

Atomic Force Microscopy

Michael Gutnikov
michael.gutnikov@udo.edu

Lasse Sternemann
lasse.sternemann@udo.edu

Durchgeführt am 09.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Messprinzip	3
2.2	Wechselwirkungen	4
2.2.1	Spitze - Oberfläche	4
2.2.2	Cantilever - Spitze - Oberfläche	6
2.2.3	Kraft-Distanz-Kurven	7
2.3	Messspitze und Cantilever	9
2.4	Detektionssysteme	11
2.5	Messmodi	12
2.6	Piezoelemente	14
2.7	Disc-Speichermedien	15
3	Versuchsaufbau und -durchführung	16
3.1	Aufbau und Messvorbereitung	16
3.2	Untersuchung einer Mikrostrukturprobe	17
3.3	Untersuchung einer CD, DVD und Bluray	17
3.4	Aufnahme der Kraft-Abstands-Kurven	18
4	Auswertung	19
4.1	Topografie einer Mikrostruktur	19
4.2	Topografie einer CD, DVD und Blu-Ray	22
4.3	Adhäsionskraft und Elastizitätsmodul	24
5	Diskussion	27
5.1	Topografie einer Mikrostruktur	27
5.2	Topografie einer CD, DVD und Blu-Ray	27
5.3	Adhäsionskraft und Elastizitätsmodul	28

1 Ziel

In diesem Versuch sollen die Topologien verschiedener Strukturen im Mikrometerbereich sowie die von Speicherdisks wie CD, DVD und Blu-Ray untersucht werden. Dazu wird die Methode der *atomic force microscopy* (AFM) verwendet, die auf der Auslenkung einer wenigen Nanometer großen Spitze aufgrund der Wechselwirkung zwischen dieser und den Oberflächenatomen basiert. Da diese Wechselwirkungen nicht auf Elektrostatik basieren, können im Vergleich zum Rastertunnelmikroskop auch nicht leitende Proben vermessen werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Messprinzip

Das klassische Messprinzip der AFM ist in Abbildung 1 visualisiert. Eine **Messspitze** (*Probe Tip*), die an einem **Cantilever** befestigt ist, wird auf eine Entfernung von wenigen Ångström bis einigen 100 nm an die Probenoberfläche gebracht. Die zwischen der Messspitze und den Oberflächenatomen wirkende Kraft resultiert aus verschiedenen distanzabhängigen **Wechselwirkungen** und wird auf den Cantilever übertragen. Verschiedene **Detektionssysteme** erlauben es die wirkende Kraft über den Cantilever zu messen und so den Abstand zwischen Messspitze und Oberfläche zu bestimmen. In Kombination eines elektronischen Feedback-Loops mit **Piezoelementen**, die die Probe relativ zur Messspitze in x-, y- und z-Richtung verschieben können (*xyz-Piezo Scanner*), ist es möglich diese Abstandsmessung auf der gesamten Probe durchzuführen und so ein Höhenprofil der Oberfläche zu ermitteln. Da je nach Distanz verschiedene Kräfte dominieren und der Feedback-Loop es auch ermöglicht auf verschiedene Weise über die Probe zu rastern, kann die AFM in mehreren **Messmodi** betrieben werden.

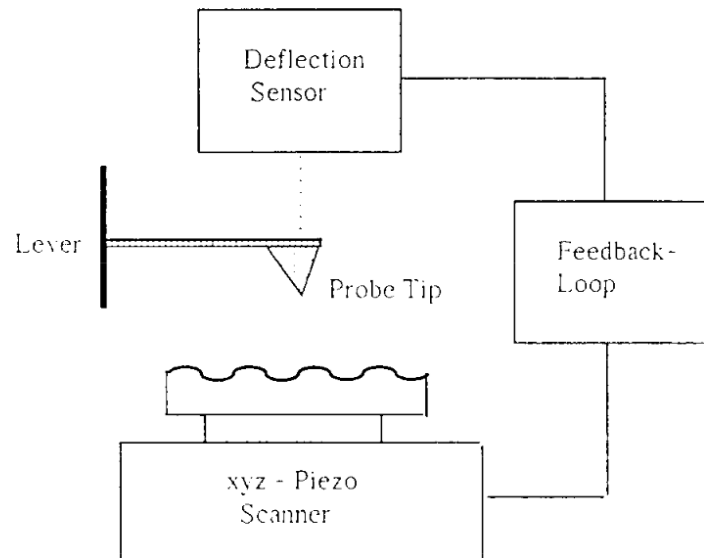


Abbildung 1: Schematische Abbildung eines Atomic-Force Mikroskops bestehend aus Spitze und Cantilever, Feedback-Loop, Auslenkungssensor und Piezoelementen. Entnommen aus [1]

2.2 Wechselwirkungen

2.2.1 Spitze - Oberfläche

Zur Vermessung des Höhenprofils der Oberfläche wird die distanzabhängige Kraft zwischen Messspitze und Oberfläche genutzt. Das zugehörige Potential wird als Lennard-Jones-Potential

$$U(R) = 4U_0 \left[\left(\frac{R_a}{r} \right)^{12} - \left(\frac{R_a}{r} \right)^6 \right]$$

angenähert, das einen positiven und demnach repulsiven Anteil (*Repulsive interaction*) und einen attraktiven Anteil (*Attractive interaction*) besitzt, und in Abbildung 2 (a) mitsamt der resultierenden Kraft (b) und dem zugehörigen Kraftgradienten (c) dargestellt ist. Das Potential setzt sich aus verschiedenen Wechselwirkungen zusammen, die für unterschiedliche Entfernungen dominant sind.

Der attraktive Bereich für Abstände über 1 nm resultiert hauptsächlich aus den *Van-der-Waals-Kräften*. Diese beschreiben die Anziehung zweier eigentlich neutraler Atome durch die spontane Entstehung von fluktuierenden Dipolen. Entsteht in einem Atom eine spontaner Dipol, wird im benachbarten Atom ebenfalls ein Dipol induziert und die Atome ziehen sich an. Das zugehörige Potential fällt mit $\frac{1}{r^6}$ ab und ist demnach langreichweitig. Deswegen wechselwirkt nicht nur das vorderste Atom der Spitze mit der Oberfläche,

sondern auch dahinterliegende.

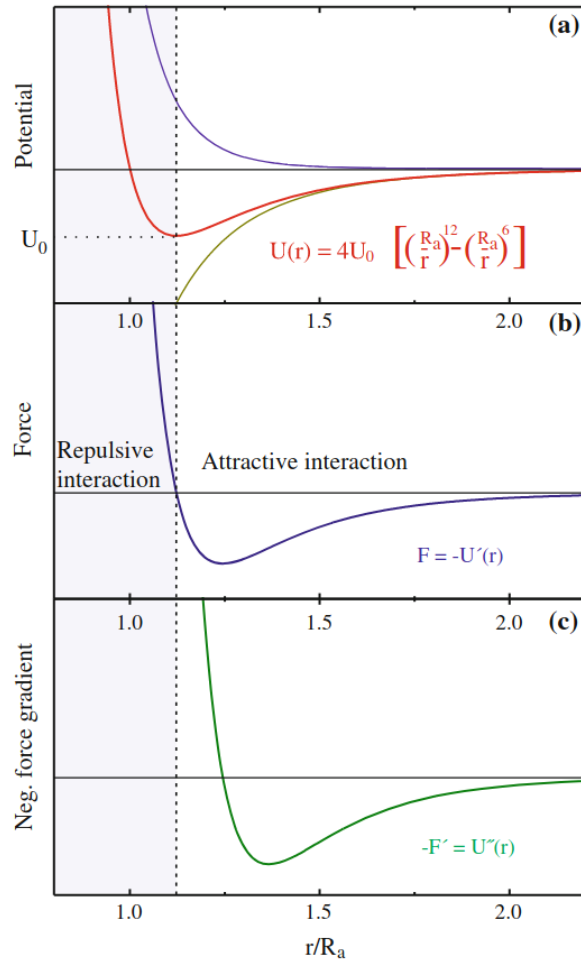


Abbildung 2: Zusammensetzung des gesamten Potentials zwischen Messspitze und Oberfläche aus anziehendem (*attractive*) und abstoßendem (*repulsive*) Potential in der Beschreibung eines Lennard-Jones-Potentials sowie die negative Änderung der Kraft (*Neg. force gradient*). Entnommen aus [2]

Für Distanzen unter 1 nm kommt es zu chemischen Bindungen, bei denen die Orbitale der beteiligten Atome hybridisieren. Führt dies zu einer Verringerung der Gesamtenergie wirken diese Bindungen attraktiv. Erhöht sich die Gesamtenergie wirken die Bindungen repulsiv. Relevanter für diese Distanzen unter 1 Å ist das Auftreten stark repulsiver Wechselwirkungen. Die dominante Abstoßung folgt aus dem Pauli-Prinzip, nach dem zwei Elektronen mit dem selben Spin nicht den selben Zustand besetzen dürfen. Bei sehr geringen Distanzen führt der Überlapp der Orbitale dazu, dass Elektronen in höhere unbesetzte Bänder ausweichen müssen. Dies führt zu einer starken Erhöhung der Gesamtenergie und somit zu einer repulsiven Kraft. Zusätzlich kann auch Coulombabstoßung zwischen den Kernen auftreten, wenn diese nicht komplett durch ihre Elektronen abgeschirmt sind. Falls zwischen der Spitze und der Oberfläche eine Potentialdifferenz vorliegt, kommt es zusätzlich zu elektrostatischen Kräften. Diese können jedoch vermieden werden, indem die Potentialdifferenz durch das Anlegen einer entsprechenden Spannung kompensiert wird. Da die entstehenden Kräfte in Bereich einiger Nanonewton liegen und die Auslenkungen des Systems dementsprechend sehr gering sind, ist die Messung der Auslenkung besonders anfällig für externe Erschütterungen des Mikroskops.

