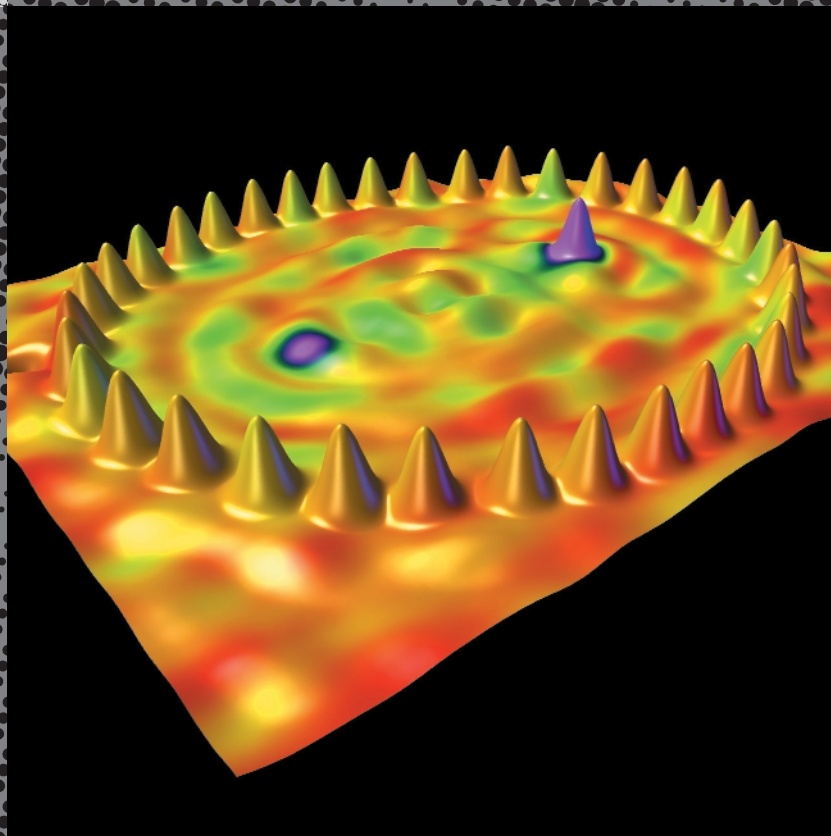


Jochen M. Rieber  
Frank Allgöwer  
Andreas Stemmer

# Schneller sehen durch Regelungstechnik

- Moderne Bildgebung in der Nanotechnologie





Die Nanotechnologie, also die Wissenschaft von Untersuchungen und Manipulationen im Nanometermaßstab, wird als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts angesehen. Wichtige Komponenten dieses aktuellen Forschungszweiges sind das Rastertunnelmikroskop und das Rasterkraftmikroskop, die den Blick in die Nanowelt erlauben. Dieser Artikel gibt einen einführenden Einblick in die Bildgebung der Nanowelt und versucht, den Beitrag von Systemtheorie und Regelungstechnik für die Nanotechnologie anhand der Regelung von Rasterkraftmikroskopen allgemeinverständlich zu beschreiben.

---

### **Die Nanotechnologie als zukunftssträchtige Wissenschaft an der Grenze des Sichtbaren**

In Zukunftsvisionen wird heutzutage davon geschwärmt, dass Roboter durch unsere Blutbahnen schwimmen, um defekte Zellen und unser Erbgut zu reparieren oder sogar Viren zu bekämpfen. Weitergehende Visionen sprechen davon, dass solche Kleinst-Maschinen passend zum Anwendungsgebiet aus einzelnen Molekülen aufgebaut werden und selbst wieder andere Maschinen herstellen.

Um solche Zukunftsvorstellungen einschätzen und beurteilen zu können, sind zunächst einige Vergleiche angebracht. Ein DNS-Molekül unseres Erbgutes besitzt einen Durchmesser von etwa zwei Nanometern (nm), das sind zwei Millionstel Millimeter. Die Größe eines Wasserstoffmoleküls liegt bei 0,4 nm, diejenige eines Hepatitis-C-Virus bei 50 nm. Im Vergleich dazu erscheint ein Haar mit einem Durchmesser von etwa 50 Mikrometern oder 50 000 nm geradezu riesig. Oder anders ausgedrückt: der Durchmesser eines DNS-Moleküls verhält sich zur Größe eines erwachsenen Menschen etwa wie die Größe einer Fliege zum Durchmesser des Erdballs. Objekte im

Nanometer-Bereich sind also nicht einfach nur „klein“, sie sind vielmehr fast unvorstellbar klein. Eine Voraussetzung für die Realisierung der erwähnten Zukunftsvisionen und damit für das Arbeiten in Nanometer-Dimensionen ist also, dass man Nano-Objekte manipulieren und idealerweise auch sichtbar machen kann.

Für Forschung und Manipulation im Nanometer-Maßstab hat sich der Begriff der Nanowissenschaft oder der Nanotechnologie gebildet. Ursprünglich sprach man von Nanotechnologie als dem Vorgang, bei dem „Maschinen“ in der Größe von wenigen Nanometern selbstorganisiert Produkte beliebiger Größe in effizienter und qualitativ hochwertiger Weise herstellen. Seit einigen Jahren wird diese ursprüngliche Idee meist auf die Herstellung von Produkten im Nanometermaßstab reduziert.

---

Jochen M. Rieber / Frank Allgöwer ■

Andreas Stemmer ■

Schneller sehen durch Regelungstechnik ■

oder Quantencomputer mit ungeahnten Rechengeschwindigkeiten oder die Miniaturisierung in den Bereichen Speicherchips, Medizintechnik und Energiewandlung genannt. Die Nanotechnologie ist heute allgemein als eine anspruchsvolle und wichtige Forschungsrichtung mit großem Zukunftspotenzial anerkannt.

Die Anfänge der Nanowissenschaft reichen knapp 50 Jahre zurück. Im Jahr 1959 hält der amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynmann einen Vortrag mit dem Titel „There's plenty of room at the bottom“. Darin beschreibt er die Vision vom Aufbau beliebiger Strukturen aus einzelnen Atomen und Molekülen. Der japanische Ingenieur Norio Taniguchi prägt 1974 den Begriff Nanotechnologie (englisch „nanotechnology“) für die „atomare oder molekulare Verarbeitung von Werkstoffen“. Die Entwicklung der Rastertunnelmikroskopie in den Jahren 1978 bis 1986 erlaubt die Erstattung von Strukturen im atomaren Bereich. Schließlich gelingt es 1989 einer Gruppe von Forschern um Don Eigler am IBM Forschungszentrum Almaden in Kalifornien, einzelne Atome zu verschieben. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, „schrieben“ sie den Schriftzug „IBM“ mit Hilfe des Rastertunnelmikroskops mit genau 35 Xenonatomen auf eine Nickeloberfläche. Auf ähnliche Weise werden auch die inzwischen recht populären Quantenpferche (Abbildung 2 und Titelbild) erzeugt und abgebildet.

