

Rasterkraftmikroskop

**Praktikum - Festkörperphysik**

Julia Jacob                                    Mario Alex Hollberg  
julia.jacob@udo.edu                        mario-alex.hollberg@udo.edu

16. Oktober 2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Funktionsweise des Rasterkraftmikroskops . . . . .	3
2.2 Wechselwirkung . . . . .	5
2.3 Messmodi . . . . .	6
2.4 Kraft-Abstands-Kurve . . . . .	7
<b>3 Durchführung</b>	<b>8</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>11</b>
4.1 Messung der Topografie einer Mikrostruktur . . . . .	11
4.2 Topographie einer CD, DVD und Blu-ray . . . . .	14
4.3 Federkonstante, Adhäsionskraft, Elastizitätsmodul mittels Kraft-Abstandskurven	17
<b>5 Diskussion</b>	<b>17</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>18</b>
<b>Literatur</b>	<b>19</b>

# 1 Ziel

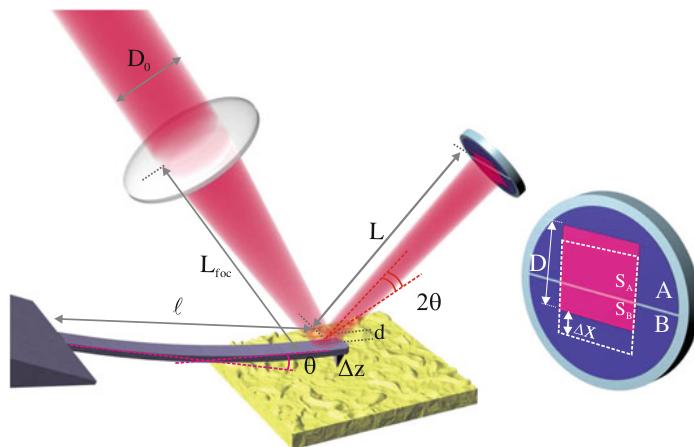
Das Rasterkraftmikroskop wurde 1986 von Gerd Binning, Calvin Quate und Christoph Gerber [1] erfunden und erlaubt eine Auflösung in der Größenordnung von wenigen zehntel Pikometer. Die Auflösung ist damit mindestens genauso gut, wie die des von Christoph Gerber mitentwickelte Rastertunnelmikroskops, mit dem großem Vorteil, nun auch nicht-leitende Proben vermessen zu können. Zusätzlich zeichnet sich das Rasterkraftmikroskop durch einen weiteren Vorteil aus: der Handlichkeit. Denn zur Vermessung einer Probe ist kein Vakuum nötig, wodurch das Rasterkraftmikroskop bereits auf einen handelsüblichen Tisch verwendet werden kann. Anwendung findet das Rasterkraftmikroskop deshalb in sämtlichen Naturwissenschaften, sowie in der Industrie.

In diesem Versuch wird die Topografie einer Siliziumdioxid-Probe mit unterschiedlichen Mikrostrukturen, sowie verschiedene Speichermedien: CD, DVD und Blu-ray mittels des Rasterkraftmikroskops im Nicht-Kontakt-Modus untersucht. Anhand einer Kraft-Abstandskurve von Edelstahl, Teflon und einer TiN-Schicht wird abschließend das jeweilige Elastizitätsmodul und die Adhäsionskräfte zwischen Messspitze und Probe bestimmt.

# 2 Theorie

## 2.1 Funktionsweise des Rasterkraftmikroskops

Das Rasterkraftmikroskop basiert auf dem Hookesche Gesetz  $F = -k\Delta z$ , mit der Federkonstante  $k$  und der Auslenkung  $\Delta z$  des Federbalkens bzw. Cantilevers. Bei dem Cantilever handelt es sich um einen Arm, der an einer Seite fest montiert ist und am anderen Ende frei schwingen kann (siehe Abbildung 1).

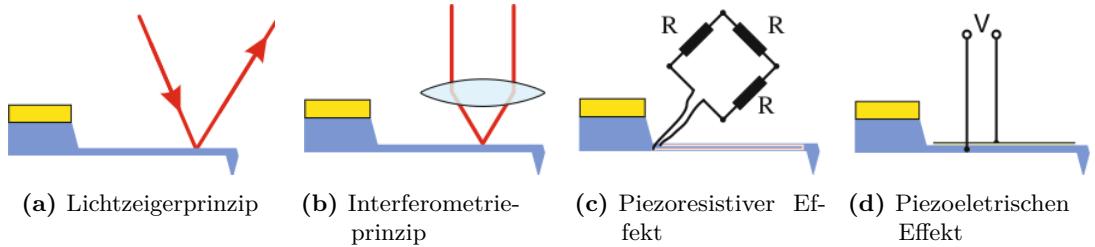


**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des Rasterkraftmikroskops. In gelb ist die Probe dargestellt. Von links ragt das Cantilever samt Messspitze auf die Probe. Rotes Laserlicht wird mittels einer Linse auf den Rücken des Cantilevers fokussiert und dort zur Photodiode reflektiert. Es handelt sich in der Abbildung um eine Zweisegment-Photodiode, anstelle einer in diesem Versuch verwendeten Viersegment-Photodiode [2, S. 161].

An dem frei schwingendem Ende ist eine Messspitze, mit einem Radius von weniger als 10 nm. Das Cantilever sollte eine kleine Federkonstante  $k$  haben, damit diese sensibel auf Wechselwirkungen mit der Probe reagiert. Die Größenordnung der Federkonstante  $k$  lässt sich dabei folgendermaßen abschätzen: Das Gewicht eines Atoms ist in etwa  $m_{\text{At}} \approx 10^{-25} \text{ kg}$  und die typische Vibrationsfrequenz von Festkörperatomen liegt bei  $\omega_{\text{vib}} \approx 10^{13} \text{ Hz}$ , damit ergibt sich nach

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \Leftrightarrow k = \omega^2 m \quad (1)$$

eine Federkonstante  $k$  in der Größenordnung von  $\sim 10 \text{ N/m}$  [2, S. 157]. Ein harmonischer Oszillatator wird bekanntlich nur dann zur Schwingungen angeregt, wenn die Anregungsfrequenz  $\omega_{\text{ex}}$  deutlich kleiner ist, als die der Resonanzfrequenz  $\omega_{\text{rf}}$ . So sollte auch das Cantilever eine hohe Resonanzfrequenz ( $> 10 \text{ kHz}$ ) aufweisen, welche erlaubt, mit hohen Scan-Geschwindigkeiten zu messen. Zusätzlich wird so auch die Stabilität vor Messverfälschungen wie externen Vibrationen gewährleistet. Damit nach Formel 1 die Resonanzfrequenz  $\omega_{\text{rf}}$  klein gehalten wird, sollte das Cantilever wenige  $\mu\text{g}$  wiegen. In Abbildung 2 sind vier verschiedene Verfahren dargestellt, die es erlauben, die Cantileverauslenkung  $\Delta z$  zu bestimmen. Neben dem im Abbildung 1 gezeigten Lichtzeigerprinzip 2a, gibt es das Interferometrieverfahren 2b, den Piezoresistiven 2c und den Piezoelektrischen Effekt 2d.



