

Empa Quarterly

Forschung & Innovation #59 | Januar 18

Silizium adieu!

Der Klang der
Biotech-Geige

Muskeln aus
der Spraydose

Forschen, wo Biologie
auf Physik trifft



Empa

Materials Science and Technology



MICHAEL HAGMANN Leiter Kommunikation

Kohlenstoff – Wunderstoff?

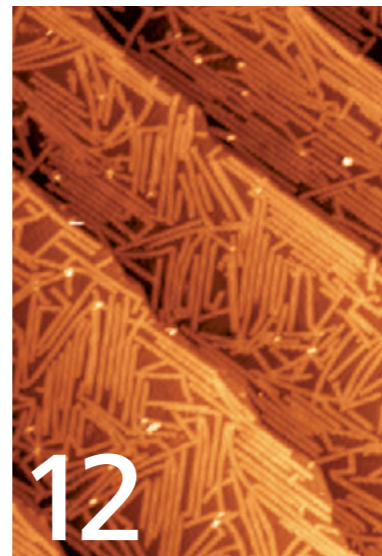
Liebe Leserin, lieber Leser

Immer kleiner, immer schneller, immer leistungsfähiger. Das erwarten wir von unseren elektronischen Gadgets mit jedem neuen Release. Konkret heisst das: immer mehr Rechenleistung auf immer kleinerem Raum. Zur Illustration ein Vergleich: Die neueste Generation Smartphones hat in etwa die gleiche Rechenpower wie ein Supercomputer Mitte der 1990er-Jahre – der aber dafür einen ganzen Raum benötigte und nicht einfach in die Hosentasche passte.

Bisher hat uns «Moore's Law» diese wundersame Verbesserung unserer Computer & Co. beschert. Doch die vom Intel-Gründer Gordon Moore bereits 1965 geäusserte «Prophezeiung» dürfte mit der herkömmlichen Siliziumtechnologie irgendwann einmal an die Grenzen des physikalisch Machbaren stossen. Neue Materialien und Technologien sind also gefragt – wie das «Wundermaterial» Graphen, aus dem Empa-Forscher nun erstmals einen Nano-Transistor hergestellt haben (S. 12). Wer weiss, vielleicht ist ja die Elektronik der Zukunft eine, die auf Kohlenstoff basiert.

Kohlenstoff ist auch der atomare Hauptbestandteil von Holz; dieses haben Empa-Forscher dank einer Pilzbehandlung zu wahrlich meisterhaft klingendem Klangholz «veredelt», um daraus Biotech-Geigen herzustellen, die einer Stradivari in Nichts nachstehen. Ein Besuch im Akustik-Labor der Empa soll zeigen, ob sich die hohen Erwartungen erfüllen (S. 4).

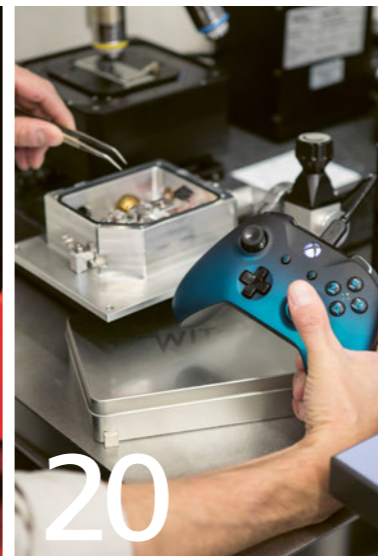
Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre, alles Gute fürs neue Jahr – und bis zum nächsten Heft!



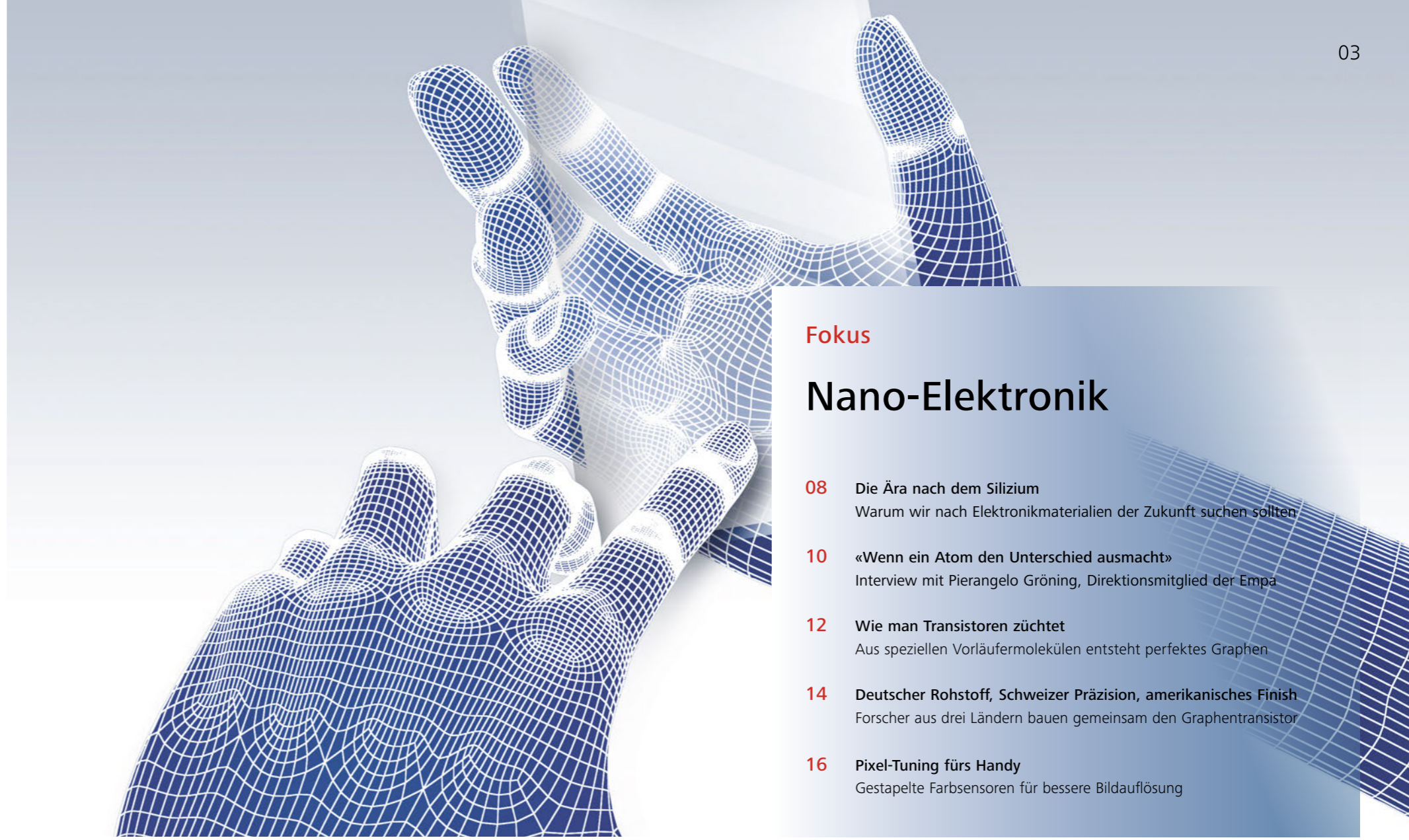
12



16



20



Fokus

Nano-Elektronik

- 08** Die Ära nach dem Silizium
Warum wir nach Elektronikmaterialien der Zukunft suchen sollten
- 10** «Wenn ein Atom den Unterschied ausmacht»
Interview mit Pierangelo Gröning, Direktionsmitglied der Empa
- 12** Wie man Transistoren züchtet
Aus speziellen Vorläufermolekülen entsteht perfektes Graphen
- 14** Deutscher Rohstoff, Schweizer Präzision, amerikanisches Finish
Forscher aus drei Ländern bauen gemeinsam den Graphentransistor
- 16** Pixel-Tuning fürs Handy
Gestapelte Farbsensoren für bessere Bildauflösung
- 04** Sinfonia ai funghi
Akustikforscher untersuchen den Klang einer Geige aus Biotech-Holz
- 07** «Mein Traum: ein Streichquartett mit Mycowood-Instrumenten»
Interview mit Walter Fischli, Pharmaunternehmer und Musik-Mäzen
- 18** Muskeln aus der Spraydose
Lebendige Muskelfasern für Herzpatienten
- 20** Mit Blick über den Tellerrand
Michel Calame leitet die Abteilung «Transport at Nanoscale Interfaces»
- 23** Vermischtes
CO₂-Totalüberwachung, Legierungen aus dem Laserdrucker

Titelbild

Mikrochips aus Silizium prägen die Gegenwart – doch das Material stösst an seine Grenzen. Leiterbahnen und Oxidschichten sind nur noch wenige Atomlagen dick und können nur schwer noch weiter verkleinert werden. Die Empa sucht nach Materialien für die Elektronik der nächsten Generation. **Seiten 08 – 17.** Bild: iStockphoto.

