

Vom Mikroskop zum vielseitigen Werkzeug

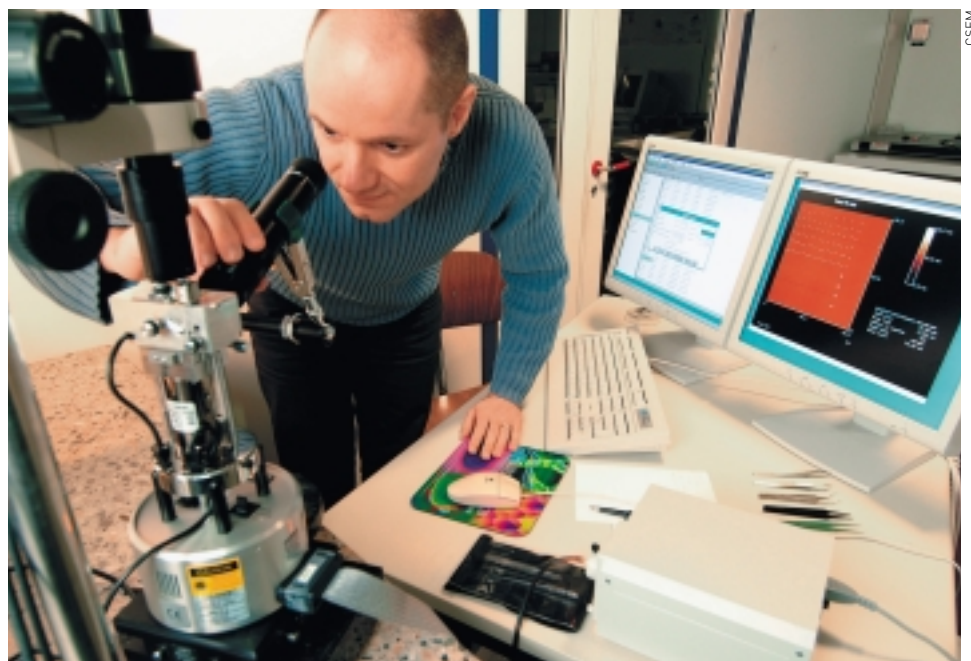
Von Christian Bernhart*

Das Rastertunnelmikroskop brachte Professor Dr. Heinrich Rohrer und Professor Dr. Gerd Binnig den Nobelpreis und machte in der Folge die Schweiz zu einer führenden Nation auf dem Gebiet der Nanotechnologie. Es folgte die Entwicklung des universelleren Rasterkraftmikroskops. Ausgehend von dieser Entwicklung entstehen daraus Nanoinstrumente, beispielsweise ein Nanodispenser (CSEM), eine Millipede (IBM Rüschtikon) und die biochemischen Cantilever-Sensoren.

Die Nanotechnologie, vom blossen Auge längst nicht mehr zu erkennen, übersteigt die herkömmliche Vorstellungskraft. Im Kleinstbereich von einigen Millionstel Millimetern beeinflusst, verändert und konstruiert diese neue Technologie Materie und Partikel zu neuen Verbindungen mit ganz neuen Eigenschaften. Ein Beispiel dafür sind die nadelartigen Röhren aus Kohlenstoff. Diese Nanotubes, deren Herstellung dem Japaner Sumio Iijima erstmals 1991 mittels Bogenentladung zweier Grafitелеktroden gelang, haben je nach Ausrichtung ihrer in Sechsecken angeordneten Kohlenstoffmoleküle unterschiedliche Eigenschaften. Sie sind entweder leitend wie Metall, oder sie wirken als Halbleiter wie Silizium. Eine weitere Eigenschaft: Einwandige Nanotubes haben eine Steife, die zehnmal grösser als jene von Stahl ist. Nanotubes gelten heute als Bausteine künftiger Computerchips.

