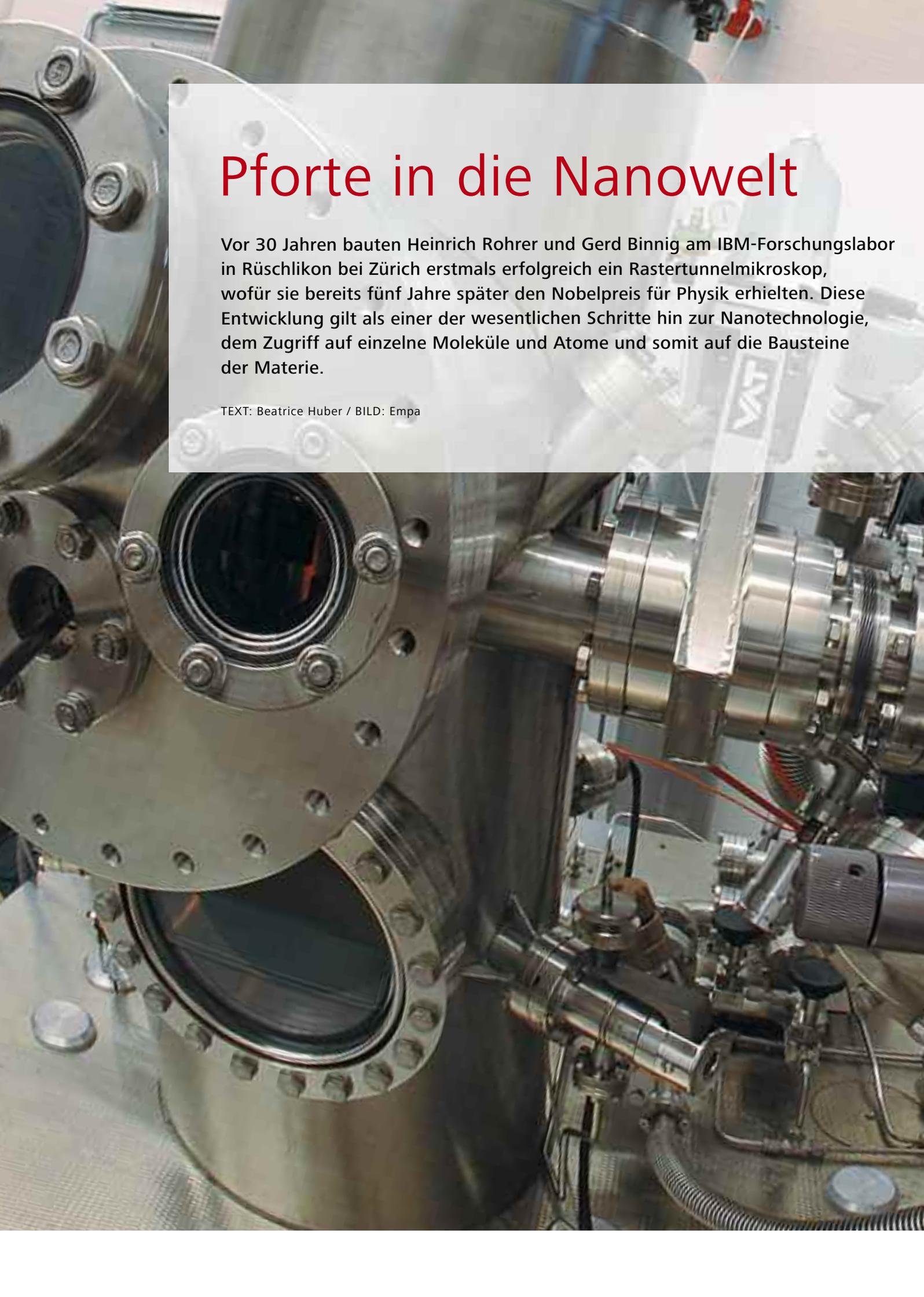


# Pforte in die Nanowelt

Vor 30 Jahren bauten Heinrich Rohrer und Gerd Binnig am IBM-Forschungslabor in Rüschlikon bei Zürich erstmals erfolgreich ein Rastertunnelmikroskop, wofür sie bereits fünf Jahre später den Nobelpreis für Physik erhielten. Diese Entwicklung gilt als einer der wesentlichen Schritte hin zur Nanotechnologie, dem Zugriff auf einzelne Moleküle und Atome und somit auf die Bausteine der Materie.

TEXT: Beatrice Huber / BILD: Empa





Das Rastertunnelmikroskop – im Bild ein Gerät, das am Empa-Standort in Thun aufgebaut ist – feiert dieses Jahr seinen 30. Geburtstag.

**N**anotechnologie, wie wir sie heute kennen, gäbe es nicht ohne die Instrumente, die diese Welt des extrem Kleinen sichtbar und damit analysierbar und manipulierbar machen. Auch Empa-Wissenschaftler nutzen Geräte wie Elektronenmikroskope, Rastertunnelmikroskope oder Rasterkraftmikroskope für ihre Forschung und erweitern deren Einsatzgebiete, wie die Beiträge auf den folgenden Seiten zeigen. Das Rastertunnelmikroskop feiert dieses Jahr seinen 30. Geburtstag: 1981 entwickelten Heinrich Rohrer und Gerd Binnig am IBM-Forschungslabor in Rüschlikon das erste Rastertunnelmikroskop, das die nötige Präzision und Stabilität aufwies. 1986 wurden sie dafür mit dem Nobelpreis in Physik geehrt.

