

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.

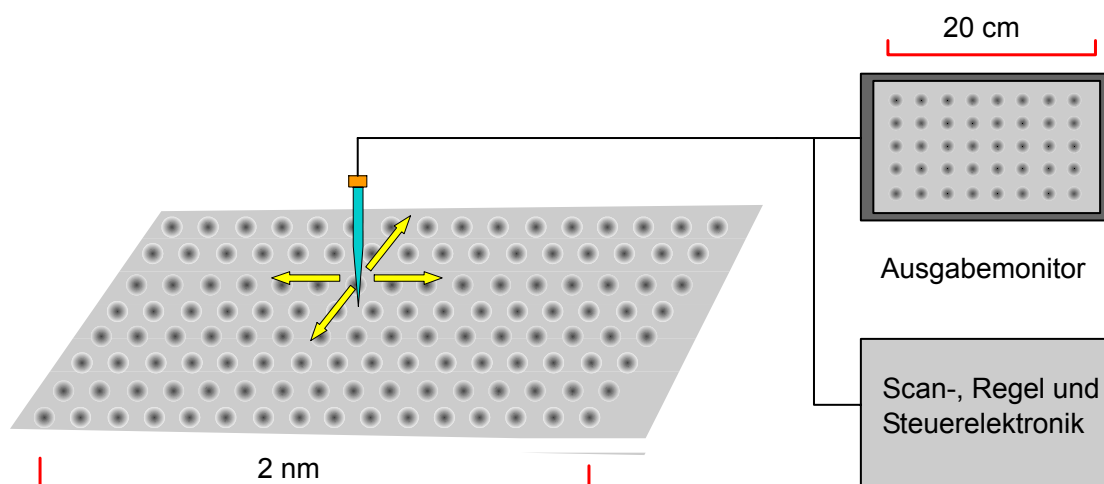


Abb. 4: Abbildung einer Oberfläche mit atomarer Auflösung mit dem Tunnelmikroskop

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

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.

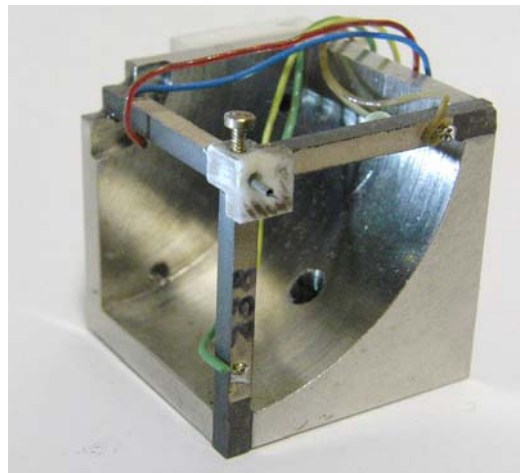
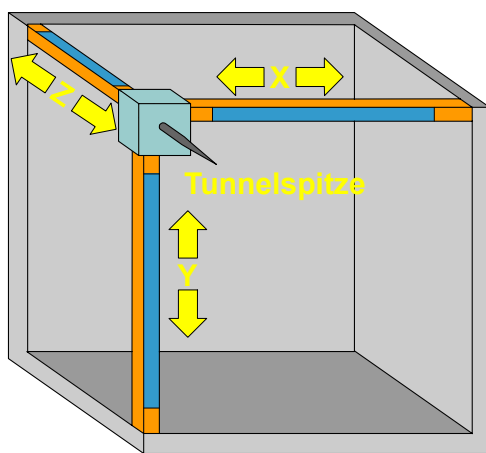


Abb. 14: Der Tripod-Scanner

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.

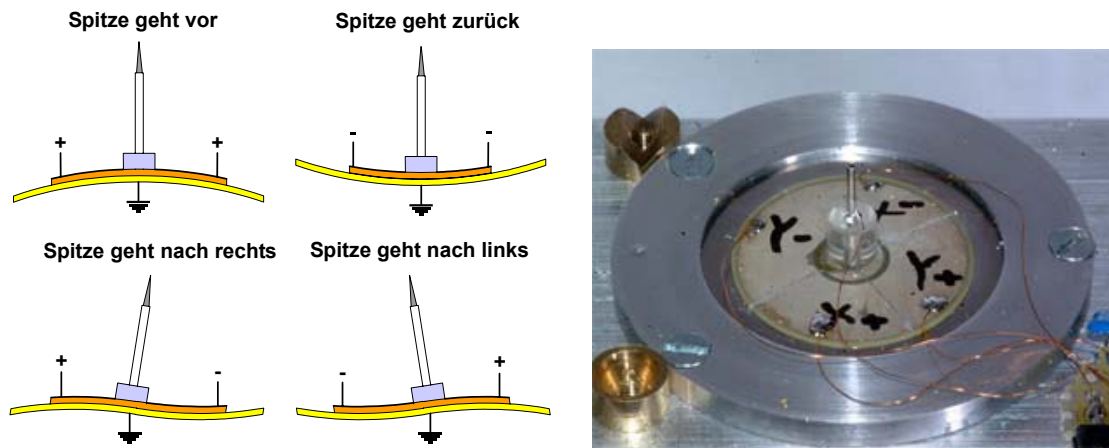


Abb. 18: 3-D Scanner aus einem Piezobeeper

Der Scanner zeigt eine hohe Empfindlichkeit und hat schon bei kleinen Spannungen von etwa ± 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.