Tunneleffekt und Oberflächen

Die Computerindustrie ist geradezu prädestiniert, ihre Forschungsanstrengungen auf die Nanotechnologie auszurichten. Die Maxime der möglichst schnellen Datenverarbeitung wird dann erreicht, wenn immer mehr Daten auf kleinerem Raum gespeichert und verarbeitet werden können; je kürzer der Weg, desto schneller die Verarbeitung. Die Grenzen dazu setzen auch heute noch die leitenden und isolierenden Materialien. Als Experimentalphysiker Heinrich Rohrer im Jahr 1978 den Frankfurter Physiker Gerd Binnig



CSEM-Forscher André Meister bei der Arbeit mit dem Atomic Force Microscope (AFM), ausgerüstet mit einem Nanodispenser. (Bild 1)

nach Rüschtikon in das IBM-Labor holte, nahmen sich die beiden Forscher vor, die Oberflächen von festen Metallen und Halbleitern besser zu verstehen. Zuvor hatte sich Heinrich Rohrer insbesondere mit dem Tunneleffekt beschäftigt, der besagt, dass aufgrund der Quantenmechanik das Elektron ein Energiepotenzial überwinden kann, selbst wenn es dazu eigentlich nicht über die nötige Energie verfügt. Auf diese Weise kann Strom scheinbar über eine nichtleitende Barriere fliessen. Drei Jahre später entstand das erste Rastertunnelmikroskop, in der Fachliteratur kurz STM, für Scanning Tunneling Microscope, genannt.

Plattenspieler-Abtastnadel als Vorbild

Das Abtasten einzelner Atome mit einer Nadelspitze, gefolgt vom Aufzeichnen in einem Raster, erweist sich beim STM als bahnbrechend. Der Basler Physikprofessor Dr. Hans-Joachim Güntherodt, Direktor des Nationalen Forschungsschwerpunkts Nanowissen-

schaften, stuft es wie folgt ein: «Die Entwicklung des Rastertunnelmikroskops im Jahr 1981 und die Verleihung des Nobelpreises 1986 haben ganz wesentlich zur Entwicklung der Nanowissenschaften beigetragen und ebenfalls dazu, dass die Schweiz heute auf diesem Gebiet führend ist.»

Das STM ermöglicht die Abbildung einzelner Atome, einen Vorstoss in Dimensionen, zu denen potente Elektronenmikroskope nur mit grossem Aufwand vordringen können. Ein Nachteil hat jedoch das STM. Basierend auf dem Tunnelstrom, der zwischen Spitze und Untergrund fliesst, können nur elektrisch leitende Stoffe, also Metalle und Halbleiter, untersucht werden. Als Gerd Binnig nach der Entwicklung des STM mit seinem damaligen wissenschaftlichen Mitarbeiter Christoph Gerber für ein Forschungsjahr in die USA an die Stanford-Universität nach Palo Alto ging, dachte er darüber nach, wie sich dasselbe Prinzip auch für das Abbilden von Isolatoren anwenden liesse. Tagelanges Nachdenken rief bei ihm folgende bildli-

che Vorstellung hervor: Die Abtastspitze verbunden mit einem Federbalken, ähnlich der Abtastnadel eines Plattenspielers, bewegt sich und spürt die Kraft, die von der Anziehung oder Abstoßung der Elektronen, von den Magnetfeldern oder der chemischen Van-der-Waals-Kraft ausgeht. Die Idee des Rasterkraftmikroskops, des Atomic Force Microscope (AFM), war fünf Jahre nach dem STM geboren.

Abtasten ohne Strom

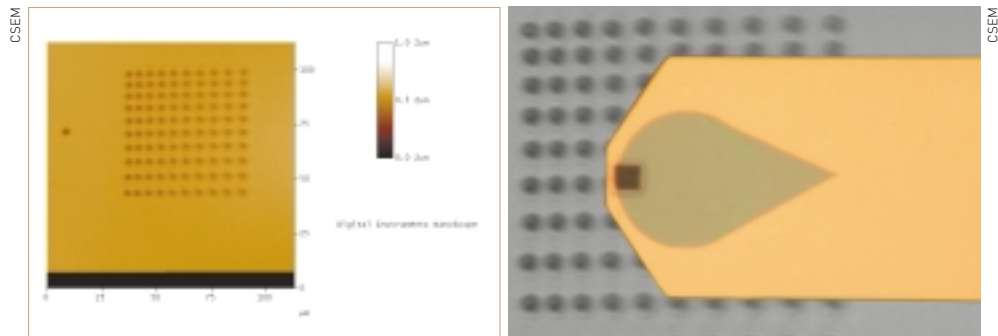
Die Höhendifferenz der Oberfläche wird beim AFM nicht mehr, wie beim STM, direkt über die Nadelspitze und dem damit verbundenen piezokeramischen Stellglied ermittelt, vielmehr ist die Spitze am Ende eines Federbalkens montiert. Dieser Federbalken oder Cantilever ist mittels Photolithografie aus einem Siliziumblock herausgearbeitet und mit dem Rest des Blocks nahtlos verbunden. Ein piezoelektronischer Scanner bewegt den Block mit Federbalken und Nadelspitze über die Oberfläche in der x- und y-Achse. Oder aber der piezoelektronische Scanner ist in der Probe untergebracht. Die z-Achse, das Höhenprofil der Oberfläche, wird jedoch ermittelt, wenn die Spitze über die Atome fährt und dabei den Cantilever auslenkt. Ein Laserstrahl registriert die Bewegung des Cantilevers und überträgt diese auf eine Photodiode.

