



FAKULTÄT FÜR PHYSIK
PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM FÜR FORTGESCHRITTENE
PRAKTIKUM MODERNE PHYSIK

Gruppe Nr. _____ Kurs: **Mo1** **Mo2** **Mi3**
zutreffendes bitte ankreuzen aktuelles Semester angeben

Versuch: _____

Namen: _____

Assistent: _____

durchgeführt am: _____

Protokollabgabe am: _____

vom Betreuer auszufüllen

Note gesamt	<input type="checkbox"/> +	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> -
Anerkannt:	_____		
	<small>(Datum Unterschrift)</small>		
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>			
Datum Rückgabe:	_____		
Bemerkung:			

Rasterkraftmikroskop

Emely Zahn, Alexander Körsgen

Abgabedatum: 19.11.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Rasterkraftmikroskop	3
2.1	Aufbau	3
2.2	Contact Mode	4
2.3	Non-Contact Mode	4
3	Theoretische Grundlagen	5
3.1	Spitzen-Proben-Wechselwirkung	5
3.1.1	Van der Waals (VdW) Kräfte	5
3.1.2	Kapillarkräfte	5
3.1.3	Lennard-Jones-Potential	5
3.2	Kraftabstandskurve	7
4	Probenmaterialien	8
4.1	Kalibrierproben	8
4.2	CD-ROM	8
4.3	Polymerprobe	8
5	Durchführung und Auswertung der Aufgaben	9
5.1	Spitzengeometrie und Auflösungsvermögen	9
5.2	Einfluss des Spitzenradius	9
5.3	Normale Federkonstante	10
5.4	Gitterausmessung	10
5.5	Kraftabstandskurve	14
5.6	Aussehen Kraftabstandskurven	15
5.7	CD Ausmessung	16
5.8	Reibungskräfte	19
5.9	Polymerblend-Probe	20

1 Einführung

Das Rasterkraftmikroskop (auch Atomic Force Microscope, AFM) gehört zu den Rastersondenmikroskopen und ermöglicht die Abbildung von Oberflächenstrukturen mit atomarer Auflösung. Im Gegensatz zu optischen Mikroskopen, die durch die Beugungsgrenze limitiert sind, nutzt das Rasterkraftmikroskop eine feine Spitze, die über die Probenoberfläche geführt wird, um topographische Informationen zu sammeln.

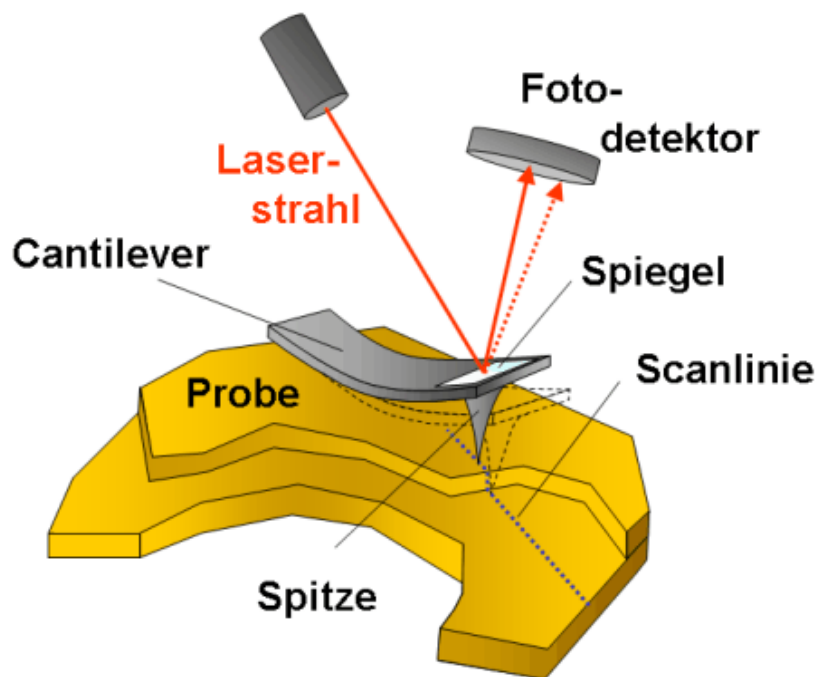


Abbildung 1: Rasterkraftmikroskop Schema [1]

2 Rasterkraftmikroskop

2.1 Aufbau

Das Rasterkraftmikroskop besitzt als Sonde eine mikroskopische Spitze, die am Ende einer Balkenfeder (Cantilever) befestigt ist. Damit wird die Oberfläche der Probe rasterförmig abgetastet, um ein topographisches Bild zu erhalten. Die Mess- bzw. Regelgröße ist die Verbiegung des Cantilevers. Dieser liegt oft in Dreiecksform vor, um seine Torsionssteifigkeit zu erhöhen, da laterale Reibungskräfte zur Torsion des Cantilevers führen. Des Weiteren ist im Contact Mode eine kleine Federkonstante von Vorteil, um die Probenoberfläche beim Kontakt nicht zu beschädigen. Die Oberseite des Cantilevers ist mit Metall bedampft, um die gute Reflektion von Laserstrahlen zu ermöglichen (notwendig zur Verbiegungsmessung). Der Spitzenradius sollte möglichst klein sein, um eine hohe Auflösung

zu garantieren. Das Aspektverhältnis der Spitze sollte möglichst groß sein, damit die Spitze auch Vertiefungen kleinen Durchmessers gut erfassen kann. Die Positionierung der Spitze ist in Grob- und Feinverstellung aufgeteilt. Zur Feinverstellung wird der inverse piezoelektrische Effekt (Verbiegung eines Kristalls bei anliegender Spannung) genutzt. Das Verstellsystem besteht aus einem Scannerröhrchen. Dieses besteht aus piezoelektrischem Material, und hat vier symmetrisch angebrachte Elektroden an seiner Außenseite und eine Ringelektrode an seiner Innenseite. Wird an die Elektroden zweier gegenüberliegender Seiten eine Spannung angelegt, erzeugt das eine laterale Verbiegung in der Ebene dieser. Die z-Auslenkung wird durch Anlegung einer Spannung an alle Außenelektroden und die Innenelektrode bewerkstelligt, da hier ein einstufiger Scanner verwendet wird.

2.2 Contact Mode

Im Contact Mode wird die Spitze über die Oberfläche geführt und rastert diese ab. Die Lageänderung wird über die Verbiegung des Cantilevers mithilfe des Lichtzeigerprinzips bestimmt. Ein Laserstrahl wird auf den Cantilever gestrahlt und von diesem auf eine Viersegmentphotodiode reflektiert. Durch den Vergleich der an den vier Segmenten auftretenden Spannungen kann auf die Lageänderung des Laserstrahls zurückgeschlossen werden. Durch die Topographie der Probe werden Normalkräfte auf den Cantilever ausgeübt. Die z-Auslenkung des Cantilevers kann als T-B-Differenzspannung (Top-Bottom) zwischen dem oberen und unteren Segment der Photodiode gemessen werden. Die Torsion des Cantilevers kann als L-R-Differenzspannung (Left-Right) zwischen dem linken und rechten Segment der Photodiode gemessen werden. Änderungen der Topographie und der Reibungskraft sind so gleichzeitig messbar. Ansonsten lässt sich die Verbiegung des Cantilevers z.B. mithilfe eines Tunnelstroms, durch Ausnutzung der abstandsabhängigen Kapazität zweier Elektroden oder durch eine Interferenzmessung bestimmen. Im Constant Height Mode wird der Scanner in konstanter Höhe über die Oberfläche geführt. Als Maß für die Topographie wird das T-B-Differenzsignal aufgezeichnet. Im Constant Force Mode wird die Höhe der Probe beim Rastern so geregelt, dass das Photodiodensignal konstant bleibt. Dabei wird die Höhennachregelung aufgezeichnet.