2.2.2 Cantilever - Spitze - Oberfläche

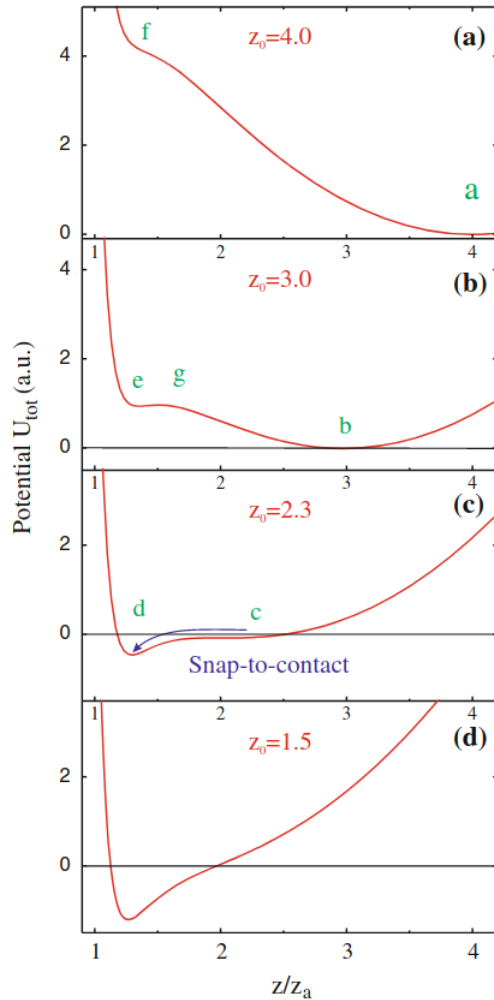


Abbildung 3: Mit abnehmender Distanz zwischen Messspitze und Probe entsteht zunächst ein zweites lokales Minimum nahe der Oberfläche. Ab einem gewissen Abstand verschwindet das erste lokale Minima und die Messspitze springt an die Oberfläche (snap-to-contact). Entnommen aus [2]

In einem AFM-Aufbau ist die Spitze an einem Cantilever befestigt, der als Feder fungiert und so ebenfalls Einfluss auf die Gesamtkraft nimmt. Nach dem Hook'schen Gesetz ergibt sich ein Potential

$$U_F = \frac{1}{2}k(z - z_0)^2,$$

das quadratisch in der Auslenkung z um eine Ruheposition z_0 und proportional zur Federkonstante k ist. Die Auswirkungen dieses Potentials lassen sich über Abbildung 3 erklären, in der das Potential, für verschiedene Ruhepositionen auf das Lennard-Jones-Potential addiert, dargestellt ist. Wenn der Cantilever weit von der Oberfläche entfernt ist (a), besitzt das Potential ein Minimum an der Ruheposition des Cantilevers. Wird der Cantilever mitsamt der Spitze angenähert (b), entsteht ein zweites lokales Minimum. Dieses liegt nah an der Oberfläche und ist von der Ruheposition nicht zu erreichen, da ein Maximum die beiden Minima trennt. Ab einer Grenze geht dieses Maximum in einen Sattelpunkt über und ein Übergang in das zweite Minimum wird möglich. Dieser Übergang wird als snap-to-contact bezeichnet und beschreibt einen Endzustand, in dem die abstoßenden Kräfte ein weiteres Annähern an die Probe verhindern.

2.2.3 Kraft-Distanz-Kurven

Aus den gegebenen Potentialverläufen lässt sich begründen, welche Kraft auf das System aus Messspitze und Cantilever wirkt, wenn es an die Oberfläche herangebracht oder entfernt wird. Dieses Verhalten wird in Kraft-Distanz-Kurven dargestellt, die die Kraft für einen vollen Zyklus aus Annäherung und Entfernung gegen den Abstand auftragen. Zum Verständnis der folgenden Beschreibung werden die Punkte A) bis E) in Abbildung 4 beschrieben. Charakteristisch für den Annäherungsprozess ist zunächst eine Kräftefreiheit A), bis zu einem plötzlichem negativem Kraftgradienten B), der einer Anziehung zur Probe entspricht und aufgrund des snap-to-contacts (*Snap-In*) auftritt. Dabei wirkt die attraktive Van-der-Waals-Kraft. Da mit dem snap-to-contact die Messspitze auf der Oberfläche aufliegt, steigt die Kraft bei weiterer Annäherung aufgrund der repulsiven Pauli-Kraft linear C) bis zu einem Maximum, bei dem das Annähern gestoppt wird. Wenn das Messsystem entfernt wird, sinkt die Kraft analog zu ihrem vorherigen Anstieg D), bis die wirkende Kraft bei dem selben Abstand wieder ihr Vorzeichen wechselt. In Abhängigkeit von der Stärke der attraktiven Adhäsions- und Kapillarkräfte verbleibt die Spitze nun länger in Kontakt E) und es treten stärker anziehende Kräfte als beim snap-to-contact auf bis die Spitze den Kontakt verliert (*Pull-Off*). Die Adhäsionskraft F_A ist also die Kraft, die überwunden werden muss, um den Kontakt zwischen Spitze und Probe aufzulösen. Diese kann aus der Abstandsdifferenz Δ_{SP} zwischen Snap-In und Pull-Off berechnet werden. Es gilt

$$F_A = k \cdot \Delta_{SP}. \quad (1)$$

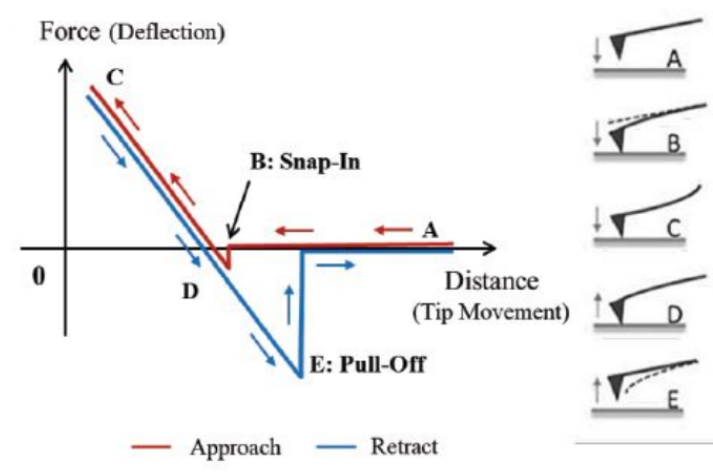


Abbildung 4: Eine vollständige Kraft-Distanz-Kurve mit den entsprechenden Positionen und Auslenkung der Cantilever an ausgewählten Punkten A) bis E). Entnommen aus [3]

Der lineare Anstieg und Abfall der Kurve hängt dabei von der Härte der Probe ab. Da die Messspitze nur schlecht in besonders harte Proben eindringen kann, steigt die Kraft, wie in Abbildung 5 zu sehen, stärker an und sinkt auch schneller ab. Mit einer höheren Federkonstante des Cantilevers kann der Scanbereich der Kraft-Distanz-Kurve auf Kosten der Kraftauflösung erweitert werden, da der Cantilever größere Kräfte aushält, bevor er inelastisch verformt wird.

Der Elastizitätsmodul E einer Probe kann über folgende Gleichung [4] beschrieben werden:

$$F_K = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{2 \tan(\alpha)}{\pi} \delta^2 \quad (2)$$

Diese beschreibt die Kraft F_K , welche durch eine kegelförmige Spitze mit Öffnungswinkel 2α auf eine Probe mit dem *Young Elastizitätsmodul* E wirkt. ν ist dabei die materialabhängige *Poisson-Zahl* und δ beschreibt die Eindringtiefe der Spitze in die Probe.

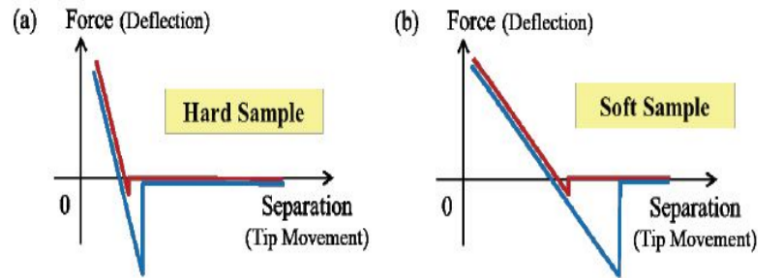


Abbildung 5: Die Kraft-Distanz-Kurve einer harten a) und einer weichen Probe b) zeigen die unterschiedlich starken Steigungen der Kraftkurve. Entnommen aus [3]

2.3 Messspitze und Cantilever

Die Messspitze und der Cantilever gehören zu den Hauptbauteilen, da auf sie die Kraft wirkt beziehungsweise sie die Kraft weitergeben, die später Rückschlüsse auf die Topologie der Oberfläche geben soll. Deswegen müssen sie spezielle Eigenschaften besitzen, die in der Anwendung auch unterschiedliche Messmodi ermöglichen können.