**Abbildung 2:** Vier verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Cantileverauslenkung  $\Delta z$  [2].

In Abbildung 2c ist ein piezoresistives Element auf das Cantilever angebracht, welches seinen elektrischen Widerstand bei Druck oder Zug ändert. Der elektrische Widerstand wird durch eine Wheatstone-Brücke bestimmt. Das recht kostengünstige piezoresistive Verfahren hat allerdings gegenüber Anderer ein schlechteres Signal-zu-Rauschen-Verhältnis. Bei dem recht neuem Verfahren des Piezoelektrischen-Effekts aus Abbildung 2d besteht der Cantilever selber aus einem Piezokristall. Das Cantilever und ein weiteres Piezoelement besitzen jeweils eine Elektrode. Erfährt das Piezo-Cantilever nun eine Auslenkung, so entsteht eine Spannung zwischen den beiden Elektroden, welche proportional zur Auslenkung ist. Ebenso kann das Cantilever durch den piezoelektrischen Effekt zu Schwingungen angeregt werden, was für dynamische Betriebsmodi von großem Interesse ist. Das Interferometri- und das Lichtzeigerprinzip aus Abbildung 2a und 2b benötigen einen reflektierenden Punkt auf dem Rücken des Cantilevers. Bei dem Interferometrieverfahren wird durch den reflektierende Strahl ein sensibles Interferometer erzeugt, wodurch die

Cantileverauslenkung sehr genau bestimmt werden kann. Allerdings ist die Justage sehr kompliziert. Bei dem Lichtzeigerprinzip wird das reflektierende Laserlicht von einem Detektor aufgenommen. Besteht der Detektor aus zwei Photodioden, so lässt sich die Auslenkung  $\Delta z$  bestimmen (siehe Abbildung 1). Erfährt das Cantilever eine Auslenkung in vertikaler Richtung  $z$ , so ändert sich der Winkel  $\theta$  des Strahlenganges und damit die x-Position des Laserpunktes auf dem Detektor. Die beiden Photosegmente registrieren nun wesentlich verschiedene Intensitäten, was zurück auf die Auslenkung geführt werden kann. Besteht der Detektor aus vier Photodioden, können zusätzlich laterale Auslenkungen bestimmt werden. Analog zur vertikalen Verschiebung  $\Delta x$ , lässt sich die Verschiebung  $\Delta y$ , zur Bestimmung der laterale Auslenkung, messen. Die Position des Laserstrahls auf dem Detektor, und damit die vertikale und laterale Auslenkung, lässt sich folgendermaßen über die Laserintensität der vier Photodioden bestimmen:

$$\Delta x = \frac{(S_2 + S_3) - (S_1 + S_4)}{S_0} \quad \Delta y = \frac{(S_1 + S_2) - (S_3 + S_4)}{S_0} \quad (2)$$

Dabei ist jene Intensität  $S_i$  mit  $i \in 1, \dots, 4$  das Signal, welches die jeweiligen Photodioden registrierten. Da die angekommende Intensität fluktuiert, wird auf die gesamte Intensität  $S_0 = \sum_{i=1}^4 S_i$  normiert. Im Detektor werden  $N$  Photonen pro Zeitintervall  $\Delta t$  registriert und erzeugen damit einen Strom. Mit diesem Ansatz hängt das Auflösungsvermögen [2, S. 165] für die vertikale Auslenkung  $\Delta z$  von folgenden Faktoren ab:

$$\Delta z = \frac{l\lambda}{6d} \frac{S}{N} \sqrt{\frac{2eB}{S_0 R}}, \quad (3)$$

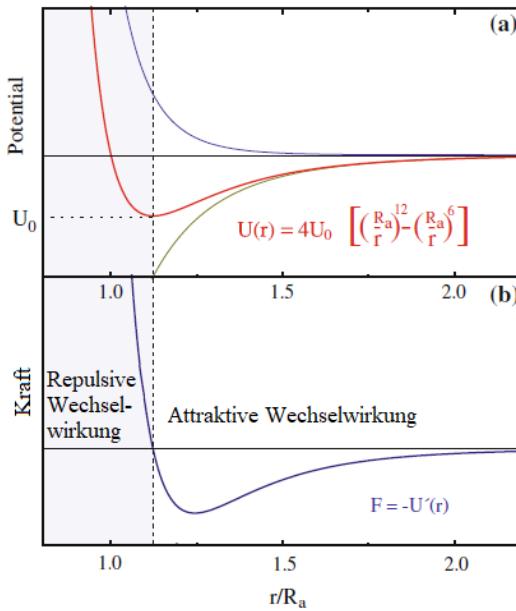
mit der Cantileverlänge  $l$ , der Wellenlänge des Lasers  $\lambda$ , dem Durchmesser  $d$  des Laserstrahls beim reflektieren (siehe Abbildung 1), dem Signal-zu-Rauschen-Verhältnis  $\frac{S}{N}$ , der Bandbreite  $B = \frac{1}{\Delta t}$  und der Sensitivität  $R$  der Photodiode.

## 2.2 Wechselwirkung

Sobald der Abstand zwischen Messspitze und Probe genügend gering ist, wirken elektrostatische, Van-der-Waals- und/oder Kapillar-Kräfte, sowie Kräfte bedingt durch das Pauli-Prinzip. Vorallem dominieren hier die Van-der-Waals-Kräfte und die Kräfte bedingt durch das Pauli-Prinzip, welche durch das Lennard-Jones-Potential

$$U_{\text{LJ}} = 4U_0 \left[ \left( \frac{R_a}{r} \right)^{12} - \left( \frac{R_a}{r} \right)^6 \right] \quad (4)$$

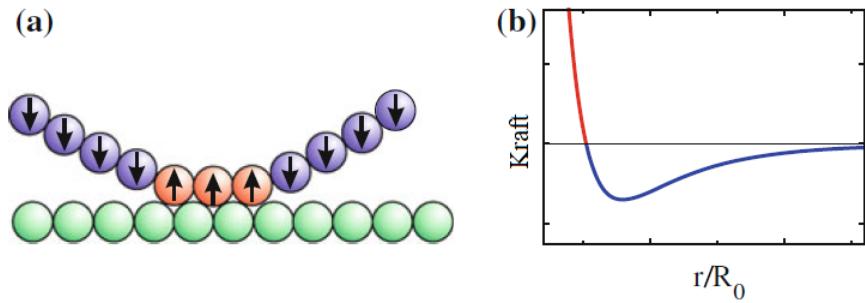
angenähert werden kann. Die Potentialtiefe wird dabei durch  $U_0$  und der Abstand des Kraftminimums  $\frac{\partial U_{\text{LJ}}}{\partial r}$  durch  $R_a$  definiert. Der attraktive Term  $\left( \frac{R_a}{r} \right)^6$  gibt dabei die Van-der-Waals-Kräfte und der repulsive Term  $\left( \frac{R_a}{r} \right)^{12}$  die Kräfte bedingt durch das Pauli-Prinzip wieder.



