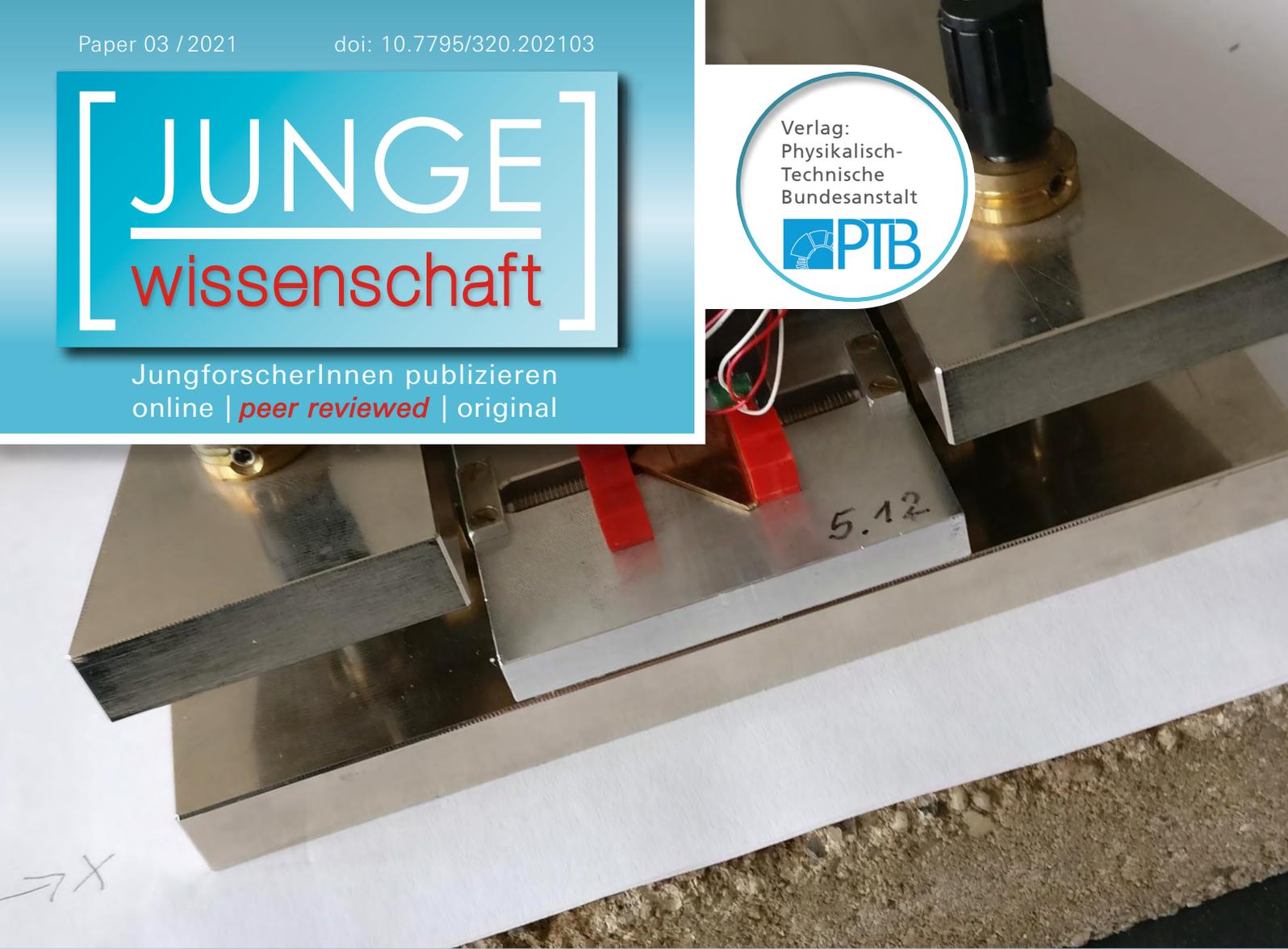


JungforscherInnen publizieren
online | *peer reviewed* | original



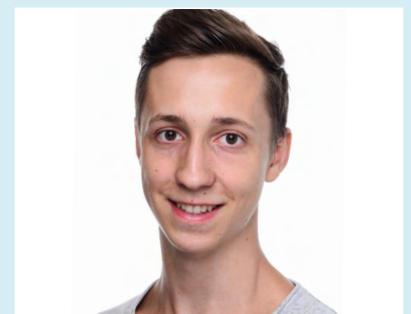
Technik

Oberflächen fast atomar abtasten

Aufbau, Optimierung und Inbetriebnahme
eines Rastertunnelmikroskops

Mithilfe eines Bausatzes wurde ein Rastertunnelmikroskop aufgebaut. Die Funktionstüchtigkeit war erst gegeben, nachdem das Übertragungs- und Auswertungssystem neu entwickelt worden war. In ersten Messungen wurde der Messbereich des Mikroskops bestimmt, die Störanfälligkeit getestet und erste Proben vermessen.

DER JUNGFORSCHER



Julian Prasser (2000)

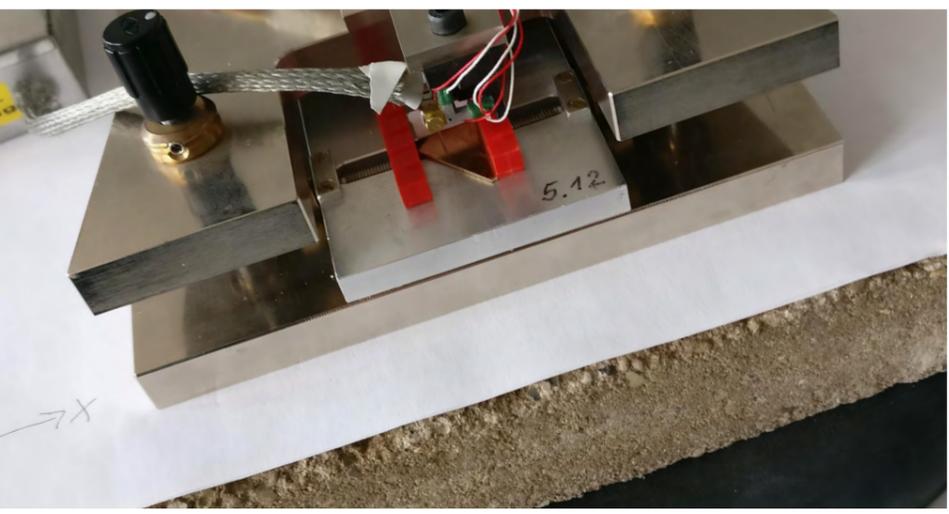
Staatliche Fachoberschule
und Berufsoberschule,
Unterschleißheim

Eingang der Arbeit:

07.8.2019

Arbeit angenommen:

30.8.2019



Oberflächen fast atomar abtasten

Aufbau, Optimierung und Inbetriebnahme eines Rastertunnelmikroskops

1. Einleitung

Mit der Entwicklung des ersten Rastertunnelmikroskops Anfang der neunzehnhundertachtziger Jahre ermöglichten Gerd Binnig und Heinrich Rohrer anderen Wissenschaftlern erstmals die Untersuchung und Manipulation atomarer Strukturen einer Oberfläche. Dafür erhielten sie 1986 den Nobelpreis in Physik. Ermöglicht durch diese Entwicklung entstand das völlig neue Forschungsgebiet der Rastersondenmikroskopie, das eine Vielzahl an mikroskopischen Verfahren, wie das Rastertunnelmikroskop oder das Nahfeldmikroskop, hervorbrachte und heute diverse technische Anwendungen findet (vgl. [1], S. 2; vgl. [2], S. 13).

Die vorliegende Arbeit gibt einen Ein-

blick in das ausgedehnte Feld der Rastertunnelmikroskopie und stellt den Prozess des Aufbaus sowie der Optimierung eines Rastertunnelmikroskops dar. Außerdem werden die Ergebnisse einiger Messungen diskutiert.

2. Theorie der Rastertunnelmikroskopie

2.1 Prinzipielle Funktionsweise

Das Rastertunnelmikroskop (engl. *Scanning Tunneling Microscope, STM*) funktioniert auf der Grundlage des Tunneleffekts (siehe 2.2). Eine Metallspitze wird senkrecht über einer elektrisch leitenden Probe positioniert, so dass der Abstand weniger als einen

Nanometer beträgt. Durch das Anlegen einer Spannung an die Probe kann ein Tunnelstrom gemessen werden, der als Maß für die relative Höhe der Probenoberfläche gilt (vgl. [3], S. 23–24).