Messspitze

Die Messspitze ist das Bauteil, das der Oberfläche am nächsten kommt und tatsächlich mit ihr wechselwirkt. Eine unendliche glatte Oberfläche könnte mit einer stumpfen Spitze vermessen werden. Wenn die Oberfläche jedoch nicht glatt ist und distinkte Hindernisse gemessen werden sollen, kommen neue Anforderungen auf die am besten über die in Abbildung 6 abgebildeten Messdefekte zu begründen sind. In Abbildung 6 a) und b) ist zu erkennen, dass eine zu stumpfe Spitze womöglich nicht in der Lage ist zu steile Objekte zu erkennen. Das gemessene Profil (rot) entspricht der mathematischen Faltung aus dem Profil der Spitze und dem der Oberfläche. Um nun kleine und steile Signale zu detektieren, muss die Spitze steiler zusammenlaufen als der steilste Gradient an der Probenoberfläche und dünner sein, als das kleinste Objekt. Mathematisch entspräche die Struktur der Spitze idealerweise einer Delta-Distribution, da die Faltung dann nur der Struktur der Probenoberfläche entspricht. In der Anwendung sind Spitzendurchmesser im einstelligen Mikrometerbereich und Krümmungsradien von wenigen Nanometern möglich. Eine weitere Quelle für Defekte sind die in Abbildung 6 zu sehenden Beulen an der sonst flachen Spitze. Diese müssen unbedingt vermieden werden, da sie nicht vorhandene Strukturen an der Oberfläche im Höhenprofil erzeugen.

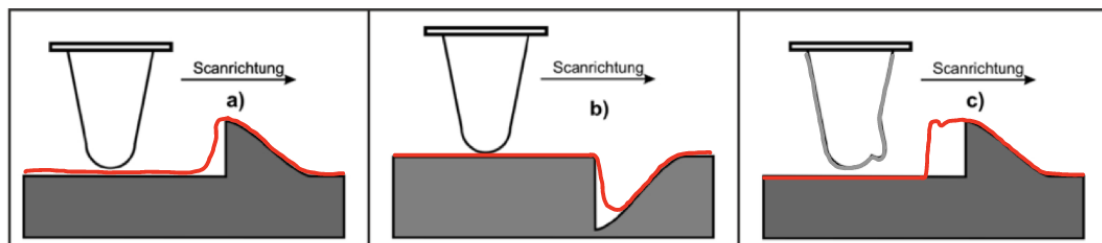


Abbildung 6: Es können Messartefakte auftreten, wenn die Spitze nicht in der Lage ist steile An- oder Abstiege im Höhenprofil zu erkennen oder Defekte an der Messspitze vorhanden sind. Bearbeitet aus [5]

Cantilever

Der Cantilever nimmt die auf die Messspitze wirkende Kraft auf, indem er sich verbiegt. Um diese Verbiegung zu Kraftmessung gut detektieren zu können, muss auch der Cantilever bestimmte Eigenschaften besitzen. Diese sind besonders an verschiedene Messmodi gekoppelt. Da der Cantilever sehr geringe Kräfte im Bereich von 10^{-9}N detektierbar machen muss, soll er sich bereits bei diesen Kräften genügend auslenken. Hier werden Federkonstanten von ca. 10N/m , die detektierbare Auslenkungen im Ångström Bereich erlauben. Zusätzlich soll der Cantilever eine Resonanzfrequenz » 10kHz besitzen, um in dynamischen Messungen, bei denen sich der Cantilever bewegt, die Messgeschwindigkeit zu erhöhen. Aufgrund der geringen Federkonstante folgt aus der Anforderung an die Resonanzfrequenz

$$\omega_{\text{Res}} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

eine sehr geringe Masse des Cantilevers im Microgrammbereich.

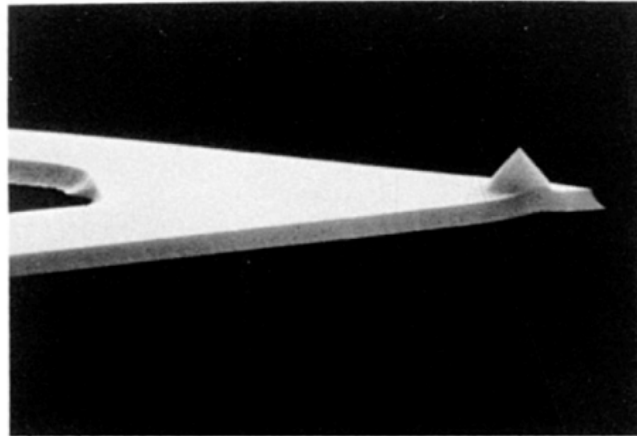


Abbildung 7: Teil eines Cantilevers mit angebrachter Spitze, die einen maximalen Durchmesser von circa $5\mu\text{m}$ besitzt. Entnommen aus [6]

2.4 Detektionssysteme

Zur Bestimmung der wirkenden Kraft muss in statischen Messung die Auslenkung des Cantilevers und in dynamischen Messungen dessen Schwingungsamplitude gemessen werden. Dafür kann auf elektrische oder optische Detektionsmechanismen zurückgegriffen werden, die in Form des Lichtzeigerprinzips (*Beam deflection*), der Interferometriemessung (*Interferometry*) und des Piezowiderstands (*Piezoresistance*) schematisch in Abbildung 8 skizziert sind.

Zu den elektrischen Detektionsmechanismen gehören die Kondensatormethode, die Elektronentunnelmethode sowie Piezoelektrische Methoden. Bei der Kondensatormethode bilden der Cantilever und eine Elektrode einen Kondensator, dessen abstandsabhängige Kapazität gemessen wird. Während diese Methode sehr stabil und einfach zu betreiben ist, stellt die elektronstatische Anziehung des Cantilevers an die Elektrode ein Problem dar. Bei der atomar auflösenden Elektronentunnelmethode zur Detektion wird der Tunnelstrom zwischen einer Spitze und dem Cantilever gemessen. Der Betrieb im Vakuum ist jedoch umständlich und die Wechselwirkung der Spitze mit dem Cantilever beeinflusst die genaue Distanzmessung. Bei den piezoelektrischen Methoden induziert die Verbiegung des Cantilevers eine Spannung in piezoelektrischen Kristallen, die direkt oder über eine Widerstandsänderung gemessen werden und so zur Distanzberechnung genutzt werden kann. Besonders sensitive Messungen lassen sich mit einer optischen Interferometriemessung durchführen, bei der durch Auslenkung des Cantilevers die optische Weglänge des Lichts geändert und aus dem so veränderten Interferenzeffekten eben diese Auslenkung berechnet wird.

Ein weitere, technisch deutlich einfacher umsetzbare Technik beruht auf dem Lichtzeigerprinzip. Hier wird ein Laserstrahl auf den Cantilever geschossen und von diesem auf eine Viersegmentdiode reflektiert. Diese besteht aus vier einzelnen Dioden und kann aus dem Intensitätsverhältnis der einzelnen Dioden die Position des Laserstrahls relativ zum Zentrum der Photodiode bestimmen. Aufgrund des Einsatzes von vier Photodioden lässt sich so neben der vertikalen auch die laterale Auslenkung bestimmen. Die mit dieser Methode minimal messbare vertikale Auslenkung ist unter anderem proportional zur Wellenlänge des Lasers und der Spotgröße des Laserstrahl auf dem Cantilevers, da beide den störenden Einfluss der Interferenz beeinflussen. Durch Optimierung dieser Parameter lassen sich mit dem Lichtzeigerprinzip vertikale Auslenkung ab einem Bereich um circa 1pm messen [2].

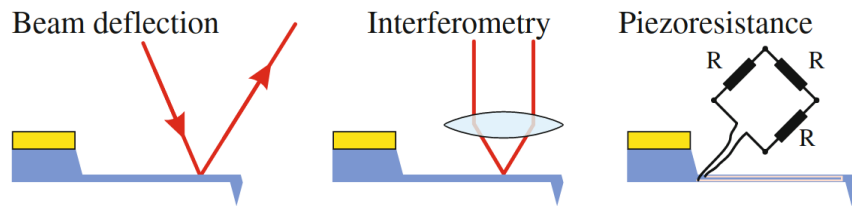


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Auslenkungsdetektion (v.l.) über das Lichtzeigerprinzip, die Interferometriemessung und der piezoelektrischen Messung. Entnommen aus [3]

2.5 Messmodi

In der AFM können verschiedene Messmodi genutzt werden, um unterschiedliche Eigenschaften der Oberfläche oder auch allgemeiner unterschiedliche Oberflächen zu untersuchen. Grundsätzlich wird dabei zwischen statischen und dynamischen Messungen sowie Messungen mit oder ohne Kontakt zur Oberfläche unterschieden.

