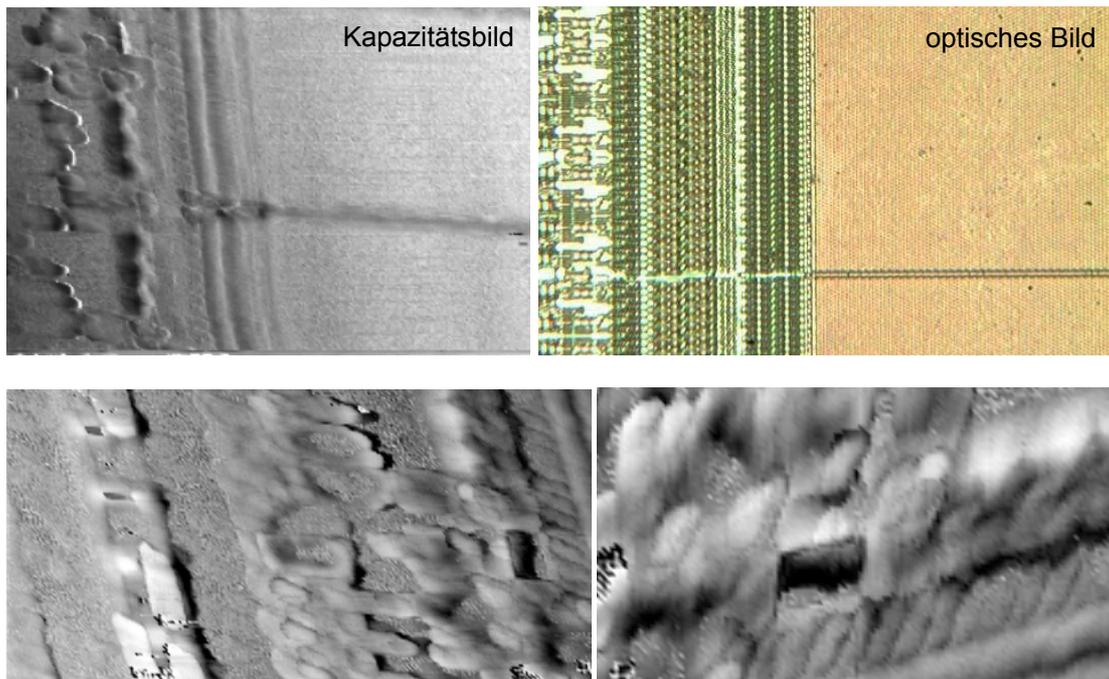
Das Kapazitätsbild ist zwar stark gestört aber an manchen Stellen tritt doch eindeutig die periodische Struktur des Gitters eindeutig zutage. Vor allem in einer Profilkurve entlang der gelben Linie ist das gut zu sehen. Die starken Störungen kommen durch das wiederholte Aufsetzen der Spitze auf dem Gitter zustande. Für die Messung wurde der Abstand der Spitze nicht geregelt, sondern konstant gehalten, sodass kleine Unebenheiten zum Aufsetzen der Spitze führen.

Zu deutlich weniger Störungen führt ein Raster-scan im etwas größeren Abstand zur Probe. Aber natürlich sinkt dadurch auch die laterale Auflösung des Bildes.



**Abb. 150: Kapazitätsbild in größerem Abstand**

#### 4.5.1. Abbildung eines Speicherchips

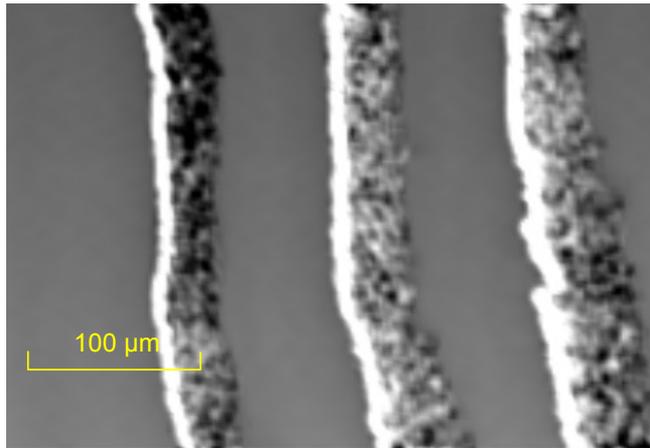


**Abb. 151: Ramspeicher**

Schon etwas besser aber immer noch verbesserungsfähig werden die Bilder eines Speicherchips.