Die Fortschritte, die man sich von dieser neuen Wissenschaft erhofft, sind vielfältig und revolutionär. Als Schlagworte seien Kunststoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften, Designermoleküle, DNS-

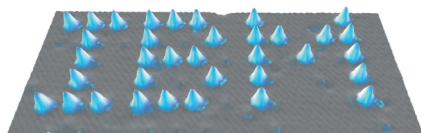


Abb. 1: Manipulation von einzelnen Atomen. Im Jahr 1989 gelingt es einer Gruppe um Don Eigler im IBM-Forschungszentrum Almaden in Kalifornien, einzelne Atome zu verschieben. Dabei ordnen sie 35 Xenonatome mit Hilfe eines Rastertunnelmikroskops so auf einer Nickeloberfläche an, dass der Schriftzug „IBM“ entsteht. Foto verwendet mit freundlicher Genehmigung der IBM Corporation.

Es soll aber nicht der Inhalt dieses Artikels sein, näher auf die Möglichkeiten und die Zukunft der Nanotechnologie einzugehen. Für eine leicht verdauliche Einführung sei dazu zum Beispiel auf [Boeing 04] verwiesen. Stattdessen sollen in diesem Beitrag Apparate und Methoden vorgestellt werden, mit denen sich der Mensch einen Einblick in die Nanowelt verschaffen kann. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Regelungstechnik, mit deren Hilfe die auftretenden physikalischen Effekte technisch nutzbar gemacht werden. Um die Regelungstechnik erfolgreich in die Nanotechnologie einzubringen, sind interdisziplinär geschulte Experten mit mathematischem, physikalischem und systemtheoretischem Hintergrund gefragt. Dies wird im Folgenden untermauert, indem der Einsatz von Methoden zur Modellierung, Identifikation und Regelung von Rasterkraftmikroskopen erläutert wird.

## Des Menschen Fenster in die Nanowelt

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Geräte entwickelt, um Einblick in die Nanowelt zu erhalten und tatsächlich Atome „anschauen“ zu können. Dabei kann nicht das Sehen im eigentlichen Sinne gemeint sein, da die Auflösung von optischen Mikroskopen bei der halben Lichtwellenlänge, also bei etwa 250 nm, erschöpft ist. Stattdessen nutzt man indirekt bestimmte physikalische Effekte zwischen Molekülen.

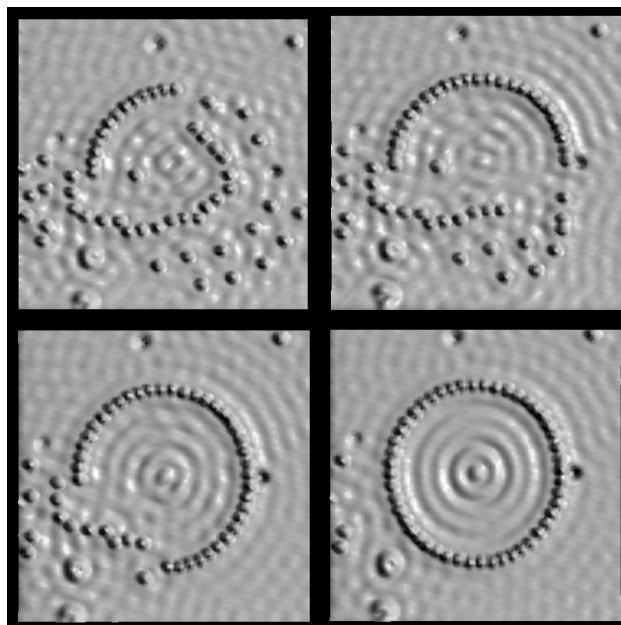


Abb. 2: Entstehung eines Quantenpferchs. Mit einem Rastertunnelmikroskop werden Eisenatome kreisrund auf einer Kupferfläche angeordnet. Dadurch ergeben sich kreisförmige Verteilungsdichten der Elektronen der Kupferoberfläche. Diese Elektronen sind sozusagen in einem „Gehegezaun“ aus Eisenatomen eingepfercht und beeinflussen damit die Materialeigenschaften. Foto verwendet mit freundlicher Genehmigung der IBM Corporation.

Den ersten Schritt zur Verbesserung von Mikroskopauflösungen macht ein junger deutscher Physiker namens Ernst Ruska im Jahr 1931, als er das Abbild eines Platingitters erzeugen möchte. Anstatt das Gitter mit Licht zu bestrahlen und das Licht mit optischen Linsen zu bündeln, bestrahlt er es mit Elektronen und bündelt diese mittels eines Magnetfeldes. Elektronen verhalten sich, je nach ihrem Energiegehalt, wie elektromagnetische Wellen mit sehr kleiner Wellenlänge und besitzen deshalb in bestimmter Hinsicht ähnliche Eigenschaften wie das sichtbare Licht. Dieses Prinzip wird als Elektronenmikroskop bezeichnet.

Um das Jahr 1980 experimentieren der Schweizer Heinrich Rohrer und der Deutsche Gerd Binnig (Abb. 3) mit dem Tunneleffekt, der besagt, dass Elektronen scheinbar eine nichtleitende Barriere durchdringen können. Es gelingt ihnen, diesen Effekt auszunutzen und ein so genanntes Rastertunnelmikroskop (englisch „scanning tunnel microscope“) [Binnig 82] zu bauen. Ein modernes Tunnelmikroskop zeigt Abbildung 4. Das Prinzip ist recht einfach und in Abbildung 5 dargestellt. Bewegt man eine sehr feine metallische Nadelspitze in einem Abstand von wenigen Atomdurchmessern über eine leitende Oberfläche und legt dazwischen eine elektrische Spannung an, fließt ein messbarer Tunnelstrom zwischen Spitze und Oberfläche. Verändert sich durch die



Topographie der Oberfläche der Abstand zur Spitze nur um Bruchteile von Nanometern, ändert sich die Tunnelstromstärke in drastischer Weise. Die Nadelspitze wird nun so über die Oberfläche geführt, dass die Stromstärke und damit der Abstand zur Probe konstant bleiben. Die dazu notwendigen Positionsänderungen der Spitze, zumeist über Piezoaktuatoren erzeugt, können aufgezeichnet werden und geben die Topographie der Oberfläche bis in den Sub-Nanometerbereich wieder. Um den Abstand beziehungsweise den Strom zwischen Nadelspitze und Probe konstant halten zu können, wird ein Regler benötigt, der damit eine entscheidende Komponente des Rastertunnelmikroskops ist. Für diese Entdeckung und den Bau des Rastertunnelmikroskops erhalten Rohrer und Binnig 1982 ein Patent und 1986 den Nobelpreis für Physik, den sie mit Ernst Ruska teilen.