Wenn die Messspitze in Kontakt zur Oberfläche steht, liegt der Abstand zwischen Messspitze und Oberfläche im repulsiven Bereich des Potentials unter 10 nm und die Messspitze wird von der Oberfläche weggedrückt. In diesem Modus lässt sich die Topologie der Oberfläche beinahe atomar auflösen. Ein zusätzlicher Vorteil dieses Modus ist, dass die Messspitze durch flüssige Oberflächenkontaminationen hindurchmisst. Der konstante Kontakt zur Oberfläche birgt die Gefahr des Abbrechens der Messspitze oder Beschädigung der Oberfläche. Messung im *contact mode* können statisch und dynamisch durchgeführt werden. In statischen Messungen wird der Cantilever durch die wirkende Kraft verbogen und diese Biegung gemessen. Es kann entweder die Höhe der Messspitze über der Oberfläche konstant gehalten und die Änderung der Biegung gemessen werden (*constant height*) oder die Biegung und dementsprechend auch die Kraft konstant gehalten werden, indem der Abstand zwischen Messspitze und Oberfläche durchgehend nachreguliert wird (*constant force*). Diese beiden Methoden sind in Abbildung 9 dargestellt.

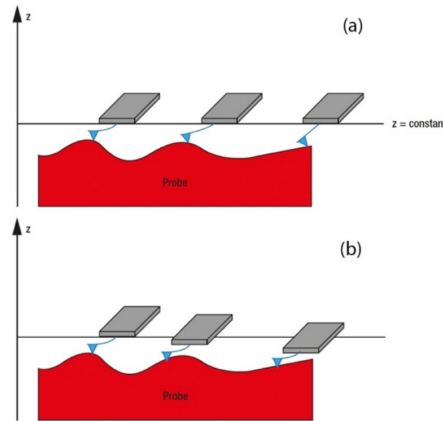


Abbildung 9: In Ausschnitt a) ist das Rastern bei konstanter Entfernung z zur Probenoberfläche und in Ausschnitt b) beim Erhalten einer konstanten Kraft auf die Spitze dargestellt. Entnommen aus [2]

In dynamischen Messungen schwingt das System aus Cantilever und Messspitze mit dessen Resonanzfrequenz von einigen kHz. Nähert sich die Spitze nun mit jeder Schwingperiode stark genug an die Oberfläche an, dass repulsive Kräfte auftreten, wird die AFM im *tapping-mode* betrieben, der die dynamischen Messungen mit Oberflächenkontakt beschreibt. Die Distanz wird aus der Änderung der Schwingungsamplitude aufgrund der durch die abstoßende Kraft veränderten Schwingfrequenz berechnet. Um eine möglichst starke Änderung der Amplitude bei geringen Kräften zu beobachten, wird eine Anregungsfrequenz des Cantilevers nahe der Resonanzfrequenz gewählt.

Liegt die Entfernung zwischen Messspitze und Oberfläche zwischen 10 nm und $10\text{ }\mu\text{m}$, stehen beiden nicht in Kontakt (*non contact mode*) und es wirkt eine attraktive Kraft. Da kein Kontakt vorliegt, ist die Oberfläche in diesem Modus vor Beschädigung geschützt. Analog zum *contact mode* kann auch hier zwischen statischen und dynamischen Messungen unterschieden werden. Da die Kraft nun anziehend ist, wird der Cantilever zur Probe hingebogen und die Resonanzfrequenz gesenkt. Die Konzepte der Detektion bleiben gleich.

2.6 Piezoelemente

Um mit den beschriebenen Messmethoden die gesamte Oberfläche untersuchen zu können, werden die Spitze und die Oberfläche durch Piezoelemente relativ zueinander verschoben. Piezoelemente bestehen aus nicht zentrosymmetrischen, ferroelektrischen Materialien, wie zum Beispiel Quarz, in deren Kristallgitter Ionen durch ein externes elektrisches Feld verschoben werden können. Die resultierende Verformung des gesamten Piezoelements ist proportional zu dem angelegten E-Feld und lässt sich demnach einfach über eine Spannung messen. In dem genutzten Aufbau kann so die Probe über drei entkoppelte Piezoelemente in x-, y- und z-Richtung verschoben werden. Ein Nachteil der ferroelektrischen Materialien ist die Ausbildung von elektrischen Domänen, in denen eine definierte elektrische Polarisierung entsteht. Ähnlich zu ferromagnetischen Materialien führt das Anlegen eines elektrischen Feldes zur Ausrichtung der einzelnen Domänen, sodass die spannungsabhängige Auslenkung des Piezoelements nach Anlegen einer maximalen Spannung beim anschließenden absenken der Spannung nicht gleich verläuft. Dieser Hystereseeffekt kann in Kraft-Distanz-Kurven beobachtet werden. Während der Verlauf beim Hineinfahren und Herausfahren aus dem repulsiven Bereich in einer Kraft-Distanz-Kurve genau übereinander liegen sollte, führt die Hysterese dazu, dass die beiden Linien, wie in Abbildung 10 leicht versetzt verlaufen. So kann dieser Effekt quantisiert und in den Topographiemessungen korrigiert werden. Zusätzlich kann der Hysterese entgegengewirkt werden, indem die momentane Auslenkung des Piezoelements wiederum durch auf das Element aufgelegte piezoelektrische Flächen analog zum Abschnitt Detektionsmechanismen gemessen und entsprechend nachreguliert wird.

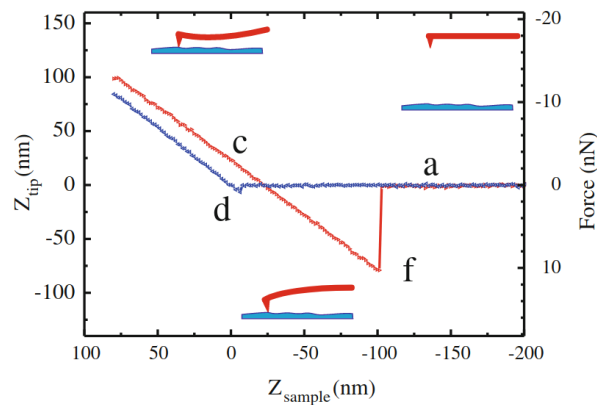


Abbildung 10: Abbildung einer Kraft-Distanz-Kurve im Bereich links von c) und d) ist der Versatz der Geraden aufgrund der Hystere der Piezoelemente zu erkennen. Entnommen aus [2]

2.7 Disc-Speichermedien

Um auf Discs Informationen zu speichern und diese optisch auszulesen, werden entlang von Rillen Absenkungen vorbestimmter Höhe in die Disc gepresst. Wenn ein Ausleselaser über die Rille scannt, kommt es an den Kanten der Absenkungen zu destruktiver Interferenz. Der Abfall der reflektierten Intensität wird vom Computer als 1 gespeichert, während die vorhandene Intensität als 0 gedeutet wird. Da die Abfrage in einem vordefinierten Abstand wiederholt wird können so mehrere Einsen sowie Nullen und somit Informationen gespeichert werden. Umso dichter die Rillen aneinandern liegen und je kürzer die Länge der Absenkungen ist, desto mehr Informationen können auf den Discs immer gleichen Durchmessers gespeichert werden.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

3.1 Aufbau und Messvorbereitung

Der schematische Aufbau des hier genutzten Atomic Force Microscopes ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Detektion erfolgt über das Lichtzeigerprinzip, indem ein sichtbarer Laser aus einer Glasfaser ausgekoppelt, auf den Cantilever gerichtet und dessen Reflektion von einer Vier-Segment-Photodiode detektiert wird. Der Cantilever kann starr befestigt werden, da das Abrastern und Annähern zwischen Probe und Spitze über die Bewegung des Probenstisches durch drei Piezoelemente für die Richtungen x, y und z erreicht wird. Die Bewegung der z-Piezo-Einheit wird über einen PID-Controller gesteuert, der das Feedback der Vier-Segment-Photodiode berücksichtigt. Die ausgelesenen Daten werden auf einem Computer gespeichert und grafisch dargestellt. Um eine Probe zu untersuchen, wird der Probenstisch manuell auf circa einen Centimeter von der Spitze entfernt und die Probe anschließend auf den Probenstisch gelegt. Anschließend wird der Probenstisch erneut manuell über Justierschrauben an die Spitze angenähert, bis die Spitze eine Auslenkung erfährt. Von diesem Punkt an übernimmt der Computer die Steuerung der Piezoelemente und hält den Abstand zwischen Spitze und Probe konstant. Per Hand wird der Abstand nachgeregelt, bis das z-Piezoelement in neutraler Position ist und so eine maximale Auslenkung in beide Richtungen möglich ist.