#### **Mikroskop rastert Oberfläche ab**

Das Rastertunnelmikroskop ist kein «echtes» Mikroskop, da es kein direktes Bild des untersuchten Objekts erzeugt. Das Instrument rastert mit einer Messspitze das Profil einer Oberfläche ab, wobei immer ein winziger Abstand zwischen der Spitze und Oberfläche bestehen bleibt. Dadurch wird verhindert, dass während des Rasterns etwas beschädigt wird. Das Mikroskop nutzt zur Messung den so genannten Tunneleffekt. Dieser quantenmechanische Effekt, der dem Mikroskop seinen Namen gab, ermöglicht einem Elektron (oder auch einem anderen Teilchen), einen Tunnel durch einen nach klassischer Physik unüberwindbaren Potenzialberg zu bohren. Infolgedessen fliesst ein Strom, der gemessen werden kann, selbst wenn sich Messspitze und Oberfläche nicht berühren. Auch Flash-Speicher, etwa in USB-Sticks, beruhen auf dem Tunneleffekt.

Rohrer und Binnig teilten sich 1986 den Physik-Nobelpreis mit dem deutschen Elektroingenieur Ernst Ruska, der bereits in den 1930er-Jahren das Elektronenmikroskop entwickelt hatte. Dieses nutzt statt normalem Licht einen Elektronenstrahl und erzielt damit eine deutlich bessere Auflösung. Lichtmikroskope erreichen eine Auflösung von rund 200 Nanometern, Elektronenmikroskope derzeit rund 0,1 Nanometer. Wie die Rastertunnelmikroskope sind auch die Elektronenmikroskope inzwischen längst zu unverzichtbaren Werkzeugen der Nanotechnologie geworden. //

# Forschungsprogramm gestartet

Welche Chancen bieten Nanomaterialien, welche Risiken bergen sie? Das Nationale Forschungsprogramm 64 will bestehende Wissenslücken schliessen und so zu einem nachhaltigen Erfolg von Nanomaterialien beitragen. Die Empa ist an vier von 17 geförderten Projekten beteiligt.

TEXT: Beatrice Huber

## Ist nano nachhaltig?

Um Herausforderungen wie den Klimawandel oder die Verknappung natürlicher Ressourcen zu meistern, sind nachhaltige Lösungen gefragt. Nanotechnologien und Nanomaterialien liefern dazu neue Ansätze. Die Schweizerische Akademie für Technische Wissenschaften SATW hat gemeinsam mit führenden Schweizer Nano-Experten wie Empa-Direktionsmitglied Pierangelo Gröning eine Broschüre zu Nachhaltigkeit und Nanotechnologie herausgegeben und ruft darin zur öffentlichen Diskussion über Chancen und Risiken auf. Denn die Nanotechnologien werden langfristig nur Erfolg haben und einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten, wenn sie keine zu grossen Risiken bergen. Die Broschüre kann als PDF heruntergeladen werden unter [www.satw.ch/nano](http://www.satw.ch/nano).

Informationstechnologie, Elektronik, Baumaterialien, Umwelttechnik, Energietechnik, Haushaltsgeräte, Textilien, Kosmetika, Nahrungsmitteln, Medizin – die möglichen Einsatzgebiete für Nanomaterialien sind fast grenzenlos. Bereits sind weltweit mehr als 1000 Produkte auf dem Markt, die Nanomaterialien enthalten. In den Nanowissenschaften gehören Schweizer Forschungsinstitute, so auch die Empa, zu den weltweit führenden. Nanomaterialien bieten dem Forschungs- und Industriestandort Schweiz grosse Chancen. Der wirtschaftliche Erfolg wird jedoch nur dann nachhaltig sein, wenn auch mögliche Risiken zuverlässig beurteilt werden können.

## Chancen und Risiken ausloten

Die Projekte des vor kurzem gestarteten Nationalen Forschungsprogramms «Chancen und Risiken von Nanomaterialien» (NFP 64) sollen deshalb nicht nur die Chancen ausloten, die Nanomaterialien für Gesundheit, Umwelt und natürliche Ressourcen bieten, sondern auch mögliche Risiken. In einem NFP bearbeiten Forschende aus verschiedenen Disziplinen Projekte, die zur Lösung wichtiger Gegenwartsprobleme beitragen sollen. Die Schwerpunkte bestimmt der Bundesrat; durchgeführt werden die NFP vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF).

Das NFP 64 legt den Schwerpunkt auf synthetisch hergestellte Nanomaterialien. Als «Nanomaterial» gilt eine Verbindung, die mindestens in einer Dimension weniger als 100 Nanometer gross ist. Dabei sollen vor allem diejenigen untersucht werden, mit denen Mensch und Umwelt mit hoher Wahrscheinlichkeit in Berührung kommen. Eines der Ziele des NFP 64 ist denn auch, Grundlagen für «Werkzeuge» zu schaffen, mit denen sich die Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt beurteilen und überwachen lassen.

Ende November 2010 hat der SNF aus 44 eingereichten Projektskizzen 17 bewilligt und für die ersten drei Jahre mit 6,3 Millionen Franken finanziert. Empa-Forschende leiten drei Projekte und sind an einem weiteren beteiligt. //





### Empa, Juniorpartnerin am neuen IBM-Nanozentrum

Im Mai 2011 wird das neue Zentrum für Nanotechnologie auf dem Gelände des IBM-Forschungslabors in Rüschlikon eröffnet, also dort, wo vor 30 Jahren das Rastertunnelmikroskop entwickelt wurde. Das Zentrum, das rund 90 Millionen Franken kosten und von der IBM und der ETH Zürich gemeinsam betrieben wird, ist ein weiterer Meilenstein für den Nanotechnologie-Standort Schweiz. Als «Juniorpartnerin» wird auch die Empa dort forschen.

Insgesamt stehen an die 1000 Quadratmeter Reinraum sowie sechs so genannte geräuschfreie Labors zur Verfügung. Diese wurden acht Meter unter der Erde auf einem massiven Fundament gebaut und sind gegen Ausseneinflüsse komplett abgeschirmt. Das ist nötig, weil im Nanometerbereich sehr präzise gearbeitet werden muss und bereits geringe Temperaturschwankungen, Lärm, Vibration oder elektromagnetische Felder stören können.