Die Messnadel wird in einem Raster über die Probe bewegt. Im Konstantstrommodus (*constant current mode*) wird der Tunnelstrom durch eine Rückkopplungsschleife konstant gehalten. Aus dem Stellsignal des Reglers erstellt das Steuerprogramm ein Graustufenbild der untersuchten Oberfläche. Bei diesem Verfahren können Kollisionen der Spitze mit der Probe vermieden werden, solange die Regelung des Abstands schnell genug erfolgt.

Alternativ wird die Probe ohne Nachregelung des Stroms abgetastet, weshalb dieses Scanverfahren Konstanthöhenmodus (*constant height mode*) genannt wird. Die Höhendaten ergeben sich aus den Tunnelstromwerten jedes Punktes. Dieser Messmodus ermöglicht eine höhere Scangeschwindigkeit, da der Abstand nicht nachgeregelt werden muss. Er kann allerdings nur bei sehr ebener Topografie angewendet werden, um Zusammenstöße der Messspitze mit der Probenoberfläche zu verhindern (vgl. [4], S. 14).

Um die Spitze im Sub-Nanometerbereich exakt positionieren zu können, werden piezoelektrische Stallelemente verwendet. Sie bestehen meist aus Blei-Zirkonaten, $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$, die sich durch das Anlegen einer Spannung mechanisch verformen. Eine geeignete Anordnung dreier Piezoaktuatoren ermöglicht die Bewegung der Tunnelnadel in x-, y- und z-Richtung (siehe Abb. 1) (vgl. [5], S. 10–11).

Ein Messprogramm steuert die laterale Bewegung, während hingegen die Regelung des Abstands eine elektronische Schaltung übernimmt, die den aktuellen Tunnelstrom mit einem festgelegten Sollstromwert vergleicht und die Spannung am z-Piezo dementsprechend anpasst (vgl. [5], S. 10–11; [6], S. 236).

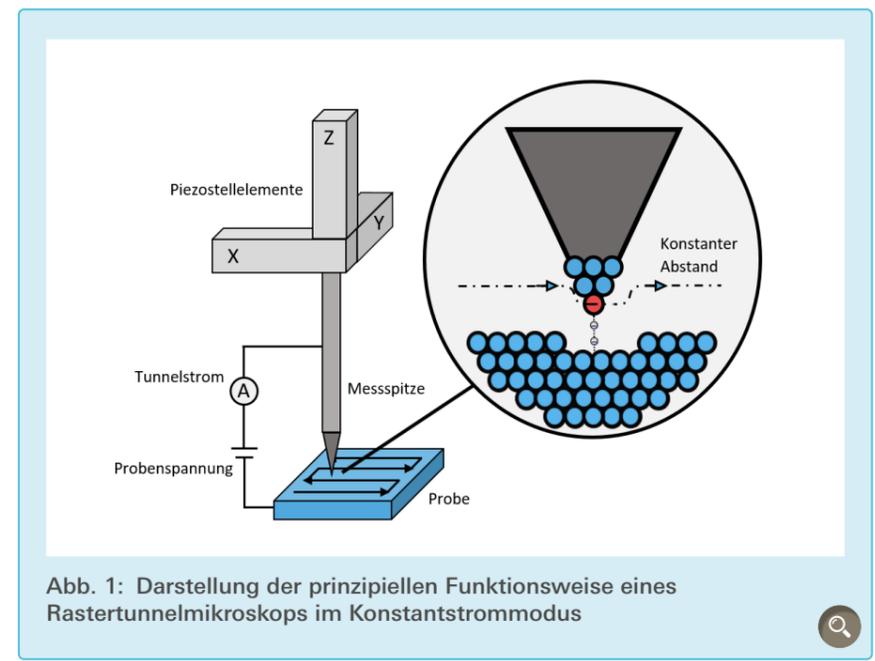


Abb. 1: Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise eines Rastertunnelmikroskops im Konstantstrommodus

2.2 Tunneleffekt

Der quantenmechanische Tunneleffekt sagt voraus, dass Elektronen und andere sehr leichte Teilchen mit einer endlichen Wahrscheinlichkeit eine Potentialbarriere überwinden können, die höher als die Energie jener Teilchen ist. Dieses Phänomen ist mit den Gesetzmäßigkeiten der klassischen Physik nicht erklärbar.

Der Effekt wird der Einfachheit halber an einem eindimensionalen rechteckigen Potentialwall dargestellt. Damit die Teilchen außerhalb der Barriere frei sind, sei das Potential dort gleich null. In Abb. 2 ist die Wellenfunktion eines Elektrons zu sehen, das von links auf die Barriere trifft. Die Energie des Teilchens ist dabei kleiner als das Potential V der Barriere. Klassisch betrachtet ist es daher für das Elektron nicht möglich, den Potentialwall zu überwinden (vgl. [7], S. 35f).

Die Quantenmechanik sagt allerdings ein anderes Ergebnis voraus: Das Betragsquadrat der Wellenfunktion $|\psi|^2$, das sich aus der Schrödingergleichung ergibt, beschreibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons. Diese ist im Bereich der Barriere nicht null, son-

dern sinkt exponentiell ab und führt zu einem von Null verschiedenen Wert rechts von der Barriere. Daher existiert eine endliche Wahrscheinlichkeit für das Teilchen, sich hinter dem Potentialwall zu befinden (vgl. [7], S. 35f).

Durch das Anlegen einer Spannung zwischen den beiden Seiten der Barriere steigt die Wahrscheinlichkeit für das Tunneln der Teilchen von der Elektrode mit dem höheren Potential auf die andere Seite. Dadurch wird ein geringer Tunnelstrom messbar, der im Nanoamperebereich liegt. Der beschriebene Potentialwall wird beim Rastertunnel-

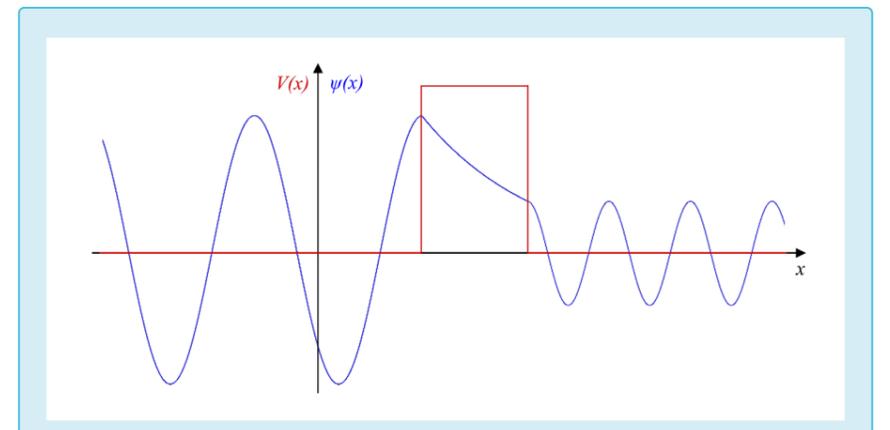


Abb. 2: Die Wellenfunktion des Elektrons (blaue Linie) fällt innerhalb der Barriere exponentiell ab (nach [7], S. 36)

mikroskop durch den Vakuum- oder Luftspalt zwischen Tunnelnadel und Probe dargestellt, da dieser als Isolator fungiert. Der resultierende Tunnelstrom, der exponentiell vom Abstand der Elektroden abhängt, ist die Grundlage der Funktion des Rastertunnelmikroskops, da er die präzise Höhenauflösung ermöglicht (vgl. [8], S. 616; [9], S. 4–5).

3. Aufbau eines Rastertunnelmikroskops

Der Aufbau des Rastertunnelmikroskops lässt sich in drei miteinander in Verbindung stehende Teile gliedern: Mechanik, Elektronik und Software. Im Folgenden wird der Prozess des Aufbaus der einzelnen Segmente beschrieben und auf die dabei entstandenen Schwierigkeiten eingegangen.

3.1 Herkunft des Bausatzes

Der Bausatz für das Rastertunnelmikroskop wurde vom Kompetenzzentrum für Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e.V. (UPOB) zur Verfügung gestellt. Ursprünglich an der Universität Münster entworfen wurde der Bausatz später von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt weiterentwickelt. Seit längerer Zeit wird der Bausatz allerdings nicht mehr kommerziell vertrieben [10].

Nicht enthalten war neben einigen Einzelteilen die Schnittstelle zum Computer, auf dem das Steuerprogramm laufen sollte, was die Entwicklung einer eigenen Schnittstelle und eines eigenen Messprogramms notwendig machte.