Impressum

Herausgeberin Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, Schweiz, www.empa.ch /
Redaktion & Gestaltung Abteilung Kommunikation /
Tel. +41 58 765 47 33 empaquarterly@empa.ch,
www.empaquarterly.ch // Erscheint viermal jährlich
Anzeigenmarketing rainer.klose@empa.ch
ISSN 2297-7406 EmpaQuarterly (deutsche Ausg.)



Empa Social Media



Sinfonia ai funghi

Klingen Geigen aus pilzbehandeltem Holz so wie ein antikes Meisterinstrument? Akustikforscher der Empa untersuchen derzeit Instrumente aus so genanntem Mycowood auf Herz und Nieren. Präzise Körperschallmessungen und psychoakustische Experimente mit Versuchspersonen sollen zeigen, ob eine Pilzkur ein Instrument messbar veredeln kann.

TEXT: Andrea Six / BILDER: Empa



Noch immer ist es ein Geheimnis, warum bestimmte Geigen, etwa eine Stradivari, so besonders klingen. Die Klimaerwärmung sei ein Grund, meint Francis Schwarze von der Abteilung für Angewandte Holzforschung an der Empa in St. Gallen. «Heutzutage wachsen Bäume schneller und ungleichmässiger als zu einer ganz bestimmten kühlen Periode im 17. Jahrhundert, als das Holz für Stradivaris Instrumente wuchs», so der Holzforscher. Heutiges Holz verfüge über weniger günstige Eigenschaften für den Geigenbau.

Schwarze suchte daher nach einer Möglichkeit, Holz so zu verändern, dass es dem antiken Baustoff gleicht. Es gelang ihm, einen Helfer aus der Natur zu rekrutieren: ein Pilz, der natürlicherweise die so genannte Weissfäule in Bäumen verursacht, den der Forscher im Labor kontrolliert auf den Baustoff angesetzt hat. Und tatsächlich bauten die Pilzfäden das Ahorn- und Fichtenholz für den Geigenbau in erwünschter Weise um.

Dabei sind die Erreger der Weissfäule von der langsamen Truppe und essen geniesserisch: Während den zwei bis drei Monaten, in denen sich die Keime am Holz für die Biotech-Geigen gütlich tun durften, verminderte sich die Masse kaum. «Andere Schädlinge bauen in dieser Zeit bis zu 50 Prozent der Holzmasse ab», so Schwarze. Die Geigenpilze hingegen begnügten sich mit ½ bis 1 Prozent. Trotzdem musste dem Pilz am Ende Einhalt geboten werden. «Sobald die Holzstruktur den gewünschten Zustand erreicht hatte, wurden die Pilze durch ein keimtötendes Gas entfernt.»

Die Mutter aller Geigen

Ziel war es, die für den Klang entscheidende Dichte des Holzes so zu beeinflussen, dass der Werkstoff jenem von antiken italienischen Geigen ebenbürtig ist. Vorbild bei Schwarzes Pilzkur war eine antike Meistergeige von Guarneri del Gesù, die «Caspar Hauser» aus dem Jahr 1724. Guarneri (1698–1744) baute, so wie sein Zeitgenosse Stradivari, im italienischen Cremona Instrumente, die wegen ihres besonderen Klangs begehrt sind und heute von grossen Solisten gespielt werden.

Doch der beste Baustoff nützt nichts, wenn das Handwerk nicht die gleichen Kriterien erfüllt. Für die Mycowood-Violinen haben Geigenbaumeister daher exakte geometrische Kopien der Guarneri-Geige hergestellt. Musik ist zwar immer auch eine Frage des

Geschmacks – die Akustikforscher der Empa interessiert allerdings, wie sich der Klang einer Geige objektiv bewerten lässt. Das neue Projekt der Empa-Abteilung Akustik/Lärminderung in Dübendorf untersucht daher den Klang der Biotech-Geigen vom ersten Moment seiner Entstehung bis hin zur Empfindung, die er bei den Zuhörern auslöst.

Getestet wird eine ganze Reihe von Instrumenten, darunter das Original, eine unbehandelte Kopie und unterschiedliche Geigen aus pilzbehandeltem Klangholz. Denn schliesslich sollen die Biotech-Instrumente ihre Fähigkeit nach wissenschaftlichen Kriterien unter Beweis stellen.

Die Seele einer Pilzgeige

In einem ersten Schritt messen Armin Zemp und Bart van Damme, wie sich Schallwellen im Holz der Geigen ausbreiten. Bei dieser Körperschallmessung regt ein Elektromagnet die Saiten der Instrumente an, damit nicht der individuelle Bogenstrich eines Musikers die Ergebnisse verfälscht. Der Versuch wird zudem in einem speziellen reflexionsarmen Labor durchgeführt, der den austretenden Schall nicht auf die Geige zurückwirft. Ein «Scanning Laser Doppler Vibrometer» zeichnet derweil die Schwingungen des Materials auf. An rund 100 Stellen auf dem Geigenkörper misst das Vibrometer deren Frequenz und Amplitude. «Hier wird sich zeigen, ob sich die Wellen im Holz unterschiedlich ausbreiten», sagt Armin Zemp. «Besonders spannend wird es, die Mycowood-Geigen mit dem Original zu vergleichen.»

Doch nach dem Körper der Geige soll auch ihre Seele vermessen werden: Wie Menschen den Klang der Biotech-Instrumente erleben, testen Experten auf dem Gebiet der Psychoakustik. Im Labor für Hörversuche, dem AuraLab der Empa in Dübendorf, werden Beat Schäffer und Reto Pieren mit Versuchspersonen arbeiten, die Hörproben der Instrumente bewerten müssen. Anhand von standardisierten Befragungen versuchen die Psychoakustiker auf diese Weise, signifikante Klangeigenschaften der einzelnen Geigen herauszuschälen. «Es wird sich herausstellen, ob ein kausaler Zusammenhang zwischen Holzstruktur, Schallmessung und Hörempfinden nachweisbar ist», sagt Reto Pieren.

Schon im Vorfeld haben die Mycowood-Geigen viel Lob erhalten. In einem Blindtest vor Publikum traten die ersten Exemplare bereits erfolgreich gegen eine Stradivari aus dem Jahr 1711 an.

Zu den Musikern, die die Biotech-Instrumente spielen durften, gehört Oleg Kaskiv, Profi-Geiger und Professor an der «International Menuhin Music Academy» in Gstaad. Kaskiv schwärmt: «Die Mycowood-Geigen haben einen warmen, farbenreichen Klang, der in die Richtung der alten italienischen Instrumente geht.» Und obwohl die Instrumente noch neu und daher nicht genügend eingespielt seien, gelänge es bereits jetzt, ihnen Klänge zu entlocken, die eine unbehandelte Geige nicht hervorbringe. Da die Konzerthallen heute immer grösser würden, seien die Mycowood-Instrumente mit ihrem grossen, tragenden und warmen Klang besonders interessant für ihn, so der Musiker. Ob die Versuchspersonen der psychoakustischen Tests ebenso begeistert sind, werden die aktuellen Experimente zeigen. //

Ersatz für Tropenhölzer

Swiss Wood Solutions, ein Spin-off von Empa und ETH Zürich, hat eine Alternative zu Tropenhölzern für den Instrumentenbau entwickelt. Ihr Produkt aus modifiziertem Schweizer Bergahorn «Swiss Ebony» hat die Eigenschaften von Ebenholz. www.empa.ch/web/s604/swiss-wood-solutions



Walter Fischli, promovierter Biochemiker und Ehrendoktor der Universität Basel, ist Mitgründer des Pharmaunternehmens Actelion. Als Stiftungsratspräsident der Walter-Fischli-Stiftung in Allschwil (BL), die Wissenschaftler und Musiker unterstützt, ist er ein idealer Partner für die interdisziplinäre Arbeit rund um das Mycowood-Projekt an der Empa.

«Mein Traum: ein Streichquartett mit Mycowood-Instrumenten»

Walter Fischli, dessen Stiftung als Geldgeber für das Geigenprojekt wirkt, liebt es, die Biotech-Violine «Caspar Hauser II» zu spielen. Warum das Instrument ein Greenhorn ist, und wie es zu seinem Namen kam, verrät er im Interview.

Sie halten gerade die Mycowood-Geige in Ihren Händen. Wie fühlt sich das an?

Überraschend ist, dass man das Gefühl hat, eine antike Geige zu halten, obwohl sie neu ist. Die biotechnologische Holzbehandlung hat dem Instrument etwas vom tragenden Klang der berühmten italienischen Geigen verliehen. Und auch bei Stücken, mit denen manche moderne Geige überfordert wäre, bleibt die Mycowood-Geige stark, farbig und modulierbar. Ich finde, sie klingt sehr interessant.

Aber ein Gefühl allein reicht nicht aus, um die Qualität einer Geige zu beweisen...