**Abbildung 3:** Annäherung der Wechselwirkung zwischen Messspitze und Probe durch das Lennard-Jones-Potential (a). In (b) ist die resultierende Kraft  $\frac{\partial U_{\text{LJ}}}{\partial r}$  dargestellt [2, S. 148].

## 2.3 Messmodi

Zunächst werden die Messmodi in dynamische und statische Verfahren unterteilt. Bei der dynamischen Messmodi schwingt das Cantilever nahe der Resonanzfrequenz kontaktlos über die Probe. Wechselwirkt die Probe nun mit dem Cantilever, so verändert sich die Cantileverschwingung geringfügig, wodurch die Topografie der Probe bestimmt werden kann. Bei der statischen Messmethoden wird die Messspitze über die Probe gerastert und das Cantilever erfährt nach dem Hookeschen Gesetz eine Auslenkung. Die beiden gängisten Messmodi sind der *Constant-Force* und der *Constant-Height*-Modus. Bei dem *Constant-Force*-Modus wird die Auslenkung  $\Delta z$ , und damit die Kraft, konstant gehalten. Dabei kann eingestellt werden, ob die repulsive (kontaktlos) oder anziehende Kraft (Kontakt) konstant gehalten werden soll. Um jene Kraft konstant halten zu können, wird der Detektorstrom in eine Signalspannung  $\Delta U$  transformiert, sodass mittels eines *Feedback-loops* bei zu schwacher/starker Auslenkung  $\Delta z$  die z-Position durch den z-Piezoelement des Cantilevers korrigiert werden kann. So lassen sich besonders harte Proben schnell abgescannten. Weiterhin erlaubt der *Constant-Force*-Modus weiche Probe unbeschädigt abzumessen. Ein Nachteil ist, dass die laterale Auflösung durch die 1-10 nm kleine Kontaktstelle begrenzt ist (siehe Abbildung 4).

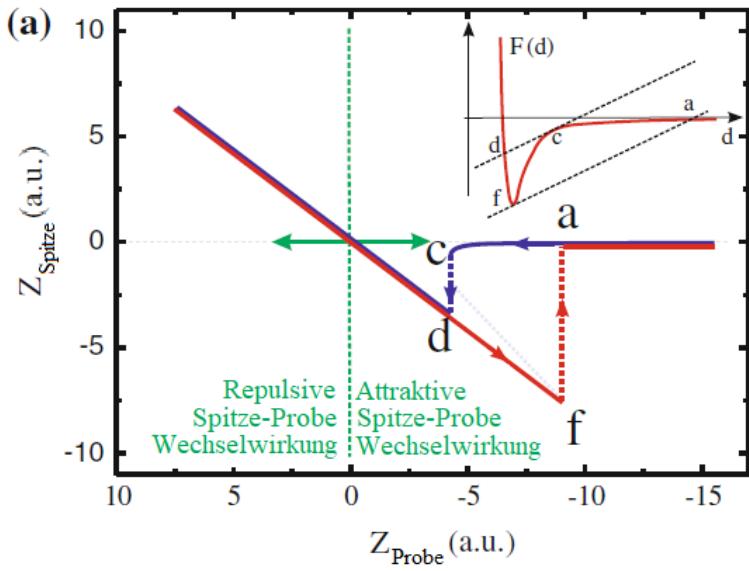


**Abbildung 4:** Schematische Darstellung des *Constant-Force* Modus bezüglich der wirkenden Kräfte zwischen Messspitze und Probe [2, S. 179].

Bei dem *Constant-Height*-Modus wird die Höhe zwischen Messspitze und Probe konstant gehalten. So kann beispielsweise bei magnetischen Wechselwirkungen die Probe kontaktlos abgerastert werden. Der *Constant-Height*-Modus funktioniert ganz ohne einen *Feedback-loops*, wodurch das Abscannen schneller ist. Allerdings findet der *Constant-Height*-Modus hauptsächlich bei weitreichende Kräfte Anwendung. Beide statische Modi sind nur für relativ ebene Proben geeignet, denn bei starken Änderungen in der Topografie kommt es zu Artefakten.

## 2.4 Kraft-Abstands-Kurve

Neben topografischen Karten, lässt sich auch mittels der Kraft-Abstands-Kurve das Elastizitätsmodul  $\epsilon$  einer Probe bestimmen. In Abbildung 5 ist eine ideale Kraft-Abstands-Kurve dargestellt, wobei die rote/blaue Kurve die sich annähernde/entfernende Messspitze beschreibt. Im Punkt (a) sind Probe und Messspitze noch nicht in Kontakt. Nachdem der Abstand zur Probe genügend klein ist und die attraktive Van-der-Waals-Kraft auf die Messspitze wirkt, kommt es im Punkt (c) zu einem *snap-to-contact*. Im Punkt (d) wirkt sofort die repulsive Kraft bedingt durch das Pauli-Prinzip und ein linearer Anstieg ist zu erkennen. Sobald die Kraft auf die Probe gemindert wird, nimmt die Kraft-Abstands-Kurve, aufgrund der starken attraktiven Adhäsionskraft, linear bis zum Punkt (f) ab. Im Punkt (f) kommt es schließlich zum *snap-out-contact*. In der oberen rechten Ecke der Abbildung 5 sind die einzelnen Punkte (a), (c), (d) und (f) nochmal im Lennard-Jones-Kraft-Diagramm dargestellt.



**Abbildung 5:** Ideale Kraft-Abstands-Kurve, wobei rot die annähernde und blau die entfernende Messspitze darstellt. (a) Messspitze noch nicht mit der Probe in Kontakt. (c) Die Messspitze ist genügend nah dran und es kommt zum *snapshot-to-contact*. (d) repulsive Kraft bedingt durch das Pauli-Prinzip. (f) Abstand genügend entfernt und es kommt zum *snapshot-out-contact* [2, S. 184].

### 3 Durchführung

In der folgenden Abbildung 6 ist der Aufbau zunächst schematisch dargestellt. Der Cantilever-Arm ist auf die Probe gerichtet und seine Auslenkung wird mittels eines Lasers (635 nm) ermittelt. Der am Cantilever-Rücken reflektierte Laserstrahl wird von einem Viersegment-Photodetektor registriert, sodass die Auslenkung anhand der registrierten Intensität bestimmt werden kann (siehe Unterkapitel 2.1). Der Detektorstrom wird an einen PC weitergegeben und dort ausgewertet. Unterschiedliche Verfahren erlauben es, die Probe abzurastern. In diesem Versuch ist die Cantilever-Apparatur fest montiert. Hingegen wird die Probe mittels piezo-elektrischen Elementen in alle drei Raumrichtungen bewegt. Zur Ansteuerung dienen jeweils drei Piezo-Controller. Im Folgendem wird der piezo-elektrische Effekt genauer erklärt.