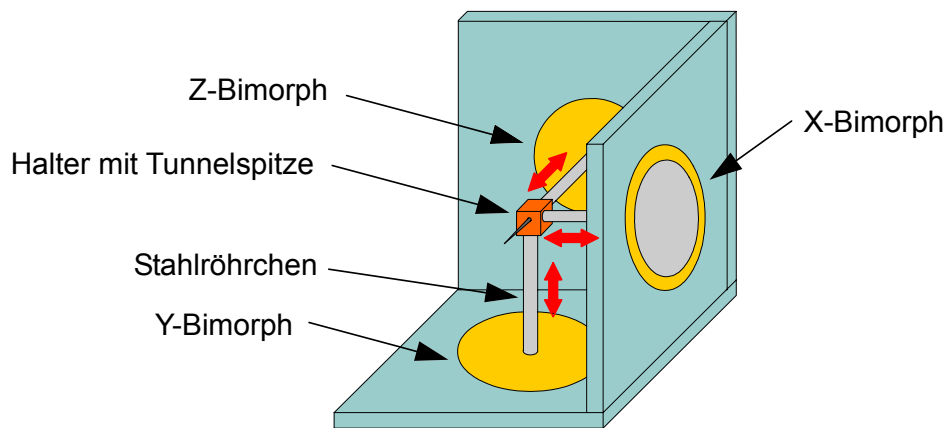
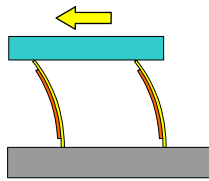


Abb. Tripod-Scanner mit Bimorph-Antrieb

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.

negative Sägezahnspannung
Läufer bewegt sich nach links



positive Sägezahnspannung
Läufer bewegt sich nach rechts

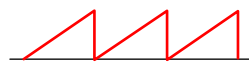
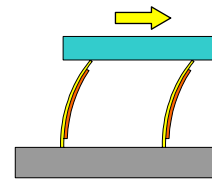


Abb. 39: Ansteuerung des Verstellers

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.

