

Klassifikation der rastersondenmikroskopischen Verfahren**

Obmann und Übersetzer: *Gernot Friedbacher* und Harald Fuchs**

1. Einleitung

Ein wichtiger Meilenstein in der Geschichte der Rastersondenmikroskopie war die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops [Scanning Tunneling Microscopy (STM)] durch Binnig und Rohrer im Jahr 1981.^[1] Die Idee, mikroskopische Hochauflösung durch Rastern einer spitzen Sonde in sehr geringem

Abstand von der Probe, also im Nahfeldbereich, zu erreichen, existierte bereits vor dem Bau des ersten STM-Geräts. So wurde das Konzept der Raster-Nahfeld-Mikroskopie, das die Möglichkeit eröffnet, das Auflösungs-limit nach Abbe zu unterschreiten,^[2] bereits 1928 von Synge^[3] und 1956 von O'Keefe^[4] vorgeschlagen. Allerdings war zu jener Zeit die Technik für eine experimentelle Umsetzung dieser Idee nicht vorhanden. Ein Gerät, das bereits sehr viele Ähnlichkeiten mit dem späteren STM-Gerät hat, war der Topografier, der von Young et al. 1972 entwickelt wurde.^[5] In diesem Instrument wurde eine sehr dünne Metallspitze mithilfe piezoelektrischer Stellelemente (Piezo-Stellelement) über die Probenoberfläche gerastert. Beim Aufbau des Topografierers wurde auch bereits erkannt und berücksichtigt, dass eine gute Schwingungsisolierung des Gerätes ein Schlüsselfaktor für die hochauflösende Mikroskopie ist. Da beim Topografier der Abstand zwischen Spitze und Probe über das Feldemissionssignal gesteuert wurde, war die Auflösung auf etwa 400 nm beschränkt. Young et al. haben in ihrer Publikation von 1972^[5] allerdings bereits ausgeführt, dass die Auflösung deutlich verbessert werden könnte, wenn man den Abstand zwischen Spitze und Probe verkleinert und den Tunnelstrom zur Abstandssteuerung nutzt. Die Realisierung dieser Idee im ersten Rastertunnelmikroskop hat jedoch noch bis 1981 gedauert. Dieses war wegen seines extremen Auflösungsvermögens bis in den atomaren Bereich und seiner spektroskopischen Eigenschaften das erste Rastersondenmikroskop, das auf breites Interesse in vielen Bereichen der Wissenschaft stieß. Da seine Erfindung wesentliche Impulse für die Entwicklung weiterer Rasterson-

dentechniken geliefert hat, werden diese Techniken auch oft als STM-Abkömmlinge oder STM-verwandte Techniken, kurz Rastersondentechniken (oder -methoden), bezeichnet.

2. Das Konzept der Rastersondenmikroskopie

Abbildung 1 zeigt das allgemeine Konzept der Rastersondenmikroskopie (SPM). Eine spitze Sonde (z. B. Spitze, optische Faser, Pipette) wird mithilfe von Piezo-Stellelementen über die Probe gerastert, wobei entweder die Probe oder die Sonde bewegt werden kann. Während dieser Rasterbewegung wird ein bestimmtes Sondersignal für jeden Bildpunkt aufgezeichnet. Da das Messsignal eine lokale Information aus einem kleinen Bereich unter der Sonde wiedergibt, wird auch häufig die Bezeichnung lokale Sondentechniken

Die *Angewandte Chemie* veröffentlicht Übersetzungen von Recommendations und Technical Reports der IUPAC, um die chemische Fachsprache im Deutschen zu fördern. Sauber definierte Begriffe und klare Nomenklaturregeln bilden die Basis für eine Verständigung zwischen den Wissenschaftlern einer Disziplin und sind für den Austausch zwischen Wissenschafts- und Fachsprache sowie Allgemeinsprache essenziell. Alle Übersetzungen werden von einem ausgewiesenen Experten (dem „Obmann“) geprüft, korrigiert und autorisiert. Die nächste Übersetzung („Generische herkunftsbezogene Nomenklatur für Polymere“) ist für Heft 5/2004 vorgesehen. Empfehlungen von Themen und Obleuten sind willkommen.

[*] Prof. Dr. G. Friedbacher
Institut für Chemische Technologien und Analytik
Technische Universität Wien
Getreidemarkt 9/164-AC
1060 Wien (Österreich)
Fax: (+43) 1-58801-15199
E-mail: gernot.friedbacher@tuwien.ac.at
Prof. Dr. H. Fuchs
Physikalisches Institut der Universität Münster
Wilhelm-Klemm-Straße 10
48149 Münster (Deutschland)
Fax: (+49) 251-83-33602
E-mail: fuchsh@nwz.uni-muenster.de

[**] Copyright© der englischen Fassung, die unter dem Titel „Classification Of Scanning Probe Microscopies“ von G. Friedbacher (Wien) und H. Fuchs (Münster) für die Veröffentlichung in *Pure Appl. Chem.* 1999, 71, 1337–1357^[180] vorbereitet wurde: International Union of Pure and Applied Chemistry, 1999. – Wir danken der IUPAC für die Genehmigung zum Druck einer deutschen, um neuere Ergebnisse erweiterten Fassung dieses Technical Report. – Da auf dem Gebiet der Rastersondenmikroskopie die meisten Begriffe für Methoden in englischer Sprache publiziert und auch gut eingeführt sind, wurde auf eine konsequente, vollständige Übersetzung der Terminologie verzichtet. Deutsche Begriffe wurden so weit verwendet, als sie auch eingebürgert sind und die eindeutige Zuordnung zu den entsprechenden Methoden und Originalzitationen gewahrt ist. Diese Vorgehensweise ist zwar sprachlich nicht konsistent, gewährleistet aber eine bessere Lesbarkeit.

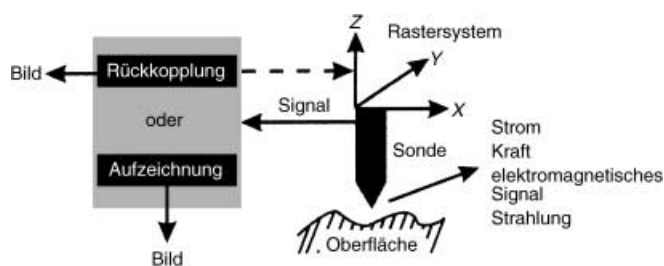


Abbildung 1. Allgemeines Schema der Rastersondenmikroskopie.

verwendet [local probe techniques]. Für die meisten heutigen Anwendungen ist der wichtigste Aspekt dieses Konzepts, aber nicht der einzige, die Nutzung des lokalen Signals zur Abstandsbestimmung. Damit ist es möglich, topographische Information im Realraum zu erhalten.

Man kann zwischen zwei Betriebsweisen unterscheiden. Bei der einen wird die absolute vertikale Position der Sonde konstant gehalten, womit sich der Abstand zwischen Sonde und Probenoberfläche aufgrund der Oberflächentopographie ständig ändert, was auch zu einer entsprechenden Änderung im Messsignal führt. Bei diesem Messmodus kann auf kleinen Flächen mit höheren Rastergeschwindigkeiten gearbeitet werden, um Bildverzerrungen z.B. durch thermische Drifts, vor allem bei atomar aufgelösten Bildern, zu minimieren. Allerdings ist das Risiko eines unbeabsichtigten Kontakts der Sonde mit der Probenoberfläche, der zur Zerstörung der Sonde oder der Probenoberfläche führen kann, relativ groß. Bei der anderen Betriebsweise wird das Sonden-signal durch Anpassung der vertikalen Sondenposition (oder der Probenposition), mittels Anlegen einer entsprechenden Spannung an das vertikale Piezo-Stellelement, konstant gehalten. Die dazu erforderliche Spannung gibt die Oberflächentopographie der Probe wieder, falls andere Effekte, die das Sonden-signal beeinflussen könnten, vernachlässigbar sind. In diesem Modus können auch größere Flächen (über $100 \mu\text{m}^2$) von rauen Proben bei minimalem Risiko eines Zusammenstoßes zwischen Spitze und Probe untersucht werden. Allerdings muss man wegen der limitierenden Ansprechzeit der Rückkopplungsschleife im Allgemeinen mit niedrigeren Rastergeschwindigkeiten arbeiten.

Aus dieser allgemeinen Beschreibung lassen sich folgende Komponenten eines Rastersondenmikroskops ableiten:

- Piezo-Stellelement für die Ausführung einer Relativbewegung zwischen Sonde und Probe
- Detektor für die Messung des Sonden-signals
- elektronisches Rückkopplungssystem zur Konstanthaltung des Sonden-signals über entsprechende Höhenanpassung der Sonde
- Bildverarbeitungssystem, das die einzelnen Datenpunkte in ein Bild umsetzt.

Eine allgemein übliche und einfache Möglichkeit, Rastersondentechniken zu benennen, ist es, den Buchstaben „P“ in der englischen Abkürzung SPM durch eine entsprechende Abkürzung für die Art des Messsignals zu ersetzen; Beispiele sind: für den Tunnelstrom als Signal STM und für Kräfte als Signal SFM. Daher wird manchmal auch SXM als allgemeine Abkürzung verwendet. Die Abkürzung SPM ist jedoch weiter verbreitet, weil sie deskriptiver ist („P“ für Sonde [probe]).

Es wurde bereits erwähnt, dass die Abbildung der Oberflächentopographie nicht die einzige Perspektive der Rastersondenmikroskopie ist. So wurde gezeigt, dass durch Positionieren der Sonde mit Ångström- und Sub-Ångström-Genauigkeit lokale spektroskopische Information, sogar von einzelnen Atomen, zugänglich gemacht werden kann. Dieser Ansatz steht nicht immer in Einklang mit dem oben vorgestellten allgemeinen Konzept der Rastersondenmikroskopie. Trotzdem können die entsprechenden spektroskopischen Techniken der Rastersondenmikroskopie zugeordnet werden, weil ähnliche oder identische Instrumente verwendet werden.

Ziel dieses Überblicks ist eine Klassifizierung der SPM-Techniken und eine Klärung von Terminologie und Abkürzungen. Auf Ausdrücke, die in der geschichtlichen Entwicklung der SPM-Techniken eingeführt wurden, aber nicht exakt in das obige Nomenklatur-schemata passen, wird dabei hingewiesen. Die weitere Verwendung solcher Ausdrücke kann akzeptiert oder sogar empfohlen werden, solange sie eindeutig sind und die entsprechende Technik richtig beschreiben. Des Weiteren sei angemerkt, dass dieser Beitrag keine detaillierte Beschreibung der Instrumente und keine umfassende Übersicht über verschiedene Anwendungen zum Ziel hat. Auf entsprechende Literatur wird exemplarisch verwiesen.

3. Überblick über die SPM-Techniken

Tabelle 1 bietet einen Überblick über die Techniken, die im Folgenden beschrieben werden. Neben der vorgeschlagenen Terminologie sind auch Synonyme, die in der Literatur verwendet werden, angeführt.

3.1. Rastertunnelmikroskopie (STM)

3.1.1. Prinzip

Bei der STM wird als Sonde eine sehr dünne Metallspitze verwendet, die typischerweise in einem Abstand von weniger als 1 nm über die Probe gerastert wird. Üblicherweise wird zwischen Spitze und Probe eine Spannung von wenigen Millivolt angelegt und ein Tunnelstrom von einigen Nanoampere gemessen. Wegen des exponentiellen Zusammenhangs zwischen Tunnelstrom und Abstand ist der Tunnelstrom ein äußerst empfindliches Maß für Abstandsänderungen. So verändert eine Variation des Abstands um 0.1 nm den Tunnelstrom bei Metallen etwa um den Faktor 10. Das bedeutet, dass im Prinzip durch Konstanthalten des Tunnelstroms auf wenige Prozent Abstandsänderungen im Bereich von 0.001 nm registriert werden können. Allerdings wird der Tunnelstrom auch von der elektronischen Struktur der Oberfläche

Tabelle 1: Überblick über die SPM-Techniken.

Technik	gebräuchliche Synonyme	verwandte Techniken	Technik	gebräuchliche Synonyme
Rastertunnelmikroskopie (STM)		Rastertunnelspektroskopie (STS)	Magnetic Force Microscopy (MFM)	Near-Field Scanning Optical Microscopy (NSOM)
		Scanning Noise Microscopy (SNM)	Van der Waals Force Microscopy (VDWFM)	
		Scanning Noise Potentiometry (SNP)	optische Raster-Nahfeld-Mikroskopie (SNOM)	
		Scanning Chemical Potential Microscopy (SCPM)	Aperture SNOM (ASNOM)	
		Scanning Optical Absorption Microscopy (SOAM)	Transmission ASNOM (T-ASNOM)	
		Spin-Polarized STM (SPSTM)	Collection ASNOM (C-ASNOM)	
		Ballistic Electron Emission Microscopy (BEEM)	Emission ASNOM (E-ASNOM)	
		Photon Emission STM (PESTM)	Non-Aperture SNOM (NA-SNOM)	
		$\hat{=}$ Scanning Tunneling Optical Microscopy (STOM)		
		Photon-Assisted STM (PASTM)	Evanescent-Field SNOM (EF-SNOM)	
Rasterkraftmikroskopie (SFM)		$\hat{=}$ Laser-Assisted STM (LASTM)		Photon Scanning Tunneling Microscopy (PSTM) Evanescent-Field Optical Microscopy (EFOM)
Atomic Force Microscopy (AFM)		Reibungskraftmikroskopie (FFM)	Scanning Near-Field Plasmon Microscopy (SNPM)	
		$\hat{=}$ Lateral Force Microscopy (LFM)	Scanning Electrochemical Microscopy (SECM)	
		Young's Modulus Microscopy (YMM)	Scanning Capacitance Microscopy (SCaM)	
Tapping Mode AFM (TM-AFM) Pulsed-Force-Mode AFM (PFM-AFM) Electric Force Microscopy (EFM)	Intermittant Contact AFM Scanning Maxwell Stress Microscopy (SMM)	Force-Distance Measurements	Scanning Ion-Conductance Microscopy (SICM)	Scanning Thermal Microscopy (SThM) Scanning Thermal Profiler (SThP)
		Scanning Surface Potential Microscopy (SSPM)	thermische Raster-Nahfeld-Mikroskopie (SNTM)	
		Scanning Kelvin Microscopy (SKM)		
			akustische Raster-Nahfeld-Mikroskopie (SNAM)	

beeinflusst. Für Abbildungen, die bei einer bestimmten Tunnelspannung unter konstantem Strom aufgenommen wurden, wird manchmal auch der Ausdruck Constant Current Topography (CCT) verwendet. Da Elektronen nur von besetzten Zuständen in der Spitze in unbesetzte Zustände in der Probe oder umgekehrt, je nach Polarität der Spannung, tunneln können, geben STM-Bilder bei kleinen Tunnelspannungen im Allgemeinen die Kontur der lokalen Zustandsdichte nahe dem Fermi-Niveau (LDOS_{E_F}) wieder. Für weitere Informationen zu Theorie, Gerätetechnik und Anwendungen der STM seien ein Buch von D. Bonnell^[6] und die darin genannten Literaturstellen empfohlen.