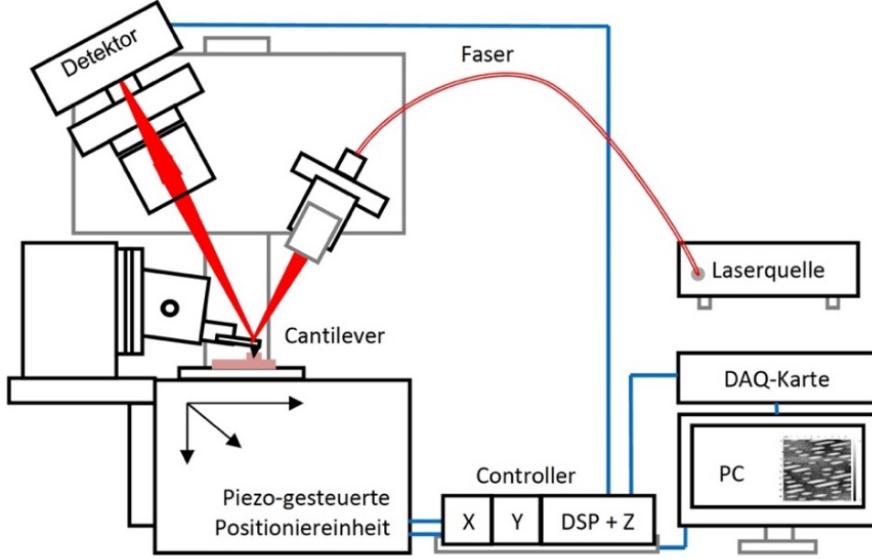
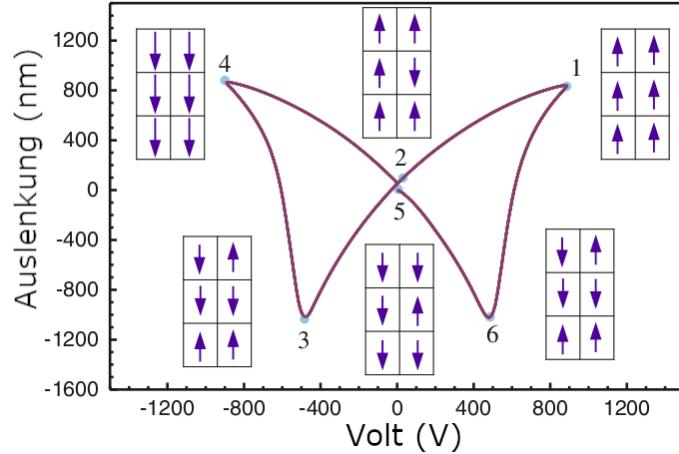


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [3, S. 2].

Der piezo-elektrische Effekt tritt nur bei Kristallen wie Silizium auf, da diese kein Inversions-Zentrum aufweisen. Nur dann heben sich die Oberflächenladungen in der Polarisationsrichtung nicht mehr auf, sodass sich in Anwesenheit eines externen E-Feldes der Kristall ausdehnt/zusammenzieht. Grund dafür, ist der intrinsische Effekt, welcher mit dem unerwünschten extrinsischen Effekt einhergeht. Der intrinsischen Effekt verschiebt die Kristall-Ionen bei Anwesenheit eines externen E-Feldes, sodass sich dies makroskopisch als Kristallvolumenänderung bemerkbar macht. Dieser Effekt ist annähernd linear und nicht hysterisch. Der extrinsische Effekt ist für die Neuorientierung der ferroelektrischen Domänen verantwortlich und damit hysterisch. Angenommen die Dipolmomente haben sechs Orientierungsmöglichkeiten und der Kristall damit sechs unterschiedliche Typen von Domänen. Wird das E-Feld nun in die Polarisationsrichtung angelegt, können sich die Dipolmomente, nach Überwindung einer Energie-Barriere, (anti-)parallel zum E-Feld ausrichten. Vier der Domänen schrumpfen, während die zwei übrigen Domänen größer werden. Wie lange es dauert, bis sich die Dipolmomente entlang des E-Feldes ausrichten und der Kristall sich damit ausdehnt/zusammenzieht, hängt also von seiner Vorgeschichte ab. Zusammengefasst, hängt die Antwort des Kristall-Systems von seinem inneren Zustand ab. Dieses Verhalten ist in Abbildung 7 der Einfachheit halber für zwei Orientierungen dargestellt. Am Punkt 1 ist das E-Feld stark genug, sodass alle Dipolmomente parallel ausgerichtet sind. Wird das E-Feld abgeschaltet, so richten sich einige Dipolmomente antiparallel aus. Dennoch überwiegen die parallel ausgerichteten Dipolorientierungen. Zwischen diesen beiden Punkten überwiegt der erwünschte intrinsische Effekt. Nun wird das E-Feld in umgekehrter Richtung eingeschaltet und die Netto-Polarisation wird am Punkt 3 gleich Null. Mit stärker werdenden E-Feld, richten sich am Punkt 4 alle Dipolmomente antiparallel aus. Am Punkt 5 ist das E-Feld wieder abgeschaltet und die Minderheit der Dipolmomente hat sich wieder in paralleler Richtung orientiert.

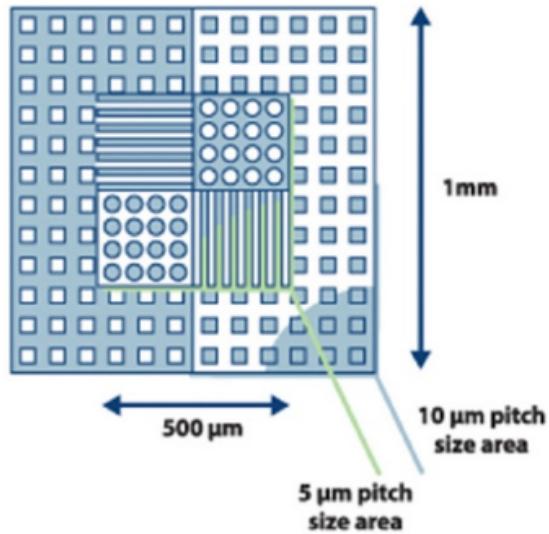
Zuletzt wird das E-Feld ein weiteres Mal umgekehrt und es ergibt sich bei Punkt 6 wieder eine Netto-Polarisation von Null. Im Verlauf von Punkt 3 nach 6 haben sich die Domänen vollständig neu orientiert, sodass der unerwünschte extrinsische Effekt teilweise dominiert hat. Um Hysterie zu vermeiden, sollte das piezo-elektrische Element zwischen den Punkten 1-2 betrieben werden. Zusätzlich kommen Dehnungssensoren, die sogenannten *Strain Gauge*, zum Einsatz, welche diesem Problem entgegenwirken.