Die Vorteile des AFM gegenüber dem STM sind eklatant. Die Begrenzung auf leitende Materialien fällt dahin, auch müssen die Objekte nicht mehr im Vakuum untersucht werden, selbst biologische Makromoleküle und ganze Zellen lassen sich in Pufferlösungen ohne vorausgehende aufwändige Präparation abtasten und darstellen.

AFM als Universitäts-Hit

Die Aussicht auf die enorm erweiterte Untersuchungspalette löste eine Forschungsinitiative aus. Kaum haben Gerd Binnig, Christoph Gerber und Calvin Quate ihre ersten wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht, machten sich die Forscher der uni-

(l.) Nanodroplets – kleinste Flüssigkeitstropfen bis minimal 5 Attoliter. (Bild 2)
 (r.) Nanodispenser beim Auftragen von Flüssigkeitstropfen bis minimal 5 Attoliter. (Bild 3)



versitären Physikinstiute an den Bau der eigenen AFM. Darunter befand sich damals auch der Diplomand Harry Heinzlmann, der heute die Nano- und Life-Science-Abteilung des Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) leitet. Seine Doktorarbeit behandelte im Jahr 1989 das Thema: «Application of atomic force microscopy to non-conducting surfaces». In Ausführung, Anwendung und Präzision jedoch unterscheiden sich die ersten Rasterkraftmikroskope von den heutigen industriell hergestellten Modellen.

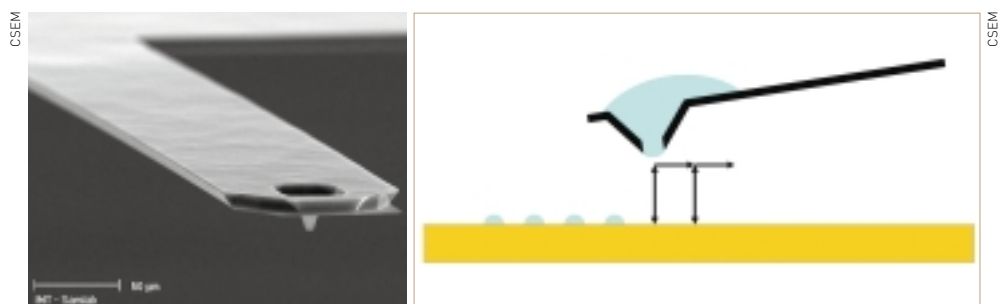
Eines der Hauptprobleme war die enorme Empfindlichkeit der Abtastnadel, die von den natürlichen Raumschwingungen, die hunderttausend Mal zu stark sind, abgekoppelt werden musste. Heinzlmann erinnerte sich: «Früher dachte man, man müsse diese Schwingungen ganz stark dämpfen.» Zu diesem Zweck wurde die Abtastvorrichtung in stark dämpfende Gebilde weich eingespannt. Mit mässigem Erfolg. Heinzlmann spricht

von einer spannenden Pionierzeit, aber auch von «unhaltbaren Zuständen». Reden war beim Messvorgang verboten, Atmen kaum erlaubt. Und, so Harry Heinzlmann: «Die Sache funktionierte nur, wenn die Busse aufhörten zu fahren. Also haben wir nach Mitternacht mit den Messungen angefangen.»