Abb. 3: Heinrich Rohrer (\*1933) und Gerd Binnig (\*1947) entwickelten um das Jahr 1980 das erste Rastertunnelmikroskop. Für ihre Idee und die Umsetzung erhielten sie 1982 ein Patent sowie 1986 den Nobelpreis für Physik. Binnig entwickelte mit zwei Mitarbeitern bis 1986 auch das Rasterkraftmikroskop, mit dem im Gegensatz zum Rastertunnelmikroskop auch nichtleitende Materialien abgetastet und manipuliert werden können. Foto verwendet mit freundlicher Genehmigung der IBM Corporation.

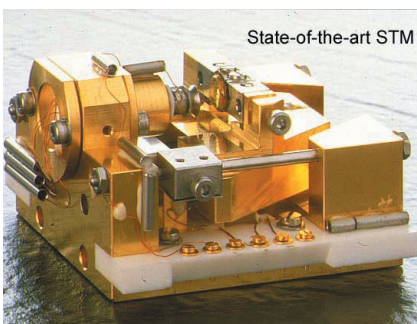


Abb. 4: Ein modernes Rastertunnelmikroskop. Foto verwendet mit freundlicher Genehmigung der IBM Corporation.

Ein gravierender Nachteil des Rastertunnelmikroskops ist die Beschränkung, dass nur leitende Materialien abgebildet werden können. Vor allem in der Biologie

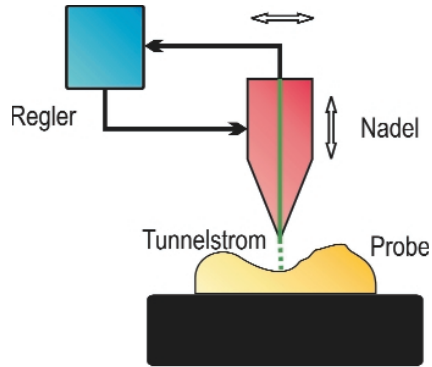


Abb. 5: Funktionsprinzip des Rastertunnelmikroskops. Zwischen einer Nadelspitze und einer leitenden Oberfläche im Abstand weniger Atomdurchmesser fließt ein Tunnelstrom, dessen Stärke sich schon bei kleinsten Abstandsänderungen messbar verändert. Durch einen Regler wird der Abstand zwischen Spitze und Oberfläche konstant gehalten. Die dazu nötigen Positionsänderungen der Nadelspitze geben die Topographie der Oberfläche an.

möchte man aber auch nichtleitende Strukturen im Nanometerbereich betrachten können. Wiederum gelingt Gerd Binnig zusammen mit dem IBM-Mitarbeiter Christoph Gerber und Calvin Quate von der Stanford University die Lösung des Problems in Form des Rasterkraftmikroskops (englisch „atomic force microscope“ oder „scanning force microscope“) [Binnig 86], [Sarid 94]. Ein typischer Vertreter dieser Mikroskopklasse ist in Abbildung 6 zu sehen. Das Rasterkraftmikroskop macht sich den Effekt der Wechselwirkungskräfte zwischen Atomen und Molekülen zunutze. Das Funktionsschema ist in Abbildung 7 dargestellt. Bewegt man eine sehr feine Nadelspitze, die am Ende eines verbiegbaren Balkens angebracht ist, in einem Abstand von wenigen Atomdurchmessern über eine Oberfläche, wird die Spitze je nach Abstand zur Oberfläche aufgrund von Elementarkräften (wie der Van-der-Waals-Kraft, der Coulombkraft oder des Pauli-Prinzips) angezogen oder abgestoßen. Dadurch verändert sich die Reflexionsrichtung eines Laserstrahls, der auf dem Biegebalken in eine segmentierte Detektordiode reflektiert wird. Ändert man nun den Abstand zwischen Probe und Spitze so, dass sich die Reflexionsrichtung des Laserstrahls wieder normalisiert, kann man diese Änderung des Abstands als Topographie der Probe aufzeichnen. Ähnlich wie beim Rastertunnelmikroskop wird also der Abstand beziehungsweise die Kraft zwischen Probe und Messspitze mittels einer geeigneten Regelung konstant gehalten, mit dem Unterschied, dass kein Tunnelstrom fließen muss und damit auch nicht-

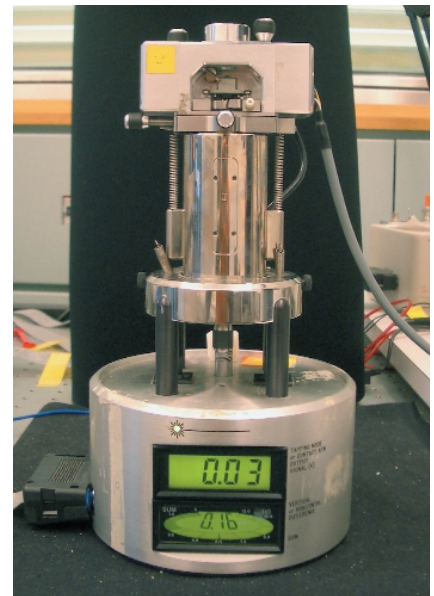


Abb. 6: Ein modernes Rasterkraftmikroskop. Die Höhe des Gerätes beträgt etwa 25 cm.

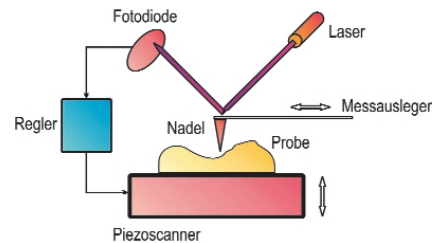


Abb. 7: Funktionsprinzip des Rasterkraftmikroskops. Eine Nadelspitze wird über die abzutastende Oberfläche, die sich auf dem Piezoscanner befindet, geführt. Änderungen des Abstands zwischen Spitze und Oberfläche rufen veränderte Wechselwirkungskräfte hervor, die den Messausleger verbiegen. Ein Laserstrahl, der vom Ausleger in eine Fotodiode reflektiert wird, ändert dann seine Reflexionsrichtung. Ein Regler sorgt durch vertikale Positionsänderungen des Piezoscanners dafür, dass die Reflexionsrichtung des Laserstrahls konstant bleibt. Die dazu nötigen Positionsänderungen des Piezoscanners geben die Topographie der Oberfläche an.

leitende Materialien abgetastet werden können. Die Auflösung, die mit heutigen Kraftmikroskopen erreicht werden kann, liegt im Ultrahochvakuum bei unter 0,01 nm.