**Abbildung 7:** Schematische Darstellung des schmetterlingsförmigen Verhalts der ferroelektrischen Domänen eines piezo-elektrischen Elements. Der Bereich zwischen den Punkten 1 und 2 überwiegt der intrinsische Effekt. In den darauffolgenden Punkten dominiert der extrinsische Effekt teilweise. Das piezo-elektrische Element sollte damit nur in dem Bereich zwischen den Punkten 1 und 2 arbeiten [2, S. 47].

In diesem Versuch wird ausschließlich im *Constant-Force*-Modus gemessen. Um die Kraft bzw. die Auslenkung konstant halten zu können, wird dem Piezo-Controller in z-Richtung ein digitaler Signalprozessor (DSP) vorgeschaltet. Dieser verarbeitet die über die Viersegment-Photodiode registrierte Auslenkung und gibt dem Piezo-Controller ein Feedback-Signal wieder. Die z-Position der Probe wird dann mittels der Photodioden-Controller&Auto-Aligner so nachgeregelt, dass die Auslenkung konstant bleibt.

Um die Topografie einer Probe untersuchen zu können, wird die Messspitze mit Hilfe einer Kamera auf die Probe geführt. Sobald Messspitze und Probe in Kontakt stehen, kann eine z-Piezospansnung gemessen werden. Der optimale Messbereich liegt zwischen 0-50 V, sodass die Höhe der Messspitze auf eine z-Piezospansnung von 25 V eingestellt wird. Zunächst wird eine Siliziumdioxid Mikrostrukturprobe (siehe Abbildung 8) untersucht.



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der Mikrostrukturprobe. Dabei handelt es sich um einen Silizium-Sockel mit 100 nm dicken Siliziumdioxid-Schichten, welche die Mikrostrukturen bilden [3, S. 4].

Dann wird die Topografie unterschiedlicher Speichermedien: CD, DVD, Blu-ray untersucht und daraus die maximale Speicherkapazität der CD bestimmt. Die bei der Topografie-Messung verwendeten Einstellungen sind in Tabelle 1 ersichtlich.

**Tabelle 1:** Einstellungen zu den Topografie-Messungen

Probe	Scanfenster μm	Scanparameter Pixel	Scangeschwindigkeit Pixel/s
Mikrostruktur	20x20	250x250	100
CD	10x10	250x250	100
DVD	5x5	250x250	100
Blue-ray	2x2	250x250	50

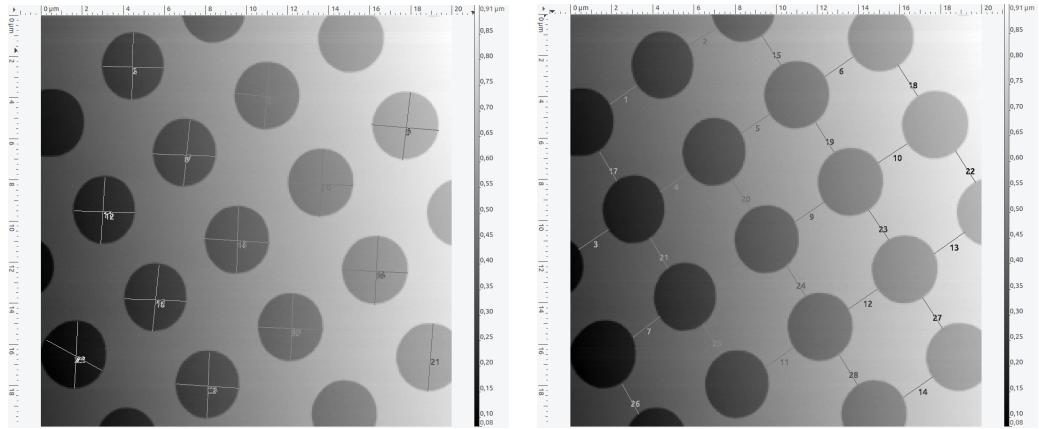
Abschließend wird die z-Nachreglung deaktiviert und eine z-Piezospannung von 8 V eingestellt, um eine Kraft-Abstandskurve von Edelstahl, Teflon und einer TiN-Schicht aufzunehmen.

## 4 Auswertung

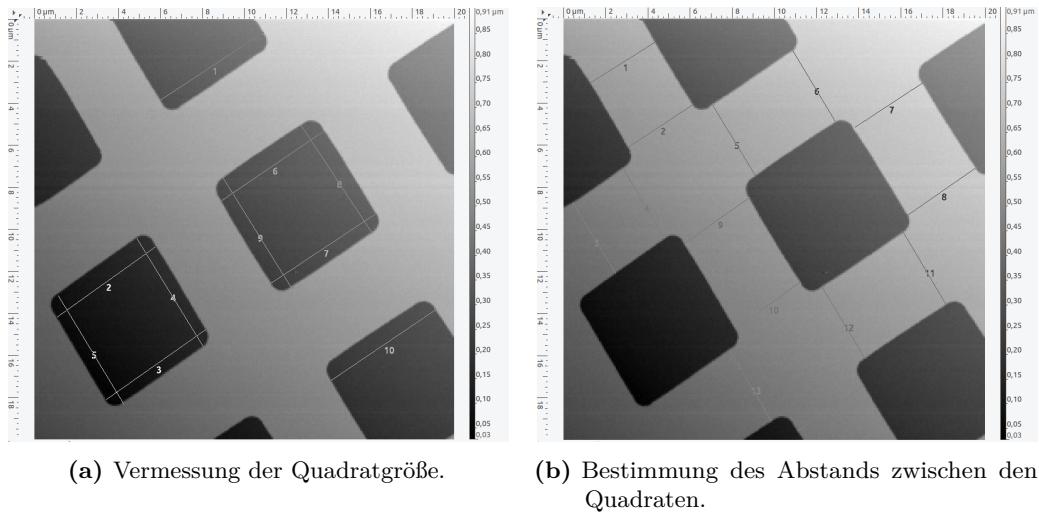
### 4.1 Messung der Topografie einer Mikrostruktur

Im Verlauf der ersten Versuchsreihe werden verschiedene Strukturformen auf einer Mikrostrukturprobe betrachtet. Mittels des AFM-Aufbaus werden von den drei vorhandenen