2.3 Non-Contact Mode

Im Non-Contact bzw. Tapping Mode berührt der Scanner die Oberfläche der Probe immer nur kurz. Der Cantilever wird mithilfe eines Piezokristalls zu Schwingungen nahe seiner Resonanzfrequenz angeregt und der Oberfläche angenähert. Durch die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe ändert sich die effektive Federkonstante und somit die Resonanzfrequenz des Cantilevers. Die Schwingungsamplitude und -phase ändern sich. Dadurch kann die Kraftänderung und somit die Höhenänderung der Oberfläche gemessen werden (stattdessen kann auch eine Constant Force Methode verwendet werden). Der Cantilever fungiert hier als gedämpfter harmonischer Oszillator. Eine große Federkonstante mindert das Einwirken von äußeren Schwingungen. In diesem Modus ist die Messgeschwindigkeit kleiner und die laterale Auflösung schlechter. Dafür gibt es keinen bzw. kleinen Einfluss von Kapillar- und Reibungskräften.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Spitzen-Proben-Wechselwirkung

3.1.1 Van der Waals (VdW) Kräfte

VdW-Kräfte entstehen aus Dipol-Dipol-Wechselwirkungen ohne Elektronenpaarbindung. Daher dominieren sie bei elektrisch neutralen, nichtmagnetischen Systemen in einem sehr kleinen Distanzbereich (wenigen Å bis etwa 10 nm). Man unterscheidet zwischen drei Arten von VdW-Kräften: Ausrichtung permanenter Dipole, induzierte Dipole und Dispersionskräfte durch fluktuierende Elektronendichten.

Für zwei Atome im Vakuum gilt das folgende Potential: $V_{\text{VdW}} = -\frac{1}{z^6}$. Für makroskopische Körper wird meistens die Hamaker-Näherung verwendet:

$$F_{\text{VdW}} = -\frac{H \cdot r}{6 \cdot z^2} \quad (1)$$

wobei H die Hamaker-Konstante (materialabhängig, typisch 10^{-19} bis 10^{-20} J), r der Spitzenradius und z der Abstand zwischen Spitze und Probe ist.

3.1.2 Kapillarkräfte

Kapillarkräfte sind die Kräfte, die in Flüssigkeiten auftreten. Entweder in einem sehr engen Raum oder wenn man sich sehr nah an festen Oberflächen befindet. In Luft liegt auf der Probe und Spitze fast immer ein nm-dünner Wasserfilm. Dies ist bei Messungen in normaler Laborumgebung der Fall (Raumluft mit typischer relativer Luftfeuchtigkeit von etwa 30-60 %). Nur im Vakuum oder in einer gezielt getrockneten Räumen ist dieser Wasserfilm praktisch nicht vorhanden. Beim Annähern bildet sich zwischen Spitze und Oberfläche ein Meniskus, dessen Oberflächenspannung die Spitze anzieht.

Die Kapillarkraft wirkt in der Regel über einen größeren Distanzbereich als VdW-Kräfte, da ein Meniskus bereits dann bestehen kann, wenn die Spitze der Probe noch nicht im unmittelbaren atomaren Kontakt ist.

Für eine kugelförmige Spitze gilt bei Annäherung:

$$F_{\text{Kap,max}} = -4\pi R\sigma \quad (2)$$

wobei R der Spitzenradius und σ die Oberflächenspannung der Flüssigkeit (für Wasser: $\sigma \approx 0,074$ N/m) ist.

3.1.3 Lennard-Jones-Potential

Das Lennard-Jones-Potential beschreibt die Wechselwirkung zwischen zwei Atomen. Es berücksichtigt sowohl die anziehenden Van der Waals-Kräfte als auch die repulsiven Kräfte (Überlappung der Elektronenorbitale), die bei sehr kurzen Abständen auftreten. Die

repulsiven Kräfte entstehen, wenn zwei Atome sich so nah kommen, sodass sich ihre Elektronenwolken stark überlappen und diese dann aufgrund des Pauli-Prinzips nicht denselben Quantenzustand besetzen können. Dies führt zu einer starken Abstoßung bei sehr kurzen Abständen.

Den Kurvenverlauf des Lennard-Jones-Potentials ist in Abbildung 2 zu sehen.

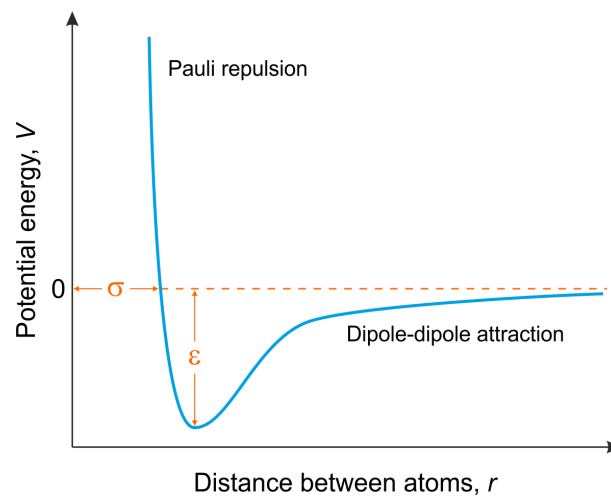


Abbildung 2: Lennard-Jones-Potential [2]

Das Lennard-Jones-Potential wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$V(z) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{z} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{z} \right)^6 \right] \quad (3)$$

wobei ϵ die Tiefe des Potentialtopfes (typische Bindungsenergie) und σ ein charakteristischer Längenmaßstab ist, der näherungsweise dem Gleichgewichtsabstand entspricht.

3.2 Kraftabstandskurve

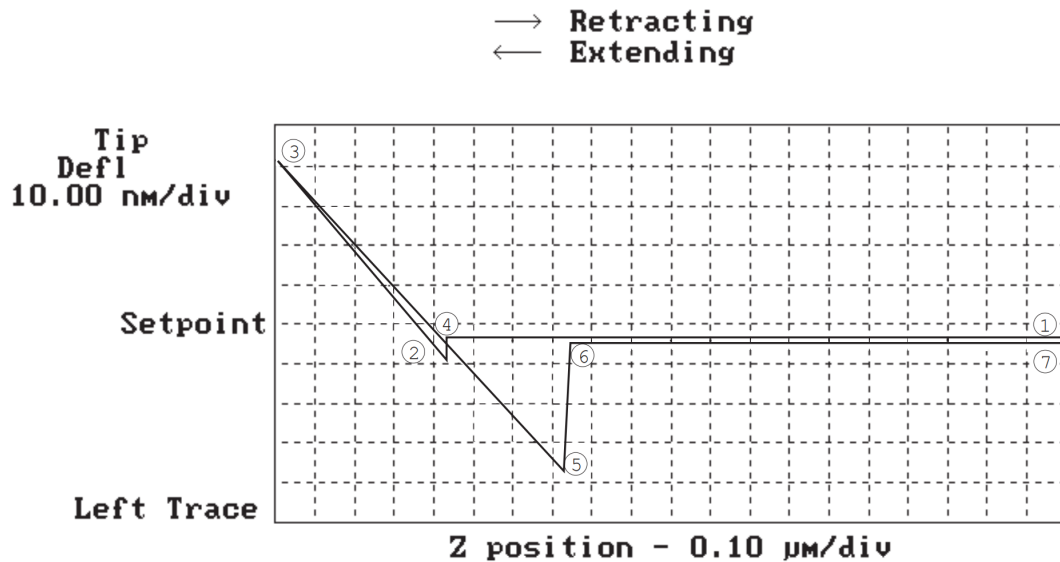


Abbildung 3: Kraftabstandskurve

Das Prinzip dieser Kurve ist, dass die Spitze des AFM sich der Probe nähert und wieder wegfährt während die Kräfte zwischen Spitze und Probe gemessen werden.