Die aktuellen Experimente an der Empa vergleichen den Klang der pilzbehandelten Geige mit jenem des antiken Originals und eines unbehandelten Instruments. Da wir auf physikalische Messungen und statistisch auswertbare Tests mit Versuchspersonen setzen, wird das wissenschaftlicher als alles, was man bisher gemacht hat. Das Trio aus Wissenschaft, Tontechnik und Musik, also die Akustikabteilung der Empa, das Tonstudio «Idee und Klang» in Basel und der renommierte Geiger Oleg Kaskiv, wird die Mycowood-Geige gemeinsam durch die Tests jagen. Das wird unglaublich spannend, und es wird sich zeigen, ob die pilzbehandelte «Caspar Hauser II» besser klingt als eine unbehandelte Geige.

Caspar Hauser II, woher kommt eigentlich der Name der Biotech-Geige?

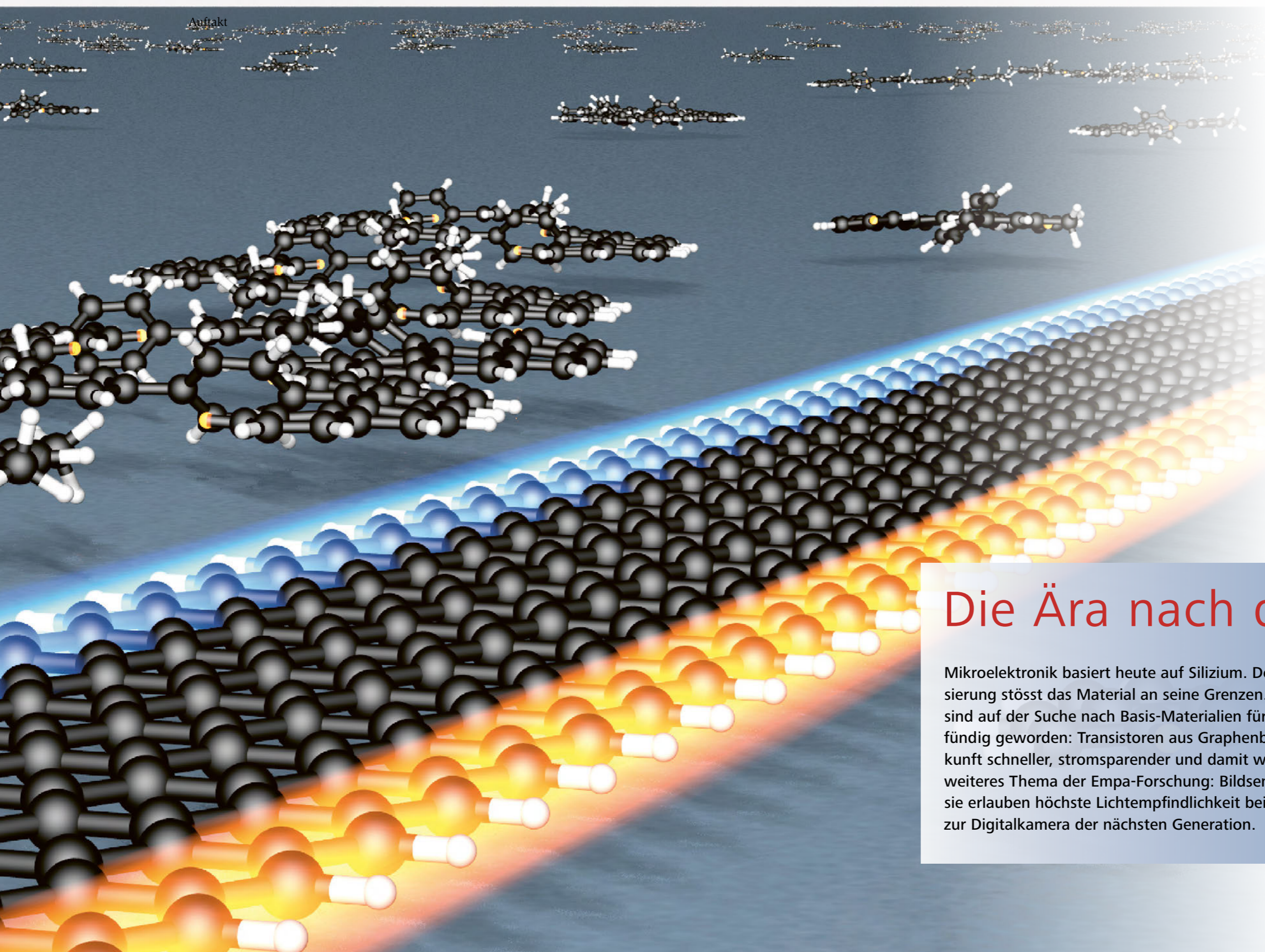
Die Mycowood-Geige ist eine exakte Kopie einer grossen italienischen Geige. Gebaut wurde diese Originalgeige von Giuseppe Guarneri im 18. Jahrhundert. Sie tauchte allerdings erst nach Guarneris Tod plötzlich aus dem Nichts auf. Auch wenn man sie eindeutig als eine Guarneri del Gesù identifizieren kann, liegt ihre Vergangenheit im Dunkeln. Meinen Freund und Geigenexperten Michael Baumgartner hat das an die Geschichte von Caspar Hauser erinnert, eine der rätselhaftesten Figuren des 19. Jahrhunderts. Caspar Hausers geheimnisvolle Herkunft schuf einen Mythos, der in Literatur, Kunst und Musik aufgegriffen wurde. Darum haben wir der Originalgeige von Guarneri den Namen «Caspar Hauser» gegeben. In logischer Konsequenz heisst die Mycowood-Geige nun «Caspar Hauser II».

Wenn die Mycowood-Geige alle Tests besteht, was steht ihr dann bevor?

Die «Caspar Hauser II» ist ja noch eine neue Geige, ein Greenhorn. Das Einspielen von Holzinstrumenten braucht seine Zeit. Dabei wird sich zeigen, ob sie sich – zusammen mit weiteren Mycowood-Geigen – auch künftig positiv entwickelt. Wir sind dafür mit der Musikakademie Basel und der «International Menuhin Music Academy» in Gstaad im Kontakt. Letztlich sollen Instrumente entstehen, die talentierten jungen Musikern mit knappen finanziellen Ressourcen zur Verfügung gestellt werden können.

Möchten Sie mit diesen Geigen das Instrumenten-Projekt abschliessen?

Mein Traum wäre ein Mycowood-Streichquartett mit zwei Geigen, einer Bratsche und einem Cello. Momentan schauen wir, ob wir eine Bratsche mit pilzbehandeltem Holz herstellen können. Eine Bratsche hat einen viel grösseren Klang als eine Violine. Vielleicht ergeben sich dann auch grössere Unterschiede im Klang zwischen unbehandelten Instrumenten und einer Viola, deren Holz mit Pilzen behandelt wurde. Ein hochinteressantes Nachfolgeprojekt!

**Massgeschneiderte Graphenbänder**

So entsteht die Basis für Graphen-Nanoribbon-Transistoren: speziell designte Moleküle (schwarz) dienen als Grundbausteine. Auf einer heissen Goldoberfläche polymerisieren sie zu Graphenbändern mit speziell geformten Rändern (blau, gelb). Diese Graphenbänder sind Halbleiter und lassen sich als Grundmaterial für Transistoren einsetzen – möglicherweise eine Basis für Rechner von morgen.

Die Ära nach dem Silizium

Mikroelektronik basiert heute auf Silizium. Doch mit der zunehmenden Miniaturisierung stösst das Material an seine Grenzen. Forscherinnen und Forscher der Empa sind auf der Suche nach Basis-Materialien für die nächste Elektronik-Generation fündig geworden: Transistoren aus Graphenbändern könnten die Computer der Zukunft schneller, stromsparender und damit wesentlich kühler rechnen lassen. Ein weiteres Thema der Empa-Forschung: Bildsensoren aus Perowskit-Nanokristallen – sie erlauben höchste Lichtempfindlichkeit bei zugleich hoher Auflösung, ein Schritt zur Digitalkamera der nächsten Generation.

«Wenn ein Atom den Unterschied ausmacht»

Längst ist der Nanometer der relevante Massstab für die Mikro- und Opto-Elektronik, und die Miniaturisierung schreitet immer weiter voran. Damit steigen die Anforderungen an die Reinheit und Qualität der eingesetzten Materialien. Empa-Forschende arbeiten an Materialien für die Elektronik und Opto-Elektronik der Zukunft. Pierangelo Gröning, Direktionsmitglied der Empa und Leiter des Forschungsschwerpunkts «Nanostrukturierte Materialien», erklärt, welche Probleme es zu lösen gibt und in welche Richtung sich die Forschung bewegt.

INTERVIEW: Rainer Klose / BILD: Empa

Herr Gröning, Sie betreuen unter anderem die Forschung an Transistoren aus Graphenbändern und Perowskit-Nanokristallen. Was verbindet diese Forschungsgebiete?