Technisch realisiert wird ein Rasterkraftmikroskop, indem man die zu vermessende Probe auf einem so genannten Piezoscanner platziert, dessen vertikale und horizontale Position verschoben werden kann und damit den Abstand zwischen Probe und Messspitze festlegt. Die Messvorrichtung, bestehend aus Messspitze, Messausleger, Laser und Detektor, ist fest installiert. Die Probe wird vom Piezoscanner unter der Messvorrichtung hin- und herbewegt und dabei in dazu senkrechter Richtung jeweils um eine Messzeile verschoben. Man spricht vom Abrastern des Objektes, während der Abstand zur Messspitze oder die Wechselwirkungskraft konstant gehalten wird. Da der Messausleger und der Piezoscanner zu Schwingungen fähig sind, ist für die effektive Anwendung eines Rasterkraftmikroskops moderne Regelungstechnik zur Kraft- beziehungsweise Abstandsregelung wünschenswert. Auf Ansätze und Methoden zur Regelung eines Rasterkraftmikroskops wird im nachfolgenden Abschnitt näher eingegangen werden.

### Mit Regelungstechnik erreicht man „schnelleres Sehen“

Um ein Rasterkraftmikroskop effektiv einzusetzen und seine Vorzüge ausnutzen zu können, ist der Einsatz moderner Methoden aus der Systemtheorie und Regelungstechnik wünschenswert. Dies soll im Folgenden gezeigt und veranschaulicht werden. Dabei beschränken wir uns auf die Bewegungen des Mikroskops in vertikaler Richtung, das heißt auf die Höhenänderungen des Piezoscanners, die letztendlich die Topographie der abgetasteten Oberfläche wiedergeben.

In Systemtheorie und Regelungstechnik werden abgeschlossene Einheiten, so genannte Systeme, betrachtet, siehe Abbildung 8(a). Energie oder Information fließt über Eingänge in ein System und bewirkt eine Veränderung des Systemverhaltens. Die Ausgänge des Systems geben mittels Energie- oder Informationsflüssen Auskunft über das Systemverhalten. Regelungstechnik wird dann eingesetzt, wenn ein dynamisches System, bei dem sich charakteristische Größen mit

der Zeit ändern, so über die Eingänge beeinflusst werden soll, dass sich ein gewünschtes Verhalten einstellt. Ein typischer Regelkreis ist in Abbildung 8(b) gezeigt. Ein Regler berechnet aus der Differenz zwischen gemessenen Systemausgängen und den entsprechenden gewünschten Sollwerten die erforderlichen Stellsignale, die dann über die Systemeingänge eine Angleichung der Ausgänge an die Sollwerte bewirken. Die Regelungstechnik ist mittlerweile allgemein als so genannte „Enabling Technology“ anerkannt, das heißt als eine Wissenschaft, die in praktisch allen Bereichen des Lebens und der Technik meist versteckt auftritt, aber unerlässlich ist. Erfolgreiche Anwendungen reichen von der Luft- und Raumfahrt über Robotertechnik, Fahrzeugtechnik, Mobilkommunikation, digitale Fotografie und chemische Industrie bis zur Energiewirtschaft. Nicht zuletzt hält die Regelungstechnik den Menschen

überhaupt am Leben, da im menschlichen Körper eine Vielzahl von Regelkreisen für den Erhalt der Vitalfunktionen sorgt, so zum Beispiel Regelung der Körpertemperatur oder des Blutzuckerspiegels. In den letzten 50 Jahren wurde von Ingenieuren und Mathematikern eine Anzahl von effektiven Methoden zur Regelung verschiedenster Systemklassen und Anwendungsgebiete entwickelt. Eine kompakte Abhandlung zu Geschichte, Gegenwart und Zukunft der Regelungstechnik ist in [Murray 02] zu finden.

Im Fall der Rasterkraftmikroskop-Regelung ist das Ziel, den Messausleger durch Veränderung der vertikalen Scannerposition in einer konstanten Auslenkung zu halten und dabei Schwingungen des Scanners möglichst zu unterdrücken, da diese die Messgenauigkeit und die Messgeschwindigkeit limitieren. In Abbildung 9 ist der Regelkreis zur Regelung der ver-

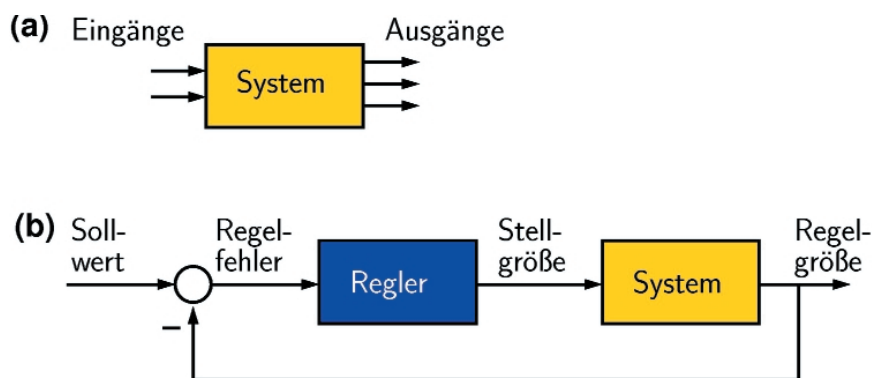


Abb. 8: (a) Ein System ist eine abgeschlossene Einheit, bei dem Signale an den Eingängen Einfluss auf das Systemverhalten im Inneren haben. Über die Signale an den Ausgängen kann teilweise oder vollständig auf das Verhalten im Systeminneren geschlossen werden. (b) In einem Regelkreis versucht ein Regler, den Regelfehler, das heißt die Differenz zwischen Sollwert und Regelgröße, klein zu halten. Dazu wirkt der Regler über die Stellgröße so auf das System ein, dass die Regelgröße sich dem Sollwert annähert.