### Wie Nanotechnologie unsere Zukunft prägt

Um innovative Technologien effizient entwickeln, finanzieren und regulieren zu können, sind sorgfältige Entscheide gefragt, die auf neuesten Erkenntnissen beruhen. Das gilt auch für die Nanotechnologie. Die Swiss NanoConvention 2011 unterstützt Entscheidungsträger hierbei und bietet eine Plattform, um Führungspersönlichkeiten aus Forschung und Industrie, Schlüsselfiguren im Bereich Innovation und Technologie, Unternehmer, Investorinnen und Vertreter aus Verwaltung und Politik zusammenzubringen, Ideen zu diskutieren und auszutauschen – oder gar neue zu entwickeln. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer erhalten fundierte Informationen über eine der wichtigsten «emerging technologies» des 21. Jahrhunderts und deren Potenzial für innovative Ansätze, Produkte und Dienstleistungen. Parallel zur Swiss NanoConvention lädt die NanoPubli die breite Öffentlichkeit ein, sich in einer Ausstellung und in Vorträgen über die Welt des extrem Kleinen aus «erster Hand» zu informieren.

Zentrale Themen der Veranstaltung sind die grossen Herausforderungen unserer Zeit wie eine nachhaltige Energieversorgung und eine saubere Umwelt – Stichwort «Cleantech» –, die Zukunft der Medizin mit Nano-Therapeutika und -Diagnostika sowie die Entwicklung innovativer funktioneller Materialien und deren zahlreiche industrielle Anwendungen. Ein weiterer Schwerpunkt sind mögliche Risiken, in erster Linie von freien Nanopartikeln, und wie die Gesellschaft damit umgehen kann.

Kurzum: Die Swiss NanoConvention ist DAS Schaufenster für Nanotechnologie in der Schweiz, das gemeinsam vom «Who's who» der Schweizer Nano-Szene veranstaltet wird, und der ideale Ort, um die Vordenker und Treiber der Nanotechnologie zu treffen und kennen zu lernen.

Weitere Informationen inklusive Programm und Anmeldung unter [www.swissnanoconvention.ch](http://www.swissnanoconvention.ch)



# Happy Birthday!

30 Jahre nach dem ersten erfolgreichen Experiment sind Rastertunnelmikroskope in Industrie und Forschung nicht mehr wegzudenken. Diese und ihre Weiterentwicklungen, die Rasterkraftmikroskope, können nicht nur einzelne Atome abbilden, sondern auch manipulieren. Damit nicht genug: Kombiniert mit anderen Messmethoden lassen sich bald auch «chemische Landkarten» in drei Dimensionen erstellen, die zeigen, wie Materialien Nanometer für Nanometer aufgebaut sind.

TEXT: Martina Peter / BILDER: Empa

In kleineren Dimensionen sind wir «blind». Denn das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beträgt «nur» 0,2 Millimeter. Der Mensch kann also zwei Punkte lediglich dann separat erkennen, wenn sie einen Abstand von mindestens 0,2 Millimeter haben. Für alles, was kleiner ist, braucht er optische Hilfen: Lupen und Mikroskope.

Optische Mikroskope sehen rund 1000-mal «besser» als das menschliche Auge, haben also eine Auflösung um die 0,2 Mikrometer. Weil der Durchmesser einzelner Atome jedoch bei 0,2 Nanometer liegt, genügt das nicht. Was tun, wenn nichts mehr zu sehen ist und die Orientierung schwierig wird? Ganz einfach: Die Umgebung ertasten. Genau dieses Prinzip machen sich Rastertunnelmikroskop («Scanning Tunneling Microscope», STM) und Rasterkraftmikroskop («Atomic Force Microscope», AFM) zu Nutze, um Oberflächen in atomarer Auflösung abzubilden.

## «Lupen» für die Nanowelt

Im STM wird eine feine, elektrisch leitende Nadel, deren Spitze aus einem einzelnen Atom besteht, an die zu untersuchende Probe (die ebenfalls elektrisch leitend sein muss) herangeführt. Beträgt der Abstand nur noch einige Atomdurchmesser und wird dann eine Spannung angelegt, fließt – ohne dass sich Nadel und Probe berühren – ein elektrischer Strom, der so genannte Tunnel-

strom. Bei konstantem Tunnelstrom schiebt nun eine hoch präzise Mechanik die Spitze zig-Mal über die Probenoberfläche und rastert sie Linie um Linie. Dabei «erfühlt» die Spitze die Elektronendichte der Probe, die gewöhnlich mit der Position der Atome korreliert. Die Auf- und Abbewegung, die sie dabei ausführt, um den Tunnelstrom konstant zu halten, wird vom Computer aufgezeichnet und in ein dreidimensionales Abbild der Oberfläche umgerechnet.

In den letzten 30 Jahren haben STM und Weiterentwicklungen davon die Forschungsinstitute weltweit erobert. Heutige Geräte liefern allerdings weit mehr als faszinierende Oberflächenbilder, sie können Atome und Moleküle manipulieren, etwa hin- und herschieben, zu Mustern anordnen und einiges mehr.

## Rastertunnelmikroskope als Werkzeuge

An der Empa nützt beispielsweise der Chemiker Karl-Heinz Ernst das STM, um Moleküle in Bewegung zu versetzen. Er leitet die Forschungsgruppe «Molecular Surface Science» und hat sich auf Phänomene wie molekulare Selbstorganisation und Kristallisation spezialisiert. Er benützt dazu ein Ultrahochvakuum-Gerät, das bei Temperaturen um vier Kelvin, also nahe dem absoluten Nullpunkt arbeitet: «Mich interessiert, wie Moleküle auf Oberflächen herumzappeln, wenn wir sie kitzeln», scherzt Ernst, der auch Professor an der Universität

Zürich ist. «Wenn wir Moleküle etwa mit Tunnelelektronen in Schwingung versetzen, gehen sie manchmal kaputt, manchmal nicht. Wir möchten besser verstehen, warum sie mal länger, mal kürzer überleben.» Diese Erkenntnisse sollen helfen, komplexe chemische Prozesse zu erklären, wie sie sich zum Beispiel auf Katalysatoroberflächen abspielen.