Bei der Forschung an Graphenbändern – so genannten Nanoribbons – und Perowskit-Nanokristallen arbeiten wir an Materialien, die ihre einzigartigen Eigenschaften nur aufgrund ihrer äusserst kleinen Dimensionen entfalten. Bei Ausdehnungen über zehn Nanometer verschwinden diese Eigenschaften nahezu oder sind technologisch nicht mehr interessant.

Was motiviert die Empa, an neuartiger Nano-Elektronik zu forschen?

Zum einen ist es die Faszination, einzigartige Materialeigenschaften, die sich nur bei Objekten mit Ausdehnungen von einigen wenigen Nanometern entfalten, technologisch zu nutzen. Des Weiteren ist es die erforderliche Präzision, mit der die Synthese dieser Nanoobjekte erfolgen muss – im Extremfall kommt es auf jedes einzelne Atom an. Und zu guter Letzt fasziniert uns die Möglichkeit, diese Eigenschaften mit «kleinen» atomaren Modifikationen zu beeinflussen, sprich anzupassen.

Warum müssen wir in der Elektronik das Silizium ersetzen?

1948 wurde der Transistor erfunden in Form eines bipolaren Germanium-Transistors. Schnell erkannte man aber, dass für die MOSFET-Architektur eines Transistors Silizium besser geeignet ist, da Silizium eine natürliche Oxidschicht bildet, die als Dielektrikum für das Gate verwendet werden kann. Die MOSFET-Architektur ermöglichte zudem die Miniaturisierung des Transistors, so dass 1958 der erste integrierte Schaltkreis auf Siliziumbasis gebaut werden konnte. Seitdem basiert unsere Mikroelektronik auf Silizium. Neueste Transistoren haben Lateraldimensionen von weniger als 20 Nanometer und eine Oxiddicke von gerade noch vier oder fünf atomaren Schichten. Damit nimmt jedoch die Verlustleistung pro Quadratzentimeter immer mehr zu, und es wird immens schwierig, diese Wärme abzuführen. Auch ist der Energiebedarf für Computer und Displays nicht zu unterschätzen. Allein fürs Internet wird weltweit rund drei Prozent der Energie aufgewendet, Tendenz steigend. Will man diesem Trend entgegenwirken, brauchen wir bessere Materialien und neue Fertigungsprozesse für deren Verarbeitung.

Neue Fertigungsprozesse?

Ja, ein gutes Material ist noch lange keine Technologie. In der Mikroelektronik ist heute die gesamte Prozesskette in der industriellen Fertigung auf das Element Silizium hin optimiert. Beim Silizium gibt es keine Geheimnisse oder Fallen in der Fertigung mehr. Bevor wir also dieses System durch etwas völlig anderes ersetzen können, benötigen wir zunächst ein bedeutend besseres Material und dann einen erfolgversprechenden technologischen Ansatz, wie es verarbeitet werden kann. Mit den Graphen-Nanobändern und Perowskit-Nanokristallen haben wir zwei Materialklassen mit herausragenden physikalischen Eigenschaften für die Elektronik von morgen beziehungsweise künftige Displays entwickelt. Was die Fertigungsprozesse angeht, wird es für die Perowskit-Nanokristalle weniger herausfordernd werden als für die Graphen-Nanobänder. Bei letzteren wissen wir noch überhaupt nicht, wie man eine robuste und preisgünstige Technologie zur Herstellung von Chips realisieren kann.

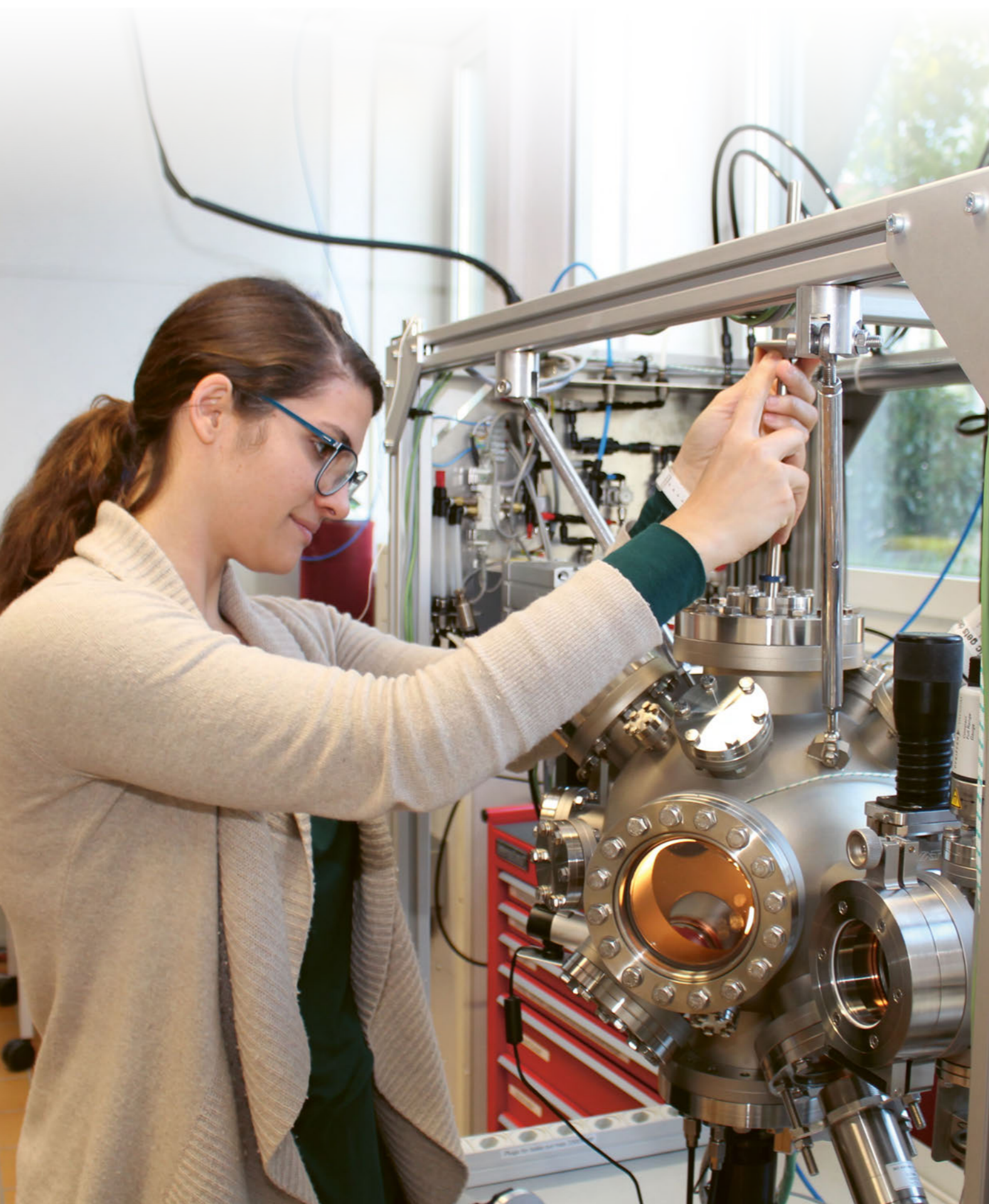
Wo liegen die grössten wissenschaftlichen Herausforderungen für den Umstieg zur Graphen-Elektronik?

Zunächst gilt es einmal festzuhalten, dass Graphen kein Halbleiter, sondern ein Halbmetall ist, also als elektronischer Schalter – als Transistor – absolut ungeeignet. Die Quantenmechanik sagt aber voraus, dass schmale, nur wenige Nanometer breite Graphenbänder Halbleiter sein können. Die Quantenmechanik sagt uns aber auch, dass für die Erhaltung der einzigartigen elektronischen Transporteigenschaften die Ränder der Bänder keine Defekte aufweisen dürfen – und ein einziges fehlendes Atom ist hier bereits ein Defekt! Mit einem «Bottom-Up»-Ansatz konnten wir in den letzten Jahren zeigen, dass atomar präzise Graphen-Nanobänder unterschiedlichster Formen aus geeigneten, speziell designten Vorläufermolekülen synthetisiert werden können. Je nach Form sind die Nanobänder metallisch oder halbleitend. Aufgrund ihrer atomaren Perfektion weisen die Bänder die vom Graphen erwarteten herausragenden Transporteigenschaften auf.

Und wohin geht die Reise bei den Halogenid-Perowskit-Nanokristallen?