3.1.2. Analytische Charakteristika

Die wichtigsten analytischen Merkmale sind folgende:

- Bildflächen von über $100\ \mu\text{m}^2$ bis in den atomaren Bereich können in einem Experiment abgedeckt werden. Daher kann man zunächst ein Überblicksbild aufnehmen und anschließend bestimmte Strukturdetails mit höherer Auflösung untersuchen. Das ist ein wesentlicher Vorteil für viele topographische und metrologische Untersuchungen, weil bei einem Transfer der Probe zwischen Instrumenten, die in verschiedenen Größenbereichen arbeiten, das Wiederauffinden einer Pro-

benstelle schwierig oder sogar unmöglich ist.

- Da die Information im Realraum erhalten wird, können lokale Defekte (z.B. monoatomare Defekte, Stufen, Versetzungen) direkt untersucht werden. Das ist ein großer Vorteil gegenüber Beugungstechniken, die ausgedehnte periodische Strukturen erfordern und nur gemittelte Informationen liefern.
- Da sich die Position der Spitze in allen Raumrichtungen mit Piezostellelementen einstellen lässt, kann aus den Bildern Information zur dreidimensionalen Topographie der Oberfläche herausgelesen

werden. Das gilt natürlich nur, wenn lokale elektronische Effekte vernachlässigbar sind, weil die STM genau genommen ein Bild der LDOS_{E_F} erzeugt. Die Vereinfachung ist jedoch gerechtfertigt, wenn man Oberflächentopographien mit Rauigkeiten weit über dem atomaren Niveau (z.B. einige Nanometer oder mehr) betrachtet. Auf atomarer Skala ist die Interpretation im Allgemeinen wesentlich komplizierter, und eine Unterscheidung zwischen elektronischer Struktur und Topographie erfordert sowohl spezielle Experimente (z.B. Vergleich von Bildern, die bei unterschiedlichen Spannungen und Polaritäten aufgenommen wurden) als auch Vergleiche von experimentellen Ergebnissen mit Berechnungen.

- Die STM kann nicht nur im Ultrahochvakuum (UHV), sondern auch unter Umgebungsbedingungen durchgeführt werden, wodurch ihre Anwendbarkeit deutlich erweitert wird. Obwohl natürlich viele grundlegende Studien von Oberflächen unter gut definierten (Ultrahoch-) Vakuumbedingungen durchgeführt werden müssen, sind Untersuchungen in Flüssigkeiten oder an Luft für die analytische Chemie von großem Interesse, weil so viele Materialien, von Metallen und Halbleitern über organische bis zu biologischen Proben, in ihrer natürlichen Umgebung untersucht werden können. In vielen Fällen ist auch die Probenvorbereitung einfach. Manchmal können Proben direkt in ihrem ursprünglichen Zustand untersucht werden, manchmal müssen nur frische Bruchflächen erzeugt werden. Eine wesentliche Einschränkung ist allerdings die Tatsache, dass Isolatoren im Allgemeinen nicht untersucht werden können. Nur wenn Isolatoren in dünnen Schichten auf einem leitenden Substrat vorliegen, ist in manchen Fällen ihre Untersuchung möglich. Eine weitere wichtige Perspektive der Möglichkeit, unter Umgebungsbedingungen zu messen, sind In-situ-Untersuchungen von Oberflächenprozessen an Fest/flüssig- und Fest/Gas-Grenzflächen. Solche Prozesse können mithilfe spezieller elektrochemischer Zellen

auch unter kontrolliertem elektrochemischem Potential verfolgt werden. Diese Option wird in der Literatur oft als elektrochemische STM (ECSTM) bezeichnet. In ECSTM-Experimenten müssen jedoch Vorkehrungen getroffen werden (z.B. Beschichtung der STM-Spitze mit einer isolierenden Polymerschicht), um den Faraday-Strom zwischen Spitze und Elektrolytlösung zu unterdrücken. Die ECSTM wurde bereits erfolgreich eingesetzt, um Prozesse an Elektrodenoberflächen auch mit atomarer Auflösung zu untersuchen (siehe z.B. Lit. [6], zit. Lit., und Lit. [7]).

- Wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt, kann mit den SPM-Techniken auch spektroskopische Information erhalten werden. In Falle der STM ist das die Rastertunnelspektroskopie (STS), für die es zwei grundsätzliche Varianten gibt. In der ersten Variante wird die Spitze über der interessierenden Probenstelle positioniert, und der Tunnelstrom wird als Funktion der Spannung gemessen, ohne die Spitzenposition zu verändern. Auf diese Weise kann ein Spektrum der elektronischen Zustandsdichte erhalten werden, weil bei Veränderung der Spannung unterschiedliche besetzte oder unbesetzte Zustände am Tunnelprozess beteiligt sind. Durch den Einsatz chemisch modifizierter Spitzen und die Nutzung des inelastischen Tunnelns konnten auch chemische Informationen über schwingungsspektroskopische Daten erhalten werden.^[8] Methodisch gesehen ist für diese Technik die Bezeichnung *Rastertunnelmikroskopie* nicht ganz korrekt, weil in Wirklichkeit eine Punktspektroskopie betrieben wird. Trotzdem wird diese Technik in Verbindung mit der STM diskutiert, weil, wie bereits erwähnt, dieselben Instrumente verwendet werden. Die andere Möglichkeit, spektroskopische Informationen zu erhalten, ist die simultane Aufnahme von STM-Bildern bei verschiedenen Spannungen. Das kann durch Punktspektroskopie für jeden einzelnen Bildpunkt erreicht werden oder durch Modulation der Spannung während des Rasterns. In der Litera-

tur wird diese Technik manchmal als Current Imaging Tunneling Spectroscopy (CITS) bezeichnet. Als Beispiel für die Unterscheidung zweier chemischer Spezies (in diesem Fall Ga- und As-Atome auf einer GaAs(110)-Oberfläche) in atomar aufgelösten STM-Bildern durch simultane Aufnahme von zwei Bildern bei entgegengesetzter Polarität sei eine Arbeit von Feenstra et al.^[9] zitiert. Das spektroskopische Potenzial der STM wurde in sehr vielversprechender Art auch in der Gruppe von Avouris^[10–12] zum Studium der Oberflächenchemie auf Silicioberflächen genutzt. Katalytisch relevante Prozesse, wie die Adsorption von CO auf verschiedenen Oberflächen,^[13,14] und die temperaturabhängige Adsorption von Sauerstoff auf Aluminium^[15] wurden in der Gruppe von Varga untersucht. In dieser Gruppe wurden auch sehr schön die Möglichkeiten zur chemisch aufgelösten Rastertunnelmikroskopie mit atomarer Auflösung aufgezeigt.^[16–21] Obwohl natürlich solche Studien unter optimierten und gut definierten Bedingungen in einer UHV-Kammer durchgeführt werden müssen, zeigen sie sehr deutlich das große Potenzial der STM zur Aufklärung der Mechanismen chemischer Oberflächenreaktionen auf atomarer Skala. Spektroskopische Informationen wurden auch durch STM-Untersuchungen unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes gewonnen.^[22] Schließlich sei erwähnt, dass durch Spektroskopie bei tiefen Temperaturen auch spezielle magnetische Phänomene (Kondo-Effekt) untersucht wurden.^[23]

- Obwohl kein Zweifel am faszinierenden Potenzial der STM in der Analytischen Chemie besteht, muss auch auf ihre Grenzen und auf mögliche Artefaktquellen hingewiesen werden. Eine wesentliche Limitierung für viele analytische Anwendungen ist die Tatsache, dass Isolatoren nicht untersucht werden können. Eine Ausnahme bilden ultradünne Filme auf leitenden Substraten.^[24,25] Des Weiteren ist der Einfluss der Spitze auf die Messda-

ten zu nennen. Im Falle der STM müssen hier sowohl elektronische als auch geometrische Effekte berücksichtigt werden. Elektronische Effekte spielen eine wesentliche Rolle bei atomar aufgelösten Untersuchungen. Die Vernachlässigung der chemischen Natur des Apexatoms an der Spitze ist nur eine erste Näherung, die davon ausgeht, dass die Oberflächenzustände der Probe und die Tunnelstrombilder nicht von der elektronischen Struktur der Spitze beeinflusst werden. Für weitere Informationen zum Thema Interpretation von STM-Bildern sei auf Lit. [6] und darin enthaltene Zitate hingewiesen. Geometrische Effekte und andere Artefaktquellen, z.B. Schwingungen und Drifts, werden in Abschnitt 3.2 behandelt.

3.1.3. Verwandte Techniken

Neben den bisher beschriebenen Signalerzeugungsmechanismen wurden auch andere genutzt, um mithilfe der STM Informationen über Oberflächen zu erhalten. So kann die Oberflächentopographie auch aufgezeichnet werden, ohne dass zwischen Spitze und Probe eine Spannung angelegt wird. In diesem Fall wird das thermische Rauschen des Stroms zur Signalerzeugung genutzt.^[26–28] Diese Methode wurde als Scanning Noise Microscopy (SNM) und Scanning Noise Potentiometry (SNP) bezeichnet.

Das Betreiben der STM mit Wechselstrom eröffnet die Möglichkeit, Isolatoren zu untersuchen. Diese Technik wurde als Alternating Current STM (AC-STM)^[29] bezeichnet.

Bei der Scanning Chemical Potential Microscopy (SCPM)^[30] wird die Spannung über den Tunnelkontakt durch einen thermischen Gradienten zwischen chemisch unterschiedlicher Probe und Spitze erzeugt. Dadurch können hochaufgelöste Abbildungen der thermoelektrischen Änderungen des Gradienten des chemischen Potentials mit der Temperatur erhalten werden. Ein thermischer Gradient kann auch durch Bestrahlung mit Laserlicht in einem bestimmten Wellenlängenbereich erzeugt werden. Diese Technik wurde

als Scanning Optical Absorption Microscopy (SOAM)^[31] bezeichnet.

Durch Einsatz von spinpolarisierten Elektronen, die mit ferromagnetischen Spitzen erzeugt werden können, kann mit der STM auch Oberflächenmagnetismus hochaufgelöst untersucht werden.^[32–39] Für diese Technik wurde die Bezeichnung Spin-polarized STM (SPSTM) vorgeschlagen.

Die Ballistic Electron Emission Microscopy (BEEM) ist eine Modifikation der STM, mit der die Höhen von Potentialbarrieren an Grenzflächen von Schichtsystemen untersucht werden können.^[6,40,41] Die Probe besteht aus mindestens zwei Schichten, die eine Grenzfläche bilden (z.B. Metallschicht auf einem Halbleiter), die als Potentialbarriere für die Ladungsträger fungiert. Wird zwischen Spitze und Metallschicht eine Spannung angelegt, können Elektronen über den Tunnelkontakt tunneln und werden in die Metallschicht „injiziert“. Einige dieser Elektronen können sich durch die Metallschicht bis zur Grenzfläche bewegen, ohne dass sie gestreut werden. Falls sie genug Energie haben, um in den Halbleiter (Kollektor) einzutreten, kann ein Kollektorstrom gemessen werden. Die Energie der Elektronen kann durch Veränderung der Tunnelspannung zwischen Spitze und Metallschicht eingestellt werden. Auf diese Weise kann der Transport von Ladungsträgern durch verdeckte Grenzflächen spektroskopiert werden.

In weiteren Modifikationen der STM wird mit elektromagnetischer Strahlung gearbeitet.^[42–54] Hier muss zwischen zwei grundlegenden Konzepten unterschieden werden: der Messung von Photonen, die im Tunnelkontakt durch inelastische Tunnelprozesse erzeugt werden,^[46,50,52,53] und der Erzeugung von elektrischen Strömen durch Bestrahlung des Tunnelkontakts.^[43–45,47–49] Für die erste Gruppe von Methoden wird die Bezeichnung Photon Emission Scanning Tunneling Microscopy (PESTM) empfohlen, für die zweite Photon-Assisted Scanning Tunneling Microscopy (PASTM). Für die PESTM wurde auch die Bezeichnung STOM (Scanning Tunneling Optical Microscopy) verwendet.^[53] Die empfohlene Terminologie trägt jedoch dem Unterschied zwischen Emissions- und Bestrahlungstechniken besser Rech-

nung. Darüber hinaus bietet sie auch eine bessere Abgrenzung dieser Techniken von optischen Nahfeldtechniken und Verfahren mit dem evaneszenten Feld. Zur genaueren Bezeichnung der Methode kann die eingesetzte Strahlungsquelle in den Namen aufgenommen werden (z.B. LASTM für Laser-Assisted STM).

Zusätzlich zu diesen modifizierten STM-Techniken können in der Literatur auch Akronyme für Instrumente gefunden werden, bei denen die STM mit einer anderen Technik kombiniert wird. Als Beispiel sei die Field Ion STM (FI-STM) erwähnt, mit deren Hilfe die STM-Spitze über Feldionenmikroskopie (FIM) in situ untersucht werden kann.^[55]

Schließlich sollte erwähnt werden, dass die Bezeichnung STM auch in Verbindung mit Techniken verwendet worden ist, bei denen kein Tunneln von Elektronen auftritt. So wurde die Bezeichnung Photon Scanning Tunneling Microscopy (PSTM) für eine Methode verwendet, die eigentlich der optischen Raster-Nahfeld-Mikroskopie zuzuordnen ist und daher dort beschrieben werden wird.