Mikrofabrikation der Spitze

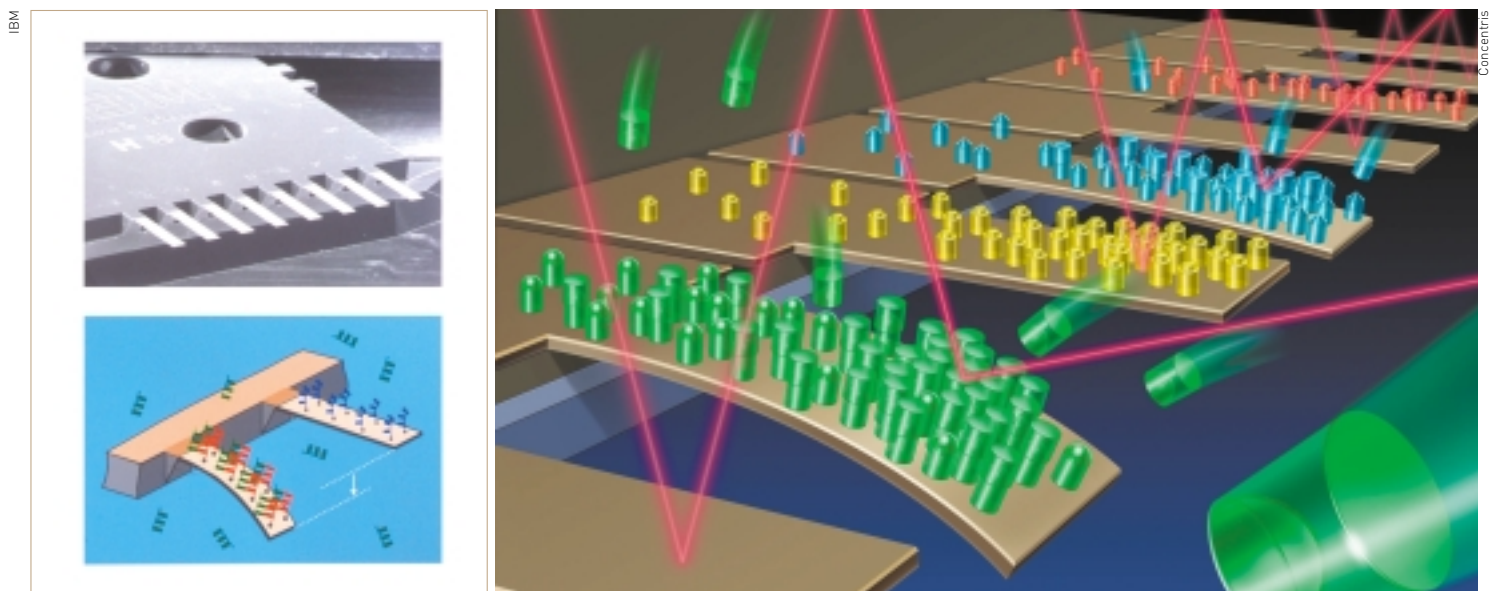
Elementare Fortschritte werden danach auf zwei Ebenen gemacht. Zum einen gelangt man zur Einsicht, dass die Geräte gar nicht stark gedämpft sein müssen, wenn sie klein, stabil und fest verspannt sind. Der zweite Fortschritt betrifft die Abtastspitze. Anfänglich ist es viel zu teuer, diese industriell herzustellen. Mit einem kleinen Metallfaden führte man deshalb von Hand einen Diamantsplitter an den Federbalken. «Es kam auch sehr darauf an», so Harry Heinzlmann, «welchen Leim man benutzte.» Heute werden die Spitzen in der Mikrotechnik in Serie hergestellt; aus 440 Spitzen wählt man die beste aus.