Die Nanokristallite leuchten in verschiedenen Farben des sichtbaren Lichts, wenn man sie mit energiereicherem UV-Licht bestrahlt. Um zu den gewünschten Farben zu kommen, gibt es zwei «Stellschrauben» – die Grösse der Kristalle und die Dotierung mit Spurenelementen. Auch hier werden, wie bei den Graphen-Nanobändern, die physikalischen Eigenschaften von einzelnen Atomen bestimmt. Aber im Gegensatz zu Graphenbändern, die sehr empfindlich auf atomare Defekte reagieren, verhalten sich die Halogenid-Perowskit-Nanokristalle diesbezüglich sehr tolerant, was ihre optischen Eigenschaften, insbesondere die Fotolumineszenz, betrifft. Wie bei den Perowskiten allgemein lassen sich Halogenid-Perowskit-Nanokristalle einfach dotieren, sprich die elektronischen Eigenschaften und damit auch die Fotolumineszenz modifizieren oder, technisch ausgedrückt, «tunen». Dotieren bedeutet geeignete Fremdatome einbauen. Für einen Perowskit-Nanokristall von zehn Nanometer Kantenlänge bedeutet dies genau ein Fremdatom. Mit den Halogenid-Perowskit-Nanokristallen steht uns eine einzigartige, technologisch robuste Toolbox zur Verfügung, die in zahlreichen Anwendungsfeldern Innovationen hervorbringen kann und gewiss auch wird. Eine bedeutende Anwendung ist etwa der Quantum-Dot-Monitor, der brillanter als ein OLED-Monitor ist und auch einfacher herstellbar. Auf dem Weg dorthin muss aber noch die Stabilität der Nanokristalle verbessert sowie eine Methode für ihre industrielle Synthese entwickelt werden.

Wie man Transistoren züchtet



Transistoren auf der Basis von Kohlenstoff-Nanostrukturen könnten in wenigen Jahren Realität sein. Einem internationalen Forscherteam mit Beteiligung der Empa ist es nun gelungen, Nanotransistoren aus wenigen Atome breiten Graphenbändern zu produzieren.

TEXT: Karin Weinmann / BILDER: Empa, iStockphoto

Nur wenige Atome breite Graphenbänder, so genannte Graphen-Nanoribbons, haben spezielle elektrische Eigenschaften, die sie zu vielversprechenden Kandidaten für die Nanoelektronik der Zukunft machen: Während Graphen – eine nur ein Atom dünne, bienenwabeförmige Kohlenstoffschicht – ein leitendes Material ist, kann es in Form von Nanobändern zum Halbleiter werden. Das bedeutet, es hat eine genügend grosse Energie- oder Bandlücke, in der keine elektronischen Zustände möglich sind. Dadurch lässt es sich an- und abschalten – und wird so möglicherweise zu einem zentralen Bestandteil von Nanotransistoren.

Kleinste Details in der atomaren Struktur dieser Graphenbänder haben allerdings massive Auswirkungen auf die Grösse der Energielücke – und damit darauf, wie gut sich die Nanoribbons als Bestandteile von Transistoren eignen. Die Grösse der Lücke hängt einerseits von der Breite der Graphenbänder ab, andererseits von der Struktur der Ränder. Da Graphen aus gleichseitigen Kohlenstoff-Sechsecken besteht, kann der Rand je nach Ausrichtung der Bänder eine Zickzack- oder eine so genannte Sessel-Form («armchair») aufweisen. Während sich Bänder mit Zickzackrand wie Metalle verhalten – also leitend sind –, werden sie mit einem Sesselrand zum Halbleiter.

Das bedeutet eine grosse Herausforderung für die Herstellung der Nanoribbons: Werden die Bänder aus einer Schicht Graphen herausgeschnitten oder hergestellt, indem man Kohlenstoff-Nanoröhrchen aufschneidet, kann es sein, dass die Ränder unregelmässig sind – und somit die Graphenbänder nicht die gewünschten elektrischen Eigenschaften zeigen.

Mit neun Atomen zum Halbleiter

Forschenden der Empa ist es nun in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz und der University of California in Berkeley gelungen, Bänder von exakt neun Atomen Breite und ei-

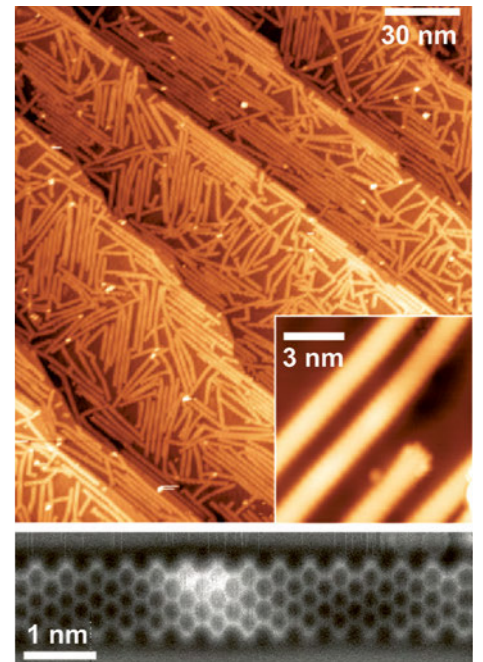
nem regelmässigen Sesselrand aus Vorläufermolekülen wachsen zu lassen. Dafür werden die speziell angefertigten Moleküle im Ultrahochvakuum verdampft. Wie Puzzlestücke fügen sie sich nach mehreren Verfahrensstufen auf einer Goldunterlage zu den gewünschten Nanoribbons von rund einem Nanometer Breite und bis zu 50 Nanometern Länge zusammen.

Probleme mit Oxidschicht

Diese Strukturen, die nur mit einem Rastertunnelmikroskop erkennbar sind, haben nun eine relativ grosse und vor allem eine genau definierte Energielücke. Damit konnten die Forschenden nun einen Schritt weiter gehen und die Graphenbänder in Nanotransistoren integrieren. Die Versuche waren noch wenig erfolgreich: Messungen zeigten, dass der Unterschied im Stromfluss zwischen dem Zustand Ein (also bei angelegter Spannung) und dem Zustand Aus (ohne angelegte Spannung) viel zu gering war. Das Problem lag bei der dielektrischen Schicht aus Siliziumoxid, die die halbleitenden Schichten mit dem elektrischen Schalterkontakt verbindet: Mit einer Dicke von 50 Nanometern war sie im Verhältnis zum Transistor kanal von weniger als 20 nm Breite viel zu dick.

Den Forschenden gelang es in der Folge jedoch, diese Schicht massiv zu verkleinern, indem sie als dielektrisches Material anstelle von Siliziumoxid-Hafniumoxid (HfO_2) verwendeten. Damit ist die Schicht gerade noch 1,5 Nanometer dünn – und der Strom bei «eingeschaltetem» Transistor um Zehnerpotenzen höher.

Ein weiteres Problem lag im «Einbau» der Graphenbänder in den Transistor; künftig sollen die Bänder nicht mehr kreuz und quer auf dem Transistor-Substrat liegen, sondern entlang des Transistorkanals ausgerichtet sein. Dadurch liesse sich der hohe Ausschuss an nicht funktionierenden Nanotransistoren erheblich reduzieren. Versuche an der Empa zeigen bereits, dass diese gerichtete Fabrikation gelingen kann. //



oben

Die mikroskopisch kleinen Bänder liegen kreuz und quer auf dem Substrat aus Gold. Jedes besteht aus neun nebeneinander liegenden Kohlenstoff-Atomen und ist 50 000 mal dünner als ein menschliches Haar. Aufnahme aus dem Rastertunnelmikroskop (orange), Computergrafik der atomaren Struktur (grau).

links

Empa-Forscherin Gabriela Borin Barin verdampft speziell angefertigte Moleküle im Hochvakuum, um die Graphen-Nanobänder wachsen zu lassen.

Deutscher Rohstoff, Schweizer Präzision, amerikanisches Finish

Vier Forschergruppen aus drei Ländern erschaffen den Graphen-Transistor

Max-Planck-Institut
für Polymerforschung,
Mainz 

Prof. Dr. em. Klaus Müllen

- Design und chemische Synthese der Rohbausteine für die Graphenbänder

Technische Universität,
Dresden 


Prof. Dr. Xinliang Feng

- Design und chemische Synthese der Rohbausteine für die Graphenbänder

Empa, nanotech@surfaces 

Prof. Dr. Roman Fasel

- Synthese der Graphenbänder auf Gold-Oberflächen (Länge: 30 nm)
- Qualitätskontrolle im Raster-Tunnelmikroskop
- Umsetzen auf nichtleitende Oberflächen
- Qualitätskontrolle mit Raman-Spektroskopie

University of California, Berkeley
Dept. of Electrical Engineering
and Computer Sciences 

Prof. Dr. Jeffrey Bokor

- Lithografische Strukturierung der Substrat-Chips (Platin-Kontaktpunkte, dielektrische Schicht und Backgate)
- Nanolithografische Fabrikation von Elektroden (20 nm Abstand)
- Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften bei einem Millionstel Ampère

Ausschneiden oder wachsen lassen?