3.2. Rasterkraftmikroskopie (SFM)

Das gemeinsame Funktionsprinzip von Rasterkraftmikroskopen ist die Messung von Kräften zwischen einer scharfen Spitze und der Probenoberfläche während die Spitze über die Oberfläche gerastert wird. Solche Kräfte können gemessen werden, indem die Spitze an einem Federhebel [cantilever] angebracht wird, dessen Auslenkung detektiert werden kann. Die Kraft ist proportional der Auslenkung und hängt von der Federkonstante des Hebels ab (Hooksches Gesetz). Dieses Detektionsprinzip kann als quasi-statischer Betriebsmodus (manchmal auch als DC-Modus bezeichnet) betrachtet werden. Eine andere Option ist die Anregung des Federhebels zu einer bestimmten Schwingungsfrequenz (manchmal auch als dynamischer Modus oder AC-Modus bezeichnet). Treten nun Wechselwirkungskräfte oder Kraftgradienten auf, wird die Schwingung gedämpft. Die daraus folgende Änderung der Resonanzfrequenz

oder der Schwingungsamplitude ist ein sehr empfindliches Maß für die Kraft, die auf die Spitze wirkt. Diese Betriebsweise wird oft als Dynamic Force Microscopy (DFM)^[56–59] bezeichnet. Für einen Überblick zum Thema Kraftmessung und SFM im Allgemeinen sei das Buch von Sarid^[60] empfohlen.

Die SFM-Techniken können auch hinsichtlich der genutzten Kräfte (z.B. Kontakt, Nichtkontakt, interatomar, elektrisch, magnetisch) näher klassifiziert werden. In der Literatur ist zudem die Unterscheidung zwischen Scanning Attractive Force Microscopy (SAFM^[61]) und Repulsive Force Microscopy zu finden. Diese Terminologie ist jedoch für eine systematische Klassifizierung weniger geeignet, weil sie die Natur des Wechselwirkungssignals und die Art der Kraftdetektion nicht so gut beschreibt. Bei der Benennung spezifischer SFM-Techniken wird der Ausdruck „Scanning“ üblicherweise nicht verwendet (z.B. Atomic Force Microscopy (AFM) statt Scanning Atomic Force Microscopy (SAFM) oder Electric Force Microscopy (EFM) statt Scanning Electric Force Microscopy (SEFM)). Dies ist nicht ganz in Einklang mit der allgemeinen Terminologie für SPM-Techniken, die in der Einleitung vorgeschlagen wurde. Da jedoch die kürzeren Begriffe gut eingeführt, ausreichend beschreibend und eindeutig sind, scheint eine Änderung der Terminologie hier nicht sinnvoll.

Wenn zusätzliche Informationen aus Kraftwechselwirkungen zwischen Spitze und Probe (z.B. über Kraft-Abstands-Kurven (siehe Abschnitt 3.2.1.1)) gewonnen werden, ist die Bezeichnung Kraftspektroskopie üblich.

3.2.1. Contact Mode Scanning Force Microscopy (CM-SFM)

3.2.1.1. Atomic Force Microscopy (AFM)

Bis heute hat neben der STM die AFM, die von Binnig, Quate und Gerber^[62] im Jahr 1986 vorgestellt wurde, die größte Bedeutung unter allen SPM-Techniken erlangt.^[60, 63–67]

Prinzip

Bei der AFM steht die Spitze, die auf einem weichen Federhebel montiert ist, während des Rasterns ständig mit der Probenoberfläche in Kontakt. Da

bei der konventionellen Kontakt-AFM weder die Spitze noch die Probe zum Schwingen angeregt wird, spricht man oft auch vom quasi-statischen DC-Modus. Abbildung 2 zeigt schematisch

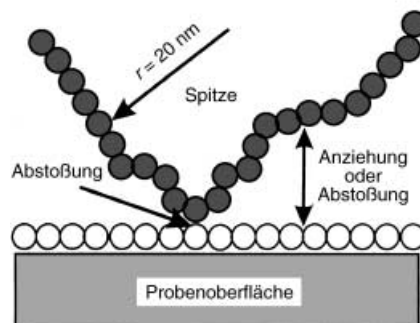


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Kräfte im Kontaktbereich zwischen Spitze und Probenoberfläche. Die Kreise symbolisieren die Proben- bzw. Spitzenatome.

die Kräfte, die auftreten, wenn eine Oberfläche von einer feinen Spitze berührt wird. Im Kontaktbereich des Spitzenapex (im Idealfall ein einziges Atom) tritt stets Abstoßung aufgrund der Überlappung der Elektronenhüllen von Spitzen- und Probenatomen auf. Da diese interatomaren abstoßenden Kräfte von sehr kurzer Reichweite und somit auf eine extrem kleine Fläche beschränkt sind, können sie zur Charakterisierung der Probenoberfläche mit atomarer Auflösung genutzt werden. Neben diesen Kräften mit kurzer Reichweite gibt es auch Kräfte mit längerer Reichweite (z.B. elektrische Kräfte, magnetische Kräfte, Van-der-Waals-Kräfte), die anziehend oder abstoßend sein können. Diese Kräfte wirken über größere Flächen und sind daher für eine Mikroskopie mit atomarer Auflösung nicht geeignet. Tatsächlich sind sie sogar unerwünscht, weil sie die Gesamtkraft auf den Federhebel erhöhen und damit zu einer möglichen Deformation oder sogar Zerstörung der Probe beitragen, besonders bei weichen und empfindlichen Materialien.

Ein Beispiel für solche unerwünschten Kräfte, die immer auftreten, wenn Proben an Luft untersucht werden, sind Kapillarkondensationskräfte. Diese Kräfte kommen durch eine Benetzung der Spitzenoberfläche durch den flüssigen Adsorbatfilm an der Probenober-

fläche zustande. Durch diese Kräfte wird die Spitze zur Probenoberfläche hingezogen, wodurch die abstoßenden interatomaren Kräfte im Kontaktbereich des Spitzenapex signifikant erhöht werden (typischerweise um den Faktor 100). Daher müssen Vorkehrungen getroffen werden (z.B. Messung in Flüssigkeit), um diese Kräfte zu eliminieren oder zu reduzieren, damit AFM-Bilder bei geringstmöglichen abstoßenden interatomaren Kräften aufgenommen werden können.

Abbildung 3 zeigt eine Kraft-Abstands-Kurve, die den Arbeitsbereich der AFM illustriert. An solchen Kurven lässt sich ablesen, wie sich die

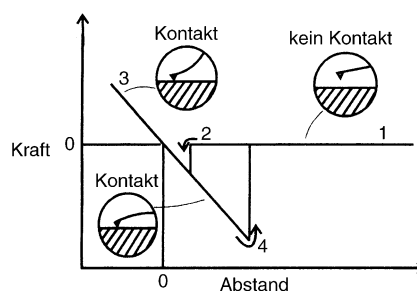


Abbildung 3. Kraft-Abstands-Kurve zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen AFM-Spitze und Probenoberfläche. Für Einzelheiten siehe Text.

Kraft verändert, wenn sich Probenoberfläche und Spitze näher kommen. Bei großen Abständen tritt keine Wechselwirkung auf, und die beobachtete Kraft ist null (gerade Linie zwischen den Punkten 1 und 2, wenn man annimmt, dass keine Kräfte langer Reichweite, wie Kräfte durch elektrostatische Aufladung, auftreten). Bei der Position 2 tritt aufgrund anziehender Van-der-Waals-Wechselwirkungen spontan Kontakt zwischen Spitze und Probenoberfläche auf. Wird die Probe weiter in Richtung Spitze bewegt, wird die Gesamtkraft auf den Federhebel abstoßend. Wenn die Probe wieder zurückgezogen wird, nimmt die Kraft entlang der Linie zwischen den Punkten 3 und 4 ab. Unterhalb der Nulllinie wird die Nettokraft auf den Federhebel anziehend, weil die Spitze durch Adhäsion an der Probenoberfläche festgehalten wird. Am Punkt 4 halten sich Adhäsionskräfte und Federhebelspannung gerade die Waage; sobald die Probe noch etwas

weiter weggezogen wird, „springt“ die Spitze von der Probenoberfläche weg. Bei AFM-Messungen kann die Kraft zwischen den Punkten 3 und 4 eingestellt werden – nach Möglichkeit nahe am Punkt 4, um die Kontaktkraft während der Messung möglichst klein zu halten. Die Größe der Adhäsionskraft (Pull-off-Kraft) kann durch Messung in Flüssigkeit deutlich reduziert werden, wie bereits oben erwähnt wurde. Ein allgemeiner Überblick über Kraftwechselwirkungen ist in einem Buch von Israelachvili zu finden.^[68]

Auch wenn es nicht Ziel dieses Beitrags ist, eine Übersicht über die AFM-Gerätetechnik zu geben, sei hier doch eine der Möglichkeiten, Kräfte zu messen, beschrieben: das Lichtehebelverfahren,^[60,69] das in kommerziellen Geräten weit verbreitet ist und eine Reihe analytischer Vorteile bietet. Abbildung 4 bietet eine schematische Darstellung dieses Verfahrens. Ein Laserstrahl wird auf die Rückseite des Federhebels fokussiert, und der reflektierte Laserstrahl wird mit einer doppelsegmentigen Photodiode detektiert. Während des Rasterns wird der Federhebel abhängig von der Oberflächentopographie unterschiedlich stark ausgelenkt. Dadurch ändert sich auch die Spiegelebene für den Laserstrahl und damit seine Position auf der Photodiode. Daher ist das Differenzsignal zwischen beiden Diodenhälften ein sehr empfindliches Maß für die Hebelauslenkung. Ein Vorteil dieses Systems besteht darin, dass auch problemlos in Flüssig-

keiten gemessen werden kann, weil eine Beeinflussung der Auslenkungsmessung durch die Bedingungen in der Flüssigkeitszelle ausgeschlossen werden kann. Mit diesem Messsystem kann auch atomare Auflösung erzielt werden. Heute werden kommerziell erhältliche, mikrostrukturierte Federhebel^[70,71] (Siliciumnitrid oder einkristallines Silicium) mit Federkonstanten von weniger als 0.1 Nm^{-1} und Resonanzfrequenzen von über 100 kHz verwendet, die Messungen bei Kräften typischerweise im Bereich von 1 nN (unter Flüssigkeiten) bis 100 nN (an Luft) erlauben. Weitere Informationen sind in einem Buch von Sarid^[60] und in einer Reihe von Übersichtsartikeln zu finden.^[63–67]

Analytische Charakteristika

- Der große Bereich an möglichen Rastergrößen und die Tatsache, dass Information im Realraum erhalten wird, wurden bereits bei der STM im Abschnitt 3.1 besprochen. Die entsprechenden Aussagen gelten auch für die AFM.
- Was den Informationsgehalt der AFM-Bilder betrifft, so ist ihre Interpretation als Oberflächentopographie sowohl auf atomarer Skala als auch bei größeren Dimensionen in guter Näherung gerechtfertigt. Das liegt daran, dass anders als bei der STM die interatomare abstoßende Kraft durch die gesamte Ladungsdichte bestimmt ist, die sphärisch um die Atomkerne verteilt ist. Daher kann in erster Näherung

der Einfluss von elektronischen Inhomogenitäten auf die Bildstrukturen vernachlässigt werden, was die Interpretation erleichtert. Diese Tatsache macht die AFM zu einem leistungsfähigen metrologischen Werkzeug (z.B. zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit oder zur Messung von Breite, Höhe und Tiefe einzelner Strukturen), weil die Bilder direkte Tiefeninformation enthalten. Das ist ein wichtiger Vorteil z.B. gegenüber der Sekundärelektronenmikroskopie. Wegen der direkten Tiefeninformation ist es auch möglich, durch numerische Integration der Bilddaten Volumina von abgeschiedenen Strukturen zu bestimmen, womit aus AFM-Bildern z.B. Größenverteilungen von Aerosolpartikeln erhalten werden können.^[72,73]

- Da keine leitfähigen Proben notwendig sind, können auch Isolatoren direkt untersucht werden, ohne dass sie beschichtet werden müssen. Das ist eine wesentliche Vereinfachung der Probenpräparation, und Artefakte durch die Beschichtung können vermieden werden. Das kann wiederum für ein breites Probenspektrum von anorganischen Isolatoren bis zu organischen und biologischen Materialien als Vorteil gegenüber der Sekundärelektronenmikroskopie gesehen werden.
- Da AFM-Messungen nicht nur im UHV,^[74] sondern auch in Flüssigkeiten durchgeführt werden können, ist die Technik ein wertvolles Werkzeug zur In-situ-Untersuchung von Oberflächenprozessen wie Korrosion, Kristallwachstum oder Filmabscheidung.^[75–83] Des Weiteren wurden durch In-situ-AFM-Messungen auch Veränderungen an biologischen Proben und an Aerosolpartikeln als Funktion der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung untersucht.^[84,85] In-situ-Untersuchungen von Oberflächenprozessen unter definierten Flüssigkeiten bieten aber auch die Möglichkeit der chemischen Klassifizierung z.B. von Aerosolpartikeln im Submikrometerbereich.^[86] Ähnlich wie bei der STM können auch hier In-situ-Messungen bei kontrolliertem elektrochemischem Potential durchgeführt

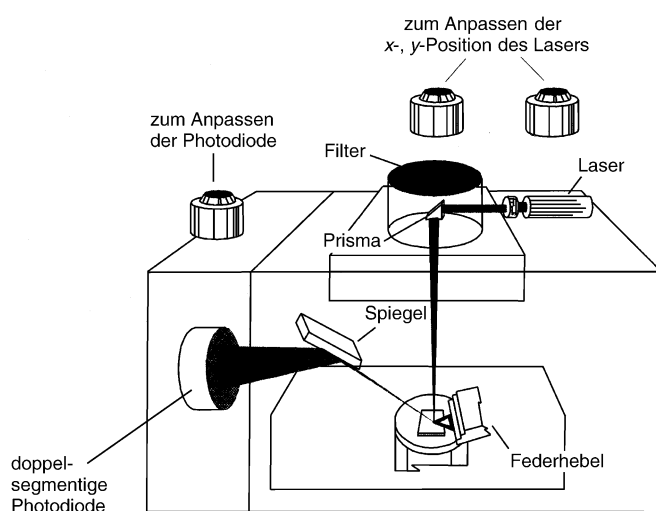


Abbildung 4. Schematische Darstellung der Auslenkungsmessung, wie sie in dem Digital-Instruments-Gerät NanoScope III AFM realisiert ist.

werden (Electrochemical AFM (ECAFM)).^[87,88] Ein weiterer interessanter Aspekt der Messung und Probenpräparation unter Flüssigkeiten ist der Schutz empfindlicher Oberflächen durch inerte Medien. So können Atmosphäreneinflüsse (z.B. Oxidation, Feuchtigkeit) durch In-situ-Präparation und -Messung vermieden werden.^[75]

- Beim Einsatz des AFM und bei der Interpretation der Messergebnisse muss man aber auch mögliche Artefakte berücksichtigen, die durch Schwingungen, Veränderungen von Oberflächenmerkmalen durch die Spitzengeometrie, Drifts, Deformation oder Zerkratzen der Probenoberfläche durch die Auflagekraft der Spitze verursacht werden können.