Charakteristischer Verlauf:

- **Snap-in (Punkt 2):** Ab einem bestimmten Punkt überwiegt die anziehende Wechselwirkung (vorallem Van-der-Waals-Kräfte oder Kapillarkräfte) gegenüber der Rückstellkraft des Cantilevers und die Spitze wird plötzlich zur Probe hin gezogen.
- **Kontaktbereich (Punkt 2-5):** Im Kontaktbereich wirken hauptsächlich repulsive Kräfte. Die Kurve verläuft hier sehr linear (weiteres Eindringen führt zu einem stärker verbogenen Cantilever). Daher kann der Bereich näherungsweise mit dem Hookschen Gesetz beschrieben werden. Im ideal Fall wäre die Steigung der Kurve beim Herranfahen und Wegfahren identisch. In der Praxis ist sie beim Herranfahen jedoch steiler, da die Spitze die Probe beim Eindringen etwas verformt. Beim Wegfahren wirkt zusätzlich der Kapilarminiskus wie ein weiches Element in Serie mit dem Canteliver. Dadurch ist die effektive Federkonstante geringer und die Steigung der Kurve flacher.
- **Snap-off (Punkt 5-6):** Beim Entfernen der Spitze von der Probe überwindet die Spitze die Adhäsionskräfte und es kommt zum plötzlichen Abheben. Eine Hysterese kann zustande kommen, wenn an Luft gemessen wird, da die Kapillarkräfte die Spitze viel länger festhalten. Da diese Kräfte oft größer sind als die anziehenden VdW-Kräfte, ist der Abstand beim Snap-off oft deutlich größer als beim Snap-in.

4 Probenmaterialien

4.1 Kalibrierproben

Das Lochgitter dient zur Kalibrierung des Rasterkraftmikroskops.

Das Liniengitter besteht aus rechteckigen SiO₂-Stufen auf Si.

Das Spitzengitter besteht aus einem Array aus scharfen Si-Spitzen.

4.2 CD-ROM

Wir nutzen die CD als Testprobe für laterale/ vertikale Maße (Pitch, Breite, Tiefe der Pits).

Diese besteht aus Polycarbonat ($n = 1.55$) mit einer reflektierenden Metallschicht (typ. Al, 50–100 nm) und einer Schutzschicht (10 - 30 μm). Die Daten liegen als Abfolge von Pits/Lands in der PC-Schicht vor. Der Spurabstand beträgt $1.6 \pm 0.1 \mu\text{m}$ und die Breite von Pits/Lands $\approx 500 \text{ nm}$.

4.3 Polymerprobe

Es wird die Polymerprobe verwendet, um den Reibungscontrast zu untersuchen. Die Probe besteht aus zwei phasenseparierten Polymeren, die sich im Reibungskoeffizienten unterscheiden. Zudem ist die Oberflächen-Topographie relativ flach, sodass der Reibungscontrast im L-R-Signal (Left-Right) gut sichtbar ist.

5 Durchführung und Auswertung der Aufgaben

5.1 Spitzengeometrie und Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen des AFM wird wie bereits erwähnt vom Spitzenradius und dem Aspektverhältnis der Spitze bestimmt. Für topographische Details der Oberfläche, die kleiner als der Spitzenradius sind, findet eine Invertierung statt. Statt der gescannten Eigenschaft wird die Spitze durch diese Eigenschaft abgebildet und verbreitert die abgebildete Topographie. In Fall a) wird näherungsweise (die Topographie gleicht einem Delta-Peak) die Spitze um 180° gedreht abgebildet. In Fall b) und d) wird jeweils die Seite der Spitze in Scanrichtung um 180° gedreht abgebildet, die Steigung wird jedoch aufgrund des größeren Anstellwinkels in Fall b) besser dargestellt. In Fall c) sind sowohl Spitzenradius zu groß als auch Aspektverhältnis zu klein, es entsteht nur eine flache Kuhle als Scanlinie. In Fall e) ist die Spitze beschädigt und der Spitzenradius zu groß, die beiden Hubbel werden nicht aufgelöst.

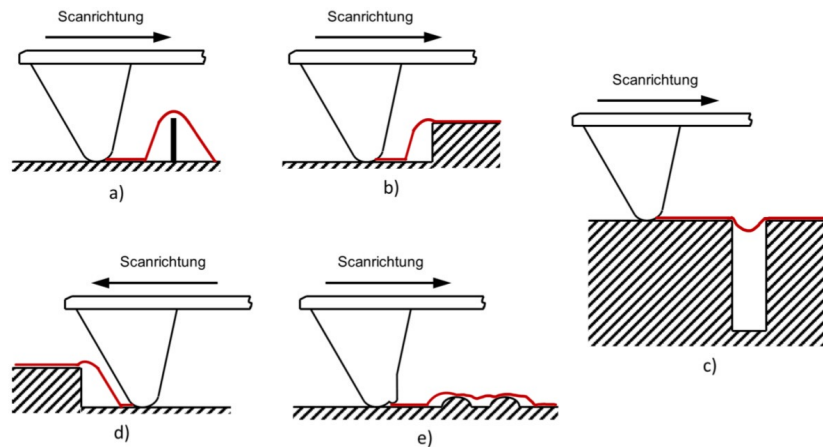


Abbildung 4: Scanlinien

Spitzenartefakte lassen sich durch den Vergleich von Vorwärts- und Rückwärtsscan erkennen, da jegliche Abweichungen auf Defekte der Spitze hindeuten. Außerdem kann die Messung mit einer um 90° gedrehten Messung verglichen werden, da auch hier die Artefakte aufgrund der unterschiedlichen Scanrichtungen an unterschiedlichen Stellen im Bild zu sehen wären.

5.2 Einfluss des Spitzenradius

Um den Einfluss des Spitzenradius auf die abgetasteten Abmessungen der Probenstrukturen abzuschätzen, kann der Satz des Pythagoras verwendet werden. Gesucht ist der gemessene Radius als Abstand von Kontaktpunkt der Spitze mit dem Boden und Mittelpunkt des Topographiedetails. Dieser bildet mit dem Radius R der Spitze und dem

Abstand $s = R + r$ von Spitzenmittelpunkt zu Topographiedetailmittelpunkt ein rechtwinkliges Dreieck. Es folgt:

$$R_{\text{mess}} = \sqrt{2Rr + r^2}$$

Es soll $R_{\text{mess}}/r \leq 1,1$ gelten. Daraus folgt $r \geq \frac{2}{0,21}R = 9,52R$. Mit einem Radius r des Topographiedetails, der ca. zehnmal größer als der Spitzenradius ist, wird das Messergebnis um weniger als 10% vergrößert.

5.3 Normale Federkonstante

Für die normale Federkonstante des Cantilevers gilt $c_n = \frac{Ewt^3}{4l^3}$ mit dem Elastizitätsmodul $E = 1.69 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$. Dabei ist die Breite $w = (35 \pm 3) \mu\text{m}$, die Dicke $t = (1 \pm 0.17) \mu\text{m}$ und die Länge $l = (350 \pm 5) \mu\text{m}$. Für die Dicke ist keine Standardabweichung angegeben, sondern ein minimaler und maximaler Wert. Unter der Annahme einer Gleichverteilung wird die Standardabweichung als $\Delta t = \frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{\sqrt{12}}$ berechnet, mit $t_{\text{min}} = 0.7 \mu\text{m}$ und $t_{\text{max}} = 0.7 \mu\text{m}$.

Für den Cantilever mit Spitze E ergibt sich $c_n = (0.034 \pm 0.018) \text{ N/m}$. Im Datenblatt ist der typische Wert für die Federkonstante als $c_{n,\text{typ}} = 0.05 \text{ N/m}$ angegeben, dabei sind $c_{n,\text{min}} = 0.01 \text{ N/m}$ und $c_{n,\text{max}} = 0.08 \text{ N/m}$. Der errechnete Wert stimmt also gut mit dem tatsächlichen überein.

5.4 Gitterausmessung

In dieser Aufgabe wurde das Lochgitter mit dem AFM im Contact Mode abgetastet.