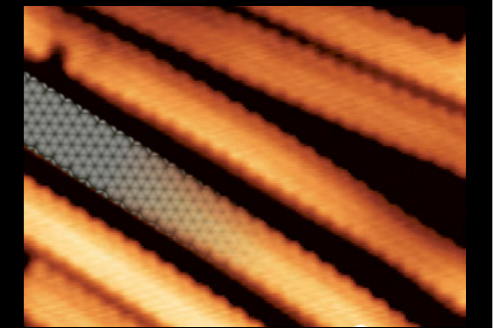
Graphen lässt sich industriell herstellen, doch dann ist es für Transistoren noch nicht geeignet: Die Graphen-Plättchen leiten Elektrizität in alle Richtungen – vergleichbar mit einem Kupferblech. Für Transistoren sind jedoch Halbleiter gefragt.

Dünne Graphenbänder, sogenannte Nanoribbons, haben solche Halbleiter-Eigenschaften. Man kann diese Bänder mit lithografischen Methoden aus Graphen-Plättchen ausschneiden oder aus industriell hergestellten Carbon-Nanoröhrchen gewinnen, indem man sie der Länge nach öffnet. Beide Methoden ergeben jedoch Bänder mit sehr vielen Störstellen an den Rändern. Das Wandern der Elektronen durchs Graphen wird dadurch beeinträchtigt.

An der Empa lassen die Forschenden deshalb Graphenbänder aus einzelnen Molekülen zusammenwachsen, die an der TU Dresden oder am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz synthetisiert wurden. Diese Methode ergibt gleichmässige Ränder ohne Störstellen – die Graphenbänder leiten Elektronen in einer wohldefinierten Weise.

Wie stark eine Störstelle am Rand eines Graphenbandes die elektronischen Eigenschaften beeinflussen kann, sehen Sie im Video «Electron wave propagation in graphene nanoribbon» (siehe link oben). Die Elektronenwolke kann nur das fehlerfreie Graphen durchlaufen – im Graphenstreifen mit der Störstelle wird die Welle zerstreut. Das Video basiert auf einer Computersimulation der Empa.

Basis für den Bau von Transistoren ist die Fähigkeit, grössere Mengen fehlerfreier Graphenbänder herzustellen und auf ein geeignetes Substrat zu übertragen, wie es nun an der Empa gelang.



Video
Electron wave propagation in
graphene nanoribbons

<https://youtu.be/inqfSJf91E>

Pixel-Tuning fürs Handy

Rot-, blau- und grünempfindliche Farbsensoren aufeinander-schichten statt mosaikförmig aufreihen – mit diesem Prinzip könnten Bildsensoren mit einer noch nie dagewesenen Auflösung und Lichtempfindlichkeit realisiert werden. Bislang gelang das in der Realität mehr schlecht als recht. Forscher der Empa und der ETH Zürich haben einen Sensorprototyp entwickelt, der Licht nahezu ideal absorbiert – und erst noch günstig herzustellen ist.

TEXT: Karin Weinmann / BILDER: Empa

Das menschliche Auge besitzt für die Farbwahrnehmung drei verschiedene Arten von Sinneszellen. Rot-, grün- und blauempfindliche Zellen wechseln sich im Auge ab und fügen ihre Informationen zu einem farbigen Bild zusammen.

Bildsensoren, beispielsweise in Handycameras, funktionieren ähnlich: Wie bei einem Mosaik wechseln sich blaue, grüne und rote Sensoren ab. Intelligente Softwarealgorithmen berechnen aus den einzelnen Farbpixeln ein farblich hochaufgelöstes Bild. Das Prinzip bringt aber auch einige Limitationen mit sich: Da jeder Pixel nur einen kleinen Teil des darauf auftreffenden Lichtspektrums absorbieren kann, geht ein grosser Teil der Lichtmenge verloren. Die Sensoren können zudem fast nicht mehr weiter verkleinert werden, und es können unerwünschte Bildstörungen, so genannte Farbmoiré-Effekte, auftreten, die mühsam wieder aus dem fertigen Bild herausgerechnet werden müssen.

Schon seit einigen Jahren beschäftigen sich Forscher daher mit der Idee, die drei Sensoren aufeinanderzustapeln statt nebeneinander zu platzieren. Dies bedingt natürlich, dass die oben liegenden Sensoren die Lichtfrequenzen, die sie nicht absorbieren, zu den unteren Sensoren durchlassen. Ende der 90er-Jahre gelang es erstmals, so einen Sensor herzustellen: er bestand aus drei aufeinander-gestapelten Siliziumschichten, die jeweils eine Farbe absorbieren.

Absorption nicht scharf genug getrennt

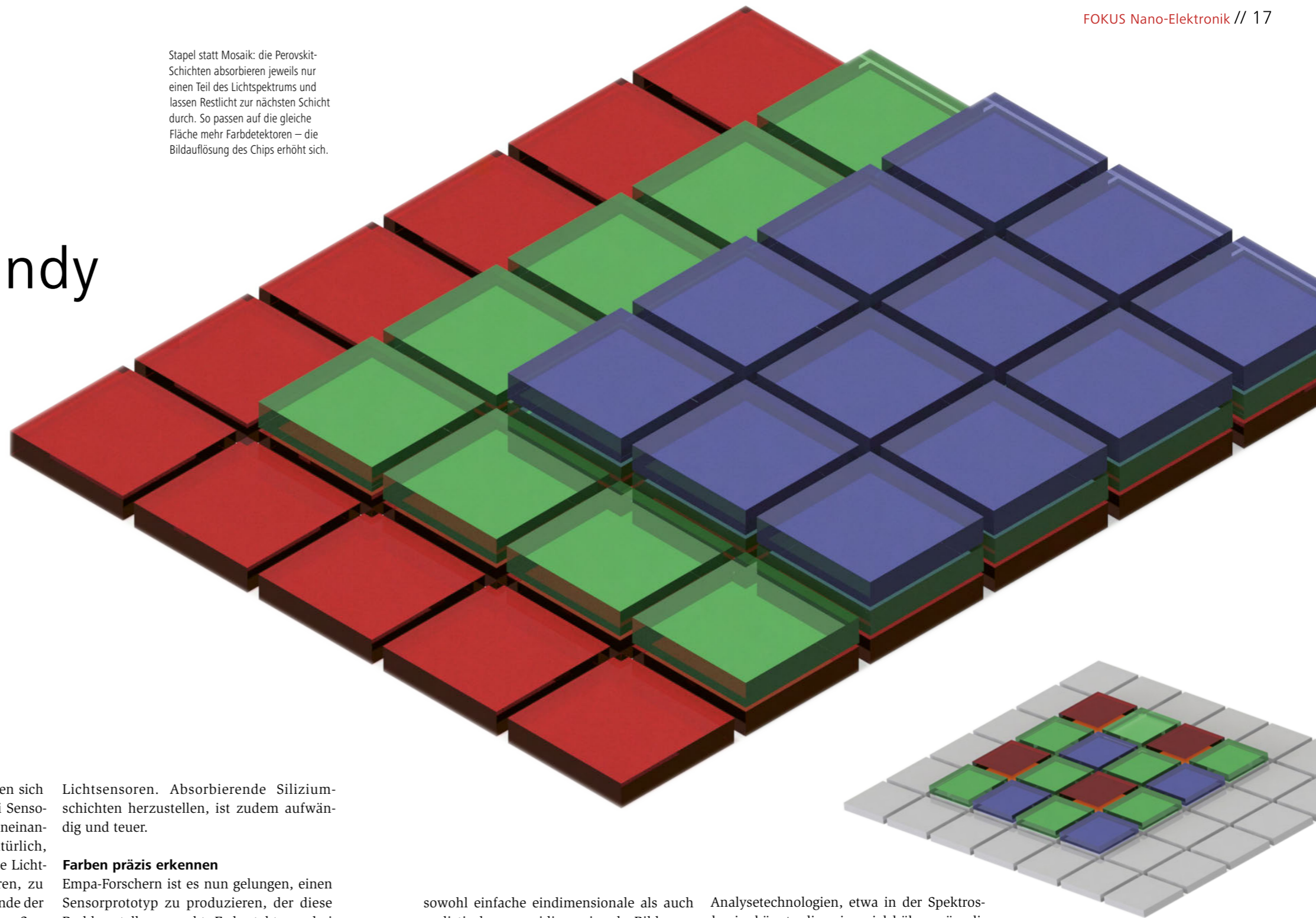
Daraus entstand auch tatsächlich ein kommerziell erhältlicher Bildsensor. Er konnte sich allerdings im Markt nicht durchsetzen: Da die Absorptionsspektren der verschiedenen Schichten nicht scharf genug abgetrennt waren, wird ein Teil des grünen und roten Lichts bereits in der blauempfindlichen Schicht absorbiert – als Resultat verwischen die Farben, und die Lichtempfindlichkeit ist dadurch sogar tiefer als bei gewöhnlichen

Lichtsensoren. Absorbierende Siliziumschichten herzustellen, ist zudem aufwändig und teuer.