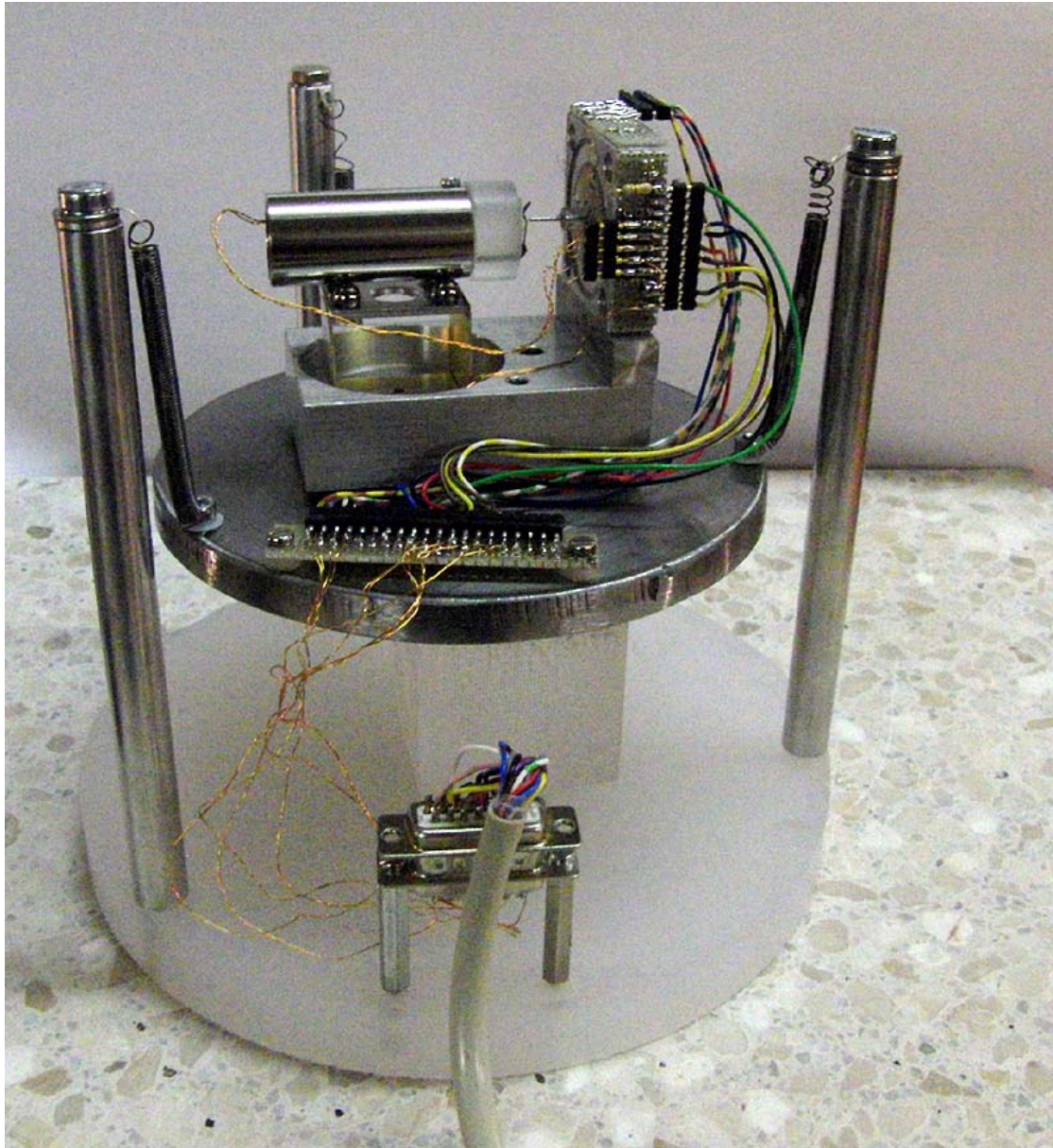
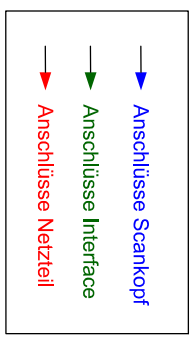
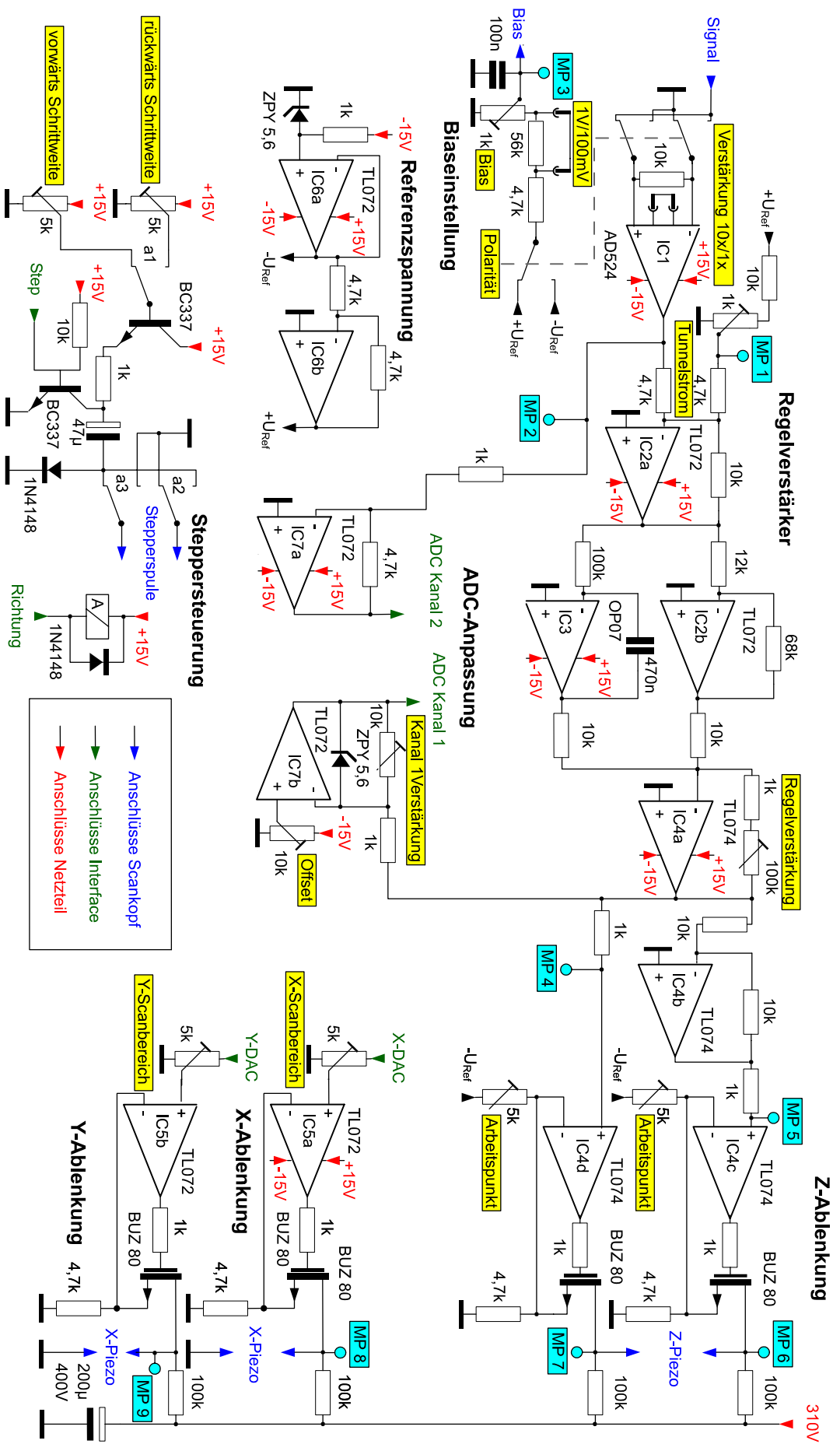


Abb. 47: Aufhängung an Federn

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.