## Forschung im Tandem

Moleküle auf Oberflächen haben es auch Marco Bieri und Stephan Blankenburg aus der Abteilung «nanotech@surfaces» ange-tan. Die beiden Physiker pflegen eine ganz spezielle Art der Zusammenarbeit. Während Bieri am Ultrahochvakuum-STM in Thun seine Experimente durchführt, reserviert Blankenburg am Computercluster Ipazia in Dübendorf Rechnerzeit, um die Experimente zu simulieren. Derweil Bieri die echten Moleküle – Monomere funktionalisiert mit Bromatomen – auf eine Silberoberfläche setzt und in den eiskalten Probenraum im STM einbringt, «präpariert» Blankenburg die Oberfläche virtuell und platziert darauf die Moleküle. Im Rechner fangen Moleküle auf der Oberfläche an, sich nach Gesetzen der Quantenmechanik gegenseitig auszurichten; im STM in Thun beginnen die «tiefgefrorenen» Moleküle sich dank dem eingeleiteten Heizprozess langsam zu erwärmen, werden aktiv und gehen ebenfalls zaghaft die ersten (echten) chemischen Bindungen miteinander ein.





Dank grossem Know-how und viel Erfahrung ist die Empa in der Lage, auf höchstem Niveau neue Geräte und Messmethoden zu entwickeln.

Diese chemischen Reaktionen sind am STM ausserordentlich schwierig zu beobachten, da sie sich blitzschnell abspielen. Es braucht viel Erfahrung und Geduld, um sich auf der Oberfläche zu orientieren und zu erkennen, wie sich Muster und supra-molekulare Systeme bilden. Da die STM-Spitze nicht gleichbleibend optimal scharf ist und manchmal ungewollt Moleküle von der Oberfläche «aufpickt», entsprechen die Abbildungen nicht immer den realen Verhältnissen auf der Probe. Eine von Bieri Hauptaufgaben ist es, STM-Bilder mit allzu eintönigen Symmetrien ohne Unregelmässigkeiten als unechte Ergebnisse zu entlarven, so genannte Artefakte, die durch die Messmethode zustande kommen.

Über Skype-Videokonferenz erhält Marco Bieri Unterstützung vom Kollegen am Hochleistungsrechner. Blankenburg teilt ihm mit, was er gemäss Simulation sehen sollte. Im Gegenzug berichtet Bieri von unerwarteten Phänomenen, die Blankenburg wiederum in seinen Computer einspeist. Beispielsweise die höchst originelle Art und Weise, wie sich in der Natur während der Polymerisation eine Molekülkette in sich selbst verdreht.

Beide Wissenschaftler sind sich einig: Gemeinsam gelingt es viel schneller, experimentelle Daten zu interpretieren – und dabei erst noch neue Erkenntnisse beispielsweise über Reaktionsmechanismen komplexer chemischer Prozesse zu generieren. Seit

&gt;&gt;

rund einem Jahr nutzt das Team dieses Tandemverfahren, die Kombination von Experiment und Rechenpower. Und das mit grossem Erfolg: So beruht unter anderem ein viel zitierter Artikel, der diesen Sommer in der renommierten Wissenschaftszeitschrift «Nature» zum Thema Graphen-Nanobänder veröffentlicht wurde, auf dieser neuen Methode. (siehe EmpaNews 31)

### 25 Jahre Rasterkraftmikroskop

Auch bei einer der wichtigsten Weiterentwicklungen des STM, dem Rasterkraftmikroskop (AFM), spielt eine Spitze mit wenigen Nanometern Durchmesser die Hauptrolle. Während das STM den Tunnelstrom misst, zeichnet das AFM die Kraft auf, die wirkt, wenn die an einem Federbalken angebrachte Spitze über «Berge und Täler» der Probenoberfläche gleitet. Je nachdem, wie die Spitze geformt ist und in welchem Zustand sie sich befindet, können damit verschiedene physikalische Eigenschaften der Probe untersucht werden.

Hans Josef Hug, Leiter der Abteilung «Nanoscale Materials Science» und Physikprofessor an der Universität Basel, zählt einen ganzen «Zoo» von Kräften auf, die mit dem AFM erfasst werden können: von elektrostatischen und magnetischen über Van-der-Waals- und Casimir-Kräfte bis zu durch kovalente und ionische Bindungen erzeugte Kräfte. «Das Prinzip des AFM bringt uns auf vielen Gebieten weiter: Reibungskräfte erschliessen uns die Tribologie, magnetische Kräfte helfen uns, das Speichern elektronischer Daten zu optimieren, Informationen zur lokalen Härte oder lokalen Adhäsion vermitteln wichtige Aufschlüsse zu den mikro-mechanischen Eigenschaften von Materialien», so Hug. «An der Empa gibt es kaum eine Kraft, die wir nicht aufzeichnen können», fügt er augenzwinkernd an.

### User Lab an der Empa

Quer durch die Empa arbeiten zahlreiche AFM- und STM-Fachleute, die ihr Wissen nicht nur den Kollegen und Kolleginnen «in house» zur Verfügung stellen. Die Türen des «Swiss Scanning Microscopy User Lab», kurz «SUL», stehen auch externen Kunden und Partnern offen. Mit einem ganzen Park von AFMs können sie Topografien untersuchen und lokale Reibung messen sowie etwa Kontaktpotenziale und lokale mechanische Eigenschaften ihrer Materialien ergründen. Ob in Eigenregie oder begleitet – für jeden gibt es eine massgeschneiderte Lösung.

«Genährt wird dieses Fachwissen durch unsere Forschung», betont Hug. Die Empa sei wie geschaffen, auf höchstem Niveau

neue Geräte und Messmethoden zu entwickeln. «Nur so können wir an der Spitze mithalten und auch künftige Ansprüche der Anwender erfüllen und deren Fragen kompetent beantworten», ist er überzeugt.