Farben präzise erkennen

Empa-Forschern ist es nun gelungen, einen Sensorprototyp zu produzieren, der diese Problemstellen umgeht. Er besteht aus drei verschiedenen Arten von Perowskiten – einem halbleitenden Materialtyp, der dank seinen herausragenden elektrischen Eigenschaften und seiner guten optischen Absorptionsfähigkeit seit einigen Jahren immer grössere Bedeutung findet, etwa bei der Entwicklung neuer Solarzellen. Je nach Zusammensetzung dieser Perowskite können sie einen Teilbereich dieses Lichtspektrums absorbieren, für den restlichen Bereich aber durchsichtig wirken. Dieses Prinzip nutzten die Forschenden um Maksym Kovalenko von der Empa und der ETH Zürich, um einen Farbsensor von nur einem Pixel Grösse herzustellen. Den Forschenden gelang es, damit

Stapel statt Mosaik: die Perowskit-Schichten absorbieren jeweils nur einen Teil des Lichtspektrums und lassen Restlicht zur nächsten Schicht durch. So passen auf die gleiche Fläche mehr Farbdetektoren – die Bildauflösung des Chips erhöht sich.



sowohl einfache eindimensionale als auch realistischere zweidimensionale Bilder zu reproduzieren – und zwar mit einer sehr hohen Farbtreue.

Die Vorteile dieses neuen Ansatzes liegen auf der Hand: Die Absorptionsspektren sind klar abgetrennt – die Farberkennung ist also massiv präziser als bei Silizium. Zudem sind die Absorptionskoeffizienten insbesondere für die Lichtanteile mit höheren Wellenlängen (grün und rot) bei den Perowskiten massiv höher als bei Silizium. Dadurch können die Schichten um Grössenordnungen kleiner gefertigt werden, was wiederum kleinere Pixelgrössen ermöglicht.

Dies ist bei gewöhnlichen Kamerasensoren nicht entscheidend – aber für andere

Analysetechnologien, etwa in der Spektroskopie, könnte dies eine viel höhere räumliche Auflösung ermöglichen. Die Perowskite können zudem in einem vergleichsweise günstigen Verfahren hergestellt werden.

Von diesem Prototyp zu einem tatsächlich kommerziell nutzbaren Bildsensor bräuchte es aber noch einiges an Entwicklungsarbeit – etwa eine Schicht zwischen den Perowskiten, die lichtdurchlässig und gleichzeitig leitend ist. Zentral sind zudem die Miniaturisierung der Pixel und Methoden, um eine ganze Matrix von solchen Pixeln in einem Schritt herzustellen. Laut Kovalenko soll dies mit bereits existierenden Technologien möglich sein. //

Herkömmlicher Bildsensor: Die Pixel für die einzelnen Farben sind nebeneinander angeordnet. Der Chip benötigt mehr Fläche als der gestapelte, die Auflösung ist geringer.

Muskeln aus der Spraydose

Für Menschen mit Herzinsuffizienz wäre ein künstliches Herz die Rettung. Um das komplexe Organ im Labor nachzubauen, müsste es aber zunächst gelingen, vielschichtige lebende Gewebe zu züchten. Forscher der Empa sind dem Ziel nähergekommen: Mit einem Sprühverfahren erzeugten sie funktionierende Muskelfasern.

TEXT: Andrea Six / BILDER: Empa

links

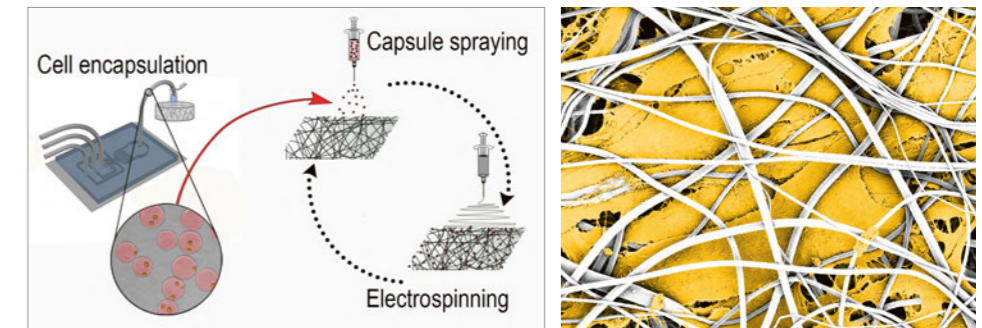
Die Natur nachgeahmt: Ein Geflecht aus Muskelfasern wächst auf gesponnenem Kunststoff. Unter dem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop erscheinen Muskelfasern rot und Zellkerne blau.

Mitte

Gewebezucht von Muskelfasern: Zellen werden in Schutzkapseln verpackt und in mehreren Lagen über ein gesponnenes Kunststoffgerüst versprüht. Am Bestimmungsort streifen die Zellen ihren Gelatinemantel ab und entwickeln sich zu ausgereiften Muskelzellen.

rechts

Bereits nach 7 Tagen verschmelzen die Zellen im Gerüst (weiss) miteinander und entwickeln sich zu länglichen Muskelfasern (gelb), wie diese eingefärbte elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt.



Wer aufgrund einer Herzinsuffizienz auf eine Transplantation angewiesen ist, muss auf ein passendes Spenderorgan hoffen. Eine elegante Alternative wäre ein künstliches Herz, welches nach der Implantation keinerlei Abstossungsreaktionen im Körper auslöst. Das Projekt «Zurich Heart» des Forschungsverbundes Hochschulmedizin Zürich, dessen Partner die Empa ist, entwickelt derzeit ein solches Kunstherz. Damit die Pumpe aus dem Labor vom Körper angenommen wird, soll sie – einer Tarnkappe gleich – von menschlichem Gewebe umhüllt und ausgekleidet sein. Bisher ist das Züchten von mehrschichtigen funktionsfähigen Geweben noch eine grosse Herausforderung im aufstrebenden

Gebiet des «Tissue Engineering». Empa-Forschern ist es nun gelungen, Zellen in einem dreidimensionalen Kunststoffgerüst zu Muskelfasern heranwachsen zu lassen.

«Das menschliche Herz ist natürlicherweise aus mehreren Lagen unterschiedlicher Gewebe aufgebaut», erklärt Lukas Weidenbacher von der Empa-Abteilung «Biomimetic Membranes and Textiles» in St. Gallen. Muskelfasern in der Auskleidung spielen hier eine entscheidende Rolle, sorgen sie doch für Stabilität und Flexibilität des stetig schlagenden Herzens. Mehrschichtig wachsende Muskelfasern zu züchten, ist jedoch schwierig, da die Zellen zunächst in ein räumliches Gerüst eingebracht werden müssen. «Zwar ist es möglich, dreidimensionale Gebilde aus Kunststoff zu erzeugen, die dem menschlichen Gewebe stark ähneln, etwa durch das so genannte Elektrospraying», so Weidenbacher. Hierbei werden flüssige Polymere als hauchzarte Fäden in der Form natürlicher Gewebe versponnen. Schädliche Lösungsmittel, die für die Methode nötig sind, seien jedoch Gift für die empfindlichen Zellen.

Schlabberiger Schutz

Die Empa-Forscher haben daher die kostbaren Zellen in schützende Kapseln verpackt. Eine Hülle aus Gelatine enthält jeweils ein bis zwei Zellen. So bleiben die Zellen vor den Lösungsmitteln geschützt. Ein spezielles Sprühverfahren, das Elektrospraying, er-

möglicht es, die Kapseln in die Poren des gesponnenen Gerüsts einzubringen. «Das Sprayen überstehen die derart geschützten Zellen sehr gut», so der Materialforscher. Haben sich die Zellen einmal am Zielort eingeknistet, löst sich die gallertige Kapsel innerhalb von Minuten auf.

Dass es den Zellen in ihrem Kunststoff-Nest gefällt, zeigen Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop: Sobald die Kapseln aufgelöst sind, beginnen die unreifen Vorläuferzellen miteinander zu verschmelzen und zu länglichen Muskelfasern auszureifen. Am Schluss soll eine Struktur entstehen, die natürlichem Muskelgewebe möglichst ähnlich ist. «Da das künstliche Herz permanent vom Blutkreislauf durchspült wird, ist es wichtig, dass die Oberfläche so gestaltet ist, dass sich keine Gerinnsel bilden», sagt Weidenbacher.

Unsichtbar für die Körperabwehr

Für die Versuchsreihe haben die Forscher unreife Muskelzellen einer Mäuse-Zelllinie verwendet. Die Vorläuferzellen differenzieren sich im Gerüst aus und produzierten Proteine, die typischerweise in Muskeln vorkommen. Das implantierbare Kunstherz soll in Zukunft mit Zellen bestückt werden, die vom Patienten selbst stammen. So könnte für die Betroffenen ein persönliches Herz gezüchtet werden, das für die Körperabwehr «unsichtbar» bleibt. //

Mit Blick über den Tellerrand

Michel Calame leitet die Forschungsabteilung «Transport at Nanoscale Interfaces» an der Empa. Der Name ist Programm: Der Physiker will dort forschen, wo sich Biologie und Physik begegnen, feuchte Systeme auf trockene Elektronik treffen und Nano-Maschinen vor lauter Kleinheit quantenmechanische Effekte zeigen. Systemgrenzen sind sein Metier.