#### 4.5.2 Abbildung Schallplatte

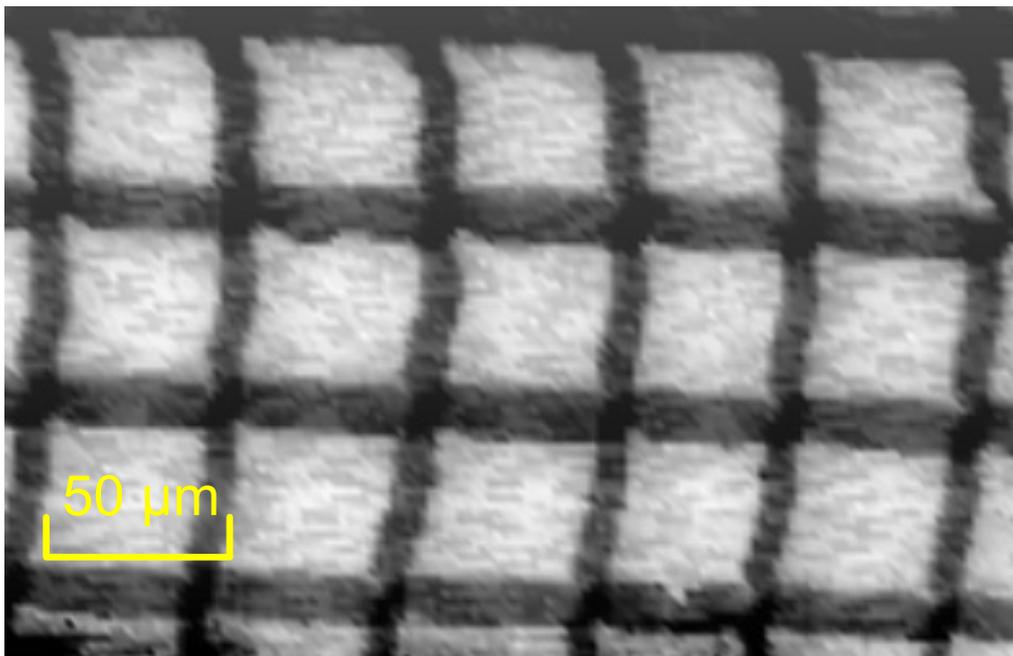
Noch besser gelingen die Abbildungen von nicht leitenden Oberflächen, wie einer Schallplatte, da hier beim versehentlichen Berühren der Oberfläche durch die Spitze die Schwingungen des Oszillators nicht aussetzen.



**Abb. 152: Spurrillen auf einer Schallplatte**

#### 4.5.3. Abbildung einer Metallfläche

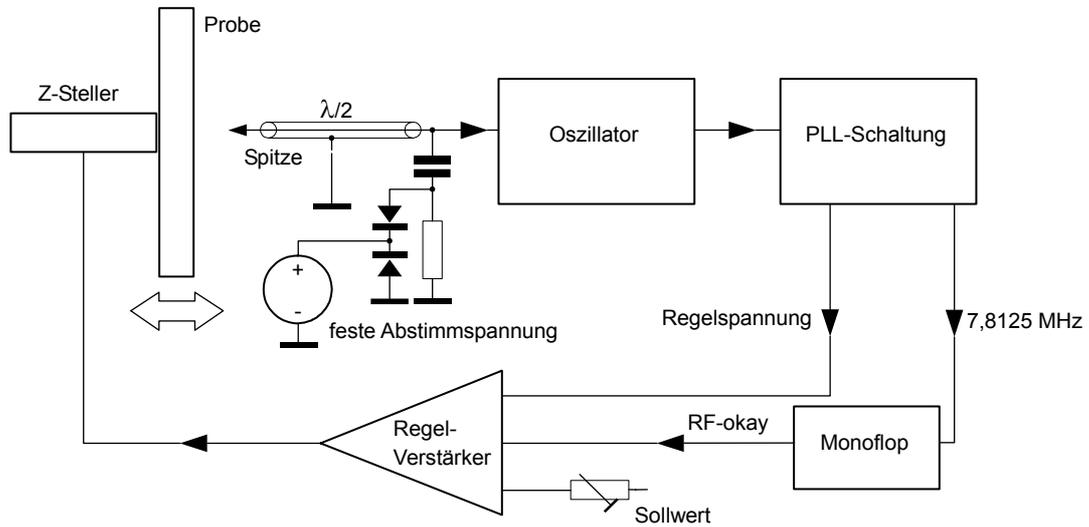
Einwandfrei ist die Abbildung eines Testgitters. Das Gitter, das schon bei den AFM-Tests verwendet werden, besteht aus 60 nm dicken, 35 x 35  $\mu\text{m}$  Quadraten aus Aluminium die auf eine Glasplatte aufgedampft sind.



**Abb. 153: Dünne Metallquadrate auf Glas**

Bessere Ergebnisse könnten durch eine andere Regelschaltung erreicht werden. Dazu müsste die Ausgangsspannung der PLL-Schaltung zur Regelung des Abstands der Spitze von der Probe, anstatt als Abstimmspannung für die Kapazitätsdioden verwendet werden. Kommt nun die Spitze der Oberfläche näher, steigt die Kapazität und somit die Regelspannung und die Spitze wird zurückgezogen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass sich im Falle einer Spitzenberührung die Ausgangsspannung der PLL-Schaltung abfällt und dann die Regelung in der falschen Richtung arbeitet.

Dieser Arbeitsbereich muss durch eine zusätzliche Schaltung vermieden werden. Dazu könnte das heruntergeteilte Eingangssignal an Port P7 verwendet werden. Die Rechteckpulse werden einem Monoflop zugeführt der wiederholt getriggert. Fallen die Rechteckpulse wegen einer Probenberührung aus fällt der Monoflop zurück und steuert die Regelschaltung, sodass die Probe zurückgezogen wird.



**Abb. 154: Regelschaltung für „konstante Kapazität Modus“**