Schwingungen können Rauschen oder periodische Strukturen in den Bildern verursachen. Schwingungsartefakte lassen sich durch die Veränderung von experimentellen Parametern wie Rastergeschwindigkeit, Rastergröße, Rasterwinkel und Verstärkungsparameter für die Rückkopplungsschleife aufklären. Bildstrukturen, die sich signifikant mit diesen Parametern ändern, geben die Oberflächentopographie der Probe nicht korrekt wieder. Diese störenden Schwingungen können durch entsprechende Isolationsbühnen oder schalldichte Kammern eliminiert oder zumindest reduziert werden.

Die meisten Spitzenartefakte kommen dadurch zustande, dass die Spitzengeometrie ein perfektes Abtasten der Oberfläche mit dem Apex nicht erlaubt, besonders dann, wenn Proben im Nanometer- und Mikrometermaßstab untersucht werden. Das kann beispielsweise der Fall sein, wenn steile Kanten, enge Gräben oder Löcher untersucht werden sollen. Dann wird die beobachtete Steigung einer Kante oder die Tiefe eines Loches von der Abtastspitze verfälscht. Objekte, die schärfer sind als die Spitze (z.B. Nadelkristalle, die aus der Probenoberfläche herausragen), erzeugen ein Bild von der Spitze. Bei Verwen-

dung von pyramidenförmigen Sili-ciumnitridspitzen^[70] werden dann im Bild Pyramidenstrukturen beobachtet, die perfekt parallel zur Abtastspitze ausgerichtet sind, wodurch dieses Artefakt auch relativ leicht erkannt werden kann. Weitere Artefaktquellen sind Mehrfachspitzen und asymmetrische Spitzen. Mehrfachspitzen erzeugen mehrere Bilder einer einzelnen Struktur, asymmetrische Spitzen führen zu einer richtungsabhängigen Auflösung. Letzteres Artefakt kann durch Vergleich von Bildern, die bei unterschiedlichen Rasterorientierungen aufgenommen wurden, erkannt oder minimiert werden. Stumpfe Spitzen verschlechtern die Bildauflösung und führen häufig zu charakteristischen quadratischen Strukturen, die parallel ausgerichtet sind und den stumpfen Apex der Spitze wiedergeben. Wenn solche unplausiblen Beobachtungen gemacht werden, muss man bei der Interpretation der erhaltenen Daten besonders vorsichtig sein und möglichst Bilder, die unter verschiedenen Bedingungen aufgenommen wurden, vergleichen oder weitere Analysentechniken in die Interpretation einbeziehen. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass Giessibl et al.^[89] subatomare Strukturen auf einer Si(111)-(7×7)-Oberfläche gefunden haben, die durch Überlagerung der atomaren Oberflächentopographie der Probe mit zwei Atomorbitalen der Messspitze erklärt werden konnten.

Eine Deformation oder gar Zerstörung der Probe muss vor allem bei der Untersuchung weicher Materialien berücksichtigt werden. Daher ist eine Minimierung der Auflagekraft wichtig. Anhaltspunkte über die Auswirkung dieses Artefakts kann man durch wiederholtes Rastern derselben Probenstelle bekommen und durch Beobachtung früher durchrasteter Bereiche in einem größeren Untersuchungsgebiet. Instabile und nicht reproduzierbare Messungen sowie das Erzeugen von Kratern sind ein warnender Hinweis auf artefaktbehaftete Ergebnisse. In diesem Fall sollte die Kraft weiter

verringert oder andere SFM-Techniken (siehe Abschnitt 3.2.1.2) eingesetzt werden.

Laterale Drifts (z.B. thermische Drifts) führen zu einer Bildverzerrung. Sie können durch die Veränderung von Rasterparametern, wie Rastergeschwindigkeit oder Rasterwinkel, und durch den Vergleich von „Aufwärts“- und „Abwärts“-Rastern erkannt werden. Bei hochauflösenden Messungen können thermische Drifts durch hohe Rastergeschwindigkeiten reduziert werden. Im Mikrometermaßstab sind Drifts normalerweise kein großes Problem.

Verwandte Techniken

Reibungskraftmikroskopie (FFM):

Da bei der AFM die Spitze während des Rasterns mit der Oberfläche permanent in Kontakt ist, treten auch Scherkräfte auf, die zu einer Torsion des Federhebels führen. Daher wird häufig auch der Ausdruck Lateral Force Microscopy (LFM) verwendet. Diese Kräfte können dazu genutzt werden, die Reibung zwischen Spitze und Probe zu messen. In der Praxis können solche Kräfte mit üblichen AFM-Geräten ermittelt werden, wobei ein vierfach geteilter Photodetektor (siehe auch das Prinzip der AFM in Abbildung 4) genutzt wird, um Auslenkung und Torsion des Federhebels gleichzeitig aufzuzeichnen. Auf diese Art können Topographie- und Reibungsbilder simultan aufgenommen werden. Das eröffnet die Möglichkeit, materialspezifische Informationen (Reibung) einzelnen Strukturmerkmalen in den Topographiebildern zuzuordnen. Dies ist vor allem für die Forschung im Bereich der Tribologie von Interesse,^[90–94] kann aber auch zur Erleichterung der Interpretation von Topographiebildern genutzt werden.^[95]

Das Prinzip der FFM wurde auch in einer weiteren Entwicklung, der Chemical Force Microscopy (CFM) genutzt.^[96] Bei dieser Methode wird eine chemisch modifizierte Spitze verwendet, die gegenüber unterschiedlichen chemischen Oberflächenzusammensetzungen sensitiv ist. Auf diese Art konnte Bildkontrast durch Änderung der Adhäsion (und damit auch der

Reibung) zwischen Spitze und Probe erzeugt werden.

Krottil et al.^[97] haben die dynamische Reibungskraftmikroskopie (DFFM) als eine Kombination der Reibungskraftmikroskopie mit Lock-in-Techniken vorgestellt. Am Beispiel verschiedener Polymersysteme gelang es ihnen damit, Reibungskräfte aus qualitativen Reibungskontrasten quantitativ abzuleiten.

Young's Modulus Microscopy (YMM):

Neben AFM-Messungen im konventionellen quasi-statischen DC-Modus sind auch welche im dynamischen AC-Modus, und dennoch im Kontaktmodus, möglich. Dieses Verfahren wurde von Maivald et al.^[98] vorgestellt. Dabei wird die Probenposition mit einer bestimmten Amplitude Δz moduliert, was zur Folge hat, dass auch die Spitzenposition mit einer bestimmten Amplitude $\Delta z'$ moduliert wird. Wegen der Deformation der Probe durch die Auflagekraft der Spitze ist $\Delta z'$ allerdings kleiner als Δz . Nur bei einer absolut steifen Probe wäre $\Delta z'$ gleich Δz . Daher ist der Unterschied zwischen den beiden Werten ein Maß für die Elastizität der Probe (in der Literatur findet sich übrigens auch der Ausdruck Elasticity Atomic Force Microscopy). Diese Methode wurde erfolgreich eingesetzt, um z.B. Kohlenstofffasern in einer Polymermatrix abzubilden.^[98]

Messung von Kraft-Abstands-Kurven:

Kraft-Abstands-Kurven wurden bereits beschrieben, um den Arbeitsbereich der konventionellen Kontakt-AFM zu erläutern (siehe Abbildung 3 und die zugehörige Erklärung). Hier sei nun darauf hingewiesen, dass man aus ihnen auch Informationen über die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probenoberfläche erhalten kann.^[99–110] So ist die Pull-off-Kraft ein Maß für die Adhäsion zwischen Spitze und Probe. Diese Kraft hängt allerdings stark vom Medium ab, in dem gemessen wird,^[104] und ihre Interpretation ist nicht einfach. Darüber hinaus weichen Kraft-Abstands-Kurven üblicherweise erheblich von dem schematischen Verlauf ab, der in Abbildung 3 dargestellt ist (siehe z.B. Lit. [104]). Insbesondere ist die gerade Linie bei der Kraft null im Nichtkontakt-Bereich nur eine Vereinfachung. Wechselwirkungen langer

Reichweite (z.B. Van der Waals, elektrostatisch) führen dazu, dass experimentelle Kraft-Abstands-Kurven in dieser Region charakteristische Merkmale zeigen. Das wurde beispielsweise genutzt, um elektrostatische Wechselwirkungen in Elektrolyten zu untersuchen.^[103] Die Messung der Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe wird auch als Kraftspektroskopie bezeichnet; sie wurde unter anderem zur Untersuchung von Polymeren und Biomolekülen eingesetzt.^[111–113]

Unter der Bezeichnung dynamische Kraftspektroskopie wurden Wechselwirkungen auch durch Messung von Resonanzfrequenzänderungen des schwingenden Federhebels ermittelt^[114] und modelliert.^[115]

3.2.1.2. Tapping Mode Atomic Force Microscopy (TM-AFM)

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Deformation oder Zerstörung der Probe bei AFM-Messungen ein Problem sein kann. Eine Verbesserung bietet die TM-AFM, wobei aber auch hier Veränderungen der Probe durch den Messprozess auftreten können.^[116] Bei der TM-AFM wird der Federhebel zur Schwingung im Bereich von einigen hundert Kilohertz angeregt (dynamischer AC-Modus). Das wird so gemacht, dass die Spitze dabei die Probenoberfläche leicht antippt [tapping]. Dadurch wird die Schwingungsamplitude des Federhebels gedämpft. Dieser Effekt kann zum Einstellen des Abstands zwischen Spitze und Probe und damit zum Abbilden der Topographie der Probe genutzt werden. Obwohl bei der TM-AFM die Spitze mit der Probenoberfläche nicht permanent in Kontakt ist, wird diese Technik den Contact-Mode-SFM (CM-SFM)-Techniken zugeordnet, weil während des Rasterns zumindest zeitweiliger Kontakt auftritt und dieser für die Signalerzeugung relevant ist. Was den Übergang vom Nichtkontakt-Bereich in den Kontaktbereich betrifft, sei auf Lit. [117–119] verwiesen. Weil bei der TM-AFM Scherkräfte eliminiert und vertikal wirkende Kräfte deutlich reduziert werden, ist diese Methode besonders, aber nicht nur, für die Untersuchung von empfindlichen Materialien (z.B. biologischen Oberflächen) oder instabilen Oberflächenstrukturen

(z.B. kleinen Partikeln) von Interesse.^[73, 86, 120–126]

Statt des Amplitudensignals kann bei der TM-AFM auch die Phasenverschiebung zwischen der Anregungsschwingung und der tatsächlich ausgeführten Schwingung des Federhebels gemessen werden. Diese Phasenverschiebung ist sehr stark von der Wechselwirkung zwischen Spitze und Probenoberfläche abhängig. Durch diese als Phase Imaging (PI) bezeichnete Methode können auch materialsspezifische Kontraste sichtbar gemacht werden, die durch Topographiebilder nicht zugänglich sind.^[79, 127–137] Ein wichtiger Aspekt bei der methodischen Weiterentwicklung solcher Analysentechniken zur Gewinnung chemischer Informationen im Submikrometermaßstab (chemische Nanoskopie) ist die Verfügbarkeit gut definierter Modellproben. Solche Proben können z.B. durch Selbstorganisationsprozesse hergestellt werden.^[137, 138]

3.2.1.3. Pulsed-Force-Mode Atomic Force Microscopy (PFM-AFM)

Bei der PFM-AFM^[139–142] wird der z-Piezowert (d.h. die Höhenposition der Probe) während des Rasterns mit einer Sinuswelle moduliert. Dabei wird ein gesamter Kraft-Abstands-Zyklus vom Kontakt- bis zum Nichtkontakt-Bereich durchlaufen. Aus der Zeitabhängigkeit des Kraftsignals können neben der Topographie auch elastische, elektrostatische und adhäsive Eigenschaften der Probe abgeleitet werden. Da laterale Kräfte dabei keine signifikante Rolle spielen, können auch empfindliche Proben an Luft und in Flüssigkeiten mit hoher Auflösung untersucht werden.

3.2.2. Non-Contact Scanning Force Microscopy (NC-SFM)

Für eine Reihe von Methoden, die Kräfte großer Reichweite zur Signalerzeugung nutzen, ist häufig der Ausdruck Non-Contact AFM zu finden. Dieser Ausdruck, der aus historischen Gründen existiert, sollte allerdings nicht für die Methoden verwendet werden, die im Nichtkontakt-Modus (adhäsiv) betrieben werden, weil wir die AFM als Methode definiert haben, die inter-

atomare, abstoßende Kräfte kurzer Reichweite zur Signalerzeugung nutzt, was impliziert, dass Kontakt auftritt. Für eine Diskussion des Übergangs vom Nichtkontakt- zum Kontaktbereich sei wieder auf Lit. [117–119] verwiesen.

Die NC-SFM wurde erstmals von Martin et al.^[143] beschrieben und wird üblicherweise im dynamischen AC-Modus betrieben, weil damit wesentlich geringere Kräfte (und Kraftgradienten) detektiert werden können. Wegen der langen Reichweite der beteiligten Kräfte wirken sie über eine größere Fläche als dies bei der AFM der Fall ist. Daher ist die erzielbare laterale Auflösung geringer.

3.2.2.1. Electric Force Microscopy (EFM)

Die EFM nutzt zur Signalerzeugung elektrostatische Kräfte oder Kraftgradienten zwischen einer leitenden Spitze und der Probe. Dabei wurden mehrere Betriebsweisen wie bimorph angeregter Hebel, probenangeregter Hebel und spannungsangeregter Hebel beschrieben. Da bei der letzten Variante der Hebel durch die modulierte elektrische Kraft zwischen Spitze und Probe angeregt wird, ohne dass ein zusätzlicher mechanischer Oszillator notwendig ist, wurde für diesen Fall auch die Bezeichnung Scanning Maxwell Stress Microscopy (SMM) verwendet. Eine Übersicht ist in Lit. [60] zu finden. Aus den elektrostatischen Kräften zwischen Probe und Spitze (Ladungen können auf die Spitze durch Anlegen einer Gleich- oder Wechselspannung zwischen Spitze und Probe aufgebracht werden) können Informationen über Oberflächenladungen^[144,145] (diese Technik wurde auch als Localized-Charge Force Microscopy bezeichnet), die Topographie, die Kapazität (dielektrische Konstante) und das Potential (siehe Lit. [60], zit. Lit.) erhalten werden. Weitere Begriffe, die im Zusammenhang mit der EFM existieren, sind die Scanning Surface Potential Microscopy (SSPM)^[146] und die Scanning Kelvin Probe Force Microscopy (SKFM)^[147] (oder Scanning Kelvin Microscopy (SKM)^[148]), die auf dem Prinzip der SMM beruhen und in der Lage sind, Oberflächenpotentiale und Kontaktpotentialunterschiede (CPDs) abzubilden.