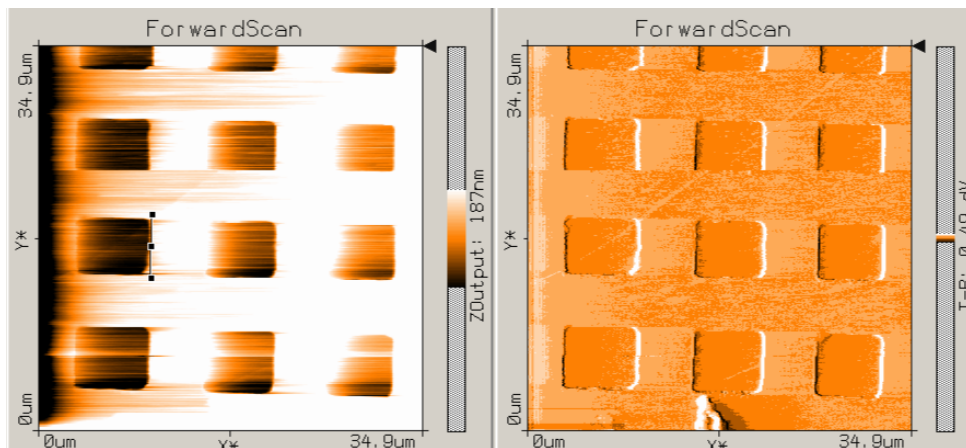


Abbildung 5: Spitzengitter Aufnahmebild

Abbildung 5 zeigt die Aufnahme des Lochgitters. Die regelmäßige Struktur rechteckiger Erhebungen ist klar erkennbar. Links sind deutliche Scan-Artefakte sichtbar, was auf eine nicht optimal eingestellte Nachregelung hindeutet. Das rechte Bild zeigt das zugehörige Deflektionssignal.

An fünf verschiedenen Stellen des Gitters wurden jeweils die z-Höhe, die x-Breite, der x-Abstand, die y-Breite und der y-Abstand gemessen.

Da die Probe nicht perfekt gerade auf dem Proben­tisch lag, musste zunächst eine Eben­korrektur durch­ge­führt werden. Hierzu wurde auch immer der Abstand der Punkte, an denen gemessen wurde, dokumentiert.

Mit diesen Daten wurde ein Fit der z-Höhe gegen die Länge durch­ge­führt, um die Schief­lage zu bestimmen. Die zweite Messung wurde dabei nicht in den Fit einbezogen, da sie sehr stark von den anderen Werten abgewichen ist. Dies liegt an einem händischen Messfehler. Die Fehler auf die z-Höhe wurden dabei wie folgt definiert: $\Delta z = 5\%$ mit $\Delta z_{min} = 0.5 \text{ nm}$ und auf die Länge $\Delta l = 3\%$ mit $\Delta l_{min} = 20 \text{ nm}$. Diese entstehen durch die Ungenauigkeiten bei der Messung und der Positionierung der Probe sowie der Piezo-Nichtlinearität und thermischen Schwankungen. Ein weiterer Faktor für die z-Achse ist der Radius des Cantilevers, der die laterale Breite nach oben verzerrt. Diese Abschätzung wurde im weiteren Verlauf des gesamten Versuchs genutzt.

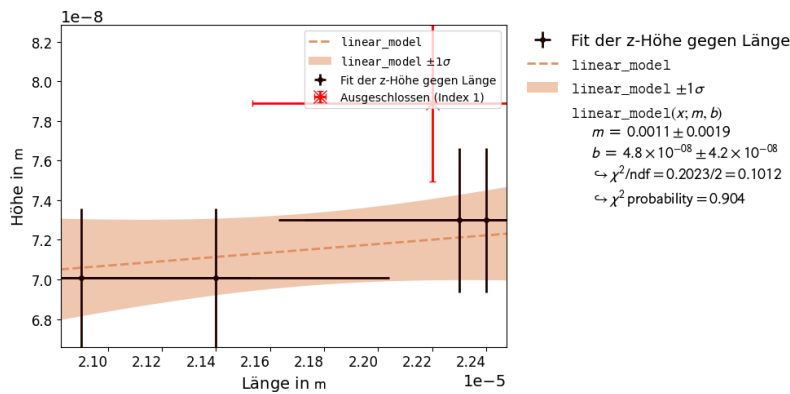


Abbildung 6: Fit der z-Höhe gegen Länge

Die Steigung des Fits beträgt $m = (4.8 \cdot 10^{-8} \pm 4.2 \cdot 10^{-8}) \frac{\text{m}}{\text{m}}$. Die Chi-Quadrat Wahrscheinlichkeit von 0.904 zeigt das eine Schräglage eindeutig vorlag und man den Wert der Steigung gut zur Korrektur der anderen Punkte anwenden kann.

Im Anschluss wurde die Schief­lage korrigiert und ein Mittelwert über alle Messpunkte gebildet. Zudem wurde der schlecht gemessene Punkt ausgeschlossen.

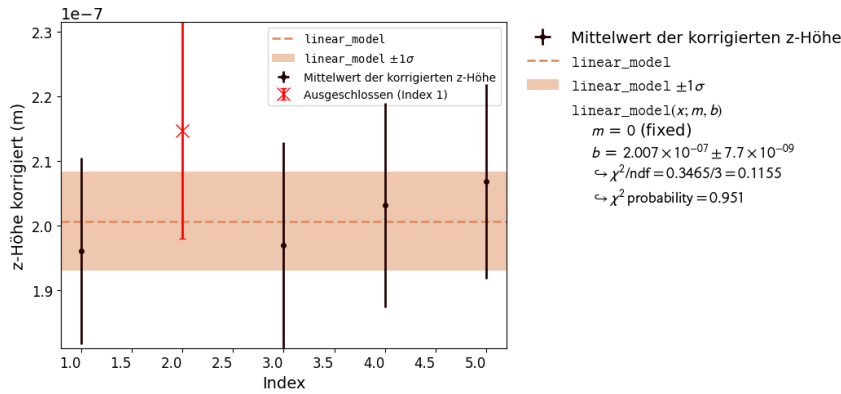


Abbildung 7: Fit der korrigierten z-Höhe

Die dabei ermittelte z-Höhe des Gitters ist $\Delta z = (2.007 \cdot 10^{-7} \pm 7.7 \cdot 10^{-9})\text{m}$. Dieser Wert stimmt gut mit dem Referenzwert von $2 \cdot 10^{-7}\text{m}$ überein.

Dasselbe wurde nun für die x- und y-Richtung durchgeführt. Auch hier wurde ein Mittelwert gebildet. Die Fehler wurden wie oben beschrieben angenommen.

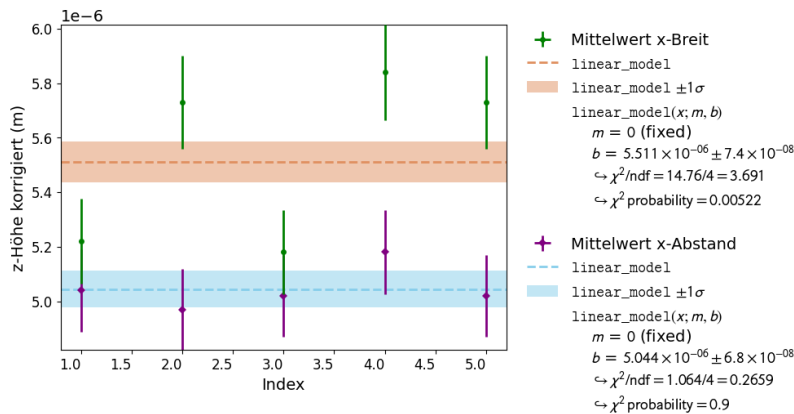


Abbildung 8: Fit der x-Breite und x-Abstandes

Die dabei ermittelte x-Breite des Gitters ist $\Delta x = (5.511 \cdot 10^{-6} \pm 7.4 \cdot 10^{-8})\text{m}$, sowie der x-Abstand $\Delta x = (5.044 \cdot 10^{-6} \pm 6.8 \cdot 10^{-8})\text{m}$. Diese Werte stimmen gut mit dem Referenzwert von $5 \cdot 10^{-6}\text{m}$ überein.