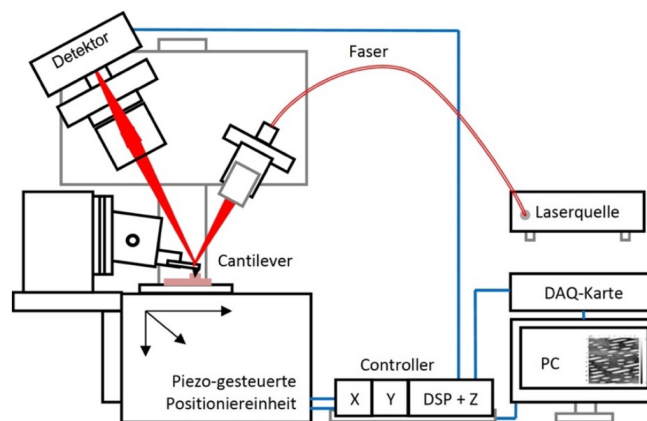


Abbildung 11: Der schematische Aufbau des Atomic Force Microscopes. Entnommen aus [5]

3.2 Untersuchung einer Mikrostrukturprobe

Zunächst soll eine $500\text{ }\mu\text{m} \times 1000\text{ }\mu\text{m}$ Probe untersucht werden, auf der, wie in Abbildung 12 zu sehen, verschiedene Mikrostrukturen vorhanden sind. Die Kreis-, Streifen und Quadratstruktur werden alle in einem Bereich von $20\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Auflösung von 250×250 Pixeln und einer Scan-Geschwindigkeit von 100 Pixeln/s im Constant-Force-Modus abgerastert. Während die Kreisstruktur mit eingeschalteter und ausgeschalteter Strain-Gauge-Nachregelung vermessen wird, werden die anderen Strukturen nur mit eingeschalteter Strain-Gauge-Nachregelung vermessen. Um vor der tatsächlichen Messung die Orientierung der Probe zu überprüfen, werden schnelle Scans mit niedriger Auflösung durchgeführt.

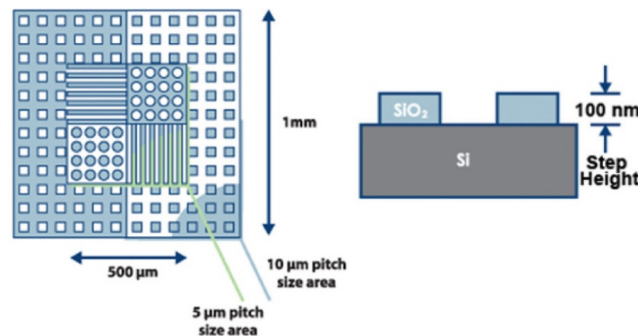


Abbildung 12: Abbildung der zu vermessenden Mikrostruktur von oben betrachtet (links) und im Querschnitt (rechts). Entnommen aus [5]

3.3 Untersuchung einer CD, DVD und Bluray

Um die Absenkungen in den Disc-Speichermedien zu vermessen, werden Stücke einer CD, DVD und Bluray ausgeschnitten und ebenfalls vermessen. Da die Absenkungen für die Discs mit größeren Speicherkapazitäten immer kleiner werden, müssen auch die Scanparameter auf höhere Genauigkeit angepasst werden. Für die Messungen, die im Constant-Force-Modus durchgeführt werden, werden daher, die in Tabelle 1 aufgetragenen Scanparameter verwendet.

Tabelle 1: Scanparameter

Probe	Scanbereich	Auflösung	Scangeschwindigkeit
CD	$10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$	$250 \times 250\text{ Pixel}$	100 Pixel/s
DVD	$5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$	$250 \times 250\text{ Pixel}$	100 Pixel/s
Bluray	$2\text{ }\mu\text{m} \times 2\text{ }\mu\text{m}$	$250 \times 250\text{ Pixel}$	50 Pixel/s

3.4 Aufnahme der Kraft-Abstands-Kurven

Als Letztes werden die Adhäsionskraft und der Elastizitätsmodul einer Edelstahl-, Teflon- und DLC-Probe untersucht. Dazu werden Kraft-Abstands-Kurven der drei Proben aufgenommen. Zuerst wird die Probe an die Spitze herangefahren, die aktive z-Nachregelung deaktiviert und daraufhin die Spannung am z-Piezo von 0 V auf 14,95 V erhöht in 0,019 V-Schritten und dann wieder auf 0 V abgesenkt. Währenddessen wird die Spannung am Cantilever-Piezo aufgenommen, welche sich mit der Auslenkung des Cantilevers ändert.

4 Auswertung

In den folgenden Kapiteln wurde ein Höhenkalibrierungsfaktor von 155 nm/V verwendet, um von der anliegenden Spannung am z-Achsen-Piezo zu einer Höhe in Nanometern zu wechseln.

4.1 Topografie einer Mikrostruktur

In Abbildung 13 sind die Rohdaten der AFM-Aufnahme der Kreisstruktur mit und ohne Strain-Gauge-Nachregelung dargestellt. Die Aufnahme ohne Nachregelung weist eine starke Verzerrung der Kreisstruktur auf, welche bei aktivierter Nachregelung größtenteils verschwindet. Alle im Folgenden gezeigten AFM-Aufnahmen werden aus den Rohaufnahmen gewonnen, indem die Originalbilder invertiert werden, eine Ebenensubtraktion als auch eine Zeilenkorrektur durchgeführt wird und zum Schluss das Bild koloriert wird. Diese Schritte werden mit dem Programm *Gwiddion* [7] ausgeführt und der 'vorher-nachher Vergleich' ist in Abbildung 14 beispielhaft anhand der Kreisstruktur gezeigt. Die kolorierten, bearbeiteten Aufnahmen für die Kreis-, Quadrat- und Linienstrukturen sind in Abbildung 15 sowohl zwei- als auch dreidimensional aufgetragen. Da die Aufnahmen vorwärts und rückwärts gemessen ununterscheidbar sind, wird für die Auswertung lediglich die Vorwärtsrichtung betrachtet. Um die Mikrostrukturen zu vermessen werden Linienprofile entlang bestimmter Richtung betrachtet, wie in Abbildung 16 zu sehen ist. Daraus können dann die gesuchten Strukturabmaße bestimmt werden, sowohl in x-y-Richtung parallel zur Probenoberfläche, als auch in z-Richtung - also die Höhe der gemessenen Struktur. Es werden für drei Bereiche der Probe die Strukturgröße (Durchmesser bzw. Seitenlänge bzw. Breite) und der Strukturabstand bestimmt. Dabei wird über verschiedene Strukturen aus verschiedenen Linienprofilen gemittelt. Daraus wird durch Addition die mittlere Strukturperiodizität bestimmt, um sie später mit den erwarteten Maßen aus dem Datenblatt vergleichen zu können. Die Werte sind in Tabelle

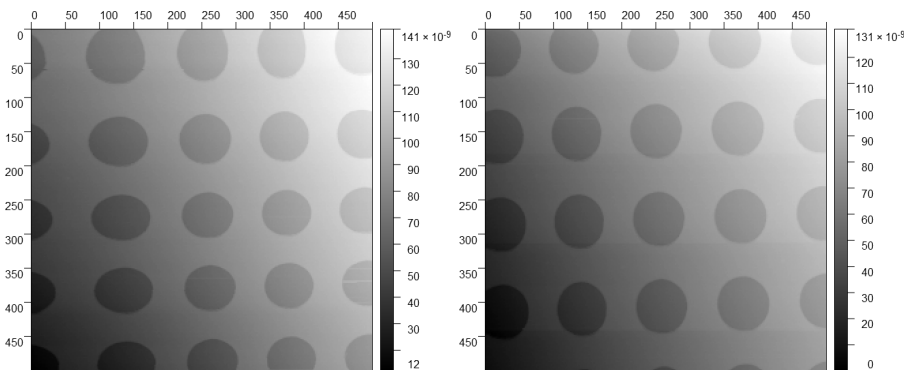


Abbildung 13: AFM-Aufnahme der Kreisstruktur ohne (links) und mit (rechts) Strain-Gauge-Nachregelung.

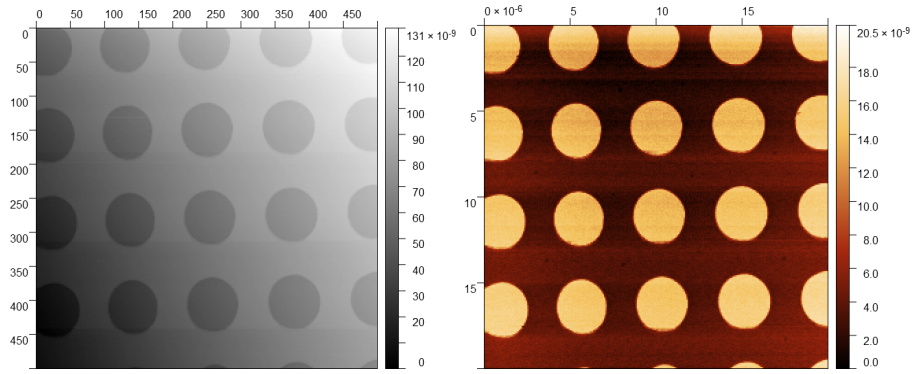


Abbildung 14: AFM-Aufnahme der Kreisstruktur vor (links) und nach (rechts) der Bildbearbeitung.