3.2.2.2. Magnetic Force Microscopy (MFM)

Bei der MFM^[149] werden magneto-statische Kräfte als Folge einer Wechselwirkung magnetischer Domänen auf der Probenoberfläche mit einer magnetischen Spitze gemessen. Die Betriebsweisen (siehe auch Lit. [60]) sind denen der EFM ähnlich. Die MFM ist in erster Linie ein interessantes Werkzeug für die Untersuchung magnetischer Speichermedien,^[150] um magnetische Muster mit einer Auflösung von etwa 50 nm abzubilden.

3.2.2.3. Van der Waals Force Microscopy (VDWFM)

Die VDWFM^[151] ist eine weitere Möglichkeit, die Oberflächentopographie von Proben im Nichtkontakt-Bereich unter sehr schonenden Bedingungen abzutasten. Van-der-Waals-Kräfte (für einen guten Überblick siehe Lit. [68]) treten zwischen Atomen oder Molekülen stets auf. Sie können anziehend oder abstoßend sein und sind von interatomaren Abständen bis zu großen Distanzen von 10 nm und mehr wirksam. Die erzielbare Auflösung hängt vom Abstand zwischen Spitze und Probe ab. Bei größeren Abständen können weiche und empfindliche Proben unter minimalen Kräften gemessen werden, allerdings mit geringerer Auflösung. Mit abnehmendem Abstand nehmen Kraft und Auflösung zu. Sobald die schwingende Spitze die Oberfläche leicht berührt, ist der Messbereich der TM-AFM erreicht (siehe Abschnitt 3.2.1.2).

Da die meisten bisher beschriebenen Messungen im anziehenden Bereich durchgeführt wurden, findet man auch die Bezeichnung Scanning Attractive Modus Force Microscopy (SAFM).^[61] Daneben existiert der Begriff Non-Contact Dynamic Force Microscopy (Non-Contact DFM), weil die Signalerzeugung im dynamischen Modus erfolgt. Obwohl diese Begriffe im Prinzip korrekt sind, wird die hier vorgestellte Terminologie empfohlen, die spezifischer ist (Unterscheidung der Kraftarten) und besser in die allgemeine Systematik von SPM-Techniken, basierend auf der Natur des Wechselwirkungssignals, passt.

3.3. Optische Raster-Nahfeld-Mikroskopie (SNOM)

Bei der SNOM^[152–159] wird das Konzept der SPM dazu verwendet, eine dünne optische Faser in geringem Abstand über die Probenoberfläche zu rastern, wobei Nahfeldeffekte elektromagnetischer Strahlung zur Signalerzeugung genutzt werden. Obwohl der allgemeinere Ausdruck Scanning Optical Microscopy für Techniken gebräuchlich ist, bei denen optische Information durch Rastern einer Sonde erhalten wird, ist die spezifischere Bezeichnung SNOM vorzuziehen, weil sie der Tatsache besser Rechnung trägt, dass in der Rastersondenmikroskopie, so wie wir sie hier definiert haben, in erster Linie „Super-Auflösung“ durch Arbeiten im Nahfeldbereich angestrebt wird. Nur dadurch sind Auflösungen weit unter der Grenze von $\lambda/2$ (Abbesches Auflösungslimit) zugänglich. Auch gegenüber der ebenfalls anzutreffenden Bezeichnung Near-Field Scanning Optical Microscopy (NSOM) ist der Ausdruck SNOM vorzuziehen, da er besser mit der allgemeinen Terminologie der SPM-Techniken in Einklang ist. Schließlich sei erwähnt, dass die SNOM nicht nur zur analytischen Charakterisierung von Proben, sondern auch zur Photostrukturierung von Farbstofffilmen eingesetzt wurde.^[160]

3.3.1. Aperture Scanning Near-Field Optical Microscopy (ASNOM)

Bei der ASNOM wird eine schmale Apertur verwendet, die durch Beschichtung einer dünnen optischen Faser mit einem Metallfilm erzeugt wird, bei der nur die Aperturöffnung im Apexbereich der Faser unbeschichtet bleibt. Die Auflösung wird durch den Durchmesser dieser Apertur, der viel kleiner als die Wellenlänge der verwendeten Strahlung sein kann, und den Abstand zwischen Faser und Probe bestimmt. Kürzlich haben Hoppener et al.^[161] beschrieben, dass man die Topographie und die optischen Eigenschaften von SNOM-Aperturen simultan durch Messung von fluoreszierenden Nanopartikeln bestimmen kann. Auf diese Art können mechanische Veränderungen der Messsonde mitverfolgt werden. Beim gebräuchlichsten Betriebsmodus

wird die Probe über die Apertur bestrahlt, und das Licht wird nach der Wechselwirkung mit der Probe in Transmission analysiert.^[152] Daher wird für diese Technik die Bezeichnung Transmission ASNOM (T-ASNOM) vorgeschlagen.

Es ist aber auch möglich, die Probe großflächig zu bestrahlen und Licht mit der schmalen Apertur an der Sonde für die Detektion zu sammeln. Die Bestrahlung der Probe kann dabei von der Rückseite im Transmissionsmodus oder von oben im Reflexionsmodus erfolgen. Für diese Variante der ASNOM wird die Bezeichnung Collection ASNOM (C-ASNOM) empfohlen. Wenn die Photonen von einer selbstleuchtenden Probe stammen, kann auch der Begriff Emission ASNOM (E-ASNOM) als Alternative für C-ASNOM verwendet werden.

3.3.2. *Non-Aperture Scanning Near-Field Optical Microscopy (NA-SNOM)*

Die NA-SNOM funktioniert sehr ähnlich wie die gerade beschriebene ASNOM. Der wesentliche Unterschied besteht im Aufbau der Sonde. Statt metallbeschichteter Fasern werden hier spezielle Sonden (z.B. Tetraederspitzen) ohne Aperturen und mit Geometrien, die zu einer stark lokalisierten Emission von Licht führen, eingesetzt. Dadurch fällt die Größenlimitierung, die für metallbeschichtete Fasern normalerweise besteht, weg, womit extrem hohe Auflösungen bis zu 1 nm erreicht werden können.^[154,155]

3.3.3. *Evanescent-Field Scanning Near-Field Optical Microscopy (EF-SNOM)*

Im Unterschied zur ASNOM wird bei der EF-SNOM^[156–159] eine unbeschichtete optische Faser als Sonde verwendet. Diese Faser detektiert während des Rasterns das evaneszente Feld über der Probe, das durch totale innere Reflexion (TIR) beim Bestrahlen der Probe von der Rückseite erzeugt wird. Da das evaneszente Feld exponentiell mit dem Abstand von der Probenoberfläche abnimmt, ist es ein empfindliches Maß für den Abstand zwischen Spitze und Probe. Daher kann die Oberflächentopographie mit hoher Auflösung,

ähnlich wie bei der STM, abgebildet werden. Aus diesem Grund wird diese Technik meist als Photon Scanning Tunneling Microscopy (PSTM) (oder Analytical Photon Scanning Tunneling Microscopy (APSTM)),^[162,163] falls spektroskopische Informationen erhalten werden) bezeichnet, um die Analogie zwischen Elektronentunneln und „Photonentunneln“ hervorzuheben. Daneben findet sich auch die Bezeichnung Evanescent-Field Optical Microscopy (EFOM). Trotzdem wird der Ausdruck EF-SNOM empfohlen, weil er mit dem allgemeinen SPM-Nomenklaturschema konsistenter ist und Verwechslungen mit der STM ausgeschlossen werden.

3.3.4. *Scanning Near-Field Plasmon Microscopy (SNPM)*

Bei der SNPM^[164] werden Oberflächenplasmonen mit einem Laserstrahl resonant angeregt. Das resultierende optische Nahfeld wird mit einer spitzen Sonde lokal detektiert. Da die elastische Streuung von Plasmonen und der strahlungsfreie Energietransfer von der Spitze zur Probe stark vom Abstand abhängig sind, ist auch die Intensität des reflektierten Laserstrahls abstandsabhängig.

3.4. *Scanning Electrochemical Microscopy (SECM)*

Bei der SECM^[165,166] wird der Faraday-Strom, der über die Spitze fließt, zur Signalerzeugung verwendet. Da die Sonde seitlich mit einem Isolator beschichtet ist, kann ein Ionenstrom nur über den unbeschichteten Apex der Spitze fließen. Bei großem Spitzen-Proben-Abstand ist dieser Strom durch die hemisphärische Diffusion von Ionen zur Spitze bestimmt. Wird die Spitze nahe an eine Isolatoroberfläche herangeführt, ist diese Diffusion gehindert, und der Strom wird in Abhängigkeit vom Abstand kleiner. Wird die Spitze dagegen an eine leitende Oberfläche angenähert, an der ein Potential anliegt, bei dem ionische Produkte entstehen können, die zum Spitzenstrom beitragen können, wird ein höherer Strom gemessen. Damit ist diese Methode sowohl auf den Abstand zwischen Spitze und Probe

als auch auf die elektrochemische Natur der Probenoberfläche empfindlich, sodass elektrochemische Prozesse auf einer Vielfalt von Materialien untersucht werden können.^[167] Kranz et al.^[168] ist es gelungen, durch Integration einer Ultramikroelektrode in eine kommerzielle AFM-Spitze den Abstand zwischen Elektrode und Probenoberfläche genau zu kontrollieren. Damit ist eine exakte Trennung zwischen topographischer Information und elektrochemischem Signal möglich.

3.5. *Scanning Capacitance Microscopy (SCaM)*

Bei der SCaM^[169–172] wird eine spitze Elektrode im Abstand von einigen Nanometern über die Probenoberfläche gerastert. Dabei kann die Kapazität des Sonden-Proben-Systems als Abstandsmaß genutzt werden. Da die Kapazität zudem von den dielektrischen Konstanten der Probe und des Mediums zwischen Probe und Sonde abhängt, können mit der SCaM auch räumliche Veränderungen der dielektrischen Eigenschaften abgebildet werden. Des Weiteren sei erwähnt, dass die SCaM auch mit der AFM kombiniert wurde, um zusätzlich die Oberflächentopographie simultan aufzeichnen zu können.^[171]

3.6. *Scanning Ion-Conductance Microscopy (SICM)*

Bei der SICM^[173–175] wird die Spitze einer Mikropipette in einer Elektrolytlösung über die Probenoberfläche gerastert. Wird zwischen einer Elektrode im Innenraum der Pipette und dem Elektrolyten außerhalb eine Spannung angelegt, kann ein Ionenstrom fließen. Dieser Strom hängt von der Öffnung der Pipette, und damit auch vom Abstand zwischen Pipette und Probe, ab. Dies kann dazu genutzt werden, die Oberflächentopographie der Probe abzutasten, indem der Ionenstrom konstant gehalten wird. Die Methode wurde auch eingesetzt, um den Ionenstrom durch Membranporen zu messen. Korchev et al.^[176] haben die SICM mit der

SNOM kombiniert und damit lebende Zellen untersucht.

3.7. Scanning Thermal Microscopy (SThM)

Bei der SThM^[177] wird ein kleines Thermoelement am Ende einer Metallspitze über die Probenoberfläche gerastert. Damit können lokale Temperaturunterschiede abgebildet werden. Für diese Technik wurde auch der Begriff Scanning Thermal Profiler (SThP) verwendet.

3.8. Akustische Raster-Nahfeld-Mikroskopie (SNAM)

Bei der SNAM^[178,179] wird eine Ultraschallwelle, die von der Spitze bei Anregung beispielsweise durch einen Piezoschwinger ausgeht, auf die Probenoberfläche übertragen. Die transmittierte Amplitude ist nun ein Maß für den Abstand zwischen Spitze und Probe, aber auch für Materialeigenschaften wie die Oberflächenelastizität. Mit der SNAM kann die Oberflächentopographie einer Vielfalt von Materialien, auch von weichen wie Polymeren, untersucht werden.

4. Liste der englischen Akronyme

ACSTM	alternating current scanning tunneling microscopy
AFM	atomic force microscopy
ASNOM	aperture scanning near-field optical microscopy
BEEM	ballistic electron emission microscopy
C-ASNOM	collection aperture scanning near-field optical microscopy
CCT	constant current topography
CFM	chemical force microscopy
CITS	current imaging tunneling spectroscopy
CM-SFM	contact mode scanning force microscopy
CPD	contact potential difference

DDFM	dynamic friction force microscopy	SKM	scanning Kelvin microscopy
DFM	dynamic force microscopy	SMM	scanning Maxwell stress microscopy
E-ASNOM	emission aperture scanning near-field optical microscopy	SNAM	scanning near-field acoustic microscopy
ECAFM	electrochemical atomic force microscopy	SNM	scanning noise microscopy
ECSTM	electrochemical scanning tunneling microscopy	SNOM	scanning near-field optical microscopy
EFM	electric force microscopy	SNP	scanning noise potentiometry
EFOM	evanescent-field optical microscopy	SNPM	scanning near-field plasmon microscopy
EF-SNOM	evanescent field scanning near-field optical microscopy	SOAM	scanning optical absorption microscopy
FFM	friction force microscopy	SPM	scanning probe microscopy
FIM	field ion microscopy	SPSTM	spin-polarized scanning tunneling microscopy
FI-STM	field ion scanning tunneling microscopy	SSPM	scanning surface potential microscopy
LASTM	laser-assisted scanning tunneling microscopy	SThM	scanning thermal microscopy
LDOS	local density of states	SThP	scanning thermal profiler
LFM	lateral force microscopy	STM	scanning tunneling microscopy
MFM	magnetic force microscopy	STOM	scanning tunneling optical microscopy
NA-SNOM	non-aperture scanning near-field optical microscopy	STS	scanning tunneling spectroscopy
NC-SFM	non-contact scanning force microscopy	SXM	scanning probe microscopy
NSOM	near-field scanning optical microscopy	T-ASNOM	transmission aperture scanning near-field optical microscopy
PASTM	photon-assisted scanning tunneling microscopy	TIR	total internal reflection
PESTM	photon emission scanning tunneling microscopy	TM-AFM	tapping mode atomic force microscopy
PFM-AFM	pulsed-force-mode atomic force microscopy	UHV	ultra high vacuum
PI	phase imaging	VDWFM	van der Waals force microscopy
PSTM	photon scanning tunneling microscopy	YMM	Young's modulus microscopy
SAFM	scanning attractive force microscopy		
SCaM	scanning capacitance microscopy		
SCPM	scanning chemical potential microscopy		
SECM	scanning electrochemical microscopy		
SFM	scanning force microscopy		
SICM	scanning ion-conductance microscopy		
SKFM	scanning Kelvin probe force microscopy		

- [1] „Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy“: G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.* **1982**, 49, 57–61.
- [2] „Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung“: E. Abbe, *Arch. Mikrosk. Anat.* **1873**, 9, 413–468.
- [3] „A Suggested Method for Extending Microscopic Resolution into the Ultra-Microscopic Region“: E. H. Syngé, *Philos. Mag.* **1928**, 6, 356–362.
- [4] „Resolving Power of Visible Light“: J. A. O'Keefe, *J. Opt. Soc. Am.* **1956**, 46, 359.