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.

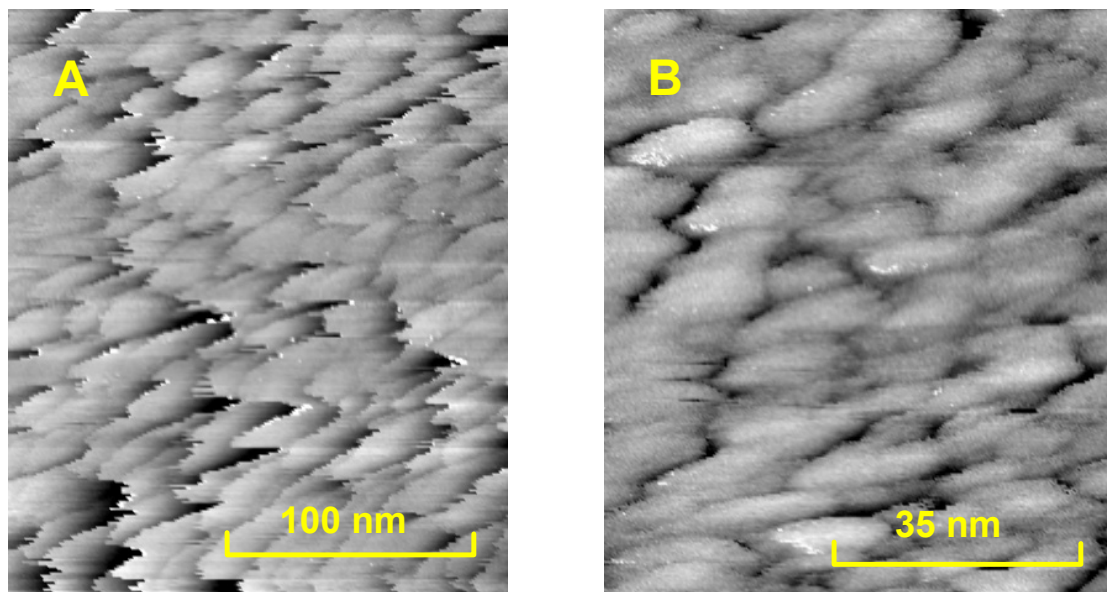


Abb. 58: Siliziumoberfläche bei verschiedenen Abtastgeschwindigkeiten

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.

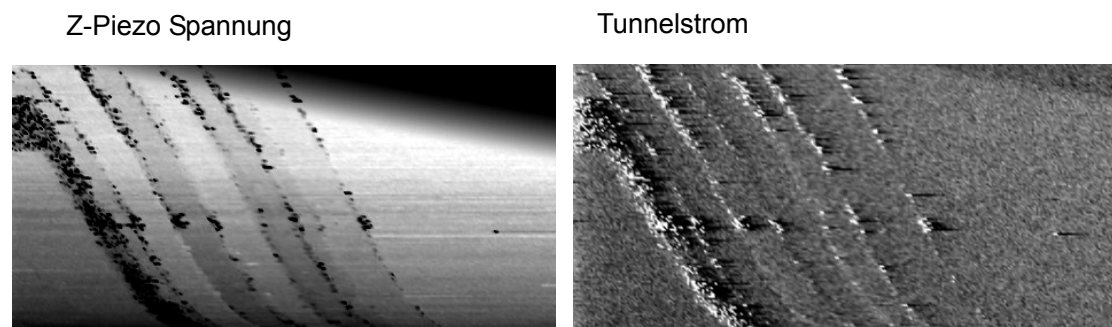


Abb. 59: Artefakte durch Übersteuern der Regelung

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.