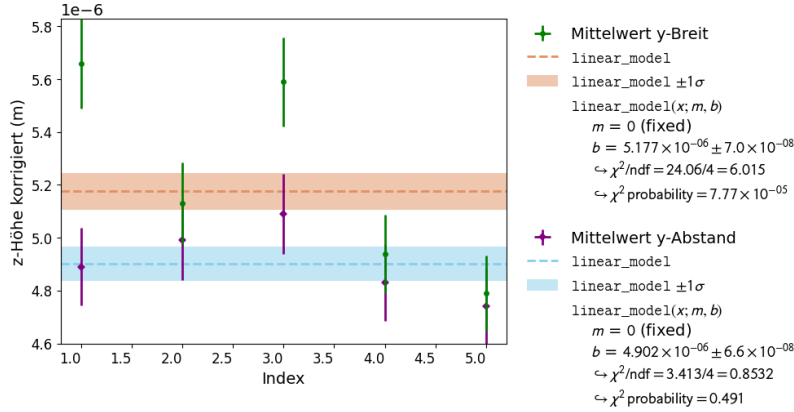


Abbildung 9: Fit der y-Breite und y-Abstandes

Die dabei ermittelte y-Breite des Gitters ist $\Delta y = (5.177 \cdot 10^{-6} \pm 7.0 \cdot 10^{-8})\text{m}$, sowie der y-Abstand $\Delta y = (4.902 \cdot 10^{-6} \pm 6.6 \cdot 10^{-8})\text{m}$. Diese Werte stimmen ebenfalls gut mit dem Referenzwert von $5 \cdot 10^{-6}\text{m}$ überein.

Während die Fits der Lochabstände in x- und y-Richtung gute χ^2 -Werte liefern, sind die χ^2/ndf der Breiten deutlich größer und die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten sehr klein. Der Mittelwert der Breite stimmt jedoch mit dem Nominalwert überein. Dies deutet darauf hin, dass die einfache Fehlerabschätzung (3%) für die Breitenmessung zu optimistisch ist. Fehler wie die reale Inhomogenitäten der Gitterstruktur (Fertigungstoleranzen), Tip-Convolution und die händische Bestimmung der Kanten, tragen zu einer erhöhten Streuung zwischen einzelnen Quadraten bei. Diese Effekte beeinflussen die Breite deutlich stärker als den Lochabstand, sodass der gemessene Mittelwert zwar konsistent mit dem Sollwert ist, die Streuung der Einzelwerte jedoch größer ausfällt.

Messgröße	Messergebnis	Referenzwert
z-Höhe	$(200.7 \pm 0.8) \text{ nm}$	200 nm
x-Breite	$(5.511 \pm 0.074) \mu\text{m}$	5 μm
x-Abstand	$(5.044 \pm 0.068) \mu\text{m}$	5 μm
y-Breite	$(5.177 \pm 0.070) \mu\text{m}$	5 μm
y-Abstand	$(4.902 \pm 0.066) \mu\text{m}$	5 μm

Tabelle 1: Gitterausmessung

Aus den in Tabelle 1 angegebenen Mess- und Referenzwerten lässt sich ein Korrekturfaktor für die Piezo-Skalierung bestimmen. Dieser ergibt sich aus:

$$k_i = \frac{L_{\text{ref},i}}{L_{\text{mess},i}}, \quad i \in \{x, y, z\}. \quad (4)$$

Verwendet man die Gitterabstände zur Kalibrierung, so erhält man

$$k_z \approx 0.997, \quad k_x \approx 0.991, \quad k_y \approx 1.020.$$

Diese Faktoren können zur Korrektur späterer Längenmessungen verwendet werden. Die Verwendung nur eines Korrekturfaktors pro Richtung setzt jedoch voraus, dass die Piezo-Charakteristik linear und zeitlich stabil ist. Diese Charakteristiken sind jedoch beim realen Scannerröhrchen nicht gegeben. Daher kann man streng genommen diese Kalibrierung nur für den Bereich der Kalibrierung verwenden.

Zudem verliert die Kalibrierung ihre Gültigkeit, wenn sich die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte) stark ändern, da dies die Piezoeigenschaften beeinflusst. Auch die Alterung im Lauf der Zeit lässt diese Kalibrierung ungenau werden. Deshalb ist eine ständige Nachkalibrierung notwendig.

Insgesamt stimmen alle gemessenen Werte gut mit den Referenzwerten überein. Somit wurde die Genauigkeit des AFM bestätigt.

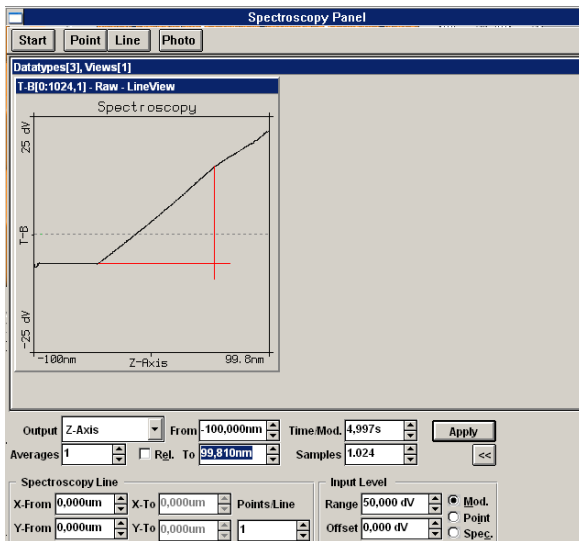
5.5 Kraftabstandskurve

Da es uns leider nicht möglich war, eine gute Kraftabstandskurve aufzunehmen, werden hier die Aufnahmen einer anderen Gruppe genutzt (Abb. 10). Auf der y-Achse ist die Verbiegung des Cantilevers als Top-Bottom-Differenzsignal in dV aufgetragen, auf der x-Achse der Abstand der Probe in nm.

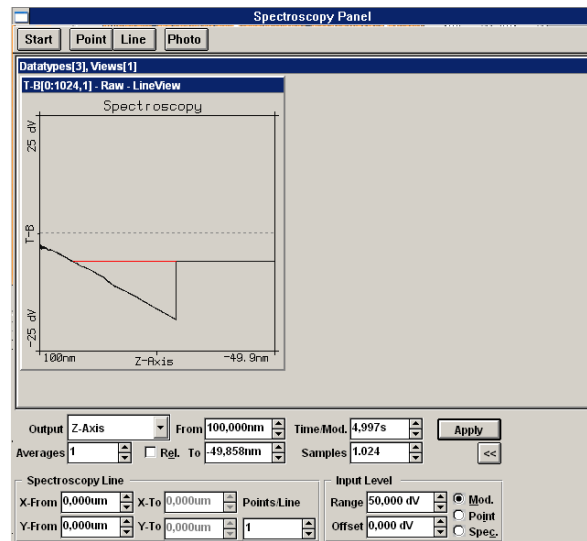
Zunächst wird die Sensitivität des Photodetektors aus der inversen Steigung der Annäherungskurve (rot eingezeichnet in Abb. 10a) bestimmt: $S = \frac{\Delta z}{\Delta U_{TB}}$. Die Kurven werden mithilfe des Bildbearbeitungsprogramms Gimp ausgewertet. Dort werden die benötigten Größen in Pixeln gemessen und mithilfe der durch die Messung der x- und y-Skala sich ergebenden Umrechnungsfaktoren in Volt bzw. Nanometer umgerechnet. Als Fehler auf die Längenmessung in Gimp wird ein Fehler von $\Delta l = 5$ px angenommen, der auch in die entsprechenden Einheiten umgerechnet wird. Für die Sensitivität wird so $S = (48.4 \pm 3)$ nm/V ermittelt.

Die Auflagekraft des Cantilevers auf die Probenoberfläche wird für den verwendeten Setpoint von $\Delta U_{TB} = 10.9$ dV bestimmt. Verwendet wird das Hooksche Gesetz $F_n = c_n S \Delta U_{TB}$. Als Federkonstante wird die zuvor berechnete verwendet: $c_n = (0.034 \pm 0.018)$ N/m. Damit ist $F_n = (1.8 \pm 1) \cdot 10^{-9}$ N. Das liegt im erwarteten Bereich von 10^{-10} bis 10^{-7} N.