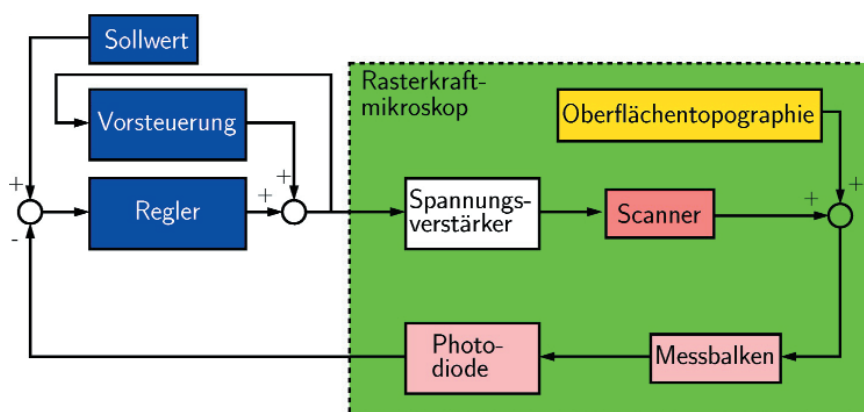


Abb. 9: Regelkreis für ein Rasterkraftmikroskop. Das Rasterkraftmikroskop, bestehend aus einem Piezoscanner, einem Messausleger mit Messspitze sowie einem Laser und einer Photodiode, liefert ein Messsignal an einen Regler. Dieser errechnet aus der Differenz zwischen gemessenem Wert und Sollwert ein Stellsignal. Zusätzlich wird in einer Vorsteuerung aus der zuletzt gemessenen Zeile ein weiterer Anteil des Stellsignals erzeugt. Das Stellsignal wird dem Piezoscanner über einen Verstärker aufgeprägt, um das tatsächliche Verhalten dem gewünschten Verhalten anzugleichen.

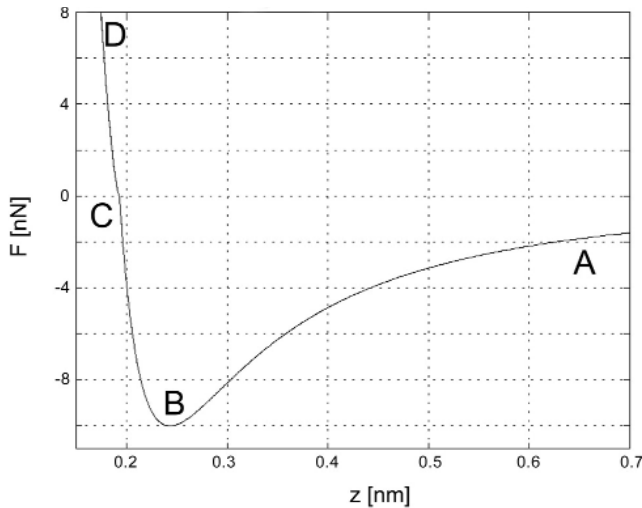


Abb. 10: Die Interaktionskraft  $F$  in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Messspitze und Probe, angelehnt an das Johnson-Kendall-Roberts-Kraftmodell. Abschnitt A-C zeigt das Lennard-Jones-Potential, wobei in A-B die attraktiven Van-der-Waals-Kräfte sowie in B-C die Pauli-Abstoßung dominieren. Abschnitt C-D resultiert aus dem modifizierten Hertz-Modell.

tikal Position des Piezoscanners gezeigt [Schitter 04]. Der Regler erhält die Differenz aus Sollwert und aktuell gemessener Auslenkung des Messkopfes als Eingangsgröße. Daraus errechnet der Regler die notwendigen Stellsignale, die den Messkopf wieder in die gewünschte Position bringen. Zusätzlich ermittelt eine Vorsteuerung über eine Scannersimulation der zuletzt gemessenen Zeile einen weiteren Stellsignalanteil, um schnelles Einschwingen zu garantieren. Ein Spannungsverstärker vergrößert die Stellsignale und beeinflusst damit die vertikale Position des Scanners. Dies bewirkt im Gegenzug wieder eine Veränderung der Auslenkung des Messauslegers und stellt dadurch die gewünschte Auflagekraft der Spitze wieder her. Die Topographie der vermessenen Probe wird dabei als „Störung“ gesehen, die die Vorrichtung aus dem idealen Betriebspunkt hinaus treibt. Durch die Messung der notwendigen vertikalen Positionsänderungen des Scanners wird die Oberflächentopographie des beobachteten Objekts aufgezeichnet.

### Modellierung, Identifikation und Analyse des dynamischen Verhaltens von Rasterkraftmikroskopen

Als erster Schritt zur Analyse und Regelung von technischen Geräten oder Prozessen, allgemeiner gesagt von Systemen, kommt meist die mathematische Modellierung oder die Systemidentifikation zum Einsatz. Bei der Modellierung

wird versucht, anhand naturwissenschaftlicher oder anderer Gesetzmäßigkeiten ein mathematisches Abbild der Wirklichkeit zum Beispiel in Form von Differentialgleichungen zu erhalten. Diese Gleichungen können dann herangezogen werden, um die Eigenschaften des Systems zu untersuchen, um das Systemverhalten mittels Simulationen vorherzusagen oder um geeignete Regler zu entwerfen. Ist es nicht möglich oder zu komplex, ein System mathematisch zu modellieren oder ist ein durch Modellierung erhaltenes Modell zu komplex für den Reglerentwurf, steht als Alternative oder Ergänzung die Systemidentifikation zur Verfügung. Dabei werden die mathematischen Gleichungen nicht auf Basis von Erhaltungssätzen und Naturgesetzmäßigkeiten hergeleitet, sondern so, dass sie experimentell gewonnene Datensätze von Ein- und Ausgangssignalen möglichst gut beschreiben (inverses Problem). Ein Standardwerk zur Identifikation ist [Ljung 99].