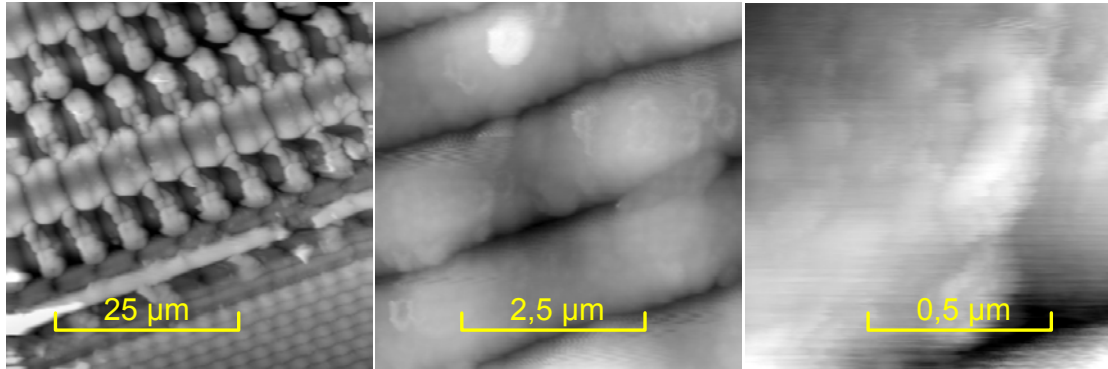


Abb. 87: Ramspeicher unter dem AFM

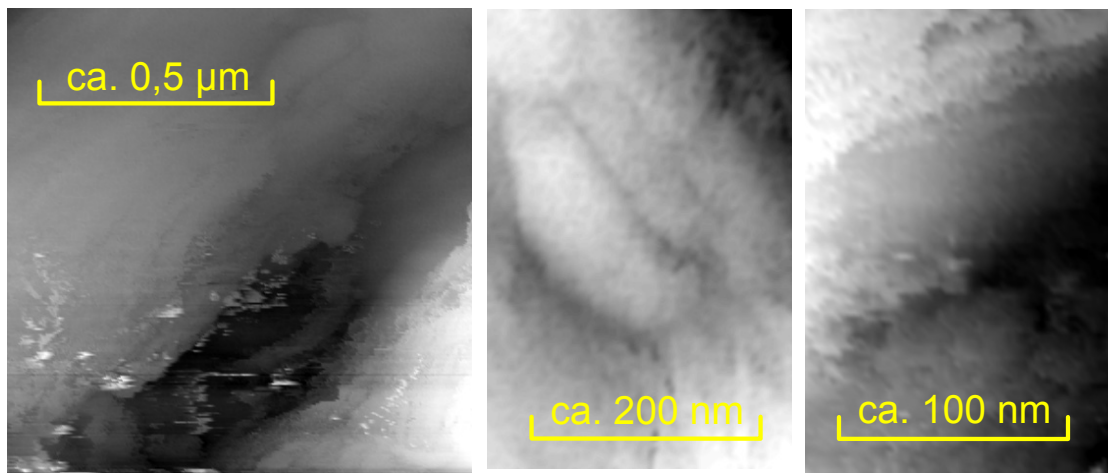


Abb. 88: Ramspeicher unter dem STM

Wird der Beeperscanner mit einer Spannung von ± 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.

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.

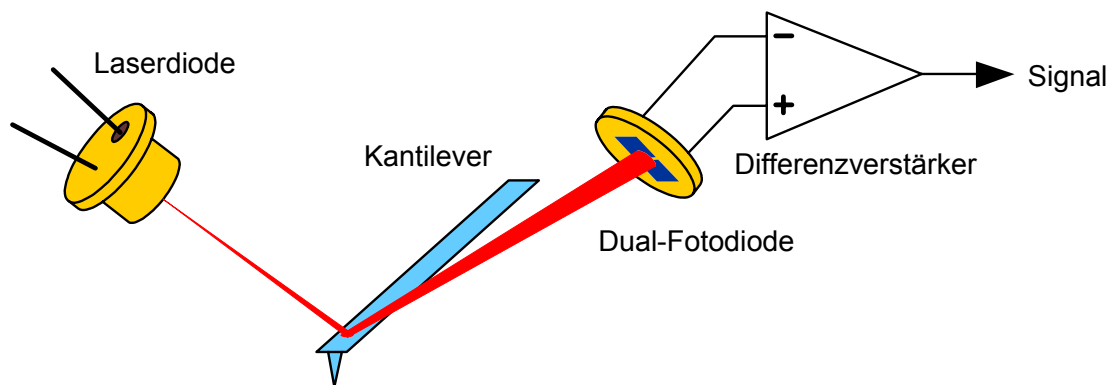


Abb. 95: Prinzip der Lichtzeigermessung

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.