Anhand der Entfernungskurve kann die Adhäsionskraft als $F_{\text{Adhäsion}} = c_N \cdot \Delta z$ bestimmt werden. Dabei ist $\Delta z = (66 \pm 2.9)$ nm hier der Abstand zwischen dem Gleichgewichtspunkt und dem Snap-off-Punkt, also die Auslenkung des Cantilevers, die durch die Adhäsionskraft verursacht wird (rot eingezeichnet in Abb. 8). Die Bestimmung erfolgt analog wie vorher beschrieben mit Gimp. Es ergibt sich $F_{\text{Adhäsion}} = (2.2 \pm 1.2) \cdot 10^{-9}$ N. Die rechnerisch maximale Kapillarkraft für einen Spitzenradius von $R = 10$ nm ergibt sich für Wasser ($\sigma = 0.074$ N/m) mit der Formel aus Abschnitt 3.1.2 zu $F_{\text{Kapillar}} \approx 9.3 \cdot 10^{-9}$ N. Die hier verwendete Spitze hat einen Radius von maximal 10 nm, somit hat die hier ermittelte Kraft einen realistischen Wert.



(a) Snap-in



(b) Snap-out

Abbildung 10: Kraft-Abstandskurven beim Annähern (Snap-in) und Entfernen (Snap-out) des Cantilevers.

In Abb. 10a ist der Snap-in-Punkt leider nicht zu erkennen. In Abb. 10b ist deutlich der Snap-out-Punkt zu sehen.

5.6 Aussehen Kraftabstandskurven

Das Aussehen einer Kraftabstandskurve an der Luft wurde bereits in Abschnitt 3.2 diskutiert. Findet die Messung im Ultrahochvakuum statt, bildet sich an der Oberfläche keine Adsorbatschicht (dünner Wasserfilm). Dadurch bleiben die sonst wirkenden Kapillarkräfte aus. Die Kapillarkräfte tragen beim Zurückziehen der Spitze dazu bei, diese bis zum Snap off an der Oberfläche zu halten. Demnach fällt im Ultrahochvakuum die Hysterese von Snap in und Snap off wesentlich weniger extrem aus. Das gleiche gilt für Messungen in Flüssigkeiten. Hier können jedoch andere Kräfte auftreten, die das Aussehen der Kurve verändern können.

Bei weichen Proben kann die Spitze die Oberfläche deformieren. Bei der Annäherung verändert sich dadurch der lineare Anstieg der Kraft beim Kontakt. Beim Snap in drückt die Spitze in die Oberfläche hinein, sie drückt nicht direkt auf eine harte Oberfläche, wodurch der Anstieg der Kraft weniger stark und auch nicht im gesamten Kontaktbereich linear ist. Außerdem ist beim Rückzug der Spitze eine stärkere Adhäsion zu vermuten. Je größer die Federkonstante des Cantilevers ist, desto größer ist die dazu proportionale Rückstellkraft, und desto später (bei geringerem Abstand) und weniger stark findet der Snap in statt. Genauso findet der Snap off früher und weniger ausgeprägt statt.

5.7 CD Ausmessung

Die Schreibfolie der CD wird mithilfe eines Klebestreifens abgezogen. Die CD kann dann mit dem AFM vermessen werden. Mithilfe des Length- und Distance-Tools der Scansoftware können die Breite der Pits, der Trackabstand und die Tiefe der Pits wie in Aufgabe 4 gemessen werden. Auch hier muss die Schiefelage in z-Richtung bestimmt werden, dazu dient eine Referenzmessung der gemessenen Distanz in z-Richtung zwischen zwei Punkten gleicher Höhe. Aus dem Abstand der Punkte und der Distanz kann die Steigung der Oberfläche in z-Richtung bestimmt werden. Mithilfe derer werden dann die tatsächlich gemessenen Tiefen höhenkorrigiert. Bei der Messung der Tiefe der Pits muss also auch der Abstand zwischen den gewählten Messpunkten (Pit und Land) gemessen werden. Für die höhenkorrigierte Tiefe z der Pits, die Breite und den Trackabstand (gemessen als Distanzen d) wird der Mittelwert der genommenen fünf Messwerte per Fit bestimmt. Als Fehler werden wie in Aufgabe 4 $\Delta z = 5\%$ mit $\Delta z_{min} = 0.5 \text{ nm}$ und $\Delta d = 3\%$ mit $\Delta d_{min} = 20 \text{ nm}$ verwendet.