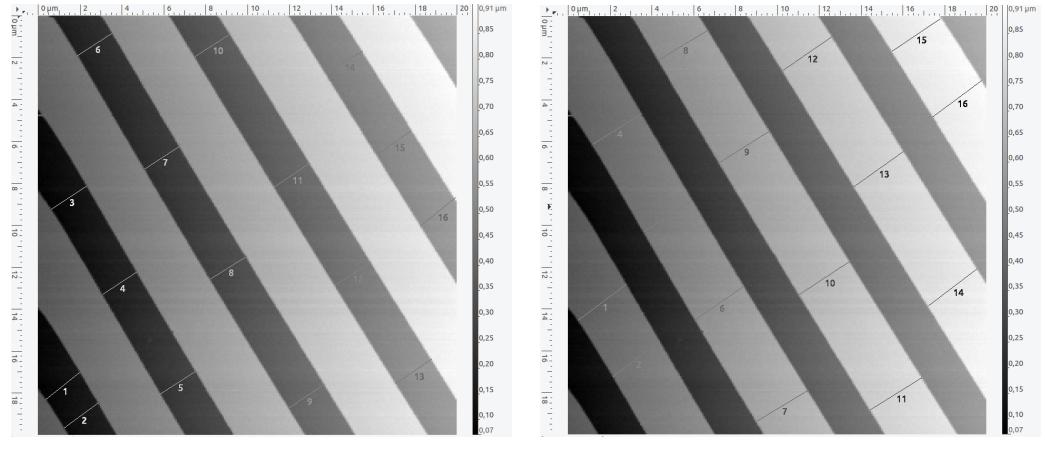
Strukturen AFM-Bilder aufgenommen. Es wird jeweils eine  $(20 \times 20) \mu\text{m}$  große Fläche vermessen. In den Abbildungen (9) bis (11) sind diese Bilder zu sehen.



**Abbildung 9:** Vermessung der Kreisstruktur auf der Mikrostrukturprobe. Aufgenommen wurde eine Fläche der Größe von  $(20 \times 20) \mu\text{m}$ . Zur Vermessung der jeweiligen Strecken wurde das 'distance and directinos-Tool' des Auswertungsprogramm Gwyddion verwendet.



**Abbildung 10:** Vermessung der Quadratstruktur auf der Mikrostrukturprobe. Aufgenommen wurde eine Fläche der Größe von  $(20 \times 20) \mu\text{m}$ . Zur Vermessung der jeweiligen Strecken wurde das 'distance and directinos-Tool' des Auswertungsprogramm Gwyddion verwendet.



(a) Vermessung der Streifenbreite.

(b) Vermessung des Abstands zwischen zwei Streifen.

**Abbildung 11:** Vermessung der Streifen auf der Mikrostrukturprobe. Aufgenommen wurde eine Fläche der Größe von  $(20 \times 20) \mu\text{m}$ . Zur Vermessung der jeweiligen Strecken wurde das 'distance and directinos-Tool' des Auswertungsprogramm Gwyddion verwendet.

**Tabelle 2:** Messwerte der Mikrostrukturprobe. Aufgelistet sind die gemittelten Werte der vermessenen Strecken und Abstände. Der Strukturabstand ergibt sich aus der Summe von Größe und Abstand der Mikrostruktur.

	Kreis	Quadrat	Streifen
Größe / $\mu\text{m}$	$3,177 \pm 0,096$	$5,958 \pm 0,120$	$2,037 \pm 0,039$
Abstand / $\mu\text{m}$	$1,688 \pm 0,052$	$3,839 \pm 0,089$	$2,832 \pm 0,061$
Strukturabstand / $\mu\text{m}$	$4,865 \pm 0,109$	$9,797 \pm 0,149$	$4,869 \pm 0,072$
Datenblatt / $\mu\text{m}$	5	10	5
Abweichung / %	2,7	2,03	2,62