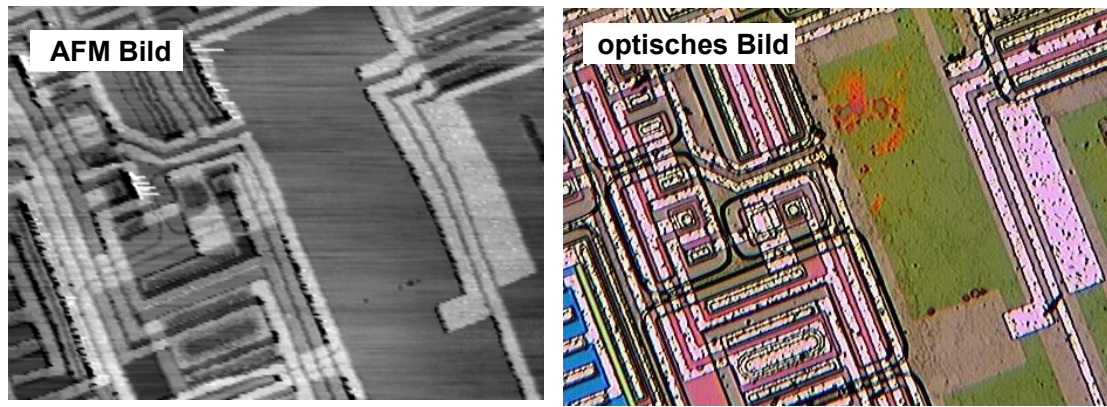


Abb. 101: Chip des Operationsverstärkers OP07

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).

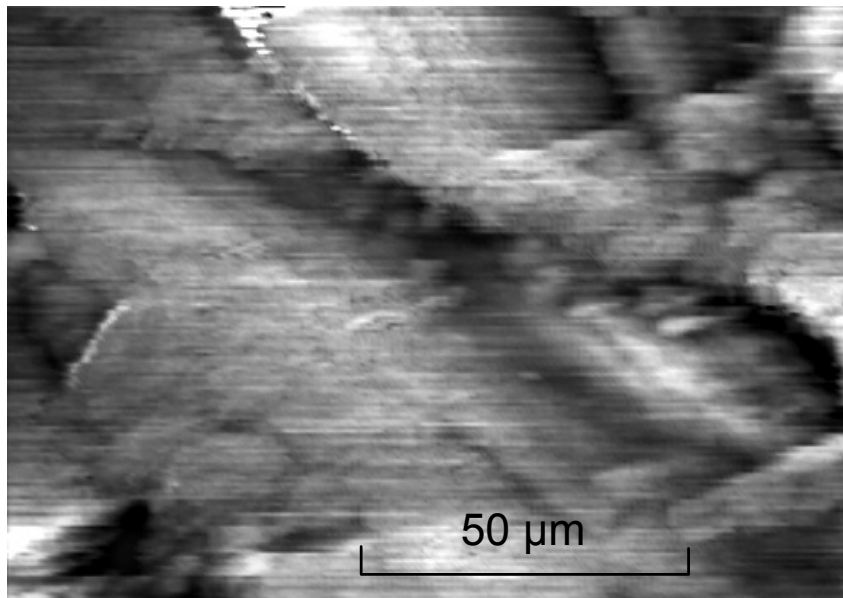


Abb. 102: Papieroberfläche unter dem AFM

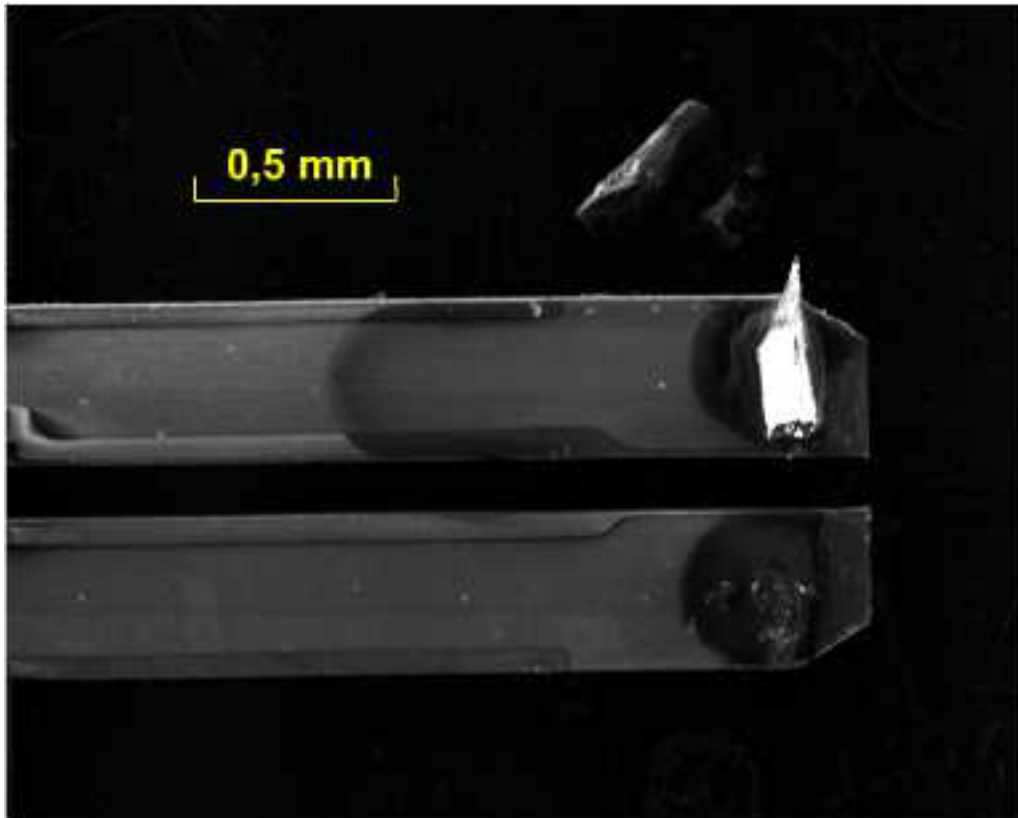


Abb. 110: REM-Bild des Stimmgabelquarzes mit aufgeklebtem Splitter

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.