3.2 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Teil des Aufbaus ermöglicht die einfache und dennoch effektive Annäherung der Messspitze an die Probe im Millimeterbereich sowie die präzise Justierung des Abstands im Sub-Nanometerbereich.

Der Annäherungsmechanismus besteht aus drei Mikrometerschrauben, die in einem gleichschenkligen Dreieck auf einer trapezförmigen Stahlplatte angeordnet sind (siehe Abb. 3). Der Scankopf, bestehend aus den drei Piezostellelementen und der Messspitze, ist nahe der Kippachse montiert, die von den beiden vorderen Mikrometerschrauben gebildet wird. Dadurch führt die Verstellung der vorderen Schrauben zu einer größeren Höhenverstellung, während mit der hinteren Feingewindeschraube, aufgrund des langen Hebelarms, sehr geringe Höhenjustierungen umgesetzt werden können.

Die Genauigkeit der Annäherungsmethode lässt sich rechnerisch bestimmen.

Die Entfernung der beiden vorderen Mikrometerschrauben zur hinteren Schraube beträgt 200 mm. Der Abstand zwischen der am Scankopf befestigten Messnadel und der Kippachse ist variabel und war bei den meisten Messungen auf 5 mm eingestellt. Die Verstellung der hinteren Feinannäherungsschraube um einen Millimeter führt dadurch zu einer Höhenänderung von $\frac{1}{40}$ mm. Die Gewindesteigung der Mikrometerschrauben beträgt $\frac{1}{3}$ mm pro Umdrehung. Eine ruhige Führung erlaubt zudem bis zu 150 Teilschritte bei jeder Umdrehung. Daraus folgt, dass die Scanspitze in Schritten von $\frac{1}{40 \cdot 3 \cdot 150}$ mm ≈ 56 nm an die Probe ange nähert werden kann (vgl. [9], S. 7).

Falls diese Präzision nicht ausreicht, besteht die Möglichkeit, den Abstand zwischen Messspitze und Kippachse weiter zu verkleinern, wodurch Justierungen an der Feinannäherungsschraube in geringere Höhenänderungen an der Spitze umgesetzt werden. Allerdings sollte dieser Abstand nicht zu kurz gewählt werden, da sonst der Verstellweg der hinteren Schraube zur Annäherung eventuell nicht ausreicht.

Die mit dieser Methode erzielte Genauigkeit ist für die gefahrlose Annäherung des Scanners ausreichend, da die Spitze lediglich in den Stellbereich des z-Pie-

zoaktuators von etwa einem Mikrometer gebracht werden muss. Dennoch ist der Annäherungsprozess relativ zeitaufwendig, da eine zu schnelle Höhenverstellung an der Feinjustierschraube zu einer Kollision mit der Probe und einer Beschädigung der Tunnelspitze führen kann.

Um den Scanner in die passende Position über der Probenhalterung bewegen zu können, ist er über zwei Schienen mit der oberen Platte verbunden, sodass er in x- und y-Richtung verschoben werden kann (siehe Abb. 3). Hierbei ist wichtig, dass die Gewindeschrauben die Schienen fest fixiert werden, da sonst Vibrationen den Scankopf über der Probe verschieben könnten und so das resultierende Bild verfälschen würden.

Im Bausatz der UPOB fehlte eine Spitzenhalterung, über die das Tunnelstromsignal an den Vorverstärker weitergeleitet werden kann. Sie wurde aus einem Messingblock gefeilt, mit einer Bohrung sowie einem Gewinde versehen und mit Epoxidharz an das Dreibein geklebt, das an den drei Piezoaktuatoren befestigt ist (siehe Abb. 4). Messing wurde aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit, Stabilität und Rostfreiheit als Ausgangsmaterial gewählt. Beim Befestigen der Messspitze in der Halterung sollte darauf geachtet werden, die Schraube nicht stärker als notwendig festzuziehen, um die Piezoaktuatoren und deren Klebestellen keiner zu großen Belastung auszusetzen.

Ein an der Spitzenhalterung angelötetes Koaxialkabel leitet das Tunnelstromsignal zum Vorverstärker weiter. Um das Signal möglichst störungsfrei zu übermitteln, ist das Kabel von einem weiteren Kupferabschirmgeflecht umgeben. Es ist wichtig, die Länge des Koaxialkabels so kurz wie möglich zu halten, um Einflüsse von Störungen, meist elektromagnetische Wellen aus dem Umfeld, zu minimieren [11].

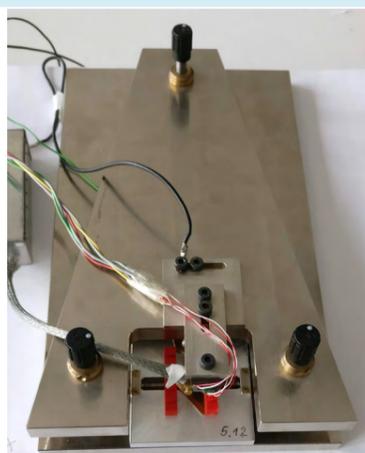
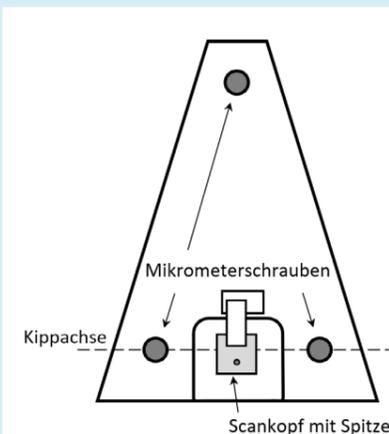


Abb. 3: Prinzip-Skizze (links) und Foto (rechts) des Annäherungsmechanismus

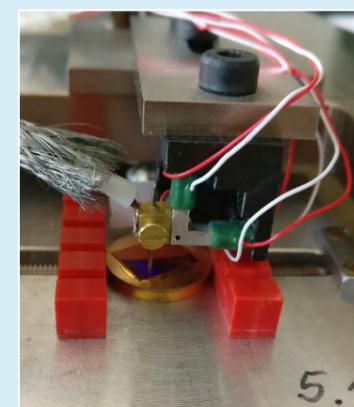


Abb. 4: Die Spitzenhalterung mit Tunnelstromkontakt ist über das Dreibein mit den drei Piezoaktuatoren (grün) verbunden

3.3 Dämpfung

Die exponentielle Abhängigkeit des Tunnelstroms vom Abstand ermöglicht die exakte Höhenauflösung des Rastertunnelmikroskops, erfordert allerdings eine adäquate Vibrationsdämpfung. Hier besteht sie aus einem schwach aufgepumpten Gummischlauch ei-



Abb. 5: Spitzenätzvorrichtung der LMU in Garching

nes Schubkarrenreifens und einer mit aufliegenden Gehwegplatte mit einer Trägheitsmasse von etwa 10 kg. Der Versuchsaufbau ruht auf dieser Platte. Laut dem zweiten Newton'schen Gesetz $a = \frac{F}{m}$ ist die Beschleunigung a , bei konstanter Kraft, indirekt proportional zur Masse. Daher verursachen auf das System einwirkende Kräfte, aufgrund der großen Trägheitsmassen der Steinplatte und der beiden Stahlplatten, eine geringere Beschleunigung, als sie es bei vergleichsweise kleinen Massen getan hätten (vgl. [9], S. 8–9).

Darüber hinaus besitzt das Dämpfungssystem eine niedrige Resonanzfrequenz, da der schwach aufgepumpte Schlauch weich ist und mit der aufliegenden Steinplatte träge auf Auslenkungen reagiert. Der Aufbau wird daher von Bodenvibrationen größtenteils entkoppelt. Allerdings konnte experimentell nicht überprüft werden, wie effektiv diese Dämpfung tatsächlich ist. Ein weiterer Nachteil des Systems ist die fehlende Isolierung vor Schallwellen. Insbesondere die Tunnelspitze, die

den Schwingungen der Luft direkt ausgesetzt ist, kann aufgrund ihrer länglichen Geometrie und Härte leicht in Schwingung versetzt werden. Um unter anderem dieses Problem zu umgehen, werden professionelle Messungen meist im Ultrahochvakuum durchgeführt (vgl. [8], S. 617). Da dies im Rahmen des Projektes nicht möglich war, wurden Messungen in möglichst stiller Umgebung und zu einer ruhigen Tageszeit unternommen, um Störungen zu minimieren.

3.4 Messspitze

Das Ergebnis einer Messung hängt zu großen Teilen von der Qualität der verwendeten Messspitze ab, weshalb bei der Herstellung und im Umgang mit Tunnelspitzen besondere Sorgfalt geboten ist.