### Neue Instrumente entwickeln

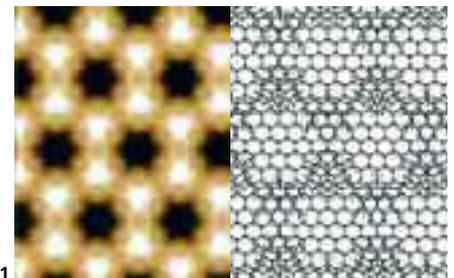
Dafür müssen Grenzen überschritten werden: «AFM und STM sind ja eigentlich keine Instrumente für die chemische Analyse», stellt Hug fest. «Wenn wir nicht bekannte Atome oder Moleküle auf eine wohldefinierte Oberfläche aufbringen, sagen uns AFM und STM nicht von sich aus, was sie dort «sehen.» Im Projekt «NanoXAS» möchten Empa-Forschende deshalb gemeinsam mit Kollegen vom Paul Scherrer Institut diesen Mangel beheben. Dazu kombinieren sie zwei Messmethoden miteinander: Die Röntgenabsorptionsanalyse zeigt, welche chemischen Elemente im untersuchten Bereich vorhanden sind, und das AFM bestimmt die Topografie und andere lokale Eigenschaften der Probe. Dadurch entstehen beinahe nanometergenaue «chemische Landkarten» eines Materials. Und mit diesen hoffen die Forschenden, einst Materialien für künftige Anwendungen gezielt verbessern zu können, etwa leistungsfähigere Digitalkameras mit einem deutlich grösseren Datenspeicher als heute üblich.

Hug schweben noch zahlreiche weitere Ideen vor, und wenn er davon erzählt, blitzt Pioniergeist auf: «Wir haben gelernt, mit STM und AFM abzubilden und auf atomarer Ebene zu manipulieren. Doch nun sollten wir damit auch in Gebiete vorstossen, die wir bis anhin nicht untersuchen konnten», meint er. «In der Nanowelt «fassen» wir zum Beispiel Dinge an, ohne zu spüren, wie stark wir mit unseren «Nanohänden» zupacken. Das müssen wir überwinden.»

Deshalb hat sein nächstes EU-Projekt aus dem 7. Forschungsrahmenprogramm namens MDSPM («Multidimensional Scanning Probe Microscopy») das Ziel, ein AFM zu entwickeln, das simultan vertikale (senkrechte) und laterale (seitliche) Kräfte in schier unvorstellbarer Feinheit messen kann. Es erkennt Differenzen im Bereich um ein Millionstel Nano-Newton. Damit könne sich womöglich unser Verständnis davon, wie chemische Reaktionen ablaufen oder wie Energie durch Reibung «verloren» geht, radikal ändern, mutmasst Hug. //

**1**  
Brom-Polymer-Verbindungen auf einer Silberoberfläche. Experiment im Rastertunnelmikroskop und Simulation.

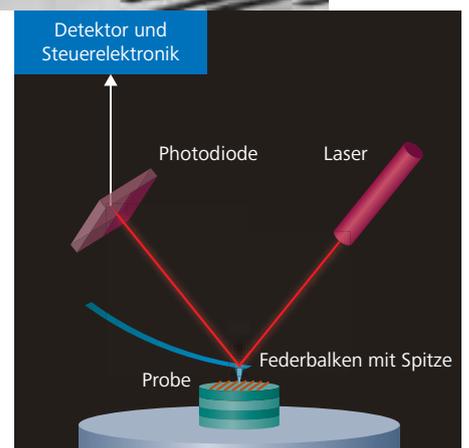
**2**  
Die Grafik zeigt die Funktionsweise eines Rasterkraftmikroskops (AFM): Ein Federbalken (siehe Aufnahme oben) rastert die Oberfläche.