(l.) Der am CSEM entwickelte Nanodispenser zum Auftragen von kleinsten Flüssigkeitstropfen. (Bild 4)
 (r.) Prinzip, wie Nanodroplets aufgetragen werden. (Bild 5)



(l.) Der an der Universität Basel entwickelte biochemische Sensor ist mit acht winzigen Federbalken (Cantilevers) ausgerüstet (oben), die auf das zu untersuchende gasförmige oder physiologische Substrat unterschiedlich stark durch Biegung reagieren; unterschiedlich, weil sie aufgrund ihrer chemischen Dotierung verschiedene Moleküle zur Reaktion an sich binden (unten). (Bild 6)

(r.) Die Biegung oder Auslenkung des Cantilever wird über einen Laserstrahl registriert und an einer Fotodiode weitergeleitet. (Bild 7)



Das erste AFM ist vor nunmehr 19 Jahren gebaut worden. Seither entwickelt es sich zu einem universalen Werkzeug der Nanotechnologie. Einerseits finden die Forscher und Ingenieure neue Ideen, um das Mikroskop kontrastreicher zu machen, andererseits finden sie Wege, um das AFM so zu modifizieren, dass es zum Werkzeug für die Materialveränderung und Sensor im atomaren Bereich wird.

Lichtquanten

So kann mit dem Prinzip des AFM erstmals eine effiziente Version des bereits 1928 konzipierten optischen Nahfeldmikroskops gebaut werden. Im Scanning Near-Field Optical Microscope (SNOM) befindet sich am Ende der Abtastvorrichtung anstelle der Spitze ein Loch, durch das Lichtquanten per Laser durchgeschickt werden. Generell eignen sich ja Lichtmikroskope begrenzt zur Untersuchung von Kleinstteilchen, weil die räumliche Auflösung durch die Wellenlänge des Lichts begrenzt ist. Kleiner als die Hälfte der Lichtwellenlänge geht es nicht. Beim sichtbaren Licht liegt die Grenze ungefähr bei 300 nm. Die Lichtteilchen, die nun durchs Loch des SNOM gelangen, werden auf bestrichenen

Oberflächen reflektiert und von einer Fotodiode registriert, oder aber die Fotodiode nimmt das Licht hinter der Probe auf. Am CSEM in Neuenburg entwickelt Harry Heinzlmann zusammen mit dem Institut de Microtechnique (IMT) der Universität Neuenburg die Mikrofabrikation eines Cantilevers für ein SNOM im Bereich von 32 nm. Gegenüber dem AFM macht das SNOM bei gewissen Proben eine kontrastreichere Abbildung möglich.

Vom SNOM zum Nanodispenser

«Nach dieser Entwicklung», meint Harry Heinzlmann, «war es nur ein kleiner Schritt zum Nanodispenser.» Prinzipiell musste die Spitze nur so optimiert werden, damit anstelle des Lichts eine Flüssigkeit durch das Loch fließen kann. Dazu wird in eine hohle Spitze mittels fokussierte Ionenstrahltechnologie (FIB) ein Loch geschossen und der Hohlkörper als Reservoir benützt, um so Material im Nanobereich deponieren zu können. Einen Dispenser dieser Art haben André Meister und Harry Heinzlmann am CSEM entwickelt. Damit können gezielt Biomoleküle oder Lösungen in einem sehr engen Mikrometer-Raster abgegeben werden. Zu-

sätzlich haben sie einen Teil des Cantilevers bei der Spitze zu einem Reservoir für einige Hundert Femtoliter, wiederum mittels FIB, ausgehöhlt.

In ein kommerzielles AFM eingeschleust lässt sich zurzeit der am CSEM entwickelte Nanodispenser nutzen für das Beschreiben von Oberflächen mit Tröpfchen, die je nach hydrophober oder hydrophiler Oberfläche einen Durchmesser von 410 bis 800 nm aufweisen. Das Dotieren von Flüssigkeit im Nanobereich könnte dereinst medizinischen Untersuchungen oder der Biotechnologie dienen. So könnte die DNA ohne aufwändige Vervielfältigung über die Polymerasekettenreaktion (PCR) auf die Reaktionsfähigkeit mit bestimmten Stoffen untersucht werden. Potenziell kämen solche Arrays billiger zu stehen.

Dispenser als Millipede?

Bis es aber so weit ist, sind noch einige mechatronische Schranken zu überwinden. Zurzeit wird nach einem geeigneten Kanalsystem für den Transport der Flüssigkeit geforscht. Laut Harry Heinzlmann könnte der Nanodispenser für den kommerziellen Einsatz eine ähnliche Entwicklung durchlaufen, wie dies am IBM in Rüschlikon mit dem

Das Abtasten einzelner Atome mit einer Nadelspitze, erweist sich beim STM als bahnbrechend.