3.4.1 Anforderungen

Im Optimalfall sind die Tunnelspitzen atomar. Das bedeutet, dass an ihrem Ende ein einzelnes Atom sitzt, über das

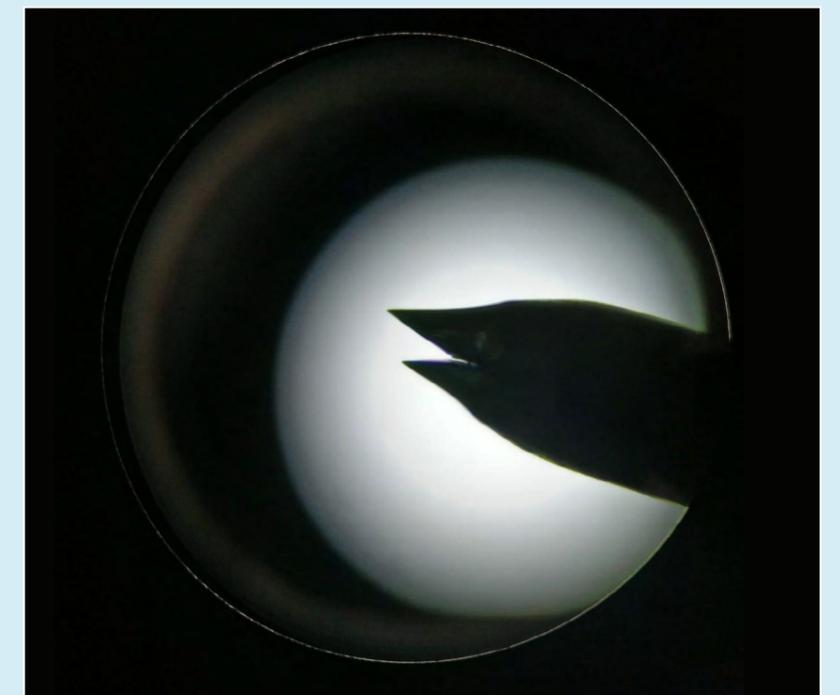


Abb. 6: Aufnahme einer Doppelspitze mit einem Lichtmikroskop

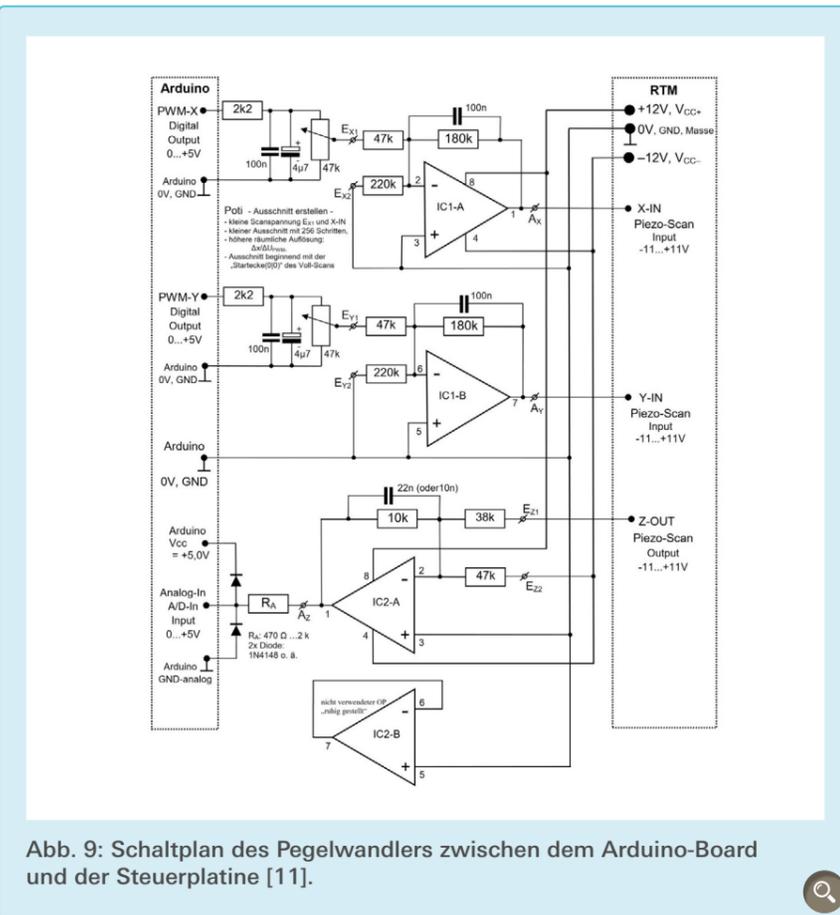


Abb. 9: Schaltplan des Pegelwandlers zwischen dem Arduino-Board und der Steuerplatine [11].

Um die Scanweite ändern zu können, wurde zusätzlich ein Spannungsteiler in Form eines Potentiometers zwischen Tiefpass und Operationsverstärker verbaut. So kann jeweils für beide Scanachsen eingestellt werden, dass die Schaltung nur einen Teil der Ausgangsspannung verstärkt und an das Steuerprogramm weitergibt. Es wird dadurch ein Bildausschnitt des vollen Bereichs gescannt. Jedoch ist es nicht möglich, diesen Teilbereich zu verschieben; er liegt immer in einer Ecke des vollen Scanbereichs [11].

Im Vergleich zum ursprünglichen Anschluss über eine ISA-Karte bietet dieses Konzept mehrere Vorteile: Das Arduino-Board ist weitaus preiswerter als eine Messkarte und ist darüber hinaus unabhängig vom Mainboard des verwendeten Computers, da es über USB mit dem Messprogramm verbunden wird.

3.6 Messprogramm

Da der AD/DA-Wandler neu konzipiert wurde, musste auch eine eigene Software programmiert werden, die mit der Schaltung kompatibel ist. Daher wurde ein Programm für das Arduino-Board programmiert und ein Python-Skript entwickelt, das auf einem Computer läuft und Daten mit dem Mikrocontroller austauscht.

3.6.1 Arduino-Software

Das Programm auf dem Arduino [16] steuert den Scanablauf des Mikroskops. Zwei Ausgangspins des Boards sind mit der Verstärkerschaltung verbunden und sprechen die x- und y-Piezoaktuatoren an. In der Hauptschleife wird das Spannungssignal der x-Achse schrittweise erhöht, bis es das Maximum von 5 Volt erreicht, und springt dann wieder auf 0 Volt zurück. Dies geschieht unabhän-

gig von der eingestellten Vergrößerung, mit einer Auflösung von 8 Bit. Dieser Vorgang wird für jede Zeile wiederholt. Bei jeder Repetition inkrementiert das Programm zudem die Ausgangsspannung der y-Achse.

Das Resultat kann als eine langsame und eine schnelle Sägezahnwechselspannung angesehen werden, wodurch die Messspitze theoretisch in einem quadratischen Raster über die Probe bewegt wird. Bei einer eingestellten Bildauflösung von beispielsweise 64 mal 64 Pixeln werden auf diese Weise 64 Zeilen mit jeweils 64 Schritten abgetastet. An jedem Punkt des Rasters wird die z-Spannung der Steuerplatine am Eingangspin digitalisiert. Dieser Wert wird, zusammen mit den zugehörigen Koordinaten des Rasters, über eine serielle Schnittstelle an das Python-Skript auf dem Computer gesendet, in Echtzeit ausgewertet und dargestellt. Auf diese Weise ist es möglich, den Verlauf der Messung zu beobachten und bei Problemen den Scan rechtzeitig abzubrechen.

Zwischen jedem Bildpunkt muss ein Delay von mindestens 16 Millisekunden eingebaut werden, um eine fehlerfreie Datenübertragung zum Computer zu gewährleisten. Wiederholte Tests zeigten, dass bei kürzeren Delays vermehrt Übertragungsfehler auftraten. Am Anfang jeder Zeile wurde zusätzlich ein längerer Delay eingebaut, da der Regelkreis des z-Piezoaktuators ebenfalls Zeit benötigt, um auf die teilweise große Höhenänderung vom Ende der letzten zur neuen Zeile reagieren zu können. Dabei hat sich der fünffache Wert des normalen Delays als ausreichend erwiesen.

Die Messdauer eines Scans mit der maximalen Auflösung von 256 mal 256 Pixeln kann, je nach Einstellung des Delays, zwischen 20 Minuten und über einer Stunde liegen. Daher war die Funktion, den Scanverlauf mitverfolgen und abbrechen zu können, wichtig für die Inbetriebnahme des Rastertunnelmi-

skrope, da so der Prozess der Bildgewinnung wesentlich erleichtert wurde.