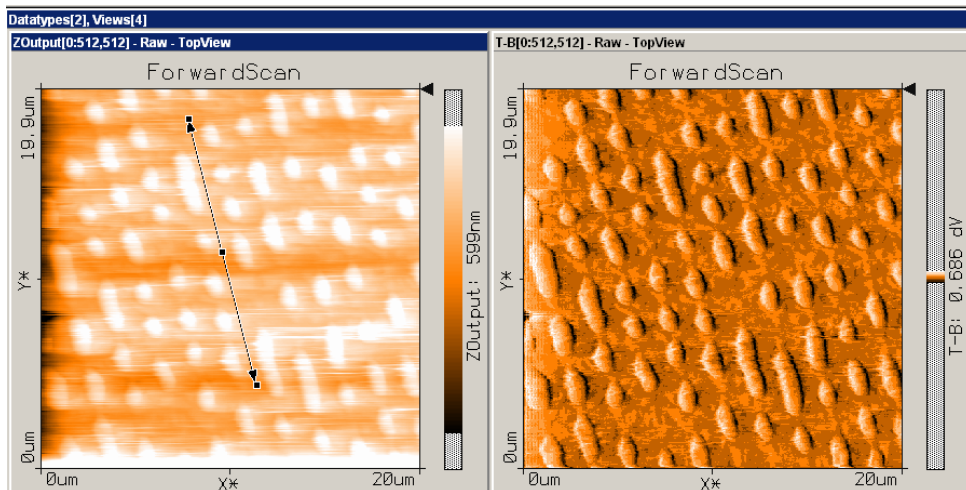


Abbildung 11: CD Topographieaufnahme

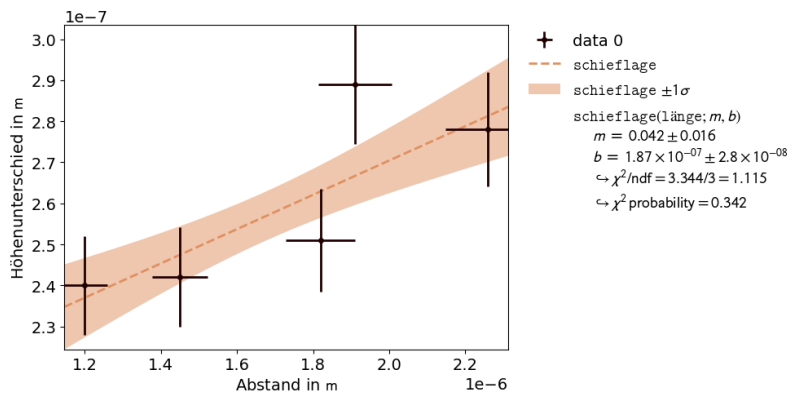


Abbildung 12: Fit zur Bestimmung der Schiefelage

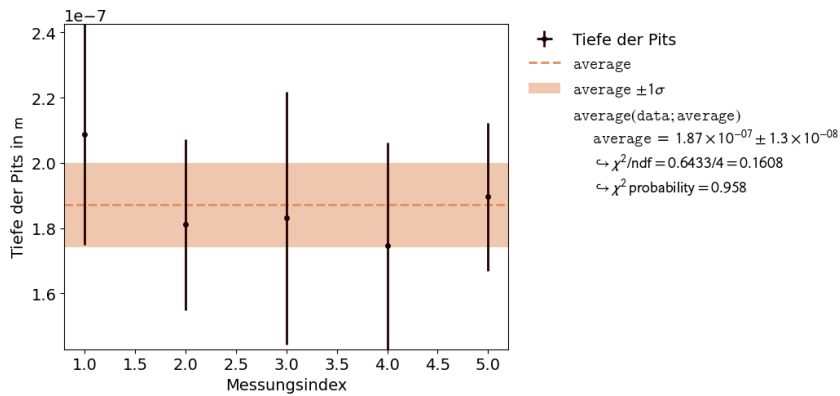


Abbildung 13: Fit der korrigierten Tiefe

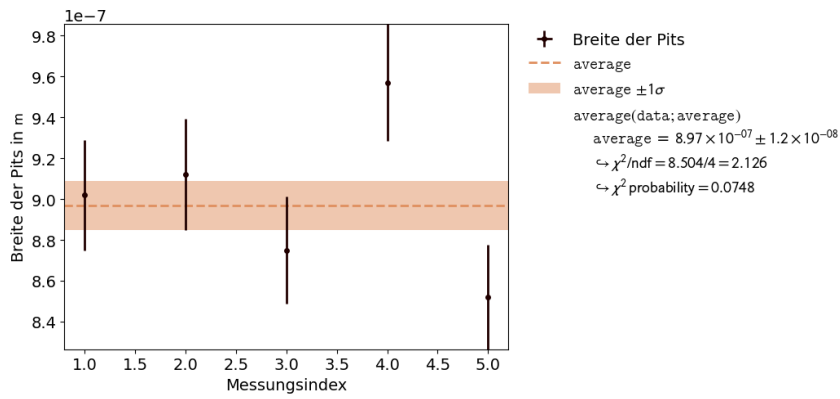


Abbildung 14: Fit der Pitbreite

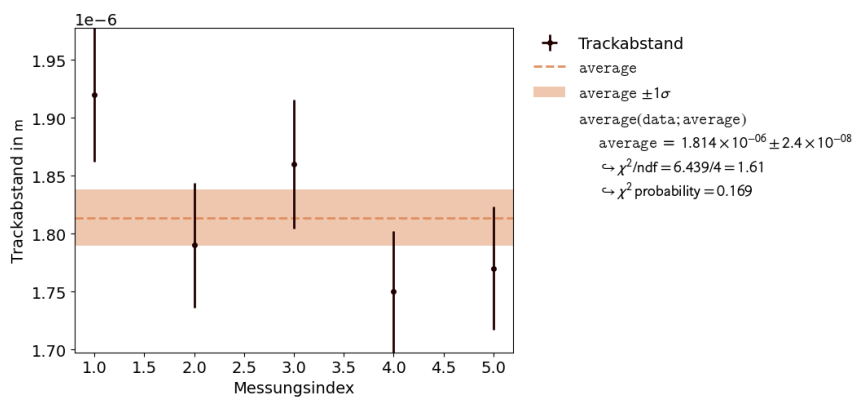


Abbildung 15: Fit des Trackabstands

Die Fits für die Bestimmung der Schiefelage und den Mittelwert der Pittiefe haben mit Güten von $\chi^2/ndf = 1.115$ bzw. $\chi^2/ndf = 0.1608$ ziemlich bzw. äußerst gut funktioniert. Hier weist eine Güte von $\chi^2/ndf < 1$ auf einen guten und eine Güte von $\chi^2/ndf \approx 1$ auf

einen akzeptablen Fit hin. Die Fits zur Bestimmung des Mittelwerts von Pitbreite und Trackabstand sind mit Güten von $\chi^2/ndf = 2.126$ bzw. $\chi^2/ndf = 1.61$ schlecht, was auf eine große Streuung der Messwerte und zu geringe Fehlerabschätzung hinweist.

Die Messung der Abstände war hier in der Tat sehr schwierig, da die Topographieaufnahme der CD viele Spitzenartefakte und eine niedrige Auflösung aufweist. Das ist an den weißen bzw. hellen Streifen zu erkennen, die sich von den Pits ausgehend zu beiden Seiten ziehen. Außerdem weisen die Pits Krümmungen und Asymmetrien auf, die sie in echt nicht haben. Einerseits ist der Scan an sich suboptimal, andererseits ist es durch die Artefakte schwieriger, an den richtigen Stellen zu messen, da die Abbildung verzogen wirkt. Davon ausgehend wäre eine größere Unsicherheit aufgrund von ungenauen Messungen durchaus gerechtfertigt.

Messgröße	Messergebnis	Referenzwert
Pittiefe	(187 ± 13) nm	126 nm
Pitbreite	(897 ± 12) nm	500 nm
Trackabstand	(1.814 ± 0.024) μm	(1.6 ± 0.1) μm

Tabelle 2: Ausmessung der CD

Aus den Fits ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Ergebnisse. Diese weichen leider alle um mehrere Standardabweichungen von den Referenzwerten ab. Das ist in Übereinstimmung mit der schlechten Qualität des Scans. Es lässt sich (wenn falsche Einstellungen des Setpoints und nicht kalibrierte Piezos auszuschließen sind) z.B. auf eine beschädigte Spitze schließen, um die Artefakte zu erklären. Ist die Spitze beispielsweise stumpf, so verbreitern sich mit dem Spitzenradius auch die gemessenen Breiten. In diesem Fall sollte jedoch eine zu kleine Pittiefe gemessen werden, statt einer zu hohen. Ansonsten kann auch der Piezocrep (zeitliche Verzögerung der Längenänderung der Scannerröhren) zu einer Verzerrung in z-Richtung führen, diese sollte jedoch weniger eklatant sein. Eine andere Möglichkeit ist, dass die verwendete CD-Probe beschädigt ist. Diese wurde nämlich bereits vorher verwendet und könnte durch zu hohe Kontaktkraft der Spitze zuvor beschädigt worden sein. Andernfalls ist zu vermuten, dass die Nachregelung des Piezos nur suboptimal funktioniert hat. Insgesamt sind die Messergebnisse in Ordnung.

Das Auslesen der CD beruht auf dem Auftreten von destruktiver Interferenz an den Grenzen zwischen Pits und Lands, die für eine abgeschwächte Intensität an der Photodiode sorgt. Für destruktive Interferenz gilt für den Gangunterschied des Lichts das an Pits und an Lands reflektiert wird $\Delta s = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ mit $k \in \mathbb{N}_0$. Dabei beträgt der Gangunterschied gerade die doppelte Tiefe eines Pits (wegen Hin- und Rückweg des reflektierten Lichts). Der für CDs verwendete Laser hat eine Wellenlänge von $\lambda = 780$ nm. Die Polycarbonatschicht der CD hat einen Brechungsindex von $n = 1.55$.

Für die optimale Tiefe der Pits folgt $h = (2k + 1)\frac{\lambda}{4n} \approx 126$ nm mit $k = 0$. Diese wird oben als Referenzwert genutzt.

5.8 Reibungskräfte

Eine hohe Reibung führt zu einer erhöhten Lateralkraft auf den Cantilever, die zu einer Torsion führt. Diese wird über die L-R-Differenzspannung der Photodiode gemessen. Bei konstanter Auflagekraft ergibt sich in einem homogenen Reibungsbereich ein Plateau im L-R-Signal. Wechselt nun die Reibung, verschiebt sich dieses. Wenn der Wechsel von hoher zu niedriger Reibung ist, sinkt das Plateau (umgekehrt steigt es). Es gilt näherungsweise:

$$F_{\text{Reibung}} \approx \mu F_{\text{Auflage}}$$

Wenn ein Richtungswechsel der Scanrichtung stattfindet, ändert sich das Vorzeichen der Lateralkraft und somit auch des L-R-Signals. Dies passiert schlagartig und es entsteht eine Hysterese.