## 4.2 Topographie einer CD, DVD und Blu-ray

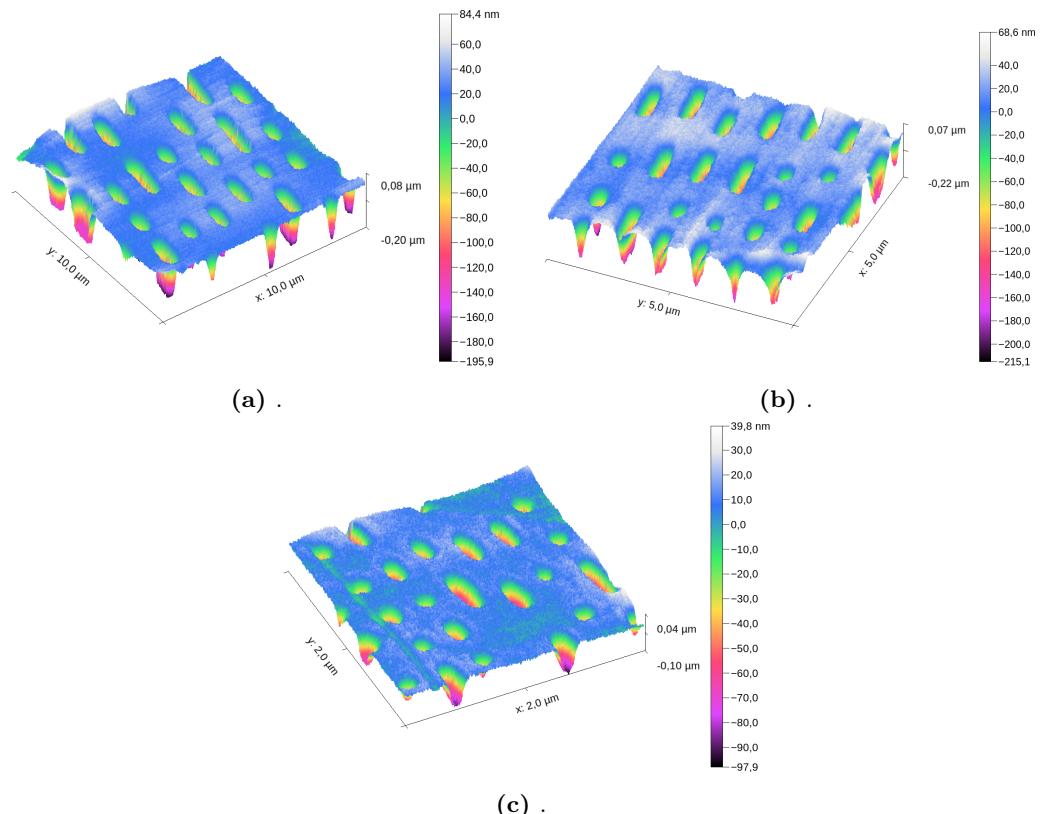
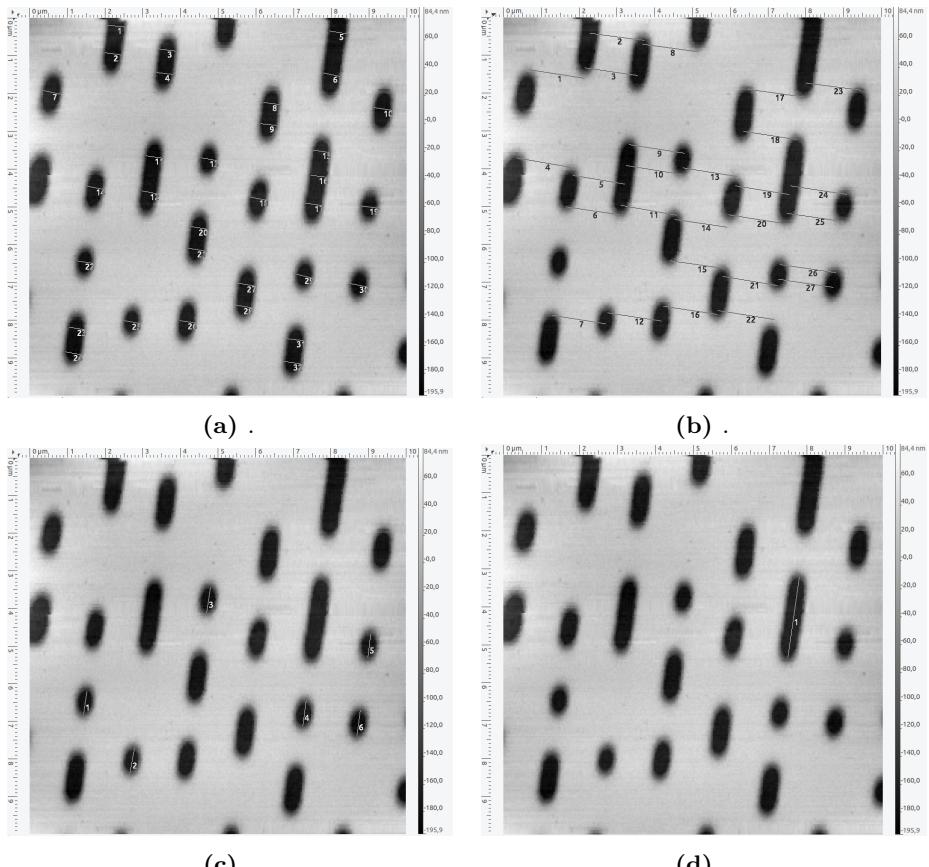
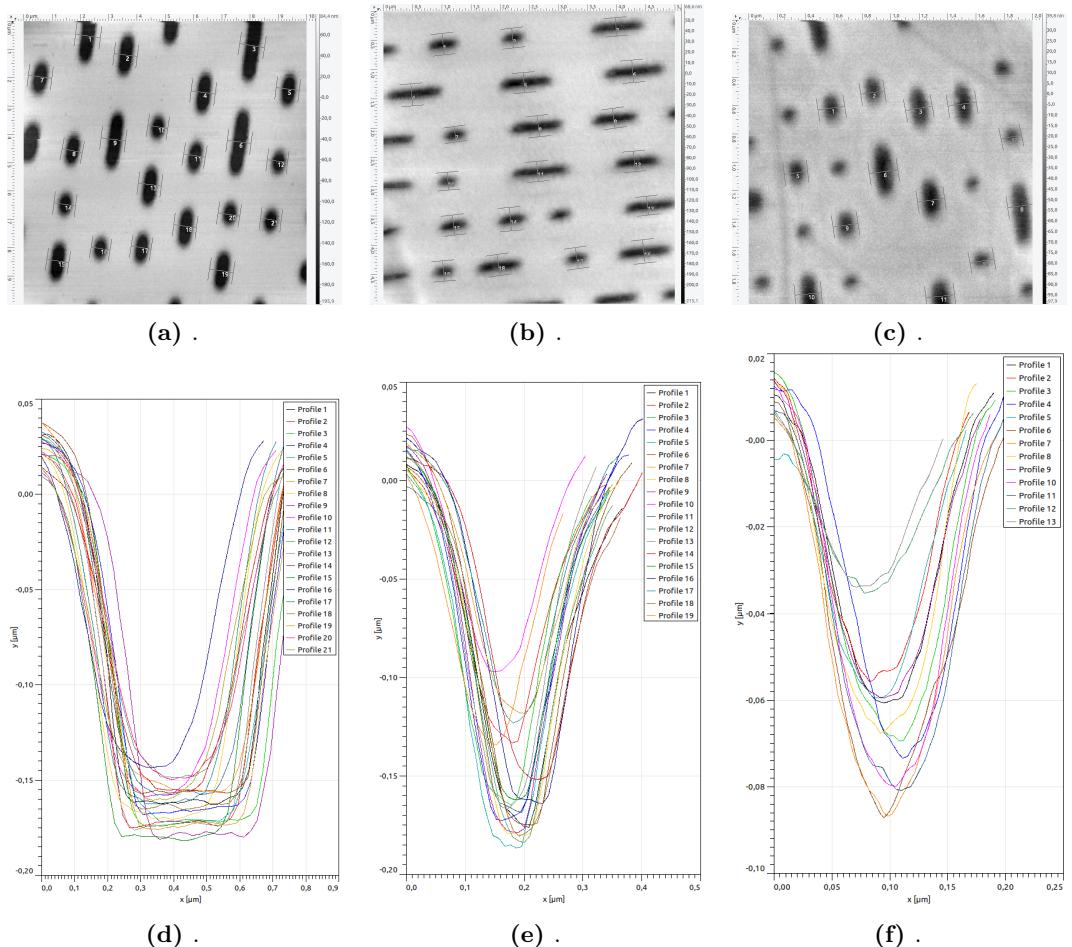


Abbildung 12:



**Abbildung 13:** .

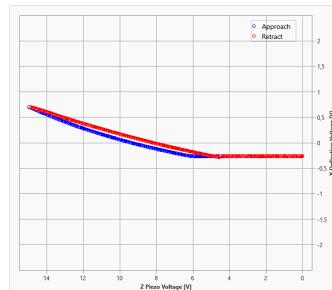


**Abbildung 14:** .

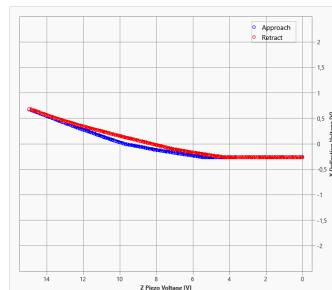
**Tabelle 3:** .