- [5] „The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopography“: R. Young, J. Ward, F. Scire, *Rev. Sci. Instrum.* **1972**, 43, 999–1011.
- [6] D. A. Bonnell, *Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy, Theory, Techniques and Applications*, VCH, New York, **1993**.
- [7] „Atomic Structure of Ordered Copper Adlayers on Single-Crystalline Gold Electrodes“: O. M. Magnussen, J. Hotlos, G. Beitel, D. M. Kolb, R. J. Behm, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 969–975.
- [8] „Single Molecule Imaging and Vibrational Spectroscopy with a Chemically Modified Tip of a Scanning Tunneling Microscope“: J. R. Hahn, W. Ho, *Phys. Rev. Lett.* **2001**, 87, 196102/1–196102/4.
- [9] „Atom-Selective Imaging of the Gallium Arsenide(110) Surface“: R. M. Feenstra, J. A. Stroscio, J. Tersoff, A. P. Fein, *Phys. Rev. Lett.* **1987**, 58, 1192–1195.
- [10] „Atom-Resolved Surface Chemistry Using the Scanning Tunneling Microscope“: P. Avouris, *J. Phys. Chem.* **1990**, 94, 2246–2256.
- [11] „Atom-Resolved Surface Chemistry: The Early Steps of Si(111)-7x7 Oxidation“: P. Avouris, I. W. Lyo, F. Bozso, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 424–430.
- [12] „Probing and Inducing Surface Chemistry on the Atomic Scale Using the STM“: P. Avouris, I.-W. Lyo, *AIP Conf. Proc.* **1992**, 241, 283–297.
- [13] „Direct Imaging of Catalytically Important Processes in the Oxidation of CO over RuO₂(110)“: H. Over, A. P. Seitsonen, E. Lundgren, M. Schmid, P. Varga, *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, 123, 11807–11808.
- [14] „Adsorption Sites and Ligand Effect for CO on an Alloy Surface: A Direct View“: Y. Gauthier, M. Schmid, S. Padovani, E. Lundgren, V. Bus, G. Kresse, J. Redinger, P. Varga, *Phys. Rev. Lett.* **2001**, 87, 036103/1–036103/4.
- [15] „Oxygen Adsorption on Al(111): Low Transient Mobility“: M. Schmid, G. Leonardelli, R. Tscheliessnig, A. Biedermann, P. Varga, *Surf. Sci.* **2000**, 478, L355–L362.
- [16] „Chemical Analysis of Pt₁Ni_{1-x} Alloy Single Crystal Surfaces by Scanning Tunneling Microscopy“: A. Biedermann, M. Schmid, P. Varga, *Fresenius J. Anal. Chem.* **1994**, 349, 201–203.
- [17] „Chemically Resolved STM on a PtRh(100) Surface“: P. T. Wouda, B. E. Nieuwenhuys, M. Schmid, P. Varga, *Surf. Sci.* **1996**, 359, 17–22.
- [18] „Scanning Tunneling Microscopy of Binary-Alloy Surfaces: Is Chemical Contrast a Consequence of Alloying?“: W. A. Hofer, G. Ritz, W. Hebenstreit, M. Schmid, P. Varga, J. Redinger, R. Podlousky, *Surf. Sci.* **1998**, 405, L514–L519.
- [19] „Chemical Discrimination on Atomic Level by STM“: P. Varga, M. Schmid, *Appl. Surf. Sci.* **1999**, 141, 287–293.
- [20] „Pt₂₅Rh₇₅(111), (110), and (100) Studied by Scanning Tunneling Microscopy with Chemical Contrast“: E. L. D. Hebenstreit, W. Hebenstreit, M. Schmid, P. Varga, *Surf. Sci.* **1999**, 441, 441–453.
- [21] „Hochauflösende Rastertunnelmikroskopie unterscheidet Atome“: P. Varga, M. Schmid, J. Redinger, *Phys. Unserer Zeit* **2000**, 31, 215–221.
- [22] „Spatial Fluctuations of the Density of States in Magnetic Fields Observed with Scanning Tunneling Microscopy“: M. Morgenstern, C. Wittneven, R. Dombrowski, R. Wiesendanger, *Phys. Rev. Lett.* **2000**, 84, 5588–5591.
- [23] „Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy: Kondo Effect and Surface State Lifetimes“: W.-D. Schneider, R. Berndt, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **2000**, 109, 19–31.
- [24] „Atomic Resolution by STM on Ultrathin Films of Alkali Halides: Experiment and Local Density Calculations“: W. Hebenstreit, J. Redinger, Z. Horozova, M. Schmid, R. Podlousky, P. Varga, *Surf. Sci.* **1999**, 424, L321–L328.
- [25] „Bulk Terminated NaCl(111) on Aluminum: A Polar Surface of an Ionic Crystal?“: W. Hebenstreit, M. Schmid, J. Redinger, R. Podlousky, P. Varga, *Phys. Rev. Lett.* **2000**, 85, 5376–5379.
- [26] „Noise in Vacuum Tunneling: Application for a Novel Scanning Microscope“: R. Möller, A. Esslinger, B. Koslowski, *Appl. Phys. Lett.* **1989**, 55, 2360–2362.
- [27] „Thermal Noise in Vacuum Scanning Tunneling Microscopy at Zero Bias Voltage“: R. Möller, A. Esslinger, B. Koslowski, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1990**, 8, 590–593.
- [28] „Scanning Noise Potentiometry“: R. Möller, C. Baur, A. Esslinger, P. Kürz, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 609–611.
- [29] „Nonlinear Alternating-Current Tunneling Microscopy“: G. P. Kochanski, *Phys. Rev. Lett.* **1989**, 62, 2285–2288.
- [30] „Scanning Chemical Potential Microscope: A New Technique for Atomic Scale Surface Investigation“: C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 537–540.
- [31] „Optical Absorption Microscopy and Spectroscopy with Nanometer Resolution“: J. M. R. Weaver, L. M. Walpita, H. K. Wickramasinghe, *Nature* **1989**, 342, 783–785.
- [32] „Surface Magnetism of Epitaxial Thin Films by Polarized Electron Scattering“: S. F. Alvarado, *J. Appl. Phys.* **1988**, 64, 5931.
- [33] „Observation of Vacuum Tunneling of Spin-Polarized Electrons with the Scanning Tunneling Microscope“: R. Wiesendanger, H.-J. Güntherodt, G. Güntherodt, R. J. Gambino, R. Ruf, *Phys. Rev. Lett.* **1990**, 65, 247–250.
- [34] „Tunneling of Spin-Polarized Electrons“: R. Wiesendanger, D. Bürgler, G. Tarrach, H.-J. Güntherodt, G. Güntherodt, *AIP Conf. Proc.* **1992**, 241, 504–510.
- [35] „Vacuum Tunneling of Spin-Polarized Electrons Detected by Scanning Tunneling Microscopy“: R. Wiesendanger, D. Bürgler, G. Tarrach, A. Wadas, D. Brodbeck, H.-J. Güntherodt, G. Güntherodt, R. J. Gambino, R. Ruf, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 519–524.
- [36] „Observation of Spin-Polarized-Electron Tunneling from a Ferromagnet into Gallium Arsenide“: S. F. Alvarado, P. Renaud, *Phys. Rev. Lett.* **1992**, 68, 1387–1390.
- [37] „Spin Polarized Electron Tunneling from a Ferromagnet into GaAs(110)“: S. F. Alvarado, *J. Appl. Phys.* **1993**, 73, 5816.
- [38] „Tunneling Potential Barrier Dependence of Electron Spin Polarization“: S. F. Alvarado, *Phys. Rev. Lett.* **1995**, 75, 513–516.
- [39] „Real-Space Imaging of Two-Dimensional Antiferromagnetism on the Atomic Scale“: S. Heinze, M. Bode, A. Kubetzka, O. Pietzsch, X. Nie, S. Blugel, R. Wiesendanger, *Science* **2000**, 288, 1805–1808.
- [40] „Direct Investigation of Subsurface Interface Electronic Structure by Ballistic Electron Emission Microscopy“: W. J. Kaiser, L. D. Bell, *Phys. Rev. Lett.* **1988**, 60, 1406–1409.
- [41] „Observation of Interface Band Structure by Ballistic-Electron-Emission Microscopy“: L. D. Bell, W. J. Kaiser, *Phys. Rev. Lett.* **1988**, 61, 2368–2371.
- [42] „Photon Emission with the Scanning Tunneling Microscope“: J. K. Gimzewski, B. Reihl, J. H. Coombs, R. R. Schlittler, *Z. Phys. B* **1988**, 72, 497–501.
- [43] „Laser-Assisted Scanning Tunneling Microscopy“: M. Völcker, W. Krieger, T. Suzuki, H. Walther, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 541–544.
- [44] „Photovoltage on Silicon Surfaces Measured by Scanning Tunneling Microscopy“: Y. Kuk, R. S. Becker, P. J. Silverman, G. P. Kochanski, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 545–550.
- [45] „Tunneling Spectroscopy Analysis of Optically Active Wide Band-Gap Semiconductors“: D. A. Bonnell, G. S. Rohrer, R. H. French, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 551–556.
- [46] „Prism-Coupled Light Emission from a Scanning Tunneling Microscope“: K.

- Takeuchi, Y. Uehara, S. Ushioda, S. Morita, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 557–560.
- [47] „Photoassisted Tunneling Spectroscopy: Preliminary Results on Tungsten Diselenide“: S. Akari, M. C. Lux-Steiner, M. Vögt, M. Stachel, K. Dransfeld, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 561–563.
- [48] „Scanning Tunneling Microscopy of Photoexcited Carriers at the Silicon(100) Surface“: D. G. Cahill, R. J. Hamers, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 564–567.
- [49] „Analysis and Compensation of Thermal Effects in Laser-Assisted Scanning Tunneling Microscopy“: S. Grafström, J. Kowalski, R. Neumann, O. Probst, M. Wörtge, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 568–572.
- [50] „Photon Emission Scanning Tunneling Microscopy“: R. Berndt, R. R. Schlittler, J. K. Gimzewski, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 573–577.
- [51] „Photon Emission Processes in STM“: R. Berndt, R. R. Schlittler, J. K. Gimzewski, *AIP Conf. Proc.* **1992**, 241, 328–336.
- [52] „Observation of Local Photoemission Using a Scanning Tunneling Microscope“: J. K. Gimzewski, R. Berndt, R. R. Schlittler, *Ultramicroscopy* **1992**, 42–44, 366–370.
- [53] „Microscopic Theory of Light Emission from the Scanning Tunneling Microscope“: M. Tsukada, T. Shimizu, K. Kobayashi, *Ultramicroscopy* **1992**, 42–44, 360–365.
- [54] „Scanning Tunneling Microscopy and Photons“: R. Möller, S. Akari, C. Baur, B. Koslowski, K. Dransfeld, *AIP Conf. Proc.* **1992**, 241, 314–327.
- [55] „New Versatile Room-Temperature Field Ion Scanning Tunneling Microscopy“: T. Sakurai, T. Hashizume, Y. Hasegawa, I. Kamiya, N. Sano, K. Yokoyama, H. Tanaka, I. Sumita, S. Hyodo, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1990**, 8, 324–326.
- [56] „Biological Materials Studied with Dynamic Force Microscopy“: D. Anselmetti, M. Dreier, R. Lüthi, T. Richmond, E. Meyer, J. Frommer, H.-J. Güntherodt, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1994**, 12, 1500–1503.
- [57] „Progress in Noncontact Dynamic Force Microscopy“: R. Lüthi, E. Meyer, L. Howald, H. Haefke, D. Anselmetti, M. Dreier, M. Rüetschi, T. Bonner, R. M. Overney, J. Frommer, H.-J. Güntherodt, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1994**, 12, 1673–1676.
- [58] „Dynamic Force Microscopy in Liquids“: M. Dreier, D. Anselmetti, T. Richmond, U. Dammer, H.-J. Güntherodt, *J. Appl. Phys.* **1994**, 76, 5095–5098.
- [59] „Atomic-Resolution Images of Radiation Damage in KBr“: R. Bennewitz, S. Schar, V. Barwich, O. Pfeiffer, E. Meyer, F. Krok, B. Such, J. Kolodziej, M. Szymonski, *Surf. Sci.* **2001**, 474, L197–L202.
- [60] D. Sarid, *Scanning Force Microscopy*, Oxford University Press, New York, **1991**.
- [61] „Scanning Attractive Force Microscope Using Photothermal Vibration“: N. Umeda, S. Ishizaki, H. Uwai, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 1318–1322.
- [62] „Atomic Force Microscopy“: G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.* **1986**, 56, 930–933.
- [63] „Atomic Force Microscopy“: D. Rugar, P. Hansma, *Phys. Today* **1990**, 43, 23–30.
- [64] „Surface Characterization of Materials at Ambient Conditions by Scanning Tunneling Microscopy (STM) and Atomic Force Microscopy (AFM)“: S. N. Magonov, *Appl. Spectrosc. Rev.* **1993**, 28, 1–121.
- [65] „Rastertunnel- und Kraftmikroskopie in der Organischen Chemie“: J. Frommer, *Angew. Chem.* **1992**, 104, 1325–1357; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1992**, 31, 1298–1328.
- [66] „Atomic Force and Scanning Tunneling Microscopy of Organic Surfaces“: H. Fuchs, *J. Mol. Struct.* **1993**, 292, 29–47.
- [67] „Surface Analysis with Atomic Force Microscopy through Measurement in Air and under Liquids“: G. Friedbacher, T. Prohaska, M. Grasserbauer, *Mikrochim. Acta* **1994**, 113, 179–202.
- [68] J. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, London, **1991**.
- [69] „Optical-Beam-Deflection Atomic Force Microscopy: The Sodium Chloride(001) Surface“: G. Meyer, N. M. Amer, *Appl. Phys. Lett.* **1988**, 53, 2400–2401.
- [70] „Microfabrication of Cantilever Styli for the Atomic Force Microscope“: T. R. Albrecht, S. Akamine, T. E. Carver, C. F. Quate, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1990**, 8, 3386–3396.
- [71] „Micromachined Silicon Sensors for Scanning Force Microscopy“: O. Wolter, T. Bayer, J. Greschner, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 1353–1357.
- [72] „Investigation of Environmental Aerosol by Atomic Force Microscopy“: G. Friedbacher, M. Grasserbauer, Y. Meslmani, N. Klaus, M. J. Högtsberger, *Anal. Chem.* **1995**, 67, 1749–1754.
- [73] „Investigation of Aerosol Particles by Atomic Force Microscopy“: G. Köllensperger, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, L. Dorffner, *Fresenius J. Anal. Chem.* **1997**, 358, 268–273.
- [74] „A Scanning Force Microscope with Atomic Resolution in Ultrahigh Vacuum and at Low Temperatures“: W. Allers, A. Schwarz, U. D. Schwarz, R. Wiesendanger, *Rev. Sci. Instrum.* **1998**, 69, 221–225.
- [75] „In Situ Investigation of Aluminum Gallium Arsenide/Gallium Arsenide Multilayer Structures under Inert and Reactive Media by Atomic Force Microscopy“: T. Prohaska, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, H. Nickel, R. Lösch, W. Schlapp, *Anal. Chem.* **1995**, 67, 1530–1535.
- [76] „Investigation of Corrosion Processes on Cleavage Edges of Potash-Lime-Silica Glasses by Atomic Force Microscopy“: I. Schmitz, T. Prohaska, G. Friedbacher, M. Schreiner, M. Grasserbauer, *Fresenius J. Anal. Chem.* **1995**, 353, 666–669.
- [77] „Atomic-Scale Imaging of Calcite Growth and Dissolution in Real Time“: P. E. Hillner, A. J. Gratz, S. Manne, P. K. Hansma, *Geology* **1992**, 20, 359–362.
- [78] „Tapping Mode AFM in Comparison to Contact Mode AFM as a Tool for In-Situ Investigations of Surface Reactions with Reference to Glass Corrosion“: I. Schmitz, M. Schreiner, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, *Anal. Chem.* **1997**, 69, 1012–1018.
- [79] „Phase Imaging as an Extension to Tapping Mode AFM for the Identification of Material Properties on Humidity-Sensitive Surfaces“: I. Schmitz, M. Schreiner, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, *Appl. Surf. Sci.* **1997**, 115, 190–198.
- [80] „In-situ Investigations on the SILAR Growth of ZnS Films as Studied by Tapping Mode Atomic Force Microscopy“: R. Resch, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, T. Kannianen, S. Lindroos, M. Leskelä, L. Niinistö, *Fresenius J. Anal. Chem.* **1997**, 358, 80–84.
- [81] „Analytical Characterization of Surfaces by Scanning Force Microscopy“: G. Friedbacher, R. Resch, I. Schmitz, G. Köllensperger, M. Schreiner, M. Grasserbauer, *Ann. Chim.* **1997**, 87, 145–163.
- [82] „In-Situ and Ex-Situ AFM Investigation of the Formation of Octadecyl Siloxane Monolayers“: R. Resch, M. Grasserbauer, G. Friedbacher, T. Vallant, H. Brunner, U. Mayer, H. Hoffmann, *Appl. Surf. Sci.* **1999**, 140, 168–175.
- [83] „Investigations of the Growth of Self-Assembled Octadecylsiloxane Monolayers with Atomic Force Microscopy“: T. Leitner, G. Friedbacher, T. Vallant, H. Brunner, U. Mayer, H. Hoffmann, *Mikrochim. Acta* **2000**, 133, 331–336.