2 aufgelistet.

Tabelle 2: Aus den Linienprofilen bestimmte Strukturabmaße für die drei Bereiche der zu untersuchenden Probe in x- und in y-Richtung.

Mikrostruktur	Strukturgröße / μm	Strukturabstand / μm	Strukturperiodizität / μm
Kreis (X)	(3.007 ± 0.044)	(1.730 ± 0.023)	(4.737 ± 0.067)
Kreis (Y)	(3.163 ± 0.018)	(1.917 ± 0.014)	(5.080 ± 0.032)
Quadrat (X)	(5.672 ± 0.076)	(3.765 ± 0.025)	(9.437 ± 0.101)
Quadrat (Y)	(6.060 ± 0.025)	(4.095 ± 0.025)	(10.155 ± 0.050)
Streifen (X)	(1.840 ± 0.034)	(2.900 ± 0.026)	(4.740 ± 0.060)

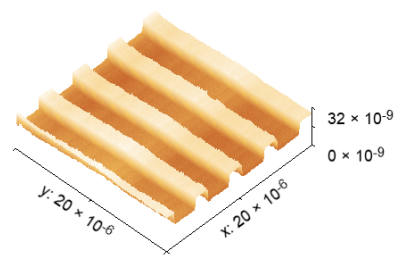
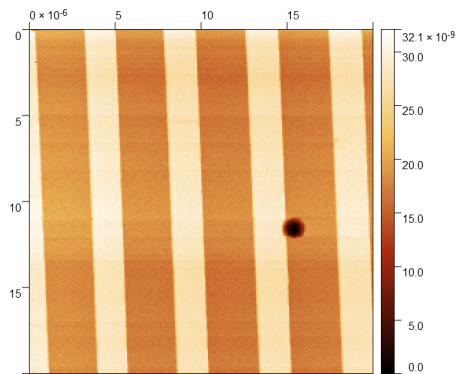
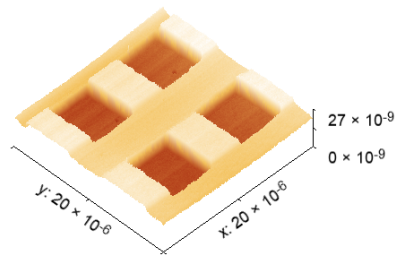
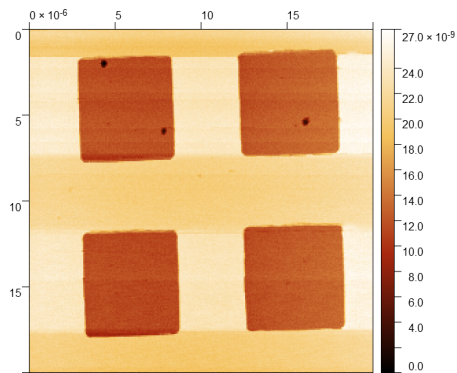
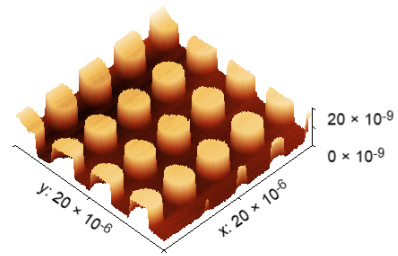
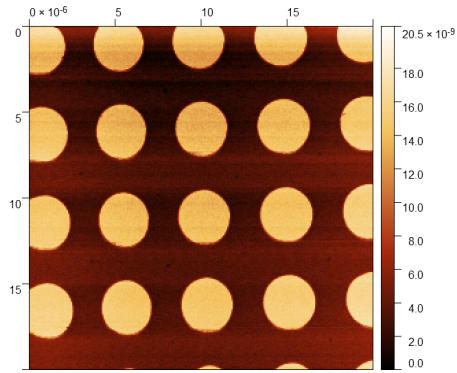


Abbildung 15: AFM-Aufnahmen der Mikrostrukturen als 2D- und 3D-Aufnahmen.

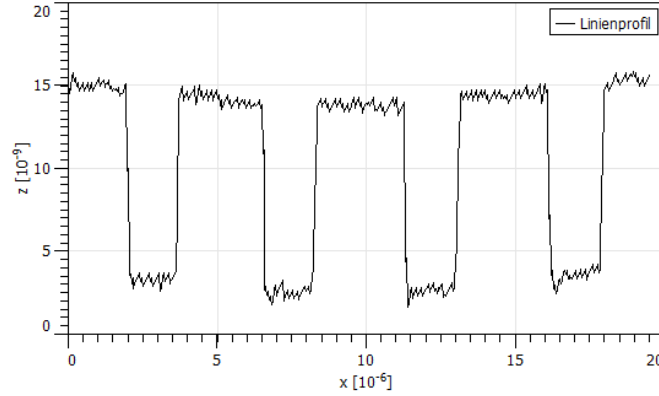


Abbildung 16: Linienprofil entlang der Kreis-Mikrostruktur. Es wird die Tiefe der Struktur in Abhängigkeit der Position in der x-y-Ebene dargestellt.

4.2 Topografie einer CD, DVD und Blu-Ray

Die AFM-Aufnahmen der drei verschiedenen Datenträger werden wie oben beschrieben bearbeitet und sind in Abbildung 17 in zwei bzw. drei Dimensionen dargestellt. Auch hier wird die Profelfunktion benutzt um die Proben zu vermessen. Es werden so die Spurbreite, der Spurabstand, die minimale und maximale sichtbare Pitlänge und die Pittiefe bestimmt. Dazu wird über mehrere Linienprofile und mehrere Pits gemittelt und das Ergebnis der Messungen und Tabelle 3 aufgetragen. Dazu wird wieder lediglich die Vorwärtsrichtung betrachtet, da sich die vermessenen Strukturen abhängig von der Messrichtung nicht verändern. Das wurde wie in Abschnitt 4.1 gezeigt und wird aus platzsparenden Gründen hier nicht wieder aufgeführt.

Tabelle 3: Gemessene Abmaße der drei untersuchten optischen Datenträger.

Datenträger	CD	DVD	BluRay
Spurbreite / μm	(0.424 ± 0.024)	(0.218 ± 0.007)	(0.158 ± 0.002)
Spurabstand / μm	(1.123 ± 0.032)	(0.623 ± 0.053)	(0.150 ± 0.006)
min. Pitlänge / μm	(0.684 ± 0.013)	(0.283 ± 0.022)	(0.183 ± 0.010)
max. Pitlänge / μm	(1.715 ± 0.035)	(0.990 ± 0.001)	(0.576 ± 0.003)
Pittiefe / nm	(22.141 ± 0.448)	(11.753 ± 0.265)	(8.210 ± 0.211)

Außerdem wird die maximale Speicherkapazität einer CD bestimmt. Dazu muss als Erstes die gesamte Länge der spiralförmigen Spur bestimmt werden, welche zwischen dem Innenradius $R_I = 23\text{ mm}$ und dem Außenradius $R_A = 58.5\text{ mm}$ der CD verläuft [8]. Dazu nähern wir diese als n Kreise an mit einem Abstand untereinander von $d = \text{Spurbreite} + \text{Spurabstand} = (1.547 \pm 0.056)\text{ }\mu\text{m}$, also