3.6.2 Python-Skript

Die Auswertung und die Visualisierung der Höhendaten werden mit einem Python-Skript durchgeführt. Es wurde Python als Programmiersprache gewählt, da mit geeigneten Bibliotheken die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche, das Speichern des Scanbildes sowie die serielle Kommunikation mit dem Arduino möglich ist.

Das Python-Programm erstellt die Benutzeroberfläche und empfängt Daten von dem Arduino-Board über eine serielle Schnittstelle, sobald der Start-Button gedrückt wurde. Außerdem werden der Fortschritt und die bereits vergangene Zeit in Sekunden angezeigt. Die Messung kann jederzeit abgebrochen werden, wobei das bis dorthin erstellte Bild gespeichert wird. Die Darstellung der grafischen Oberfläche wird mit der *Library* „Pygame“ realisiert [18]. Um die serielle Kommunikation mit dem Arduino zu ermöglichen, wird außerdem die Bibliothek „pySerial“ verwendet [19].

Die Auflösung muss auch im Python-Programm eingestellt werden und mit dem Wert im Arduino-Code überein-

stimmen. Nach der Fertigstellung einer Bildaufnahme wird das entstandene Scanbild automatisch als Bitmap und als Textdatei gespeichert. In der Textdatei wird für jeden Bildpunkt der Höhenwert als Zahl zwischen 0 und 1023 festgehalten, wobei größere Zahlen hellere Graustufen auf den Messbildern, beziehungsweise höher gelegene Bereiche der Probenoberfläche repräsentieren.

4. Versuchsergebnisse

Nun werden einige Messergebnisse gezeigt und interpretiert. Alle Scanbilder wurden mit dem Konstantstrommodus und der vollen Auflösung von 256 Pixeln aufgenommen.

4.1 Bestimmung der Messweite

Eine Voraussetzung für die Messung mit dem Rastertunnelmikroskop ist die Bestimmung der Scanweite, die von den Piezostellelementen abhängt.

Um dies zu erreichen, wurde die Aluminiumschicht eines DVD-Rohlings gescannt. Da der Spurbereich einer DVD mit 740 Nanometern genormt ist, kann durch ein Scanbild der Spurrillen die Größe des Scanbereichs bestimmt werden. Auch bei einem Rohling ist die Spiralspur bereits vorhanden (vgl. [20],

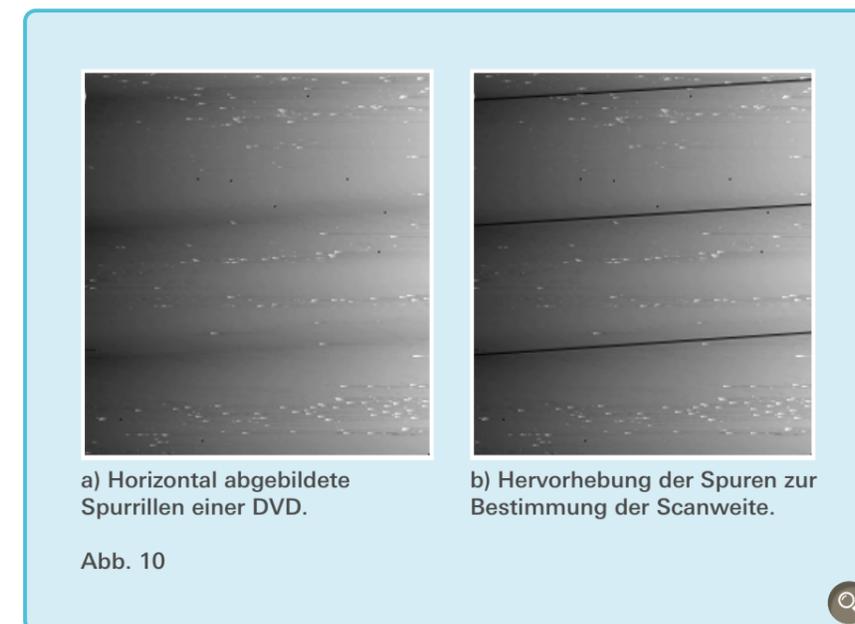
S. 156–159). Die x- und y-Piezoaktuatoren können unterschiedliche Messweiten haben, daher wurden die Spurrillen vertikal und horizontal gescannt, um die Reichweite in beiden Richtungen bestimmen zu können. Die Messbilder zeigen mit großer Wahrscheinlichkeit die Spurrillen des DVD-Rohlings, da sie eine leichte Schräglage aufweisen und in regelmäßigen Abständen auftreten (siehe Abb. 10a). Würden die Streifen exakt parallel zur x-Achse des Bildes verlaufen, wäre es wahrscheinlich, dass es sich um einen Messfehler handelt. Ein Beispiel dafür wird in Kapitel 4.2 gegeben.

Die Reichweite des y-Piezoaktuators wird aus dem Scanbild der horizontalen DVD-Spuren errechnet (siehe Abb. 10b). Das Verhältnis zwischen der Bildbreite und dem Abstand der Linien beträgt gerundet 3,0. Wird dieses Verhältnis mit dem Spurbereich der DVD multipliziert, ergibt sich eine Messweite von etwa 2,2 µm in y-Richtung.

Für die x-Richtung ergibt sich analog ein Verhältnis von 1,9 und eine Scanweite von etwa 1,4 µm. Das Messbild wurde mit dem Programm „Gwyddion“ bearbeitet und so der Kontrast zwischen Senkungen und Erhebungen erhöht (siehe Abb. 11b) [22].

Diese Ergebnisse sind aufgrund von Messungenauigkeiten und der leichten Schräglage der Rillen nicht als exakte Werte anzusehen, sondern sollen als Orientierung dienen, um weitere Messbilder besser einordnen und interpretieren zu können.

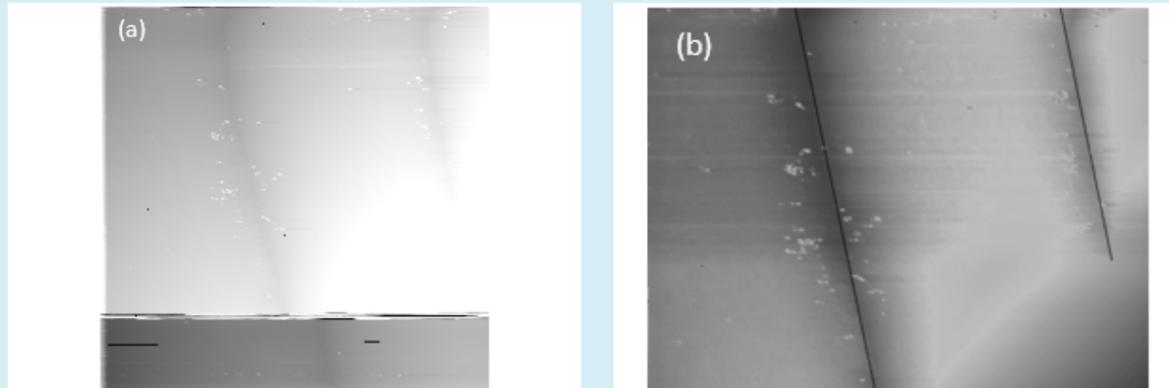
Die Differenz zwischen den Reichweiten der x- und y-Piezoaktuatoren kann durch die Potentiometer in der Verstärkerschaltung (siehe 3.5.3) kompensiert werden, indem in y-Richtung herangezogen wird, sodass nur noch 64 % der ursprünglichen Reichweite gescannt wird: $\frac{1,4 \mu\text{m}}{2,2 \mu\text{m}} = 0,64$. Dadurch scant die Anlage einen annähernd quadratischen Ausschnitt der Probe.



a) Horizontal abgebildete Spurrillen einer DVD.

b) Hervorhebung der Spuren zur Bestimmung der Scanweite.

Abb. 10



a) Horizontal abgebildete Spurrillen einer DVD. b) Das Bild wurde zur Verdeutlichung der Spuren bearbeitet.

Abb. 11

Die Messweite des z-Piezoaktuators konnte nicht bestimmt werden, da keine Probe mit Nanostrukturen bekannter Höhe verfügbar war. Da die drei Piezostellglieder baugleich sind, kann von einer ähnlichen Scanweite ausgegangen werden.

4.2 Auswirkungen von Störeinflüssen

Störende Einflüsse im Umfeld des Aufbaus können irreführende Ergebnisse verursachen. Elektromagnetische Wellen, Vibrationen im Boden oder Schallwellen können Artefakte hervorrufen, die zu einer falschen Interpretation des Messbildes verleiten können. Ein Artefakt ist eine auf dem Scanbild abgebildete Struktur, die nicht auf der Probenoberfläche existiert.