AFM zum Millipede, dem Tausendfüssler zur Datenspeicherung, erfolgt ist (vgl. dazu «Blick in die Glaskugel» in «SWISS ENGINEERING STZ 3/05, S. 20–24). Stromimpulse steuern die 4096 Cantilever des Millipedes derart, dass sie einerseits die Spitze über einen Widerstand aufheizen, andererseits an das Siliziumsubstrat, das sich unter der Polymer-Oberfläche befindet, eine Spannung anlegen, die den Cantilever nach unten zieht. Mit diesem Impuls stanzen die Spitzen der einzelnen Cantilever Löcher in die Polymeroberfläche.

Die Steuerung des Nanodispensers nach der Art und Weise des Millipedes bereitet noch Kopfzerbrechen. Die Flüssigkeit in dieser geringen Quantität würde bei einem solchen Stromimpuls sehr leicht verdampfen. Zwar möchte Harry Heinzelmann die Dotierung mit Flüssigkeit ebenfalls mittels Stromimpuls geben. «In diesem Fall müssen wir die Wärmeleitfähigkeit ändern und mit relativ wenig Strom auskommen», schränkt Harry Heinzelmann ein. Hinzu kommt, dass das im Entwicklungsstadium bestehende Kanalsystem im Bereich des sehr sensibel reagierenden Piezoelements geführt werden muss.

Sensibler Cantilever anstelle der Spitze

Einen neuen Weg, das AFM weiterzuentwickeln, wählt Christoph Gerber, erster Mitarbeiter von Gerd Binnig, ebenfalls im IBM-Forschungslabor in Rüschlikon tätig: «Ich habe schon immer ein chemisches AFM bauen wollen», sagt Christoph Gerber rückblickend. Die zündende Entdeckung kam, als Christoph Gerber die Oberfläche eines AFM-Cantilevers mit Aluminium beschichtete. Der Cantilever wurde zum Bimetall, das sehr empfindlich auf Temperatureinwirkungen reagierte. Mit seinen Kollegen Jim Gimzewski und Ernst Meyer baute Christoph Gerber den Cantilever im Jahr 1994 zu einem Calorimeter aus. Dieser ist geeignet, die Wärmeentwicklung bei einer chemischen Reaktion zu messen. Die Idee, den Cantilever als chemischen Sensor einzusetzen, war geboren.

Nicht mehr die Nadelspitze registriert Atome oder Moleküle, jetzt ist es die vergleichsmässig grosse Oberfläche des Federbalkens, die subtil auf Veränderungen im molekularen Bereich reagiert. Je nach chemischer Dotierung der Cantilever-Oberfläche werden darauf bestimmte Moleküle absorbiert. Diese lösen einen Stress aus und verbiegen den Cantilever, dessen Auslenkung gleich wie bei einem AFM mittels Laser und Fotodiode registriert wird.

Mit wissenschaftlichen Mitarbeitern und Doktoranden von Physikprofessor Hans-Joachim Güntherodt am Physikalischen Institut der Universität Basel, mit dem IBM seit über 20 Jahren eine enge Zusammenarbeit pflegt, baut das Team in der Folge das Prinzip des abgewandelten AFM, das chemische und biochemische Prozesse in nanomechanische Bewegungen umsetzt, weiter aus. Um bei solchen Prozessen nicht bloss eine spezifische Reaktion aufzuzeichnen, sondern eine ganze

Nanotechnologie-Links

Nationale Forschungsschwerpunkte:

Nanowissenschaften, Basel: www.nccr-nano.org

Materialien mit neuartigen elektronischen Eigenschaften, Genf: www.manep.ch

Quantenphotonik, Lausanne: <http://nccr-qp.epfl.ch/>

Firmen und Institute

IBM Switzerland, Rüschlikon: www.zurich.ibm.com

CSEM, Neuenburg: www.csem.ch/fs/nanotech.htm

Empa, Dübendorf: nanotech@surfaces,

www.empa.ch/plugin/template/empa/848/*/--/l=1

Top-Nano-21-Programm: www.temas.ch/nano/nano_homepage.nsf

Internationale Konferenz Nanowissenschaft und Nanotechnologie (ICN & T 2006)

Vom 30. Juli bis 4. August 2006 findet aus Anlass des 25 Jahr-Jubiläums des Rastertunnelmikroskop, und des 20-Jahr-Jubiläums des Rasterkraftmikroskops im Konferenzzentrum in Basel eine internationale Konferenz über Nanowissenschaft und Nanotechnologie statt.