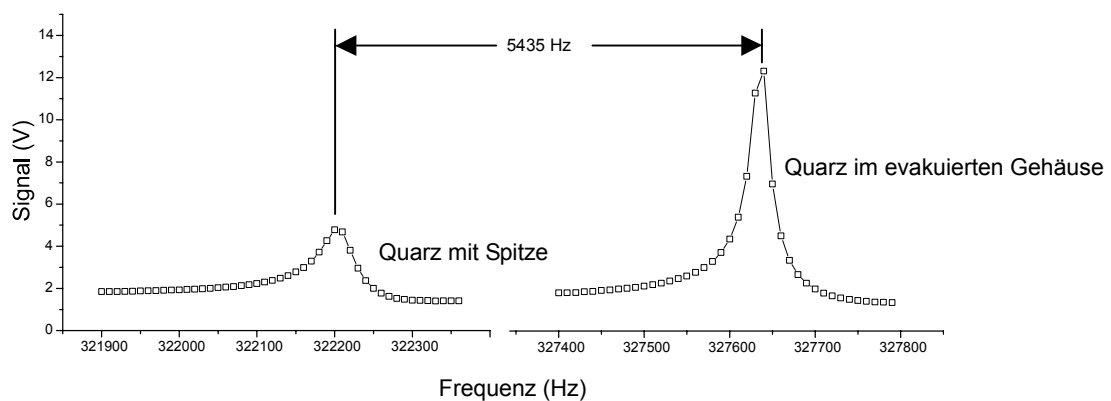


Abb. 111: Frequenz- und Güteänderung durch die aufgeklebte Spitze

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.