Die physikalische Modellierung eines Rasterkraftmikroskops ist eines der Hauptthemen in [Schitter 01]. Dabei wird beispielhaft ein Rasterkraftmikroskop vom Typ Nanoscope-IIIa MultiMode der Firma Veeco (Santa Barbara, USA) in Betracht gezogen. Die Interaktion im Kontaktbereich des Messkopfes und der Probe wird, angelehnt an das Johnson-Kendall-Roberts-Modell, als Zusammenspiel von Lennard-Jones-Potential (attraktive Van-der-Waals-Kräfte und Pauli-Abstoßung) sowie einem modifizierten Hertz-Kraftmodell betrachtet. Dadurch ergibt sich eine resultierende Kraft abhängig vom Abstand zwischen Messkopf und Probe. Den Verlauf einer solchen Kraftkurve zeigt Abbildung 10. Darüberhinaus

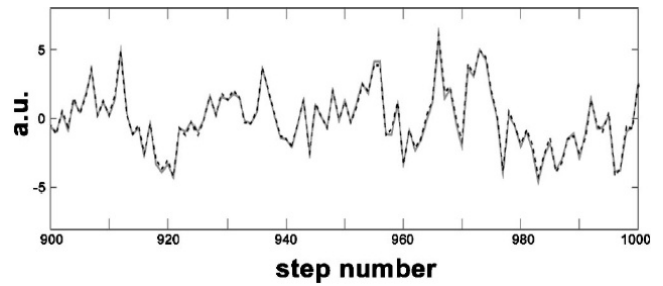


Abb. 11: Verifizierung des identifizierten Modells eines Piezoscanners in vertikaler Richtung. Die Messgrößen (durchgezogen) stimmen sehr gut mit den durch das Modell vorhergesagten simulierten Werten (gestrichelt) überein.

wird die Dynamik des Messauslegers und des Piezoscanners auf Schwingungsfähigkeit und auf Resonanzen untersucht. Es zeigt sich, dass zumindest für Regelungszwecke eine Vernachlässigung der Messauslegerdynamik gerechtfertigt ist und somit eine Beschränkung auf die Scannerdynamik ausreicht. Abschließend werden vergleichende Experimente zwischen dem realen Gerät und den erzeugten Simulationsmodellen durchgeführt und die gute Übereinstimmung festgestellt, wie in Abbildung 11 zu sehen ist.

Da ein solches rigoroses Modell, das auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht, oft zu komplex und aufwendig für Regelungsaufgaben ist, wird als nächster Schritt eine Identifikation der Scannerdynamik durchgeführt. Dazu regt man das Gerät mit einem pseudo-binären weißen Rauschsignal an und generiert ein mathematisches Modell mittels der so genannten Subspace-Identifikation. Dieses Modell ist als Differenzgleichung fünfter Ordnung angebar und lässt sich wiederum experimentell verifizieren, siehe [Schitter 01]. Analysen des identifizierten Modells weisen ein Tiefpassverhalten mit einer Resonanz bei etwa 8,5 Kilohertz (kHz) und einer Antiresonanz bei etwa 12 kHz auf. Dies ist aus dem Bodediagramm in Abbildung 12 ersichtlich.

Mit Hilfe des einfachen identifizierten Modells ist es möglich, moderne Regelungsmethoden zur Verbesserung der Eigenschaften des Rasterkraftmikroskops anzuwenden. Dies wird im folgenden Abschnitt beschrieben.



Besonders auf dem Gebiet der optimalen, robusten und nichtlinearen Regelung wurden in den letzten 15 Jahren beträchtliche Fortschritte gemacht. Optimale Regelung ist die Erzielung der bestmöglichen dynamischen Eigenschaften in Bezug auf ein Optimierungskriterium. Als Beispiel sei der möglichst schnelle Flug einer Rakete mit beschränkter Treibstoffkapazität von der Erde zum Mond genannt oder alternativ der möglichst treibstoffsparende Flug von der Erde zum Mond. Die robuste Regelung beschäftigt sich mit technischen Anwendungen, bei denen Unsicherheiten, unvorhergesehene Veränderungen oder der Ausfall von Komponenten auftreten. Zwei lineare Regelungsmethoden haben sich in beiden Bereichen als besonders effektiv erwiesen: die  $H_\infty$ -optimale Regelung und die  $L_1$ -optimale Regelung. Die  $H_\infty$ -optimale Regelung (siehe [Skogestad 96]) erlaubt die Minimierung der Energie von bestimmten Regelsignalen unter der Voraussetzung, dass Störungen energiebeschränkt sind. Die  $L_1$ -optimale Regelung (siehe [Dahleh 95]) minimiert dagegen die Amplituden von Regelsignalen wie dem Regelfehler, wobei hier die Störungen theoretisch sogar unendliche Energie haben dürfen, falls ihre Amplitude endlich ist. Beide Methoden sind für eine große Klasse von Regelungsproblemen einsetzbar und erlauben die Einbeziehung von Modellunsicherheiten. Die zugegebenermaßen kryptischen Namen  $H_\infty$  und  $L_1$  rühren von den mathematischen Bezeichnungen für die Vektorräume her, in denen die Übertragungsooperatoren der geregelten Systeme jeweils „leben“. Im Folgenden sollen einige Ergebnisse der  $L_1$ -optimalen Regelung von Piezoscannern eingehender erläutert werden. Die  $H_\infty$ -Methodik wurde in [Schitter 04] ebenfalls auf dieses Problem angewandt und erfolgreich experimentell getestet.

Im Gegensatz zur  $H_\infty$ -Regelung können mittels der  $L_1$ -optimalen Regelung die Vorgaben für das gewünschte Verhalten des geregelten Kreises direkt im Zeitbereich und nicht über den Umweg der Frequenzkennlinien angegeben werden. So ist es beispielsweise möglich, den maximal auftretenden Regelfehler zu minimieren, während gleichzeitig gefordert wird, dass das Stellsignal bestimmte Grenzen nie überschreitet. Andererseits kann auch das Überschwingen der Regelgrößen verhindert oder beschränkt werden. Da das  $L_1$ -Verfahren noch sehr neu ist, gibt es in der Literatur recht wenige experimentelle

Anwendungen. Es überwiegen Computersimulationen und akademische Studien. Am Institut für Systemtheorie technischer Prozesse an der Universität Stuttgart wird in diesem Zusammenhang gegenwärtig auch an verbesserten Entwurfsmethoden für  $L_1$ -optimale Regler gearbeitet. Das Rasterkraftmikroskop stellt dabei ein anspruchsvolles und interessantes Anwendungsgebiet dar, vor allem auch, weil es ein schnelles schwingungsfähiges System ist und schwierige Anforderungen an die  $L_1$ -Methodik stellt. Wie im Ansatz zur  $H_\infty$ -optimalen Regelung wurde ein Regler bestehend aus einer Vorsteuerung und einem Stabilisierungsanteil entwickelt, der besonderen Wert auf kleines Überschwingen und kleine Regelabweichungen legt [Rieber].