- [84] „In-Situ Investigation of Humidity-Induced Changes on Human Hair and Antennae of the Honey Bee, *Apis mellifera* L., by Scanning Force Microscopy“: R. Resch, R. Ehn, H. Tichy, G. Friedbacher, *Appl. Phys. A* **1998**, *66*, S607–S611.
- [85] „In-situ AFM investigation of Aerosols Exposed to Different Humidities“: G. Köllensperger, G. Friedbacher, R. Kotzick, R. Nießner, M. Grasserbauer, *Fresenius J. Anal. Chem.* **1999**, *364*, 296–304.
- [86] „In-Situ Investigation of Aerosol Particles by Atomic Force Microscopy“: G. Köllensperger, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, *Fresenius J. Anal. Chem.* **1998**, *361*, 716–721.
- [87] „Atomic-Resolution Electrochemistry with the Atomic Force Microscope: Copper Deposition on Gold“: S. Manne, P. K. Hansma, J. Massie, V. B. Elings, A. A. Gewirth, *Science* **1991**, *251*, 183–186.
- [88] „Atomic Resolution Electrochemistry of Underpotential Deposition Processes“: A. A. Gewirth, *AIP Conf. Proc.* **1992**, *241*, 253–261.
- [89] „Subatomic Features on the Silicon (111)-(7×7) Surface Observed by Atomic Force Microscopy“: F. J. Giessibl, S. Hembacher, H. Bielefeldt, J. Mannhart, *Science* **2000**, *289*, 422–425.
- [90] „Atomic-Scale Friction of a Tungsten Tip on a Graphite Surface“: C. M. Mate, G. M. McClelland, R. Erlandsen, S. Chiang, *Phys. Rev. Lett.* **1987**, *59*, 1942–1945.
- [91] „Tribological Characteristics of Amorphous Carbon Films Investigated by Point Contact Microscopy“: T. Miyamoto, R. Kaneko, S. Miyake, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, *9*, 1336–1339.
- [92] „Sliding Friction Measurements of Physisorbed Monolayers: A Comparison of Solid and Liquid Films“: J. Krim, R. Chiarello, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, *9*, 1343–1346.
- [93] „Elasticity, Wear, and Friction Properties of Thin Organic Films Observed with Atomic Force Microscopy“: R. M. Overney, T. Bonner, E. Meyer, M. Rüetschi, R. Lüthi, L. Howald, J. Frommer, H.-J. Güntherodt, M. Fujihira, H. Takano, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1994**, *12*, 1973–1976.
- [94] „Friction Experiments on the Nanometer Scale“: E. Gnecco, R. Bennewitz, T. Gyalog, E. Meyer, *J. Phys.* **2001**, *13*, R619–R642.
- [95] „Lateral Force Microscopy and Force Modulation Microscopy on SILAR-Grown Lead Sulfide Samples“: R. Resch, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, T. Kanninen, S. Lindroos, M. Leskelä, L. Niinistö, *Appl. Surf. Sci.* **1997**, *120*, 51–57.
- [96] „Functional Group Imaging by Chemical Force Microscopy“: C. D. Frisbie, L. F. Rozsnyai, A. Noy, M. S. Wrighton, C. S. Lieber, *Science* **1994**, *265*, 2071–2074.
- [97] „Dynamic Friction Force Measurement with the Scanning Force Microscope“: H.-U. Krottil, E. Weilandt, T. Stifter, O. Marti, S. Hild, *Surf. Interface Anal.* **1999**, *27*, 341–347.
- [98] „Using Force Modulation to Image Surface Elasticities with the Atomic Force Microscope“: P. Maivald, H.-J. Butt, S. A. C. Gould, C. B. Prater, B. Drake, J. A. Gurley, V. B. Elings, P. K. Hansma, *Nanotechnology* **1991**, *2*, 103–106.
- [99] „Measuring the Nanomechanical Properties and Surface Forces of Materials Using an Atomic Force Microscope“: N. A. Burnham, R. J. Colton, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1989**, *7*, 2906–2913.
- [100] „Tip-Sample Interactions in Atomic Force Microscopy: I. Modulating Adhesion Between Silicon Nitride and Glass“: J. H. Hoh, J.-P. Revel, P. K. Hansma, *Nanotechnology* **1991**, *2*, 119–122.
- [101] „Electrostatic and Contact Forces in Force Microscopy“: H. W. Hao, A. M. Baró, J. J. Sáenz, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, *9*, 1323–1328.
- [102] „Submicron Probe of Polymer Adhesion with Atomic Force Microscopy: Dependence on Topography and Material Inhomogeneities“: H. A. Mizes, K.-G. Loh, R. J. D. Miller, S. K. Ahuja, E. F. Grabowski, *Appl. Phys. Lett.* **1991**, *59*, 2901–2903.
- [103] „Electrostatic Interaction in Atomic Force Microscopy“: H.-J. Butt, *Biophys. J.* **1991**, *60*, 777–785.
- [104] „Measuring Adhesion, Attraction, and Repulsion between Surfaces in Liquids with an Atomic Force Microscope“: A. L. Weisenhorn, P. Maivald, H.-J. Butt, P. K. Hansma, *Phys. Rev. B* **1992**, *45*, 11226–11232.
- [105] „Measurement of Forces in Liquids Using a Force Microscope“: W. A. Ducker, T. J. Senden, R. M. Pashley, *Langmuir* **1992**, *8*, 1831–1836.
- [106] „Quantized Adhesion Detected with the Atomic Force Microscope“: J. H. Hoh, J. P. Cleveland, C. B. Prater, J.-P. Revel, P. K. Hansma, *J. Am. Chem. Soc.* **1992**, *114*, 4917–4918.
- [107] „Characterization of Surface Energetic Behavior by Atomic Force Microscopy“: A. Kawai, H. Nagata, M. Takata, *Jpn. J. Appl. Phys.* **1992**, *31*, L977–L979.
- [108] „Friction Effects on Force Measurements with an Atomic Force Microscope“: J. H. Hoh, A. Engel, *Langmuir* **1993**, *9*, 3310–3312.
- [109] „Dynamic Force Spectroscopy of Conservative and Dissipative Forces in an Al–Au(111) Tip-Sample System“: B. Gotsmann, H. Fuchs, *Phys. Rev. Lett.* **2001**, *86*, 2597–2600.
- [110] „Conservative and Dissipative Tip-Sample Interaction Forces Probed with Dynamic AFM“: B. Gotsmann, C. Seidel, B. Anczykowski, H. Fuchs, *Phys. Rev. B* **1999**, *60*, 11051–11061.
- [111] „Conformational Analysis of Native Fibronectin by Means of Force Spectroscopy“: Y. Oberdörfer, H. Fuchs, A. Janshoff, *Langmuir* **2000**, *16*, 9955–9958.
- [112] „Kraftspektroskopie an molekularen Systemen – Einzelmolekülspektroskopie an Polymeren und Biomolekülen“: A. Janshoff, M. Neitzert, Y. Oberdörfer, H. Fuchs, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 3346–3374; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 3212–3237.
- [113] „Unfolding Pathways of Individual Bacteriorhodopsins“: F. Oesterheld, D. Oesterheld, M. Pfeiffer, A. Engel, H. E. Gaub, D. J. Müller, *Science* **2000**, *288*, 143–146.
- [114] „Determination of Tip-Sample Interaction Potentials by Dynamic Force Spectroscopy“: H. Holscher, W. Allers, U. D. Schwarz, R. Wiesendanger, *Phys. Rev. Lett.* **1999**, *83*, 4780–4783.
- [115] „A Direct Method to Calculate Tip-Sample Forces from Frequency Shifts in Frequency-Modulation Atomic Force Microscopy“: F. J. Giessibl, *Appl. Phys. Lett.* **2001**, *78*, 123–125.
- [116] „Investigation of Surface Changes on Mica Induced by Atomic Force Microscopy Imaging under Liquids“: R. Resch, G. Friedbacher, M. Grasserbauer, *Fresenius J. Anal. Chem.* **1997**, *358*, 352–355.
- [117] „Cantilever Dynamics in Quasicon-tact Force Microscopy: Spectroscopic Aspects“: B. Anczykowski, D. Krüger, H. Fuchs, *Phys. Rev. B* **1996**, *53*, 15485–15488.
- [118] „Basic Properties of Dynamic Force Spectroscopy with the Scanning Force Microscope in Experiment and Simulation“: B. Anczykowski, D. Krüger, K. L. Babcock, H. Fuchs, *Ultramicroscopy* **1996**, *66*, 251–259.
- [119] „Physical Properties of Dynamic Force Microscopies in Contact and Noncontact Operation“: D. Krüger, B. Anczykowski, H. Fuchs, *Ann. Phys.* **1997**, *6*, 341–363.
- [120] „Fractured Polymer/Silica Fiber Surface Studied by Tapping Mode Atomic Force Microscopy“: Q. Zhong, D. Inniss, K. Kjoller, V. B. Elings, *Surf. Sci. Lett.* **1993**, *290*, L688–L692.
- [121] „High Resolution Imaging of Cell Surface Using a Tapping-Mode Atomic Force Microscopy“: K.