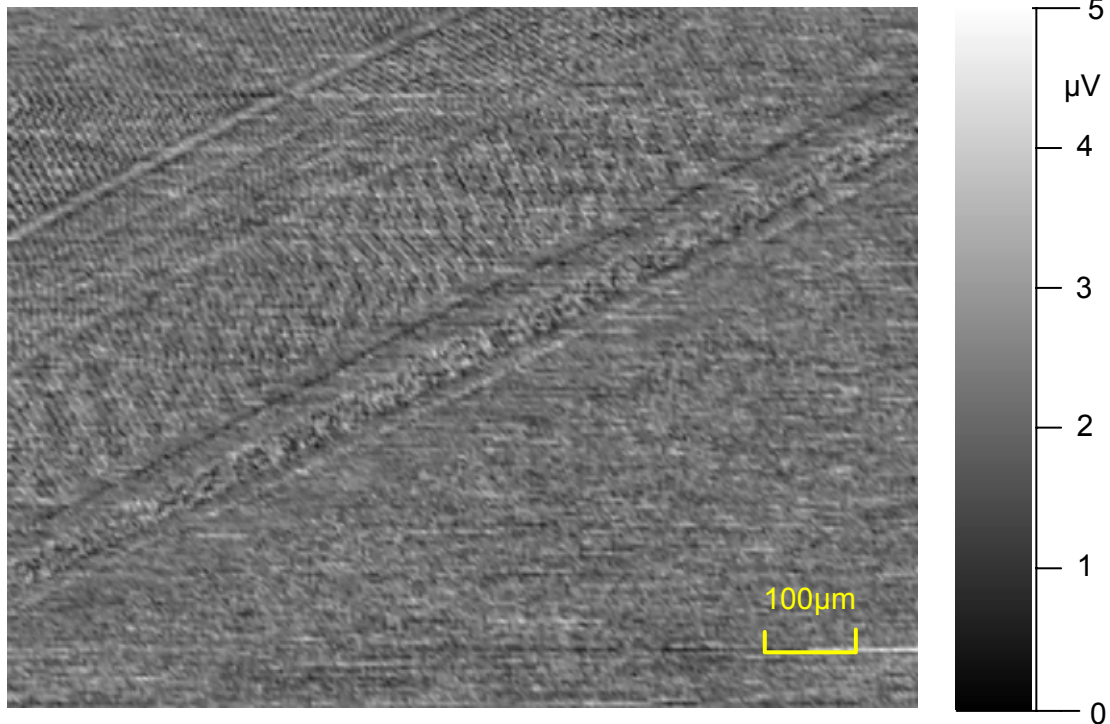


Abb. 138: Datenstrukturen auf einer Festplatte

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

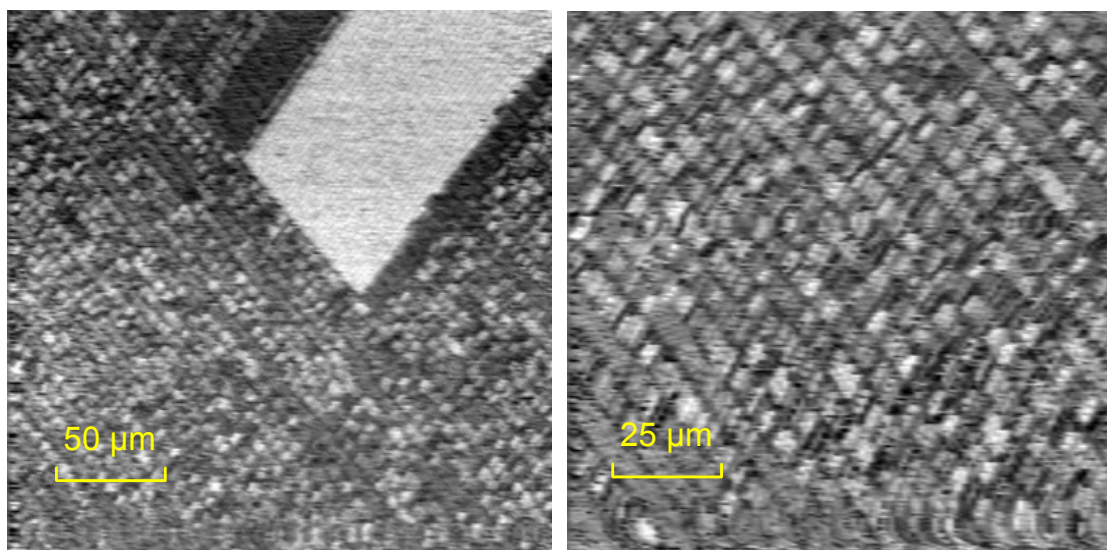


Abb. 139: Datenspur auf einer 635 Megabyte Festplatte

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.

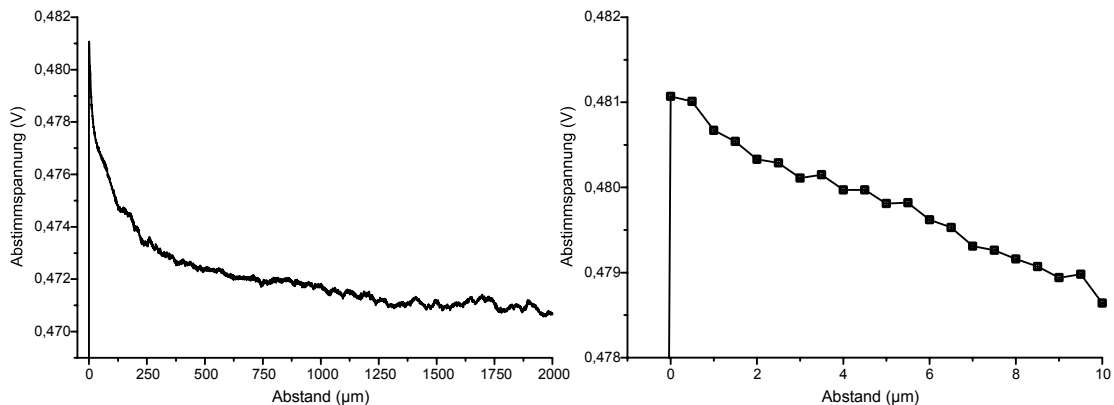


Abb. 148: Annäherung der Spitze an eine Messfläche

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.

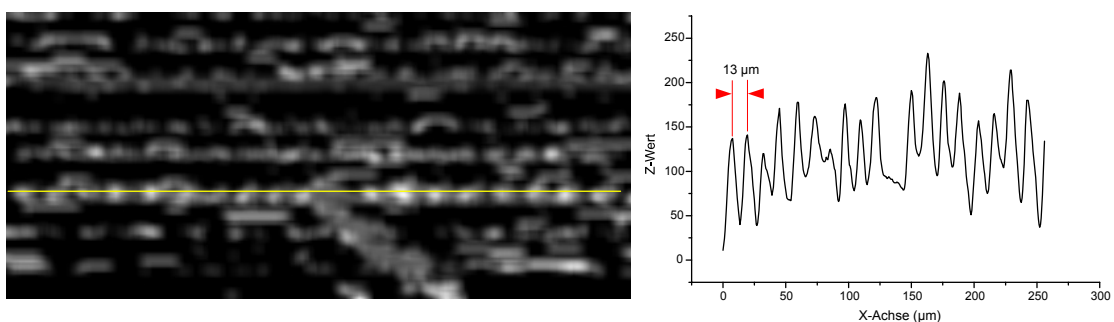


Abb. 149: Erstes Kapazitätsbild des 13 µm Gitters

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.