Experimentelle Ergebnisse im Vergleich zu einem gut eingestellten PI-Regler sind in den Abbildungen 13 bis 15 zu sehen. Man erkennt die deutliche Verkleinerung des Regelfehlers im  $L_1$ -Fall sowie das praktisch vollständige Ausbleiben von Überschwingen, auch bei der hohen Rasterfrequenz von 30 Hertz (Hz). Der PI-Regler dagegen ruft relativ hohe Auslenkungen des Messauslegers hervor, was zu Messungenauigkeiten sowie zu Beschädigungen an der Messspitze oder dem vermessenen Objekt führen kann. Sowohl bei der PI-Regelung als auch bei der  $L_1$ -optimalen Regelung wurde zusätzlich eine Kompensation der Lateralbewegungen des Piezoscanners durchgeführt, um Effekte wie Reibung und Lateral-schwingungen auszugleichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl mittels der  $H_\infty$ - als auch der  $L_1$ -optimalen Regelung bedeutende Verbesserungen der Messgenauigkeit um den Faktor zwei bis zehn im Vergleich zu industriell verwendeten PI-Reglern erreicht werden können. Diese Genauigkeitsverbesserungen sind möglich trotz einer um den Faktor zwei bis sechs höheren Abrasterungsgeschwindigkeit im Vergleich zum PI-Regler. Die genauen Werte hängen vom jeweiligen Anwendungsfall ab, jedoch ergibt sich trotz gleicher Hardware und gleichen Kosten immer eine signifikante Verbesserung der Funktionsweise durch Einsatz geeigneter moderner Regler.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch den Einsatz moderner regelungstechnischer Methoden signifikante Verbesserungen der Rasterkraftmikroskopie möglich sind. Eine Steigerung der Abtastungsgenauigkeit bei gleichzeitiger

## Regelung von Rasterkraftmikroskopen

In industriellen Anwendungen werden Rasterkraftmikroskope bisher meist mit sehr einfachen Reglern, so genannten PI-Reglern, betrieben. Diese PI-Regler ziehen üblicherweise den aktuellen Regelfehler (das heißt die Differenz zwischen Soll- und Istwert) und sein Integral über vergangene Zeitpunkte in Betracht, um daraus das Stellsignal zu generieren. Die relativ einfache Funktionsweise und Einstellbarkeit eines PI-Reglers ist der Grund für seine weite Verbreitung in der Industrie. Jedoch müssen bei Anwendung der PI-Regelung am Rasterkraftmikroskop entweder sehr lange Messzeiten oder aber Verzerrungen und Ungenauigkeiten im Messbild in Kauf genommen werden. Moderne Regelungsmethoden erlauben heutzutage die deutliche Verbesserung der mit dem PI-Regler erzielbaren Ergebnisse.

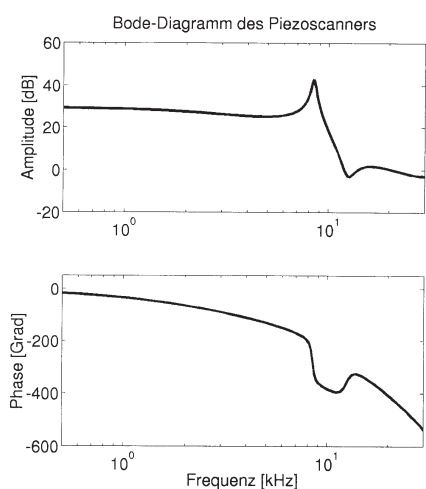


Abb. 12: Bode-Diagramm des identifizierten Modells für das Rasterkraftmikroskop. Der Amplitudengang (oben) und der Phasengang (unten) zeigen charakteristisches Frequenzbereichsverhalten mit einer Resonanz bei etwa 8,5 kHz und einer Antiresonanz bei etwa 12 kHz.

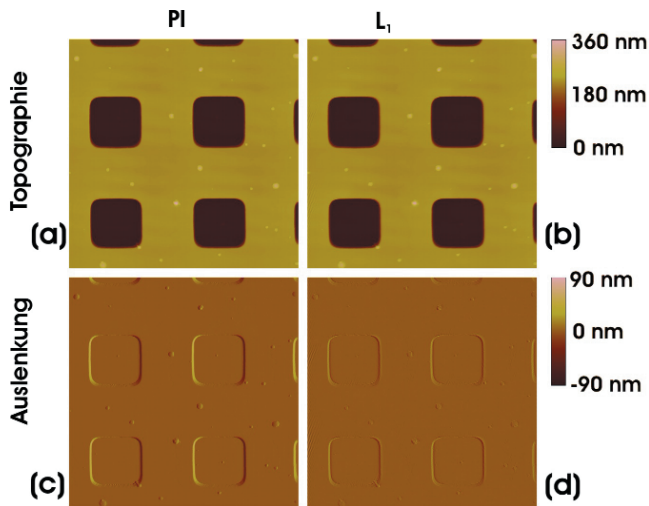


Abb. 13: Messergebnisse eines Rasterkraftmikroskops an einem Kalibriergitter (25  $\mu\text{m}$  mal 25  $\mu\text{m}$ ) mit einem Topographieabfall von 200 nm, gemessen bei einer Rasterfrequenz von 10 Hz. Bild (a) zeigt die aufgenommene Topographie, gemessen mit einem PI-Regler, Bild (b) bei Messung mit einem L1-optimalen Regler. In den Bildern (c) und (d) sind die Auslenkungen des Messauslegers gezeigt. Helle und dunkle Stellen, die vom vorherrschenden Brauntönen abweichen, weisen auf großen Regelfehler hin. Die Scanrichtung läuft von rechts nach links.

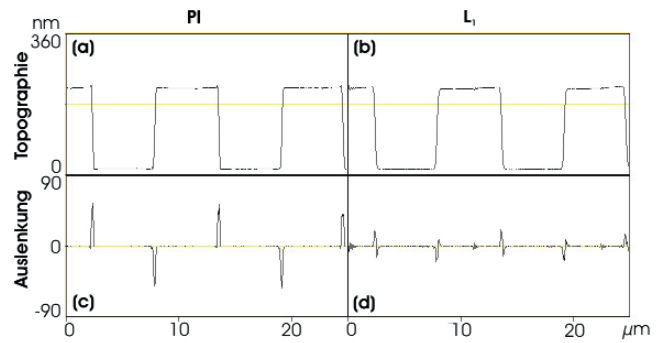


Abb. 14: Topographieschnitte der Messergebnisse aus Abb. 13. Die Bilder zeigen den Topographieverlauf, gemessen mit PI-Regler (a) und L1-Regler (b), sowie den Regelfehler für PI-Regler (c) und L1-Regler (d). Die Scanrichtung läuft von rechts nach links.