$$n = \frac{R_A - R_I}{d} = 229050. \quad (3)$$

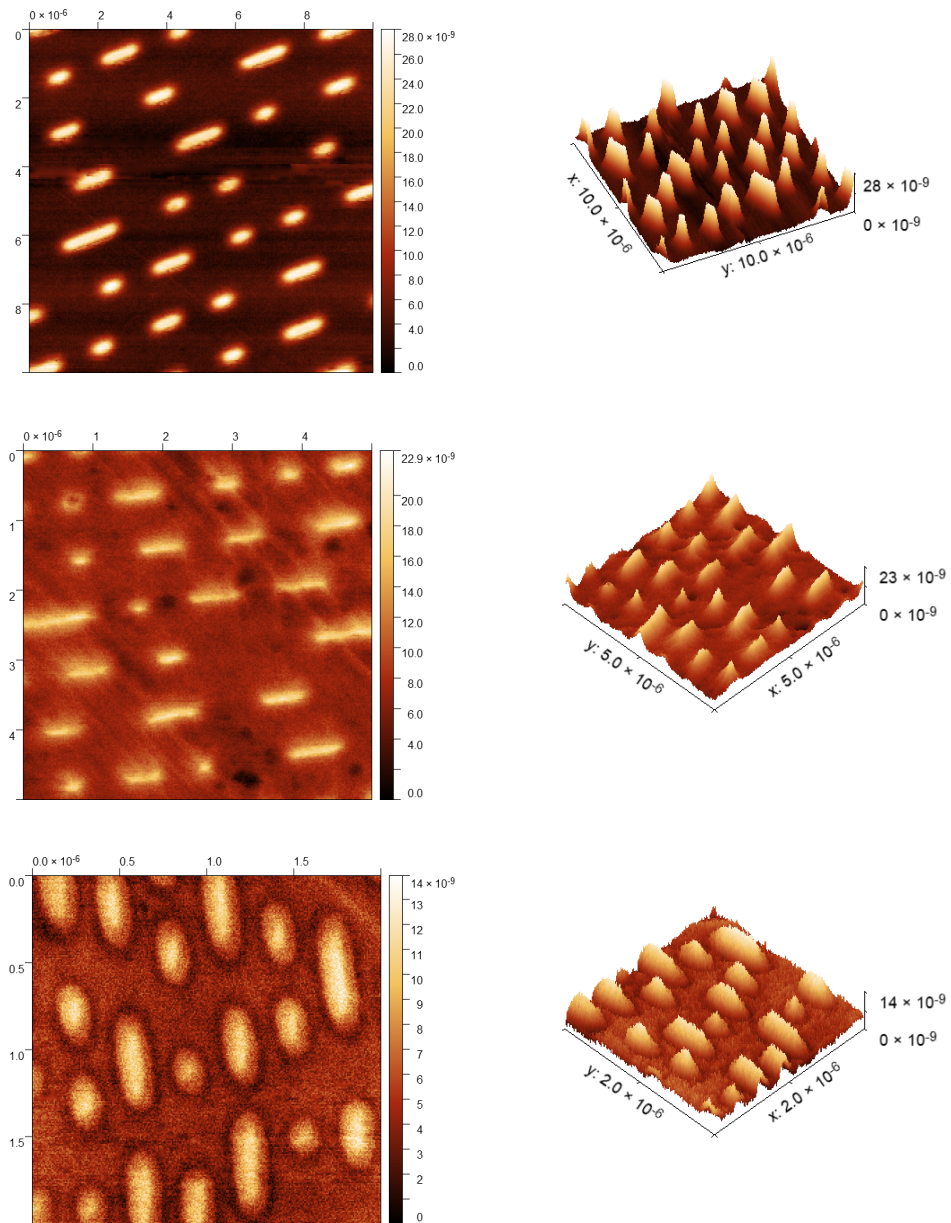


Abbildung 17: AFM-Aufnahmen der CD (oben), DVD (mitte) und Blu-ray (unten) Proben als 2D- und 3D-Aufnahmen.

Für die Spurlänge ergibt sich dann

$$L = \sum_{i=0}^n 2\pi (R_I + i \cdot d) = (5876.63 \pm 0.71) \text{ m} . \quad (4)$$

Wie in der Versuchsanleitung beschrieben, beschreibt der kleinstmögliche Pit die Abfolge '1001' und entspricht 4 Bit. Die minimale gemessene Pitlänge beträgt $p_{min} = (0.684 \pm 0.013) \mu\text{m}$. Daraus ergibt sich für die Speicherkapazität der CD

$$C_{\text{Speicher}} = \frac{L}{p_{min}} \cdot 4 \text{ Bits} \cdot \frac{1 \text{ B}}{8 \text{ Bit}} = (4295.79 \pm 81.65) \text{ MB} \quad (5)$$

4.3 Adhäsionskraft und Elastizitätsmodul

In Abbildung 18 sind die Kraft-Abstands-Kurven für die Edelstahl-, Teflon- und DLC-Probe zu sehen. Da bekannt ist, dass das z-Piezo-Element bei einer Maximalspannung von 75 V um 20 μm ausgelenkt ist, kann die z-Piezo-Spannung in einen Abstand umgerechnet werden, welche auf der x-Achse aufgetragen ist. Der Ursprung dieses Abstandes ist dabei beliebig gesetzt und hängt von der anfänglichen Position der Probe ab. Da im Folgenden nur auf eine Abstandsdifferenz eingegangen wird, spielt das aber keine Rolle. Auf der y-Achse ist die Spannung der lateralen Auslenkung aufgetragen. Diese gibt also ein Maß für die Auslenkung des Cantilevers an. Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben sind bei einer Annäherung der Probe und Spitze der Snap-In mit anschließender steigender Flanke beobachtbar. Beim Zurückziehen der Probe fällt die Piezospannung am Cantilever wieder ab und sinkt unter die Ruheposition ab, was auf die Adhäsionskraft zwischen der Spitze und der Probe zurückzuführen ist. Wird diese durch die rücktreibende Kraft des Cantilevers ausgeglichen, kommt es zum Pull-Off und der Cantilever bewegt sich wieder in seine Ruheposition zurück (siehe Abbildung 18). Der größere Pull-Off beim Edelstahl ist dabei die Folge einer größeren Adhäsionskraft und die, im Vergleich zu den anderen Proben, flachere Flanke der Teflon-Probe ein Zeichen für eine höhere Elastizität, wie im Folgenden beschrieben ist.

Über Formel 1 werden mit der Federkonstanten $k = 0,2 \text{ N/m}$ des Cantilevers die maximale Adhäsionskräfte aus der Abstandsdifferenz zwischen Snap-In und Pull-Off berechnet. Die Ergebnisse für die drei untersuchten Proben sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Differenz zwischen Snap-In und Pull-Off und die resultierende Adhäsionskraft der Proben.

Probe	Differenz zw. Snap-In und Pull-Off / μm	Adhäsionskraft / nN
Edelstahl	0.5749	114.99
Teflon	0.4501	90.03
DLC	0.4200	84.00

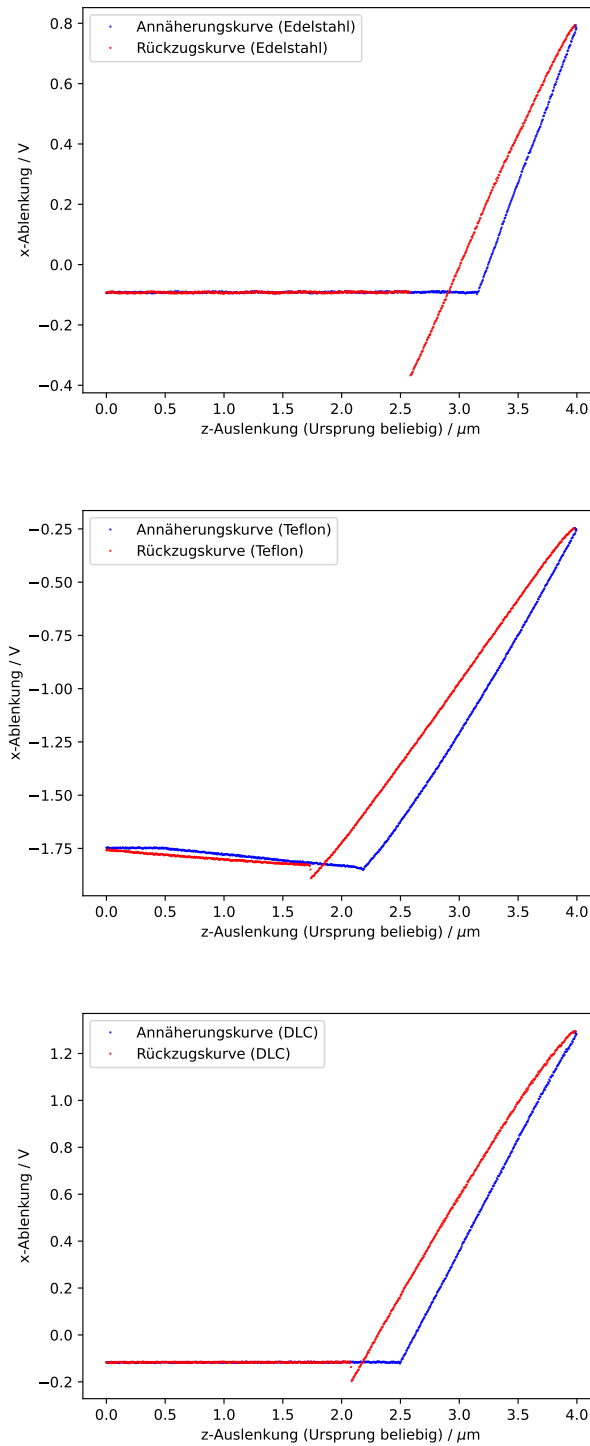


Abbildung 18: Kraft-Abstands-Kurven der drei untersuchten Proben. Die Annäherung und Entfernung von der Probe sind in unterschiedlichen Farben gekennzeichnet.

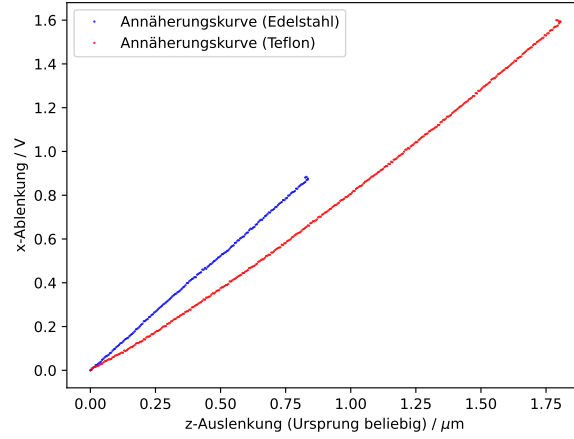


Abbildung 19: Annäherungsprozess der Edelstahl- und Teflon-Proben. Die Snap-In Punkte beider Proben sind auf den Ursprung gelegt.