Abb. 12 zeigt sehr regelmäßig angeordnete Strukturen, die in gleichen Abständen parallel zur Horizontalen verlaufen. Außerdem sind wellenartige Hebungen auf den „Säulen“ zu sehen. Die Regelmäßigkeit deutet darauf hin, dass nicht die Oberfläche der Probe, sondern Einflüsse von außen abgebildet wurden [21]. Eine mögliche Erklärung sind elektromagnetische Wellen, die nur zum Zeitpunkt dieser Messung im Umfeld auftraten, da bei späteren Scans

keine ähnlichen Muster, sondern komplexe und unregelmäßige Strukturen zu sehen waren.

Eine weitere Möglichkeit sind störende Einflüsse von der Anlage selbst, wie beispielsweise unerwünschte Schwingkreise in einer der elektronischen Verstärkerschaltungen. Aufgrund fehlender Reproduzierbarkeit konnte dieses Phänomen nicht weiter untersucht werden.

Die abgebildeten Strukturen wurden auf der linken Seite des Bildes dunkler dargestellt als auf der rechten Seite. Dieser Grauverlauf trat bei mehreren Scans auf und wurde durch eine Schräglage des Scankopfes gegenüber der Probe verursacht. Durch die Möglichkeit, die beiden vorderen Feinjustierschrauben unabhängig voneinander verstellen zu können, kann dieser Messfehler verhindert werden.

Um die Fehleranfälligkeit zu testen und die Apparatur auf eventuelle Störungen zu überprüfen, wurden die x- und y-Piezostellelemente bei einer Messung von der Steuerelektronik abgesteckt, wodurch nur ein einziger Punkt gescannt wurde. Jede kleinste Störung, verursacht durch elektromagnetische Wellen oder physikalische Einflüsse, kann auf diese Weise dargestellt werden.

Abbildung 13a zeigt das originale Messbild ohne laterale Bewegung der Spitze. Mit dem Bearbeitungsprogramm „Gwyddion“ wurden erneut die Abweichungen hervorgehoben (siehe Abb. 13b), da diese auf dem ursprünglichen Bild fast nicht zu erkennen sind [22].

Bei dieser Aufnahme sind keine regelmäßigen, sich wiederholenden Störungsmuster zu sehen. In einem Abschnitt im oberen Bereich sind nahezu keine Abweichungen vorhanden, während darunter vermehrt Störungsein-

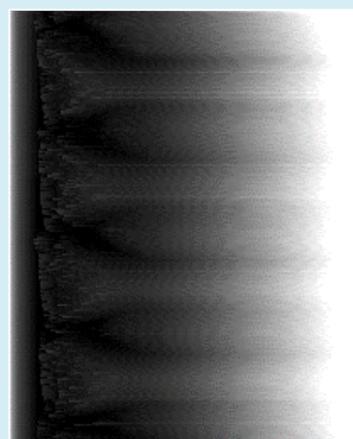


Abb. 12: Scanbild, das Artefakte zeigt



a) Scanbild ohne laterale Bewegung b) Die bearbeitete Version stellt die Abweichungen verdeutlicht dar

Abb. 13

flüsse auftreten. Dies lässt vermuten, dass vor allem Vibrationen im Untergrund oder Schallwellen aus der Umgebung die Ursache für diese Abweichungen sind. Von der Schaltung verursachte Störungen sind auszuschließen, da keine regelmäßigen Muster wie in Abb. 12 zu erkennen sind. Daher ist anzunehmen, dass Abb. 13 Störeinflüsse aus dem Umfeld der Anlage zeigt.

Da bei jeder Messung die Höhenwerte in einer Textdatei abgespeichert werden, konnte die relative Standardabweichung von 1,94 % berechnet werden. Diese geringen Abweichungen zeigen, dass das Rastertunnelmikroskop ziemlich exakt und störungsfrei messen kann, solange es

sich in einem ruhigen Umfeld befindet.

4.3 Hochorientierter pyrolytischer Graphit

Hochorientierter pyrolytischer Graphit (HOPG) bietet aufgrund seines Aufbaus in Schichten den Vorteil, dass frische, atomar glatte Plateaus durch das Abspalten der obersten Graphitschicht erzeugt werden können. Da er zusätzlich elektrisch leitend ist, wird HOPG oft verwendet, um atomare Strukturen mithilfe des Rastertunnelmikroskops darzustellen (vgl. [23], S. 3; [24], S. 1143f).

Auch mit dieser Anlage wurde Graphit

untersucht. Zwei Messergebnisse sind in Abb. 14 zu sehen. Sie wurden mit verschiedenen Scanweiten aufgenommen, allerdings sind die an den Seiten der Messbilder angegebenen Skalen lediglich grobe Schätzungen. Die Scans wurden mit einer Probenvorspannung von 0,5 Volt und einer Scanrate von 50 Millisekunden durchgeführt. Auf beiden Bildern sind komplexe Strukturen zu sehen, die nicht parallel zur x-Achse verlaufen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass keine Artefakte abgebildet wurden, sondern die tatsächliche Oberfläche der Graphitprobe zu sehen ist.

Abb. 14c zeigt die mit „Gwyddion“ bearbeitete, dreidimensionale Ansicht des Scanbildes Abb. 14a [22]. Es sind stufenartige Muster zu erkennen, die typisch für gespaltenes Graphit sind. Diese sogenannten „cleavage steps“ wurden von Hsiangpin Chang und Allen J. Bard untersucht (vgl. [24], S. 1143–1145) und entstehen durch das Abtragen der obersten Graphitschichten mit Klebeband. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Abb. 14 nicht Kontaminationen auf der Oberfläche, sondern atomare Spaltungsstufen von HOPG darstellt.

4.4 Nanostrukturen auf Graphit

Eine weitere Probe bestand aus dem organischen Halbleiter Dimethyl-Quinacridone (QAC), der auf HOPG angelagert wurde (siehe Abb. 15a). Die

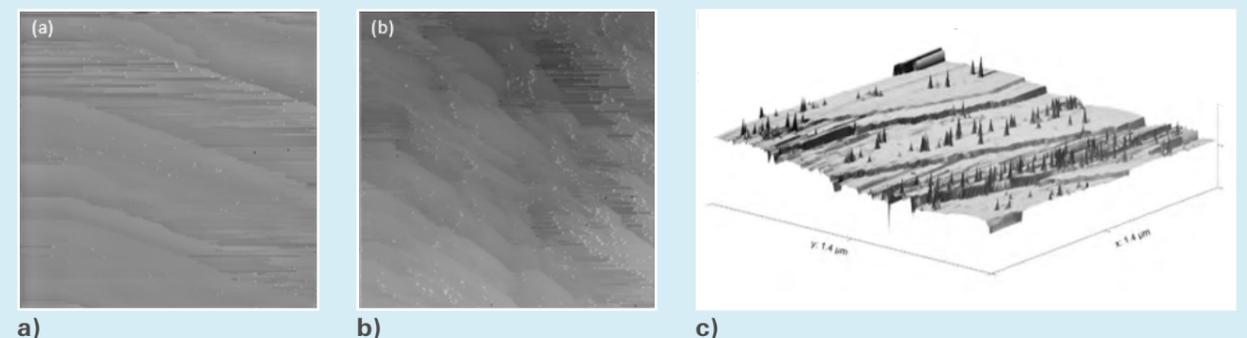


Abb. 14: Messbilder (Teilbild a und b) einer HOPG-Probe mit Spaltungsstufen. c) Eine dreidimensionale Ansicht des Scanbildes a).