	CD	DVD	Blueray
Abstand / $\mu\text{m}$	$1,459 \pm 0,031$	$0,778 \pm 0,014$	$0,314 \pm 0,008$
Breite / $\mu\text{m}$	$0,454 \pm 0,023$	$0,153 \pm 0,009$	$0,102 \pm 0,008$
Minimale Länge / $\mu\text{m}$	$0,656 \pm 0,025$	$0,299 \pm 0,022$	$0,098 \pm 0,007$
Maximale Länge / $\mu\text{m}$	2,127	$0,858 \pm 0,022$	0,436
Pittiefe /			

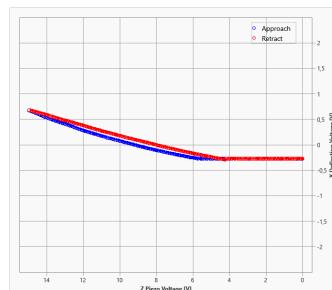
### 4.3 Federkonstante, Adhäsionskraft, Elastizitätsmodul mittels Kraft-Abstandskurven



(a) .



(b) .



(c) .

Abbildung 15: .

## 5 Diskussion

Tabelle 4: .

	Kreis	Quadrat	Streifen
Strukturabstand / $\mu\text{m}$	$4,865 \pm 0,109$	$9,797 \pm 0,149$	$4,869 \pm 0,072$
Datenblatt / $\mu\text{m}$	5	10	5
Abweichung / %	2,7	2,03	2,62

## 6 Anhang

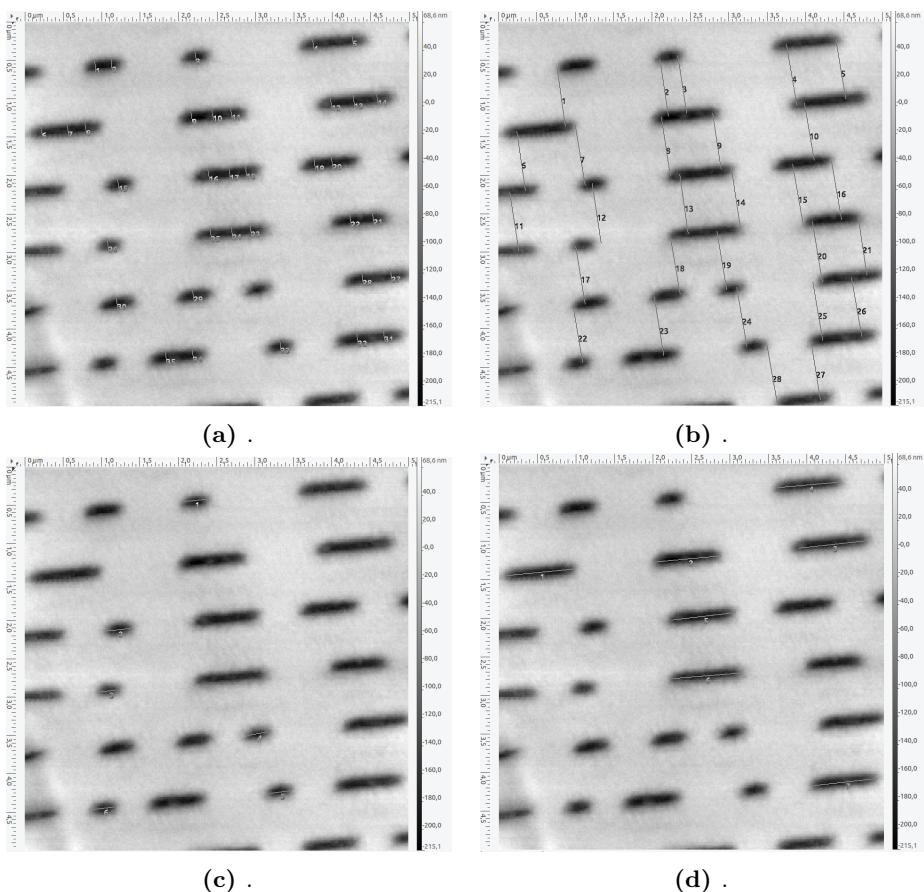
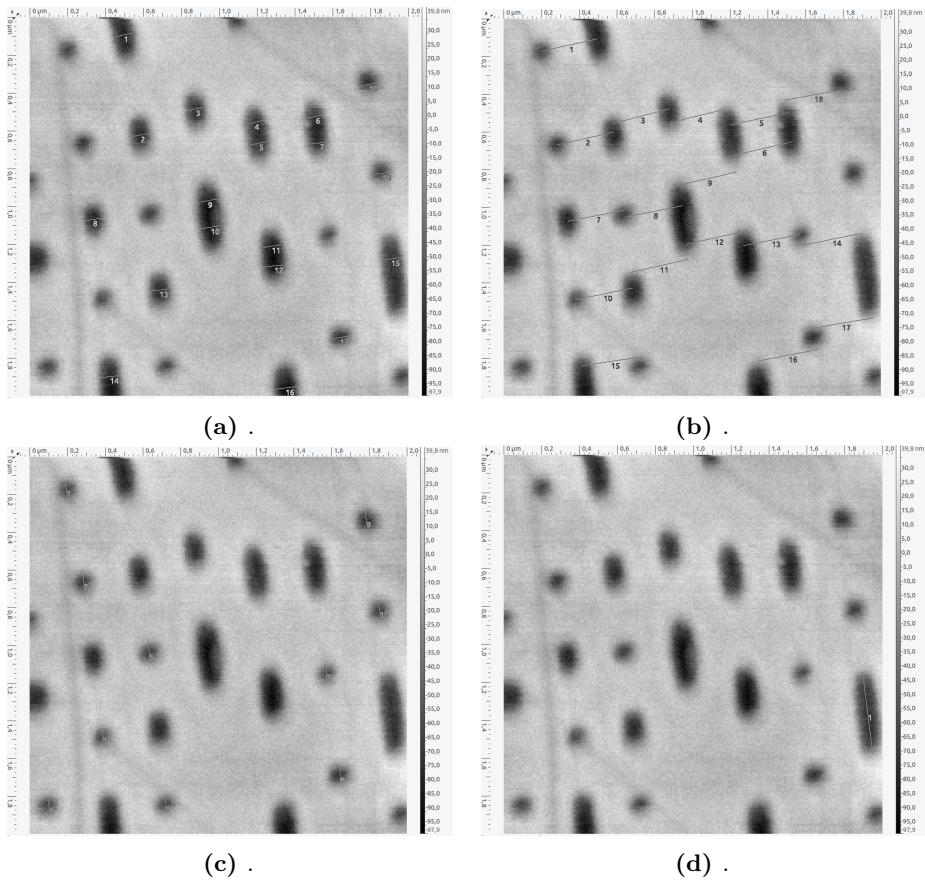


Abbildung 16: .



**Abbildung 17:** .

## Literatur

- [1] G. Binning, C. Quate und C. Gerber, „Atomic Force Microscope“, Phys. Rev. Lett. **56**, 930–933 (1986).
- [2] B. Voigtländer, *Scanning Probe Microscopy - Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy* (Springer Verlag, 2015).
- [3] T. Dortmund, *FP2-Versuch: Rasterkraftmikroskopie*, Version 3 (2014).