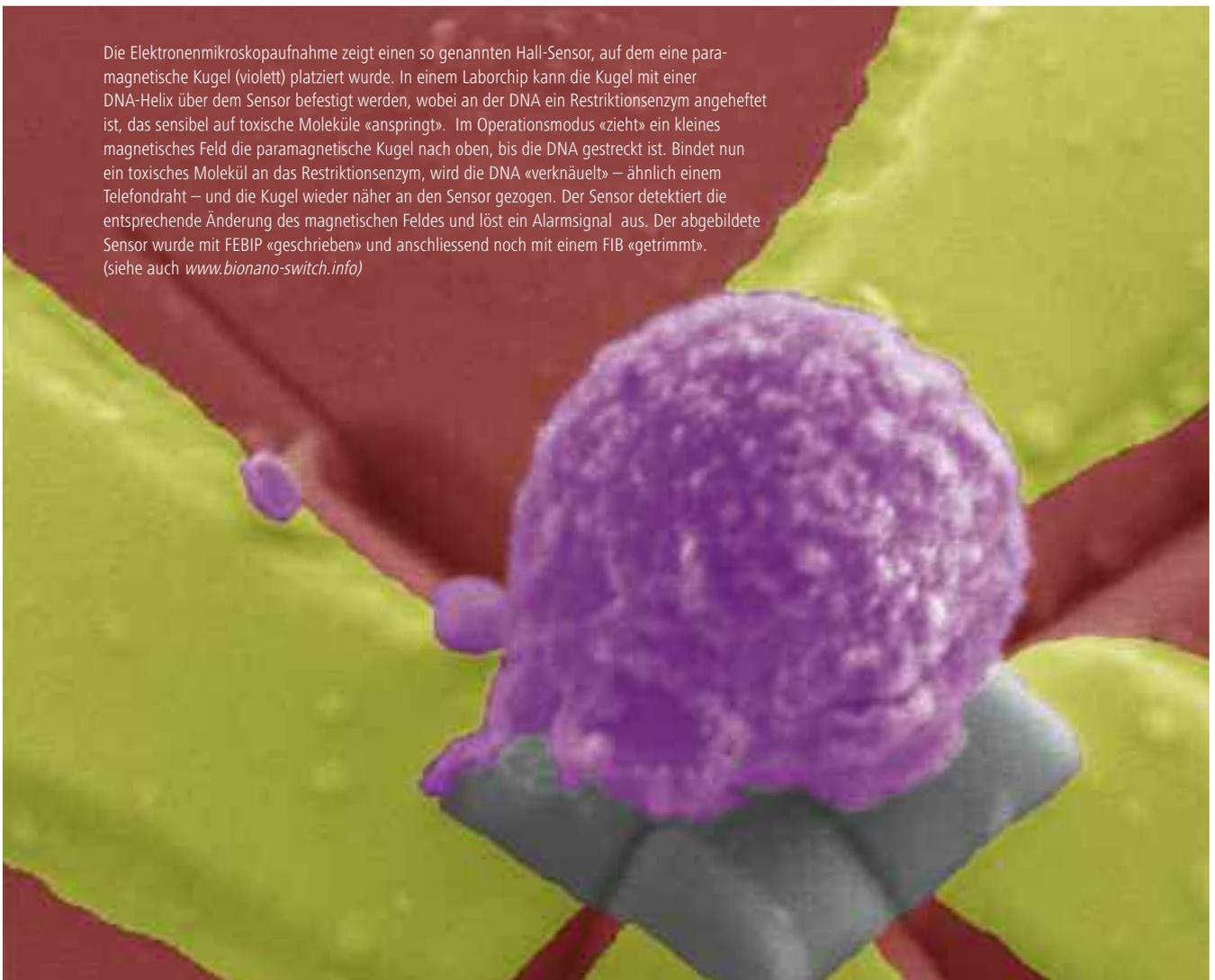


1



2





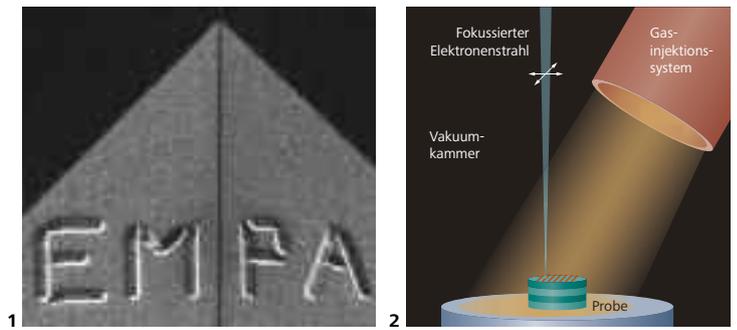
Die Elektronenmikroskopaufnahme zeigt einen so genannten Hall-Sensor, auf dem eine paramagnetische Kugel (violett) platziert wurde. In einem Laborchip kann die Kugel mit einer DNA-Helix über dem Sensor befestigt werden, wobei an der DNA ein Restriktionsenzym angeheftet ist, das sensibel auf toxische Moleküle «anspringt». Im Operationsmodus «zieht» ein kleines magnetisches Feld die paramagnetische Kugel nach oben, bis die DNA gestreckt ist. Bindet nun ein toxisches Molekül an das Restriktionsenzym, wird die DNA «verknäuel» – ähnlich einem Telefondraht – und die Kugel wieder näher an den Sensor gezogen. Der Sensor detektiert die entsprechende Änderung des magnetischen Feldes und löst ein Alarmsignal aus. Der abgebildete Sensor wurde mit FEBIP «geschrieben» und anschließend noch mit einem FIB «getrimmt». (siehe auch [www.bionano-switch.info](http://www.bionano-switch.info))

# Chemie mit Elektronenstrahlen

Fokussierte Elektronenstrahlen werden in Elektronenmikroskopen eingesetzt, um winzig kleine Objekte sichtbar zu machen. Dies sind heute Routineuntersuchungen. Neueren Datums ist allerdings, Elektronenstrahlen für chemische Reaktionen zu nutzen. So können nanometerfeine Oberflächenstrukturen «geschrieben» werden. Empa-Forschende perfektionieren diese Technologie und suchen nach immer neuen Einsatzgebieten.

TEXT: Beatrice Huber / BILDER: Empa

Instrumente wie Elektronenmikroskop, Rastertunnelmikroskop und Rasterkraftmikroskop haben den Blick in die Welt des Kleinen geöffnet und so der Forschung und der Industrie überhaupt erst ermöglicht, gezielt nanometerfeine Strukturen zu bauen. Doch diese Instrumente können mehr. So kann das Elektronenmikroskop auch für Chemie eingesetzt werden. Dabei werden zu einer Probe, die sich bereits in der Vakuumkammer des Mikroskops befindet, zusätzlich geeignete Gasmoleküle injiziert. Diese lagern sich reversibel auf der Probe ab. Der fokussierte Elektronenstrahl,



der sonst dazu dient, die Objekte sichtbar zu machen, katalysiert nun chemische Reaktionen der Gasmoleküle und zwar nur dort, wo er auftrifft. Die entstehenden nichtflüchtigen Fragmente bleiben dann dauerhaft auf der Probe. Der Elektronenstrahl bewegt sich nach einem programmierten Muster und «schreibt» so eine dreidimensionale Oberflächenstruktur.

#### Klein, minimal-invasiv, direkt

Diese Verfahren heissen in der Fachsprache FEBIP, was für «Focused Electron Beam Induced Processes» steht, also Prozesse, die durch einen fokussierten Elektronenstrahl induziert werden. Das Team um den Empa-Forscher Ivo Utke hat sich auf FEBIP spezialisiert und nutzt diese als extrem flexible Fabrikationsmethoden für das Prototyping von Nanobauteilen, um konkrete Fragen und Probleme aus der angewandten Nanoelektronik, Nanophotonik sowie Nanobiologie zu lösen. Die Gruppe arbeitet ständig daran, FEBIP zu verfeinern und neue Einsatzgebiete zu erschliessen. «Mit Hilfe des fein positionierbaren Elektronenstrahls lassen sich Oberflächenstrukturen nanometergenau und in nahezu beliebigen dreidimensionalen Formen entfernen und auftragen», sagt Utke. «Dass sie minimal-invasiv sind, macht FEBIP besonders attraktiv.»