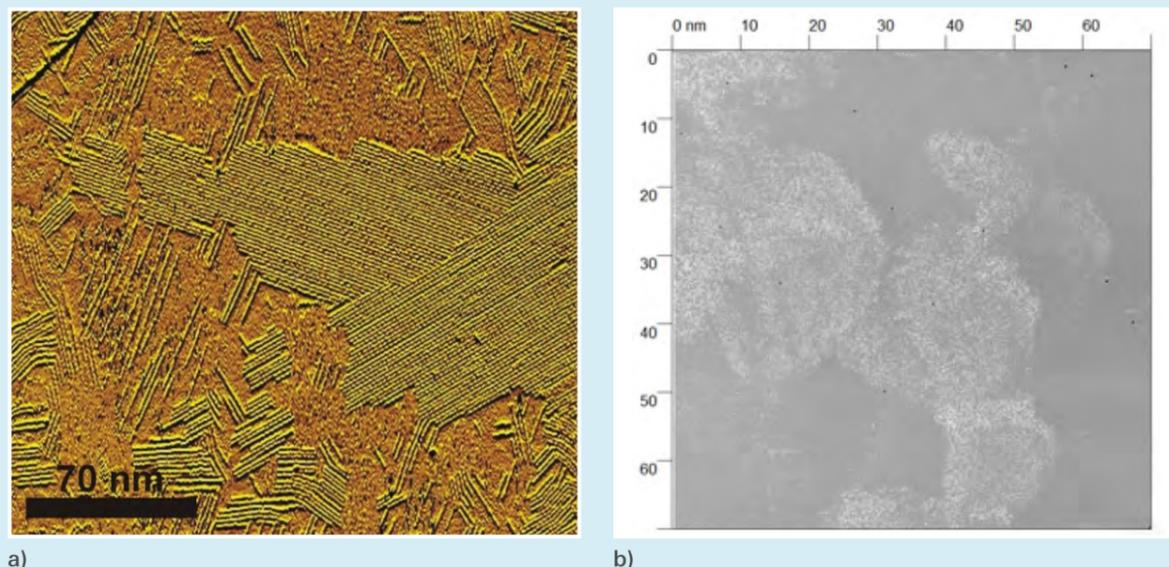


Abb. 15: Molekulare Nanostrukturen Dimethyl-Quinacridone auf HOPG. a) Aufnahme von Frank Trixler, TU München, b) eigene Aufnahme.

QAC-Moleküle bilden lange Ketten von etwa 10 bis 400 Nanometern Länge und ordnen sich parallel zueinander in Domänen an (vgl. [21]; [25], S. 1417).

Abbildung 15b wurde mit der kleinstmöglichen Scanweite von etwa 80 nm, 2 Volt Probenvorspannung und 50 Millisekunden Scangeschwindigkeit aufgenommen.

Es sind wolkenartige, komplexe Strukturen zu sehen. Daher kann ausgeschlossen werden, dass es sich um Artefakte handelt. Allerdings lässt sich aufgrund der geringen Auflösung nicht sagen, ob es sich bei den Strukturen um eine unscharfe Aufnahme der in Abbildung 15a gezeigten QAC-Domänen oder um Kontaminationen handelt. Es können lediglich Hypothesen aufgestellt werden, wie eine Überprüfung durchzuführen wäre, um herauszufinden, was tatsächlich abgebildet wurde.

Falls das Messbild tatsächlich Moleküldomänen darstellt, dann sollten parallel angeordnete Molekülketten in den

Wolken durch Heranzoomen sichtbar werden. Andernfalls könnte eine Kontaminationsschicht aus Schmutzpartikeln auf der Probe für die Strukturen gesorgt haben. In diesem Fall würden sich bei der Verringerung der Scanweite weiterhin keine erkennbaren Nanostrukturen zeigen. Des Weiteren ist es möglich, dass sich Fremdstoffe zwischen den obersten Graphitschichten angelagert haben und dadurch Höhenänderungen auf dem Messbild zu sehen sind. Solche sogenannten Interkalate lassen sich durch die Verringerung des Abstandes nicht mit der Tunnelspitze abtragen, wohingegen dies bei QAC-Domänen möglich wäre [21].

5. Diskussion

Das Ziel der Arbeit war, ein Rastertunnelmikroskop aufzubauen, das Messungen durchführen und Nanostrukturen abbilden kann. Dieses Ziel wurde nach Entwicklung eines neuen Übertragungs- und Auswertungssystem erreicht.

Einige Aspekte des Rastertunnelmikroskops sind im Nachhinein betrachtet verbesserungswürdig. Wie bei Messungen festgestellt wurde, erreichen die Piezostellelemente unterschiedliche Reichweiten. Die Piezostellelemente, die im Bausatz enthalten waren, sind vermutlich mehr als ein Jahrzehnt alt und wurden ohne Spezifikationen geliefert. Es wäre daher von Vorteil, neue Piezoaktuatoren mit bekannten Eigenschaften einzubauen.

Eine weitere Problematik ist die fehlende Möglichkeit, bei der Änderung der Scanweite den Ausschnitt über die gesamte Messweite zu verschieben, um eine besonders interessante Stelle gezielt zu untersuchen. Um dies zu ermöglichen, ist eine komplexere Verstärkerschaltung notwendig.

Es war nicht möglich, atomare Strukturen darzustellen, da dafür die Scanweite um etwa das 200-fache verkleinert werden müsste. Diese Genauigkeit konnte mit der Verstärkerschaltung nicht erreicht werden. Selbst wenn dies umzu-

setzen wäre, würden die Unterschiede der lateralen Reichweiten, die nicht überprüfte Qualität der verwendeten Messspitzen sowie die vermutlich unzureichende Dämpfung weitere Hindernisse darstellen. Dennoch konnte mit den Messungen gezeigt werden, dass das System in der Lage ist, kleinste Strukturen einer Oberfläche abzubilden.

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Kompetenzzentrum für Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e.V., das den verwendeten Bausatz zur Verfügung stellte. Außerdem ist Dr. Ralf Münchenhagen für seine Hilfe bei der Konzipierung der Verstärkerschaltung des AD/DA-Wandlers zu danken. Weiterer Dank gilt Dr. Frank Trixler, der die Probe mit Nanostrukturen bereitstellte und allen Beteiligten an der LMU, die das Ätzen der Messspitzen ermöglichten.

Quellenverzeichnis

- [1] Lounis, Samir: Theory of Scanning Tunneling Microscopy, 2014, online erschienen unter: https://www.researchgate.net/publication/261368956_Theory_of_Scanning_Tunneling_Microscopy, 08.12.2018.
- [2] Ernst, Stephan: Optimisation of the preparation process for tips used in scanning tunneling microscopy, 2016, online erschienen unter: http://www2.cphys.mpg.de/~ernst/ernst_da.pdf, 10.12.2018.
- [3] Cheng, C. Julian: Introduction to Scanning Tunneling Microscopy, New York: Oxford University Press, 2. Auflage, 2008.
- [4] Oral, Ahmet: Construction of a Scanning Tunneling Microscope and first results, 1990, online erschienen unter: <http://repository.bilkent.edu.tr/bitstream/handle/11693/17193/B006658.pdf>, 10.12.2018.
- [5] König, Rainer: Nanostrukturierung mit dem Rastertunnelmikroskop, Dissertation, Braunschweig: PTB, 1997.
- [6] Binnig, Gerd; Rohrer, Heinrich: SCANNING TUNNELING MICROSCOPY, Surface Science 126 (1983), S. 236–244.
- [7] Weiß, Reinhard: Quantenobjekt – Schrödinger-Gleichung – Tunneleffekt, 2016, online erschienen unter: <https://docplayer.org/73035609-Quantenobjekt-schroedinger-gleichung-tunneleffekt.html>, 06.12.2018.
- [8] Binnig, Gerd; Rohrer, Heinrich: Scanning tunneling microscopy from birth to adolescence, in: Reviews of Modern Physics 59 (3) (1987), S. 615–125.
- [9] Dittmann, Jonas: Bau eines Rastertunnelmikroskops, 2006, online erschienen unter: <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Rastertunnelmikroskop.pdf>, 22.12.2018.
- [10] Kompetenzzentrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e.V. (Hrsg.): Bausatz eines Rastertunnelmikroskops, o. J., online erschienen unter: https://www.upob.de/index.php?option=com_content&view=article&id=80:bau-satz-eines-rastertunnelmikroskops&catid=48&Itemid=81, 09.01.2019.
- [11] E-Mail-Korrespondenz mit Dr. Ralf Münchenhagen.
- [12] Olivia, A. I.; Sosa, Victor; et al.: Vibration isolation analysis for a scanning tunneling microscope, Rev. Sci. Instrum. 63 (6) (1992), S. 3326–3329.
- [13] Binnig, Gerd; Rohrer, Heinrich; et al.: Tunneling through a controllable vacuum gap, Appl. Phys. Lett. 40 (2) (1982), S. 178–180.
- [14] Daniel, Herbert: II. Elektrodynamik – Relativistische Physik, Berlin: Walter de Gruyter, 1. Auflage, 1997.
- [15] Hirzel, Timothy: PWM, o. J., online erschienen unter: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>, 24.12.2018.
- [16] Arduino (Hrsg.): Arduino, o. J., online erschienen unter: <https://www.arduino.cc/>, 09.01.2019.
- [17] Klima, Robert; Selberherr, Siegfried: Programmieren in C, Wien: Springer-Verlag, 3. Auflage, 2010.
- [18] Pygame (Hrsg.): Pygame Installation, o. J., online erschienen unter: <https://www.pygame.org/wiki/GettingStarted>, 09.01.2019.
- [19] pySerial (Hrsg.): pySerial, o. J., online erschienen unter: <https://pythonhosted.org/pyserial/pyserial.html#installation>, 09.01.2019.
- [20] Roth, Klaus: Chemische Köstlichkeiten, Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 1. Auflage, 2010.
- [21] E-Mail-Korrespondenz mit Dr. Frank Trixler.
- [22] Gwyddion (Hrsg.): Gwyddion, o. J., online erschienen unter: <http://gwyddion.net/>, 09.01.2019.
- [23] Wilson, Paul; Wright, Tom: STM surface studies of HOPG and Gold in air, 2010, online erschienen unter: <http://www.ucl.ac.uk/~zca-pe84/pdf/stm.pdf>, 03.01.2019.
- [24] Chang, Hsiangpin; Bard, Allen J.: Observation and Characterization by Scanning Tunneling Microscopy of Structures Generated by Cleaving Highly Oriented Pyrolytic Graphite, in: Langmuir 7 (1991), S. 1143–1153.
- [25] Eberle, Alexander; et al.: Growing low-dimensional supramolecular crystals directly from 3D particles, in: The Royal Society of Chemistry (19) (2017), S. 1417–1426.