- Umemura, H. Arakawa, A. Ikai, *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2* **1993**, *11*, L1711–L1714.
- [122] „Tapping Mode Atomic Force Microscopy in Liquids“: P. K. Hansma, J. P. Cleveland, M. Radmacher, D. A. Walters, P. E. Hillner, M. Bezanilla, M. Fritz, D. Vie, H. G. Hansma, C. B. Prater, J. Massie, L. Fukunaga, J. Gurley, V. Elings, *Appl. Phys. Lett.* **1994**, *64*, 1738–1740.
- [123] „Tapping Mode Atomic Force Microscopy in Liquid“: C. A. J. Putman, K. O. Van der Werf, B. G. De Grooth, N. F. Van Hulst, J. Greve, *Appl. Phys. Lett.* **1994**, *64*, 2454–2456.
- [124] „Imaging of Cells with Atomic Force Microscopy at a Tapping Mode“: T. Shibata-Seki, W. Watanabe, J. Masai, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1994**, *12*, 1530–1534.
- [125] „Viscoelasticity of Living Cells Allows High Resolution Imaging by Tapping Mode Atomic Force Microscopy“: C. A. J. Putman, K. O. van der Werf, B. G. de Grooth, N. F. van Hulst, J. Greve, *Biophys. J.* **1994**, *67*, 1749–1753.
- [126] „Three-Dimensional Structure of Extended Chromatin Fibers as Revealed by Tapping-Mode Scanning Force Microscopy“: S. H. Leuba, G. Yang, C. Robert, B. Samori, K. van Holde, J. Zlatanova, C. Bustamante, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **1994**, *91*, 11621–11625.
- [127] „Tapping-Probe Phase Imaging Increases Atomic Force Microscope Contrast“: J. Thornton, *Laser Focus World* **1996**, *32/7*, 141–142.
- [128] „Factors Affecting the Height and Phase Images in Tapping Mode Atomic Force Microscopy. Study of Phase-Separated Polymer Blends of Poly(ethene-co-styrene) and Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)“: G. Bar, Y. Thomann, R. Brandsch, H.-J. Cantow, *Langmuir* **1997**, *13*, 3807–3812.
- [129] „On the Factors Affecting the Contrast of Height and Phase Images in Tapping Mode Atomic Force Microscopy“: R. Brandsch, G. Bar, M.-H. Whangbo, *Langmuir* **1997**, *13*, 6349–6353.
- [130] „Description of the Frequency Dependence of the Amplitude and Phase Angle of a Silicon Cantilever Tapping on a Silicon Substrate by Harmonic Approximation“: G. Bar, R. Brandsch, M.-H. Whangbo, *Surf. Sci.* **1998**, *411*, L802–L809.
- [131] „Examination of the Relationship Between Phase Shift and Energy Dissipation in Tapping Mode Atomic Force Microscopy by Frequency-Sweep and Force-Probe Measurements“: G. Bar, R. Brandsch, M. Bruch, L. Delineau, M.-H. Whangbo, *Surf. Sci. Lett.* **2000**, *444*, L11–L16.
- [132] „Effects of Elastic and Inelastic Interactions on Phase Contrast Images in Tapping Mode Scanning Force Microscopy“: J. Tamayo, R. García, *Appl. Phys. Lett.* **1997**, *71*, 2394–2396.
- [133] „Deformation, Contact Time, and Phase Contrast in Tapping Mode Scanning Force Microscopy“: J. Tamayo, R. García, *Langmuir* **1996**, *12*, 4430–4435.
- [134] „Tapping-Mode Atomic Force Microscopy Study of the Near Surface Composition of a Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer Film“: S. N. Magonov, J. Cleveland, V. Elings, D. Denley, M.-H. Whangbo, *Surf. Sci.* **1997**, *389*, 201–211.
- [135] „Chemically Sensitive Imaging in Tapping Mode by Chemical Force Microscopy: Relationship Between Phase Lag and Adhesion“: A. Noy, C. H. Sanders, D. V. Vezennov, S. S. Wong, C. M. Lieber, *Langmuir* **1998**, *14*, 1508–1511.
- [136] „Effect of Viscoelastic Properties of Polymers on the Phase Shift in Tapping Mode Atomic Force Microscopy“: G. Bar, R. Brandsch, M.-H. Whangbo, *Langmuir* **1998**, *14*, 7343–7347.
- [137] „Analytical Evaluation of Tapping Mode Atomic Force Microscopy for Chemical Imaging of Surfaces“: B. Basnar, G. Friedbacher, H. Brunner, T. Vallant, U. Mayer, H. Hoffmann, *Appl. Surf. Sci.* **2001**, *171*, 213–225.
- [138] „Fabrication of Nanostructured Surfaces Using Self-Assembled Monolayers“: B. Basnar, M. Madera, G. Friedbacher, T. Vallant, U. Mayer, H. Hoffmann, *Mikrochim. Acta* **2000**, *133*, 325–329.
- [139] „The Simultaneous Measurement of Elastic, Electrostatic, and Adhesive Properties by Scanning Force Microscopy: Pulsed-Force Mode Operation“: A. Rosa-Zeiser, E. Weilandt, S. Hild, O. Marti, *Meas. Sci. Technol.* **1997**, *8*, 1333–1338.
- [140] „Pulsed Force Mode: A New Method for the Investigation of Surface Properties“: H.-U. Krottil, T. Stifter, H. Waschipky, K. Weishaupt, S. Hild, O. Marti, *Surf. Interface Anal.* **1999**, *27*, 336–340.
- [141] „Mapping of Electrical Double-Layer Force Between Tip and Sample Surfaces in Water with Pulsed-Force-Mode Atomic Force Microscopy“: T. Miyatani, M. Horii, A. Rosa, M. Fujihira, O. Marti, *Appl. Phys. Lett.* **1997**, *71*, 2632–2634.
- [142] „Synthesis and Behavior of the Polymer Covering on a Solid Surface. 3. Morphology and Mechanism of Formation of Grafted Polystyrene Layers on the Glass Surface“: I. Luzinov, S. Minko, V. Senkovsky, A. Voronov, S. Hild, O. Marti, W. Wilke, *Macromolecules* **1998**, *31*, 3945–3952.
- [143] „Atomic Force Microscope – Force Mapping and Profiling on a Sub 100 Å Scale“: Y. Martin, C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe, *J. Appl. Phys.* **1987**, *61*, 4723–4729.
- [144] „Deposition and Imaging of Localized Charge on Insulator Surfaces Using a Force Microscope“: J. E. Stern, B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.* **1988**, *53*, 2717–2719.
- [145] „Localized Charge Force Microscopy“: B. D. Terris, J. E. Stern, D. Rugar, H. J. Manin, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1990**, *8*, 374–377.
- [146] „Structural Study of Langmuir-Blodgett Films by Scanning Surface Potential Microscopy“: M. Fujihira, H. Kawate, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1994**, *12*, 1604–1608.
- [147] „Surface Investigations with a Kelvin Probe Force Microscope“: M. Nonnenmacher, M. O’Boyle, H. K. Wickramasinghe, *Ultramicroscopy* **1992**, *42–44*, 268–273.
- [148] „The Scanning Kelvin Microscope“: R. Mackel, H. Baumgartner, J. Ren, *Rev. Sci. Instrum.* **1993**, *64*, 694–699.
- [149] „Magnetic Imaging by “Force Microscopy,” with 1000 Å Resolution“: Y. Martin, H. K. Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.* **1987**, *50*, 1455–1457.
- [150] „Applications of Magnetic Force Microscopy in Magnetic Storage Device Manufacturing“: G. Persch, H. Strecker, *Ultramicroscopy* **1992**, *42–44*, 1269–1274.
- [151] „Theory of Van der Waals Microscopy“: U. Hartmann, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, *9*, 465–469.
- [152] „Near-Field Optics: Light for the World of NANO“: D. W. Pohl, L. Novotny, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1994**, *12*, 1441–1446.
- [153] „Near-Field-Optical Microscopy“: M. Isaacson, J. Cline, H. Barshatzky, *AIP Conf. Proc.* **1992**, *241*, 23–36.
- [154] „The Tetrahedral Tip as a Probe for Scanning Near-Field Optical Microscopy at 30 nm Resolution“: U. C. Fischer, J. Koglin, H. Fuchs, *J. Microsc.* **1994**, *176*, 231–237.
- [155] „Material Contrast in Scanning Near-Field Optical Microscopy at 1–10 nm Resolution“: J. Koglin, U. C. Fischer, H. Fuchs, *Phys. Rev. B* **1997**, *55*, 7977–7984.
- [156] „Photon Scanning Tunneling Microscopy“: R. C. Reddick, *AIP Conf. Proc.* **1992**, *241*, 37–50.
- [157] „The Photon Scanning Tunneling Microscope“: T. L. Ferrell, J. P. Gouddonnet, R. C. Reddick, S. L. Sharp,

- R. J. Warmack, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 525–530.
- [158] „Progress in Photon Scanning Tunneling Microscopy (PSTM)“: T. L. Ferrell, S. L. Sharp, R. J. Warmack, *Ultramicroscopy* **1992**, 42–44, 408–415.
- [159] „Evanescent-Field Optical Microscopy: Effects of Polarization, Tip Shape, and Radiative Waves“: N. F. van Hulst, F. B. Segerink, F. Achten, B. Bögler, *Ultramicroscopy* **1992**, 42–44, 416–421.
- [160] „Photopatterning of a Monomolecular Dye Film by Means of Scanning Near-Field Optical Microscopy“: A. Naber, T. Dziomba, U. C. Fischer, H.-J. Maas, H. Fuchs, *Appl. Phys. A* **2000**, 70, 227–230.
- [161] „Simultaneous Topographical and Optical Characterization of Near-Field Optical Aperture Probes by Way of Imaging Fluorescent Nanospheres“: C. Hoppener, D. Molenda, H. Fuchs, A. Naber, *Appl. Phys. Lett.* **2002**, 80, 1331–1333.
- [162] „Spectroscopy in the Evanescent Field with an Analytical Photon Scanning Tunneling Microscope“: P. J. Moyer, C. L. Jahncke, M. A. Paesler, R. C. Reddick, R. J. Warmack, *Phys. Lett. A* **1990**, 145, 343–347.
- [163] „Analytical Photon Scanning Tunneling Microscopy“: M. A. Paesler, P. J. Moyer, C. J. Jahncke, C. E. Johnson, R. C. Reddick, R. J. Warmack, T. L. Ferrell, *Phys. Rev. B* **1990**, 42, 6750–6753.
- [164] „Scanning Plasmon Near-Field Microscope“: M. Specht, J. D. Pedarnig, W. M. Heckl, T. W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.* **1992**, 68, 476–479.
- [165] „Scanning Electrochemical Microscopy. Introduction and Principles“: A. J. Bard, F.-R. F. Fan, J. Kwak, O. Lev, *Anal. Chem.* **1989**, 61, 132–138.
- [166] „Scanning Electrochemical Microscopy“: A. J. Bard, P. R. Unwin, D. O. Wipf, F. Zhou, *AIP Conf. Proc.* **1992**, 241, 235–247.
- [167] „Chemical Imaging of Surfaces with the Scanning Electrochemical Microscope“: A. J. Bard, F.-R. F. Fan, D. T. Pierce, P. R. Unwin, D. O. Wipf, F. Zhou, *Science* **1991**, 254, 68–74.
- [168] „Integrating an Ultramicroelectrode in an AFM Cantilever. Combined Power for Enhanced Information“: C. Kranz, G. Friedbacher, B. Mizaikoff, A. Lugstein, J. Smoliner, E. Bertangnolli, *Anal. Chem.* **2001**, 73, 2491–2500.
- [169] „Scanning Capacitance Microscopy“: J. R. Matey, J. Blanc, *J. Appl. Phys.* **1985**, 57, 1437–1444.
- [170] „Scanning Capacitance Microscopy on a 35 nm Scale“: C. C. Williams, W. P. Hough, S. A. Rishton, *Appl. Phys. Lett.* **1989**, 55, 203–205.
- [171] „Charge Storage in a Nitride–Oxide–Silicon Medium by Scanning Capacitance Microscopy“: R. C. Barrett, C. F. Quate, *J. Appl. Phys.* **1991**, 70, 2725–2733.
- [172] „Lateral Dopant Profiling in Semiconductors by Force Microscopy Using Capacitive Detection“: D. W. Abraham, C. Williams, J. Slinkman, H. K. Wickramasinghe, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1991**, 9, 703–706.
- [173] „The Scanning Ion Conductance Microscope“: P. K. Hansma, B. Drake, O. Marti, S. A. C. Gould, C. B. Prater, *Science* **1989**, 243, 641–643.
- [174] „Improved Scanning Ion-Conductance Microscope Using Microfabricated Probes“: C. B. Prater, P. K. Hansma, M. Tortonese, C. F. Quate, *Rev. Sci. Instrum.* **1991**, 62, 2634–2638.
- [175] „A Combined Scanning Ion-Conductance and Shear Force Microscope“: H. Nitz, J. Kamp, H. Fuchs, *Probe Microsc.* **1998**, 1, 187–200.
- [176] „Hybrid Scanning Ion Conductance and Scanning Near-Field Optical Microscopy for the Study of Living Cells“: Y. E. Korchev, M. Raval, M. J. Lab, J. Gorelik, C. R. W. Edwards, T. Rayment, D. Klenerman, *Biophys. J.* **2000**, 78, 2675–2679.
- [177] „Scanning Thermal Profiler“: C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.* **1986**, 49, 1587–1589.
- [178] „Near Field Acoustic Microscopy“: B. T. Khuri-Yakub, S. Akamine, B. Hadimioglu, H. Yamada, C. F. Quate, *Proc. SPIE—Int. Soc. Opt. Eng.* **1992**, 1556, 30–39.
- [179] „1 MHz Quartz Length Extension Resonator as a Probe for Scanning Near-Field Acoustic Microscopy“: A. Michels, F. Meinen, T. Murdfield, W. Göhde, U. C. Fischer, E. Beckmann, H. Fuchs, *Thin Solid Films* **1995**, 264, 172–175.
- [180] Der Originaltext wurde von der Commission On Microchemical Techniques And Trace Analysis der Analytical Chemistry Division der International Union of Pure and Applied Chemistry betreut. – Dieser Kommission gehörten während der Vorbereitung des Berichts (1995–1998) folgende Personen an: Titularmitglieder: W. P. Cofino (Vorsitzender, 1996–1999), L. G. Danielsson (Sekretär, 1998–1999), J. S. Edmonds (1998–1999), G. Friedbacher (1998–1999), M. J.-F. Leroy (1987–1995), M. W. Linscheid (Sekretär, 1991–1997), W. Lund (1998–1999), E. A. Maier (1998–1999), M. Morita (1989–1997), H. Muntau (1994–1997), M. J. Pellin (1991–1997), L. B. Reutergårdh (1996–1997), B. Y. Spivakov (1989–1997), D. G. Westmoreland (Vorsitzender, 1987–1995); assoziierte Mitglieder: S. Caroli (1991–1995), W. P. Cofino (1991–1995), L. G. Danielsson (1994–1997), J. S. Edmonds (1989–1997), G. Friedbacher (1994–1997), K. Fujiwara (1998–1999), D. M. Hercules (1994–1999), J. Hlavay (1994–1999), R. S. Lobinski (1998–1999), E. A. Maier (1991–1997), R. Morabito (1998–1999), S. Pergantis (1998–1999), L. B. Reutergårdh (1987–1995), G. R. Rhodes (1989–1997), A. R. Timerbaev (1998–1999), R. van Cleuvenbergen (1998–1999), W. Wegscheider (1987–1995), D. E. Wells (1994–1995); Ländervertreter: C. Camara (Spanien, 1988–1999), S. Güçer (Türkei, 1987–1995), Y. Kim (Korea, 1996–1999), R. S. Lobinski (Polen, 1996–1997), W. Lund (Norwegen, 1990–1997), M. B. A. Vasconcellos (Brasilien, 1992–1999), X. Wang (Chinese Chemical Society, 1996–1999). Mitglieder der Working Group on Surface Analysis: M. J. Pellin (Vorsitzender), G. Friedbacher, J. Hemminger, D. M. Hercules, Y. Kim, D. G. Westmoreland.