FEBIP weisen noch weitere entscheidende Vorteile auf: So lassen sich die Strukturen in einem einstufigen Prozess platzieren, formen und herstellen. Das ist bei anderen Verfahren nicht der Fall: Oft sind dort mindestens drei Stufen nötig. Zuerst wird eine «Schablone» auf der Probe platziert, dann das Material für die Struktur aufgetragen. Und am Schluss muss die Schablone wieder entfernt werden.

#### Nanostrukturen stabilisieren Laser

«Vertical Cavity Surface Emitting Laser», kurz VCSELs, sind Halbleiterlaser, die häufig in der Datenübertragung eingesetzt werden, beispielsweise für Kurzstreckenverbindungen wie Gigabit-Ethernet. Diese Laser wären bei Telekomfirmen beliebt, weil sie wenig Energie verbrauchen sowie einfach und in Stückzahlen von mehreren tausend auf einem einzelnen Wafer produziert werden können.

Langwellige VCSELs, das heisst VCSELs, die im Wellenlängenbereich über 1300 Nanometern arbeiten, können jedoch eine Schwäche aufweisen. Aufgrund der zylindrischen Struktur, in der die Laser auf dem Wafer aufgebaut werden, kann die Polarisation des ausgesendeten Lichts während des Betriebs ändern. Polarisation ist eine Eigenschaft gewisser Wellen, so auch der Lichtwelle, und beschreibt die Richtung ihrer Schwingungen. Eine stabile Polarisation wäre nötig, um VCSELs in optische Systeme wie Lichtwellenleiter einzubauen. Empa-Forschende konnten zusammen mit Wissenschaftlern des Laboratory of Physics of Nanostructures an der EPFL und deren Spin-off BeamExpress Abhilfe schaffen. «Wir haben mit dem Elektronenstrahl flache Gitterstrukturen auf die VCSELs geschrieben», beschreibt Utke ihre Lösung. «Die Gitter konnten die Polarisation effektiv stabilisieren.»

#### Suche nach der perfekten Zusammensetzung

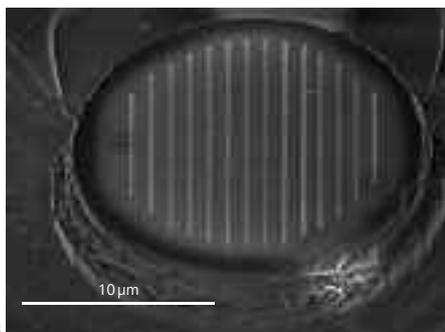
Genauso wichtig wie konkrete Anwendungen ist für die Wissenschaftler um Ivo Utke, FEBIP zu verfeinern und weiterzuentwickeln. Zentral dabei ist, die physikalisch-chemischen Prozesse in der Vakuumkammer zu verstehen und damit für die gezielte Materialsynthese kontrollieren zu können.

Dies gelang etwa im Falle eines so genannten Hall-Sensors, der weniger als ein Mikrometer gross ist. Diese Sensoren – benannt nach dem US-amerikanischen Physiker Edwin Hall – dienen vor allem dazu, Magnetfelder von kleinen (para)magnetischen Kugeln zu messen. Diese Kugeln werden zum Beispiel mit geeigneten biologischen Substanzen funktionalisiert, um mit anderen Biomolekülen, zum Beispiel Antikörpern, reagieren zu können. Dieses Konzept wird weltweit momentan vor allem für die Diagnostik von Krankheiten erforscht. Dazu soll ein gesamtes medizinisches Labor auf einen ungefähr fingergrossen Chip – den so genannten Lab-on-Chip – integriert werden. Das Forschungsteam, an dem auch das Zentrum für Elektronenmikroskopie der Empa beteiligt war, untersuchte, wie die Leistung eines Hall-Sensors ändert, wenn die aufgebrachteten Oberflächenstrukturen aus Kobalt und Kohlenstoff in unterschiedlichen Verhältnissen bestehen. Dazu wurde in der Vakuumkammer ein Gasinjektionssystem mit zwei Gasen verwendet – eines für Kobalt, eines für Kohlenstoff. Ziel war natürlich, das beste Verhältnis zu finden. Dieses lag bei einem Kobalt-Anteil von rund 65 Prozent. Fast noch bedeutender jedoch war die Erkenntnis, wie sich das Verhältnis kontrollieren lässt. Dies gelang, indem ein gepulster Elektronenstrahl eingesetzt wurde. Dabei zeigte sich, dass das Verhältnis durch die Pulsdauer bestimmt wird. Die Kontrolle wird also durch einen einfachen physikalischen Parameter erreicht, nämlich die Zeit.

#### Verschiedene Verfahren geschickt kombinieren

Die Empa-Forschenden versuchen auch, verschiedene Methoden in der Vakuumkammer zu kombinieren. Dies hat den Vorteil, dass die Proben nicht mehrmals in die Vakuumkammer eingeführt beziehungsweise herausgeholt werden müssen, beides zeitraubende Vorgänge.

Nanodrähte aus Halbleitermaterialien wie Silizium sollen in der Nanoelektronik, der weiteren Verkleinerung der Mikroelektronik, genutzt werden, um winzige elektronische Komponenten zu ebenfalls winzigen Schaltkreisen zu verknüpfen. Es ist allerdings alles andere als trivial, einzelne Nanodrähte an definierten Stellen auf vorstrukturierten Substraten herzustellen. Bislang entstanden häufig Knäuel, aus denen einzelne Drähte dann herausgepickt werden müssen. Das Empa-Team hat nun zusammen mit Forschenden des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik, des Instituts für photonische Technologien und des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts drei Methoden kombiniert: Fokussierter Ionenstrahl (FIB), Fokussierter Elektronenstrahl (FEBIP) sowie Vapor Liquid Solid (VLS, zu Deutsch dampfförmig flüssig fest).