Als nächstes wird der Elastizitätsmodul von Teflon bestimmt. Nach Umstellen von Formel 2 ergibt sich

$$E = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \frac{1}{\tan(\alpha)} \frac{1}{\delta^2} \cdot F_K. \quad (6)$$

Um die Kraft F_K und die Eindringtiefe δ zu bestimmen muss die zu untersuchende Teflon-Probe mit einer undeformierbaren Probe - in unserem Fall Edelstahl - verglichen werden. Dazu sind ansteigenden Flanke beim Annäherungsprozess aus den Kraft-Abstand-Kurven für Teflon und Edelstahl in Abbildung 19 aufgetragen. Der Snap-In wurde jeweils auf den Ursprung beider Achsen gelegt, um beide Proben vergleichen zu können. Als Ausgangspunkt wurde beispielhaft eine z-Auslenkung von $z_{Edelstahl} = 0,75 \mu\text{m}$ der Edelstahl-Probe betrachtet. Die z-Auslenkung der Teflon-Probe, welche die selbe Spannung an der Vier-Segment-Photodiode zur Folge hat liegt bei $z_{Teflon} = 0,97 \mu\text{m}$. Für die Eindringtiefe der Spitze in die Teflon-Probe ergibt sich damit

$$\delta = z_{Teflon} - z_{Edelstahl} \quad (7)$$

und die Kraft des Cantilevers auf die Probe lässt sich berechnen über

$$F_K = k \cdot z_{Edelstahl}. \quad (8)$$

Mit dem halben Öffnungswinkel $\alpha = 10^\circ$ [5], der Poissonzahl $\nu = 0.46$ von Teflon [9] und der über 7 und 8 berechneten Eindringtiefe δ und Kraft F_K ergibt sich für das Elastizitätsmodul E mit Formel 6

$$E = 20,86 \text{ MPa}. \quad (9)$$

5 Diskussion

5.1 Topografie einer Mikrostruktur

Wie schon in Abbildung 12 gezeigt ist die Mikrostruktur aufgeteilt in zwei verschiedene Bereiche. Die Kreis- und Streifenstrukturen haben laut Datenblatt eine $5\text{ }\mu\text{m}$ -Periodizität und die Quadratstruktur eine $10\text{ }\mu\text{m}$ -Periodizität. In Tabelle 5 sind die die bereits in Kapitel 4.1 berechneten Strukturperiodizitäten und die Abweichungen von den im Datenblatt gegebenen Größen aufgetragen.

Tabelle 5: Periodizitäten der drei Bereiche der zu untersuchenden Probe einschließlich Abweichungen von den erwarteten Werten.

Mikrostruktur	Periodizität (exp.) / μm	Periodizität (lit.) / μm	Abweichung
Kreis (X)	4.737	5	5.26%
Kreis (Y)	5.080	5	1.60%
Quadrat (X)	9.437	10	5.63%
Quadrat (Y)	10.155	10	1.55%
Streifen (X)	4.740	5	5.20%

Die Abweichungen sind klein genug um sagen zu können, dass die Mikrostruktur erfolgreich vermessen werden konnte. Außerdem ähneln sich die x-Abweichungen bzw. die y-Abweichungen untereinander. Diese können möglicherweise auf einen systematischen Fehler zurückzuführen werden kann, wie zum Beispiel einer leichten Verkipfung der Probe um die x-Achse und einer etwas stärkeren Verkipfung um die y-Achse.

5.2 Topografie einer CD, DVD und Blu-Ray

Die gemessenen Größen der CD sind in Tabelle 6 mit Literaturwerten und der resultierenden Abweichung dargestellt. Der Wert für die erwartete Pittingtiefe resultiert daraus, dass diese einem Viertel der Wellenlänge des auftreffenden Lichts entsprechen sollte. Der zum Lesen einer CD verwendete Laser hat normalerweise eine Wellenlänge von $\lambda = 780\text{ nm}$. Das entspricht, aufgrund des Brechungsindex der Polycarbonatbeschichtung von $n_{PC} = 1.58$, einer effektiven Wellenlänge von $\lambda = 493,67\text{ nm}$ und damit einer erwarteten Pittingtiefe von $123,42\text{ nm}$.

Tabelle 6: Vergleich der gemessenen Größen der CD mit den erwarteten Größen aus der Literatur. [10]

CD	gemessen	erwartet	Abweichung
Spurbreite / μm	(0.424 ± 0.024)	0.5	15.2 %
Spurabstand / μm	(1.123 ± 0.032)	1.1	2.09 %
min. Pitlänge / μm	(0.684 ± 0.013)	0.833	17.89 %
max. Pitlänge / μm	(1.715 ± 0.035)	3.054	43.84 %, %
Pittiefe / nm	(22.141 ± 0.448)	123.42	82.06 %

Die größere Abweichung bei der maximalen Pitlänge lässt sich dadurch rechtfertigen, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass der längste mögliche Pit mit dem $10 \times 10 \mu\text{m}$ Fenster erfasst wurde. Die starke Abweichung bei der Pittiefe kann z.B. auf eine abgenutzte Probenoberfläche zurückzuführen sein. Die ermittelte maximale Speicherkapazität hat ebenfalls eine starke Abweichung von einem Faktor ≈ 4 und kann möglicherweise aus einer falsch verwendeten Formel stammen.

Die Abweichungen der Messungen zu den Literaturwerten für die DVD und BluRay Proben sind in Tabelle 7 und 8 wie für die CD erklärt dargestellt.

Tabelle 7: Vergleich der gemessenen Größen der DVD mit den erwarteten Größen aus der Literatur. [11] [12]

DVD	gemessen	erwartet	Abweichung
Spurperiodizität / μm	(0.841 ± 0.053)	0.74	13.65 %
min. Pitlänge / μm	(0.283 ± 0.022)	0.4	29.25 %
max. Pitlänge / μm	(0.990 ± 0.001)	1.87	47.06 %
Pittiefe / nm	(11.753 ± 0.265)	102.8	82.06 %

Tabelle 8: Vergleich der gemessenen Größen der BluRay mit den erwarteten Größen aus der Literatur. [13]

BluRay	gemessen	erwartet	Abweichung
Spurperiodizität / μm	(0.308 ± 0.008)	0.32	3.75 %
min. Pitlänge / μm	(0.183 ± 0.010)	0.149	22.82 %
max. Pitlänge / μm	(0.576 ± 0.003)	0.695	17.21 %
Pittiefe / nm	(8.210 ± 0.211)	123.42	82.06 %

5.3 Adhäsionskraft und Elastizitätsmodul

Die berechneten Adhäsionskräfte liegen alle bei ca. 100 nN, wobei bei Edelstahl die größte Kraft aufgewendet werden muss, um die Spitze von den Probe zu lösen.

Das bestimmte Elastizitätsmodul $E = 20,86 \text{ MPa}$ von Teflon weist eine starke Abweichung vom Literaturwert des "Young-Moduls" $E_Y = 575 \text{ MPa}$ auf. Er ähnelt viel mehr der Kompressionsstärke von Teflon, welche bei $23,5 \text{ MPa}$ [14] liegt. Den potentiellen Grund dafür können wir uns jedoch nicht erklären.

Literatur

- [1] E. Meyer. „Atomic force microscopy“. In: *Progress in Surface Science* 41.1 (Sep. 1992), S. 3–49. DOI: 10.1016/0079-6816(92)90009-7.
- [2] Bert Voigtländer. *Scanning Probe Microscopy: Atomic Force Microscopy and Scanning Tunneling Microscopy*. NanoScience and Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-45240-0.
- [3] Park Systems. *Force-Distance Spectroscopy*. URL: <https://www.parksystems.com/jp/index.php/park-spm-modes/force-measurement/244-force-distance-spectroscopy#> (besucht am 26.06.2022).
- [4] *Determining the elastic modulus of biological samples using atomic force microscopy, JPK instruments*.
- [5] Physik TU Dortmund. *Versuchsanleitung Rasterkraftmikroskopie*.
- [6] R Wiesendanger. *Scanning probe microscopy and spectroscopy: methods and applications*. OCLC: 738524375. 1998.
- [7] *Gwyddion (Version 2.61)*. URL: <http://gwyddion.net/>.
- [8] *Grundlagen: CD-ROM*. URL: <https://www.tecchannel.de/a/grundlagen-cd-rom,401389,2>.
- [9] *Teflon/PTFE Properties Handbook*.
- [10] *Compactdisc (CD) - Optische Aufzeichnungsverfahren*. URL: <https://kompendium.infotip.de/compactdisc-cd.html>.
- [11] *Digital Versatile Disc (DVD) - Optische Aufzeichnungsverfahren*. URL: <https://kompendium.infotip.de/digital-versatile-disc-dvd.html>.
- [12] *DVD - Digital Versatile Disc*. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/com/0507171.htm>.
- [13] *Blu-Ray Disc (BD) - Optische Aufzeichnungsverfahren*. URL: <https://kompendium.infotip.de/blu-ray-disc-bd.html>.
- [14] *DesignerData - Polytetrafluoroethylene (Teflon)*. URL: [https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polytetrafluoroethylene-\(teflon\)](https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polytetrafluoroethylene-(teflon)).