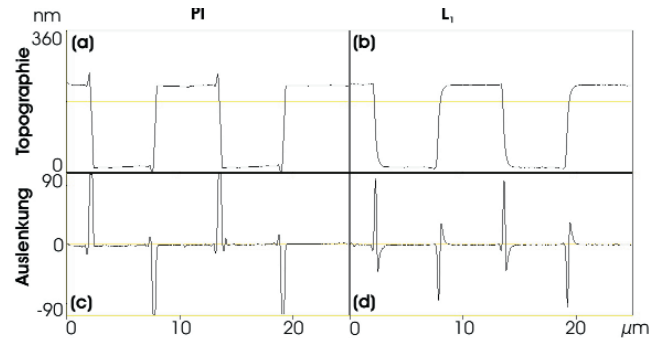


Abb. 15: Topographieschnitte von Messergebnissen am selben Kalibriergitter wie in Abbildung 13, diesmal aufgenommen mit einer Rasterfrequenz von 30 Hz. Die Bilder zeigen den Topographieverlauf, gemessen mit PI-Regler (a) und L1-Regler (b), sowie den Regelfehler für PI-Regler (c) und L1-Regler (d). Die Scanrichtung läuft von rechts nach links.

Beschleunigung der Abrasterung ist aus den gezeigten Ergebnissen ersichtlich. Damit ist in der Tat „schnelleres Sehen“ im Nanobereich möglich. Dies erhöht die Effektivität und Güte vieler Experimente und Anwendungen in Bereichen wie Biologie oder Halbleiterindustrie.

## Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel versucht, einen Bogen zwischen den Grundideen der Nanotechnologie und der dazu benötigten Mikroskopietechnik zu schlagen. Insbesondere soll hervorgehoben werden, dass moderne Methoden der Systemtheorie und der Regelungstechnik dabei helfen, die herrschenden physikalischen Effekte sinnvoll und gewinnbringend technisch einzusetzen. Die Entwicklung auf diesem Gebiet steckt gerade erst in ihren Anfängen und verspricht eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts zu werden. Neben Physik und Chemie werden auch die Systemtheorie und Regelungstechnik entscheidende Faktoren für zukünftige Fortschritte auf dem Gebiet der Nanotechnologie sein. Die Regelungstechnik ist somit ein Puzzlestein auf dem weiten Weg zur Eroberung des Nanokosmos.

## Danksagung, Bildnachweis

Die Autoren danken Dr. Georg Schitter von der University of California at Santa Barbara für die freundliche Bereitstellung der Abbildungen 10 und 11. Für die Abbildungen 1 bis 4 sowie für das Titelbild gilt: „Images reproduced by permission of IBM Research, Almaden Research Center. Unauthorized use not permitted.“

## Literatur

- Binnig, G., C. F. Quate und C. Gerber, „Atomic force microscope.“ *Physical Review Letters*, Band 56(9), S. 930-933, 1986
- Binnig, G., H. Rohrer, C. Gerber und E. Weibel, „Tunneling through a controllable vacuum gap.“ *Applied Physics Letters*, Band 40(2), S. 178-180, 1982
- Boeing, N., *Nano?! Die Technik des 21. Jahrhunderts*. Rowohlt, Berlin, Deutschland, 2004
- Dahleh, M. A. und I. J. Diaz-Bobillo, *Control of uncertain systems: a linear programming approach*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1995
- Ljung, L., *System Identification - Theory For the User*, 2nd ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999
- Murray, R. M. (chair), *Control in an information rich world. Report of the Panel on Future Directions in Control, Dynamics and Systems*. Online verfügbar unter <http://www.cds.caltech.edu/~murray/cdspanel/>, Juni 2002

- Rieber, J. M., G. Schitter, A. Stemmer und F. Allgöwer, „Experimental application of L1-optimal control for an atomic force microscope.“ To appear
- Sarid, S., *Scanning Force Microscopy*. Oxford University Press, New York, NY, USA, 1994
- Schitter, G., F. Allgöwer und A. Stemmer, „A new control strategy for high-speed atomic force microscopy.“ *Nanotechnology*, Band 15, S. 108-114, 2004
- Schitter, G., P. Menold, H. F. Knapp, F. Allgöwer und A. Stemmer, „High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes.“ *Review of Scientific Instruments*, Band 72(8), S. 3320-3327, 2001
- Skogestad, S., und I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control*. Wiley & Sons, Chichester, UK, 1996





### Jochen M. Rieber

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemtheorie technischer Prozesse der Universität Stuttgart. Er erlangte den Abschluss Diplom-Ingenieur in Technischer Kybernetik von der Universität Stuttgart sowie den Master of Science in Engineering Science and Mechanics vom Georgia Institute of Technology in Atlanta, USA, beides im Jahr 2001. Am Georgia Tech wurde Jochen Rieber mit dem Sigma Xi Best M.S. Thesis Award 2001 ausgezeichnet. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf dem Gebiet der optimalen und robusten Regelungstheorie mit Anwendungen in der Robotik und in der Nanotechnologie.



### Frank Allgöwer

hat in Stuttgart Technische Kybernetik und an der University of California at Los Angeles Angewandte Mathematik studiert und promovierte in der Fakultät Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart. Er ist Professor für Systemtheorie technischer Prozesse und Leiter des gleichnamigen Instituts der Universität Stuttgart. Vor seiner Berufung nach Stuttgart im Jahr 1999 hatte er eine Professur für Nichtlineare Systeme im Departement Elektrotechnik der ETH Zürich. Längere Forschungsaufenthalte brachten Frank Allgöwer an das NASA Ames Research Center, das California Institute of Technology, die University of California at Santa Barbara und zur Firma DuPont in Wilmington, Delaware. Sein Hauptarbeitsgebiet ist die Entwicklung und Anwendung systemtheoretischer Methoden zur Analyse und Regelung dynamischer Systeme.



### Andreas Stemmer

Die Forschungsschwerpunkte von Andreas Stemmer, Professor für Nanotechnik an der ETH Zürich, liegen im Bereich der Instrumentenentwicklung für den Nanobereich, der biologisch orientierten Nanofabrikation und dem Interfacing von Nanostrukturen. Er diplomierte 1986 in Experimentalphysik an der Universität Basel und promovierte dort 1990 in Biophysik. Während seiner Dissertation über Biological Scanning Tunneling Microscopy absolvierte er ein Zweitstudium in Molekularbiologie. Es folgten Forschungsaufenthalte am Laboratory of Molecular Biology des Medical Research Council in Cambridge, UK, und am Marine Biological Laboratory in Woods Hole, MA, USA, bevor er 1995 an die ETH Zürich berufen wurde.