3

**1,2**

Prinzip des lokalen Abscheidungsprozesses, der durch einen fokussierten Elektronenstrahl induziert wird (kurz FEBIP): Gasmoleküle aus einem Gasinjektionssystem lagern sich reversibel auf der Oberfläche einer Probe ab. Der fokussierte Elektronenstrahl induziert chemische Reaktionen der Gasmoleküle. Die entstehenden nichtflüchtigen Verbindungen lagern sich dann dauerhaft auf der Probe ab. So entsteht eine Nanostruktur – zum Beispiel der Schriftzug Empa –, die durch die Bewegungen des Elektronenstrahls geschrieben wird.

**3**

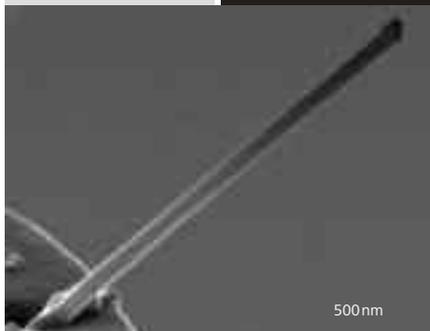
Elektronenmikroskopaufnahme eines «Vertical Cavity Surface Emitting Laser», kurz VCSEL, auf den mit einem FEBIP ein Polarisationsgitter «geschrieben» wurde. VCSELs sind Halbleiterlaser, die häufig in der optischen Datenübertragung eingesetzt werden.

**4**

Auf einem Federbalken, der in Rasterkraftmikroskopen zum Einsatz kommt, wächst ein einzelner Nanodraht. Dafür wurden drei Methoden kombiniert: Zuerst «bohrt» ein fokussierter Ionenstrahl ein Loch, dann wird mit FEBIP eine winzige Menge Katalysator im gebohrten Loch platziert, woraus mit Hilfe der so genannten VLS-Methode (Vapor Liquid Solid, zu Deutsch dampfförmig flüssig fest) ein Nanodraht herauswächst.



4



Mit fokussierten Ionenstrahlen lassen sich ähnlich wie mit fokussierten Elektronenstrahlen Objekte nicht nur sichtbar machen, sondern auch Strukturen auf einer Oberfläche bilden. Da die schweren Ionen direkt Atome aus der Oberfläche schlagen können, sind für diesen Abtrageprozess – im Unterschied zu FEBIP – keine zusätzlichen Gasmoleküle nötig. VLS ist eine gebräuchliche Synthesemethode für Nanodrähte. Dabei wird das Ausgangsmaterial der Drähte gasförmig zugegeben und scheidet an einem kleinen Katalysator ab, meist einem «Tropfen» aus flüssigem Metall, beispielsweise Gold. Dort kristallisiert das Material und der Draht beginnt zu wachsen.

Die Wissenschaftler haben zunächst mit einem fokussierten Ionenstrahl an geeigneter Stelle ein Loch «gebohrt». In dieses «pflanzte» dann ein fokussierter Elektronenstrahl eine winzige Goldmenge, die als VLS-Katalysator diente. Im dritten Schritt wurde Silan, eine gasförmige Siliziumverbindung, zugeführt und einzelne Nanodrähte, bestehend aus reinem kristallinem Silizium, begannen aus den Löchern herauszuwachsen. Der letzte Schritt fand für diese Versuche in einer anderen Wachstumskammer statt, könnte aber – mit Hilfe von heizbaren Proben-tischen – im Prinzip auch in das Elektronenmikroskop integriert werden.

Chemie mit Elektronenstrahlen hat ein grosses Potenzial. Da ist sich Ivo Utke sicher. «FEBIP könnten schon bald zu einer echten Nanofabrikationsplattform werden, um minimal-invasiv und direkt Nano-strukturen herzustellen, ohne dass die durchaus grossen Investitionen eines Reinraums nötig wären.» //

**Literaturhinweis**

- «Klein, minimal-invasiv, direkt: Elektronen induzieren lokale Reaktionen adsorbierter funktioneller Moleküle auf der Nanometerskala», Ivo Utke und Armin Götzhäuser, *Angewandte Chemie* 122 (49) 9516 (3pp)2010, DOI: 10.1002/ange.201002677
- «Tunable Nanosynthesis of Composite Materials by Electron-Impact Reaction», L. Bernau, M. Gabureac, R. Erni, I. Utke, *Angewandte Chemie International Edition* 49(47), (2010) 8880 (5pp), DOI: 10.1002/anie.201004220
- «Granular Co-C nano-Hall sensors by focused-beam-induced deposition», M. Gabureac, L. Bernau, I. Utke, G. Boero, *Nanotechnology* 21 (2010) 115503 (5pp), DOI: 10.1088/0957-4484/21/11/115503
- «Minimally-invasive catalyst templating on pre-structured surfaces for local VLS-growth of individual silicon nanowires», M. G. Jenke, D. Lerosé, J. Michler, S. Christiansen, I. Utke, submitted to *Nanoletters*, 2011.
- «High speed telecommunication laser polarisation stabilisation by minimally-invasive focused electron beam triggered chemistry», I. Utke, M. Jenke, C. Roeling, P. H. Thiesen V. Iakovlev, A. Syrbu, A. Mereuta, A. Caliman, E. Kapon, *Nanoscale*, DOI:10.1039/C1NR10047E, 2011.

**Buchhinweis**

- «Nanofabrication using focused ion and electron beams: principles and applications», Editors I. Utke, S. Moshkalev, P. Russels, Oxford Series on Nanomanufacturing. N.Y., Oxford University Press (2011 forthcoming). ISBN 9780199734214