Hauptthemen sind:

Nanobiologie: Biomolekulare Interaktionen, Abbildungen von Biomolekülen und Membranen, Bio-Sensoren

Nanosysteme, Nanomechanik und Nanooptik: Manipulation einzelner Atome und Moleküle, Molekularaufbau, NEMS, Nanotribologie und optische Nahfeldmikroskopie

Molekularelektronik: Nanodrähte, elektrischer Transport durch Moleküle, Moleküle auf Metallen und Isolatoren, neue Schaltkreisarchitektur

Quantum-Informatik: Halbleiter-Nanostrukturen und Quantum Dots

Materialien: Oberflächenstrukturen, elektrische und chemische Oberflächenstrukturen, Katalysatoren, Dünnschichten, Cluster und Nanopartikel, Nanoröhren, magnetische Strukturen, Supraleiter

Rastermikroskopie (SPM): Spin-sensible Proben, unelastische Tunnelspektroskopie, kontaktlose Kraftmikroskopie, Hochfrequenz SPM

Info: www.icnt2006.ch, Anmeldung: www.akm.ch/english/default.htm

Palette von Reaktionen selektiv und spezifisch registrieren zu können, werden mehrere Cantilever parallel aus einem Träger «mikrofabriziert». Diese Idee nimmt IBM später mit dem Millipede ebenfalls auf. Zurzeit wird mit einem Sensor mit acht Cantilevern gearbeitet. Mittels Ink-Jet-Spotter kann jeder Einzelne davon chemisch dotiert werden, um chemische und biochemische Reaktionen in gasförmiger oder physiologischer Umgebung zu registrieren. Ehemalige Mitarbeiter von Christoph Gerber an der Universität Basel setzen die patentierten Ideen in der Firma Concentris um und bauen inzwischen verschiedene Geräte auf diesem Prinzip.

Gene und Proteine gleichzeitig unter der Lupe

Christoph Gerber und seine engsten Mitarbeiter Martin Hegner und Hans Peter Lang im Basler Forschungsteam haben im Rahmen des Nationalen Forschungsschwerpunkts Nanowissenschaften und des Top-Nano-21-Programms nun biochemische Cantilever-Sensoren entwickelt, die Ablenkungen bis zu einem Nanometer messen. Direkte Messungen von Reaktionen mit Teilen der DNA ohne vorgängiges, zeitraubendes PCR sind möglich. In den kommenden Publikationen wird das Basler Team zeigen, wie die Sensoren einsetzbar sind, um gleichzeitig Untersuchungen in Genomics

und Proteomics durchführen zu können. Weitere Anwendungen dieser Methode sind schnelle Detektionen von Mikroorganismen, von Resistenzen, von Lebensmittelkontaminationen, von Virendetektionen in nativer Umgebung und als «chemische Nase» für die Qualitätskontrollen im Lebensmittelbereich. Damit kommt Gerber und sein Team dem «Lab on the Chip» immer näher. Enthusiastisch meint der quirlige, inzwischen 63-jährige Forscher: «Diese Sensoren haben, wie einst das AFM, ein völlig neues Fenster aufgemacht.» ■

**Christian Bernhart, lic. phil. I, Journalist BR, Bern*

BALDOR

The dawn of real-time Ethernet motion control

It's the start of a new era for motion control solutions, and Baldor is leading the way. Our next generation real-time Ethernet motion controllers and servo drives offer cost effective performance and flexibility.

With ultra low set-up time, plug and play expandability, and the power of Baldor's Mint[®] programming language, Baldor's real-time solution is a revolution in motion control.

Have you woken up to real-time? Discover more, visit:

www.baldor.ch/epl

Baldor ASR AG, Postfach 73, Schutzenstrasse 59, CH-8245 Feuerthalen, Switzerland.
E: sales.ch@baldor.com T: +41 52 647 4700 www.baldor.ch



**ETHERNET
POWERLINK**
STANDARDIZATION GROUP