Publiziere auch Du hier!

Forschungsarbeiten von Schüler/Inne/n und Student/Inn/en

In der Jungen Wissenschaft werden Forschungsarbeiten von SchülerInnen, die selbstständig, z. B. in einer Schule oder einem Schülerforschungszentrum, durchgeführt wurden, veröffentlicht. Die Arbeiten können auf Deutsch oder Englisch geschrieben sein.

Wer kann einreichen?

SchülerInnen, AbiturientInnen und Studierende ohne Abschluss, die nicht älter als 23 Jahre sind.

Was musst Du beim Einreichen beachten?

Lies die [Richtlinien für Beiträge](#). Sie enthalten Hinweise, wie Deine Arbeit aufgebaut sein soll, wie lang sie sein darf, wie die Bilder einzureichen sind und welche weiteren Informationen wir benötigen. Solltest Du Fragen haben, dann wende Dich gern schon vor dem Einreichen an die Chefredakteurin Sabine Walter.

Lade die [Erstveröffentlichungserklärung](#) herunter, drucke und fülle sie aus und unterschreibe sie.

Dann sende Deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung per Post an:

Chefredaktion Junge Wissenschaft
Dr.-Ing. Sabine Walter
Paul-Ducros-Straße 7
30952 Ronnenberg
Tel: 05109 / 561508
Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de

Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter, der die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird den Euch, den AutorInnen zugeschiedt und Du erhältst gegebenenfalls die Möglichkeit, Hinweise des Fachgutachters einzuarbeiten.

Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie **Jugend forscht** die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und als Open-Access-Beitrag veröffentlicht.

Was ist Dein Benefit?

Deine Forschungsarbeit ist nun in einer Gutachterzeitschrift (Peer-Review-Journal) veröffentlicht worden, d.h. Du kannst die Veröffentlichung in Deine wissenschaftliche Literaturliste aufnehmen. Deine Arbeit erhält als Open-Access-Veröffentlichung einen DOI (Data Object Identifier) und kann von entsprechenden Suchmaschinen (z. B. BASE) gefunden werden.

Die Junge Wissenschaft wird zusätzlich in wissenschaftlichen Datenbanken gelistet, d.h. Deine Arbeit kann von Experten gefunden und sogar zitiert werden. Die Junge Wissenschaft wird Dich durch den Gesamtprozess des Erstellens einer wissenschaftlichen Arbeit begleiten – als gute Vorbereitung auf das, was Du im Studium benötigst.



Richtlinien für Beiträge

Für die meisten Autor/Inn/en ist dies die erste wissenschaftliche Veröffentlichung. Die Einhaltung der folgenden Richtlinien hilft allen – den Autor/innen/en und dem Redaktionsteam

Die Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger AutorInnen bis zum Alter von 23 Jahren.

- Die Beiträge können auf Deutsch oder Englisch verfasst sein und sollten nicht länger als 15 Seiten mit je 35 Zeilen sein. Hierbei sind Bilder, Grafiken und Tabellen mitgezählt. Anhänge werden nicht veröffentlicht. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zählen nicht mit.
- Formulieren Sie eine eingängige Überschrift, um bei der Leserschaft Interesse für Ihre Arbeit zu wecken, sowie eine wissenschaftliche Überschrift.
- Formulieren Sie eine kurze, leicht verständliche Zusammenfassung (maximal 400 Zeichen).
- Die Beiträge sollen in der üblichen Form gegliedert sein, d.h. Einleitung, Erläuterungen zur Durchführung der Arbeit sowie evtl. Überwindung von Schwierigkeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Diskussion, Liste der zitierten Literatur. In der Einleitung sollte die Idee zu der Arbeit beschrieben und die Aufgabenstellung definiert werden. Außerdem sollte sie eine kurze Darstellung schon bekannter, ähnlicher Lösungsversuche enthalten (Stand der Literatur). Am Schluss des Beitrages kann ein Dank an Förderer der Arbeit, z. B. Lehrer und

Sponsoren, mit vollständigem Namen angefügt werden. Für die Leser kann ein Glossar mit den wichtigsten Fachausdrücken hilfreich sein.

- Bitte reichen Sie alle Bilder, Grafiken und Tabellen nummeriert und zusätzlich als eigene Dateien ein. Bitte geben Sie bei nicht selbst erstellten Bildern, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. die genauen und korrekten Quellenangaben an (siehe auch [Erstveröffentlichungserklärung](#)). Senden Sie Ihre Bilder als Originaldateien oder mit einer Auflösung von mindestens 300 dpi bei einer Größe von 10 · 15 cm! Bei Grafiken, die mit Excel erstellt wurden, reichen Sie bitte ebenfalls die Originaldatei mit ein.
- Vermeiden Sie aufwendige und lange Zahlentabellen.
- Formelzeichen nach DIN, ggf. IUPAC oder IUPAP verwenden. Gleichungen sind stets als Größengleichungen zu schreiben.
- Die Literaturliste steht am Ende der Arbeit. Alle Stellen erhalten eine Nummer und werden in eckigen Klammern zitiert (Beispiel: Wie in [12] dargestellt ...). Fußnoten sieht das Layout nicht vor.
- Reichen Sie Ihren Beitrag sowohl in ausgedruckter Form als auch als PDF

ein. Für die weitere Bearbeitung und die Umsetzung in das Layout der Jungen Wissenschaft ist ein Word-Dokument mit möglichst wenig Formatierung erforderlich. (Sollte dies Schwierigkeiten bereiten, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung, damit wir gemeinsam eine Lösung finden können.)

- Senden Sie mit dem Beitrag die [Erstveröffentlichungserklärung](#) ein. Diese beinhaltet im Wesentlichen, dass der Beitrag von dem/der angegebenen AutorIn stammt, keine Rechte Dritter verletzt werden und noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht wurde (außer im Zusammenhang mit **Jugend forscht** oder einem vergleichbaren Wettbewerb). Ebenfalls ist zu versichern, dass alle von Ihnen verwendeten Bilder, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. von Ihnen veröffentlicht werden dürfen, also keine Rechte Dritter durch die Verwendung und Veröffentlichung verletzt werden. Entsprechendes [Formular](#) ist von der Homepage www.junge-wissenschaft.ptb.de herunterzuladen, auszudrucken, auszufüllen und dem gedruckten Beitrag unterschrieben beizulegen.
- Schließlich sind die genauen Anschriften der AutorInnen mit Telefonnummer und E-Mail-Adresse sowie Geburtsdaten und Fotografien (Auflösung 300 dpi bei einer Bildgröße von mindestens 10 · 15 cm) erforderlich.
- Neulingen im Publizieren werden als Vorbilder andere Publikationen, z. B. hier in der Jungen Wissenschaft, empfohlen.



Impressum

[JUNGE]
wissenschaft



Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische
Bundesanstalt (PTB)
www.junge-wissenschaft.ptb.de

Redaktion

Dr. Sabine Walter, Chefredaktion
Junge Wissenschaft
Paul-Ducros-Str. 7
30952 Ronnenberg
E-Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de
Tel.: 05109 / 561 508

Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,
Pressesprecher der PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
E-Mail: jens.simon@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 3006
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)

Design & Satz

Sabine Siems
Agentur „provieler werbung“
E-Mail: info@provieler-werbung.de
Tel.: 05307 / 939 3350