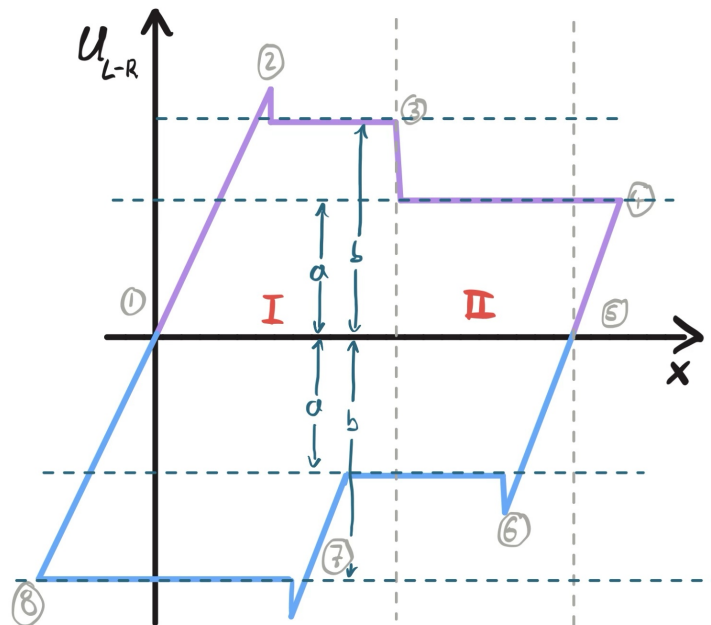


Abbildung 16: Lateralkraftsignal (L-R) - Vor- und Rücklauf

- **1**: Start auf der Nulllinie. Noch keine Torsion, $U_{L-R} \approx 0$.
- **1** → **2** (Vorlauf): Eintritt in Region I (hohe Reibung): schräger Anstieg durch Vorspannung/Stick-Slip.
- **2**: Kanten-Peak an der Grenze; danach oberes Plateau der hohen Reibung. Pfeil b markiert die Plateauhöhe ($\propto \mu_I F_N$). Der Kanten-Peak entsteht beim Überfahren von einer niedrigeren Reibung zu einer höheren Reibungsregion. Dies liegt daran, dass $\mu_{\text{Haft}} > \mu_{\text{Gleit}}$ ist. Daher entsteht auch der plötzliche Sprung, da der Übergang Haften \Rightarrow Gleiten schlagartig ist. Dasselbe Phänomen ist zudem auch bei **6** und **7** zu beobachten.
- **3**: Übergang hoch \rightarrow gering: Sprung nach unten ins niedrigere Niveau.

- **3** → **4**: Region II (geringe Reibung): unteres Plateau, Pfeil $a \propto \mu_{II} F_N$ mit $\mu_{II} < \mu_I$.
- **4**: Ende Vorlauf. Da die Spitze verdreht ist, muss der Cantilever weiter raus fahren, um am Ende des Materials anzukommen.
- **5**: Richtungswechsel \Rightarrow Vorzeichenwechsel des L-R-Signals (Beginn Rücklauf unter der Nulllinie).
- **6**: Negativer Kanten-Peak beim Übergang im Rücklauf (Spiegelbild zu $1 \Rightarrow 3$).
- **7**: Negatives GR-Plateau ($\approx |a|$). Beim weiteren Rücklauf durch Region I folgt ein negatives HR-Plateau (Betrag $\approx |b|$).
- **8**: Zweiter Richtungswechsel \Rightarrow erneuter Vorzeichenwechsel zurück Richtung Null, sodass der Cantilever nicht mehr torsiert ist.

Leseschlüssel: Die gestrichelten Vertikalen sind die Grenzen der Reibungsbereiche; die horizontalen gestrichelten Linien zeigen die Plateau-Niveaus. a/b sind direkt proportional zu μ_{II}/μ_I .

5.9 Polymerblend-Probe

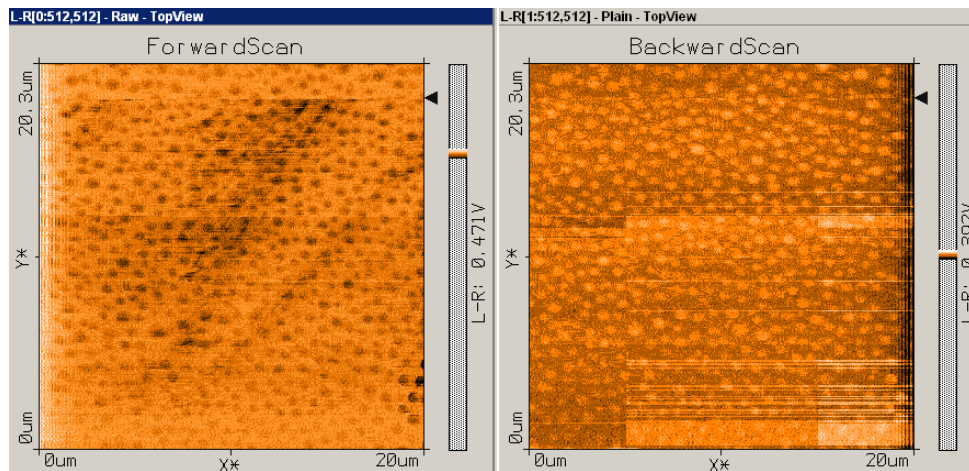


Abbildung 17: Polymerblendprobe Lateralkraftsignal (L-R)

In Abb. 17 ist das Lateralkraftsignal (L-R) der Polymerblend-Probe dargestellt. Es sind zwei unterschiedliche Reibungsbereiche zu erkennen, die durch die unterschiedlichen Materialien des Blends verursacht werden. Dies erkennt man in den Bildern anhand der körnigen Flecken mit unterschiedlichen Helligkeiten. Betrachtet man Forward- und Backward-Scan getrennt, so sind die Inseln im Backward-Scan heller als das umgebende Material, im Forward-Scan dagegen dunkler. Diese Kontrastumkehr zwischen Vorwärts- und Rückwärtsscan ist wie in Aufgabe 5.8 erläutert ein typisches Kennzeichen für Reibungskontrast.

Daraus folgt, dass die Inseln einen höheren Reibungskoeffizienten besitzen als das umgebende Material und es sich somit um zwei unterschiedliche Polymerphasen handeln muss.

Man erkennt in beiden Bildern streifenartige Strukturen (v. a. im Backward-Scan horizontale Streifen und am Rand vertikale Linien); diese können durch Probleme bei der Höhennachregelung entstehen. Beim Überfahren von Bereichen mit höherer Reibung ändert sich die Auflagekraft und somit die Höhe der Spitze. Wenn die Regelung nicht schnell genug oder schlecht reagiert, entstehen solche Artefakte. Der Piezocreep erklärt zudem die wellenartigen Strukturen im Bild (v. a. im Forward-Scan).

Um nun dennoch die reale Topographie der Probe zu erhalten, kann man ausnutzen, dass die Topographie ihr Vorzeichen beim Richtungswechsel nicht ändert, die Reibung aber schon. Um die reale Topographie zu bekommen, kann man

$$T_{\text{real}} \approx \frac{T^{\text{fwd}} + T^{\text{bwd}}}{2} \quad (5)$$

rechnen. Umgekehrt erhält man die Reibungskarte durch

$$R_{\text{real}} \approx \frac{T^{\text{fwd}} - T^{\text{bwd}}}{2} \quad (6)$$

wobei T^{fwd} und T^{bwd} die gemessenen Signale im Vorwärts- bzw. Rückwärtsscan bezeichnen.

Um dies durch reine Beobachtung der Scanbilder zu erkennen, vergleicht man den Forward- und Backward-Scan. Bereiche, die eine Kontrastumkehr zeigen, sind ein Indiz dafür, dass es sich um Reibung handelt. Bereiche, die in beiden Scans gleich aussehen, sind topographische Merkmale.

Im Vergleich zum Polymerblend ist bei der CD-Probe eine einheitliche Materialoberfläche vorhanden. Reibung entsteht höchstens an den Kanten/der Schräge (Slope) der Pits. Bei a) aufsteigender Kante ist das laterale Signal positiv (abhängig von der Vorzeichenkonvention), bei b) absteigender Kante negativ. Im Land- und Pit-Bereich ist das laterale Signal nahezu Null, da hier keine Reibungskräfte wirken.

Literaturverzeichnis

- [1] Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf. *Rasterkraftmikroskop-Schema*. 2025. URL: <https://www.hzdr.de/db/Cms?p0id=23352&pNid=0> (besucht am 04.11.2025).
- [2] Periodni.com Glossar. *Lennard-Jones Potential*. 2025. URL: <https://glossary.periodni.com/glossary.php?en=Lennard-Jones+potential> (besucht am 04.11.2025).