TEXT: Rainer Klose / BILDER: Empa, privat

Hier ist jemand auf Entdeckungsreise. Das spürt man bereits nach wenigen Sekunden. Wobei der Begriff «Reise» die Geschwindigkeit von Michel Calame nur unpassend wiedergibt. Also besser: Erkundungsmission? Jedenfalls geht es um ein bisher nur notdürftig kartografiertes Gebiet – einen weissen Fleck auf der Landkarte der Forschung. Calame mag nicht innerhalb bekannter Systeme seine Forschung treiben – in der Welt der Kristalle, der Bioorganismen, der regelmässigen Nanostrukturen – er möchte vielmehr an der Stelle suchen, an der ein System endet und auf ein anderes trifft. Wo die Gesetze der einen Welt verblasen und die Gesetze der anderen Welt zu wirken beginnen.

Vom Trockenen ins Nasse

Gesucht hat er offenbar schon immer. Studium der Physik in Neuenburg und Promotion auf dem Gebiet supraleitender Dünnschichten, danach ein Intermezzo beim Eidgenössischen Institut für Metrologie (METAS), hier ging es um die Entwicklung neuartiger Tieftemperatur-Transistoren. Dann zog es ihn an die Rockefeller University nach New York, in eine Forschungsgruppe, die sich mit molekularer Biophysik beschäftigt. «Fürchterlich, Biophysik – das ist ja nass!», hätten seine Studienkollegen damals gesagt, erzählt Calame. Physiker lieben das feuchte Metier nicht besonders, doch ihn reizte gerade dieser Aufbruch in die Welt jenseits seines bisherigen Erfahrungshorizonts. «Lebendige Organismen sind viel zu interessant, um sie nur den Biologen zu lassen.» Seither ist er Grenzgänger in Forschungsfragen ge-

blieben. «Interfaces» – die Grenzflächen und Berührungspunkte zwischen verschiedenen Materialien, aber auch zwischen den Forschungsdisziplinen, die wecken seine Neugier. «Beobachtungen auf der Nanometerskala sind besonders schön», sagt Michel Calame, «denn da trifft Physik auf Biologie und auf Chemie. Dort sind die Strukturen so klein, dass ein Elektron nicht einfach irgendwo hinüberhüpft, wie ein Chemiker es nennen würde. Hier, im Kleinen, wird die Wellennatur des Elektrons deutlich. Hier sehe ich Quanteneffekte bei Raumtemperatur.» Schnell und präzise erläutert er das, und man kann es in seinem Gesicht leuchten sehen.

Seit Oktober 2016 leitet Calame nun die Forschungsabteilung «Transport at Nanoscale Interfaces» mit rund 40 Mitarbeitenden. Ein neugieriger Chef ist ja gut – aber wohin genau führt die Erkundungsmission ihn und sein Team? Ein kleiner Exkurs durch die Physik folgt, bevor das Forschungsgebiet umrissen ist: In den 1980er-Jahren wurden Atome erstmals für die Menschheit zu greifbaren Objekten; Don Eigler vom IBM-Forschungslabor in Almaden (an dem übrigens auch Empa-Direktor Gian-Luca Bona mehrere Jahre arbeitete) arrangierte 35 Xenonatome auf einer Oberfläche zu den Buchstaben «IBM». «Später, in den 1990ern, staunten wir über Erfolge in der Nanofabrikation – das war wie Lego spielen in der Nanowelt», so Calame.

Doch heute liege das Interesse nicht mehr allein auf der Herstellung kleiner Strukturen, sondern mehr und mehr bei den Funktionalitäten, die sich damit erzielen lassen. Transportphänomene aller Art finden

statt, und je nach Forschungsdisziplin driften die Interpretationen auseinander: Physiker sprechen vom Ladungstransport, Chemiker eher vom Ladungstransfer. Die einen betrachten den Fluss als Ganzes, die anderen beobachten einzelne Tröpfchen. Doch die Grenzen zwischen den Disziplinen verschwimmen von Jahr zu Jahr mehr. Es entsteht eine «Zwischenzone», und Michel Calame und seine Kolleginnen und Kollegen lockt ein Ziel, das genau dort zu finden ist: Engineering mit Multi-Atom-Bausteinen, etwa funktionellen Molekülen, Kristalliten oder Quantenpunkten.

«Atomverbände sind die kleinsten Einheiten, an denen wir noch mit überschaubaren technischen Mitteln arbeiten können. Am Molekül oder einem Nanokristall und dessen Elektronenhülle kann ein Ingenieur noch manipulieren – am Atomkern geht das nicht mehr», sagt der Empa-Forscher. Seit zehn Jahren ist Calame auf diesem Gebiet aktiv. 2008 erscheint sein Name auf einer Publikation über molekulare Schalter, die auf sichtbares Licht reagieren. Co-Autor ist Ben Feringa, einer der aktuellen Nobelpreisträger für Chemie. Doch einzelne Schalter bewirken nicht viel – wie wäre es mit einem Cluster von Atomen, montiert auf Millionen von Nanopartikeln, die sich auf einer Oberfläche von selbst anordnen und ausrichten? Wie kommt man von da zu einer Interaktion mit biologischen Systemen? Wie führt von dort aus der Weg zur Nano-Elektronik von morgen?

Hier kommen Kolleginnen und Kollegen ins Spiel, die an der Empa verwandte Disziplinen bearbeiten: In Roman Fasels La-



Michel Calame blickt über den Horizont eines seiner Laborgeräte.

bor, «Nanotech at Surfaces», werden Graphene synthetisiert, die als Elektronikbausteine der Zukunft gelten (siehe S. 12); Hans Hug, ein Mikroskopie-Spezialist, manipuliert mit seinem Team in der Forschungsabteilung «Nanoscale Materials Science» Elektronenhüllen an Atomen; Maksym Kovalenko forscht, sowohl an der Empa als auch an der ETH Zürich, an der Selbstorganisation von Nanopartikeln; René Rossi in der Abteilung «Biomimetic Membranes and Textiles» untersucht die Oberflächeneigenschaften menschlicher Haut und erkundet funktionelle Textilien; Katharina Maniura von der Abteilung «Biointerfaces» forscht an Biofilmen auf anorganischen Materialien.

«Die Empa hat alles, was ich brauche»

Dieses wissenschaftliche Umfeld liefert nun auch die Erklärung, warum es Michel Calame nach 16 Jahren Forschung und Lehre an der Universität Basel an die Empa verschlagen hat. «Die Empa hat alles, was ich brauche: Rastertunnel- und Transmissionselektronenmikroskope, NMR und UV-Vis-Spektroskopie, «Focused Ion Beam» (FIB) für die Oberflächenanalyse. Und hier gibt es auch

des Neuenburger Sees, aufgewachsen; zur Entspannung zieht es den Wissenschaftler und Stadtmenschen öfters auf einen Wanderpfad. Doch zunächst muss das neue Familiendomizil, ein 44 Jahre altes Gebäude oberhalb des Greifensees, für die Zukunft flottgemacht werden. Statt Bergluft gibt es also zuerst einmal Baustaub.

Seiner akademischen Heimat, der Universität Basel, wird Calame noch einige Jahre treu bleiben. Am 26. Oktober wurde er dort zum Titularprofessor für Nanowissenschaften ernannt. «Let's put the atoms and molecules to work», sei sein Motto, sagt Calame, und er erläutert noch einmal, wofür das gut sein soll: Hier, auf der Nanoskala, lassen sich Bausteine für neue Schalter und neue Computer finden. Hier erwacht die personalisierte Medizin, hier liegt der Schlüssel zu neuen Mensch-Maschine-Schnittstellen. Hier werden vielleicht gezielte Eingriffe in die Nano-



Kernfusion. Das 21. Jahrhundert werde zum Jahrhundert von Neuroscience und Biotech. «Ich bin 1969 geboren – ich bin also ein Kind des Raumfahrtzeitalters», sagt Michel Calame. «Für die nächste Forschergeneration, die wir jetzt ausbilden, gilt der Wissenschafts-Wettlauf nicht mehr dem Mond. Nun geht es ums Innere des Menschen, um das Verstehen der kleinsten, wesentlichen Details.»



die Leute, die damit umgehen können. Ich brauche das hier vorhandene Know-how in den Materialwissenschaften, um meine Systeme besser zu verstehen», sagt Michel Calame.

Ein schöner Nebenaspekt beim Umzug an die Empa: «Die Nähe zu den Bergen und Seen.» Calame ist im Val de Travers, westlich

skala des Menschen möglich, die es einst vielleicht überflüssig machen, Medikamente in grosser Menge zu schlucken, die den ganzen Körper und sämtliche Organe und Gewebe überfluten.

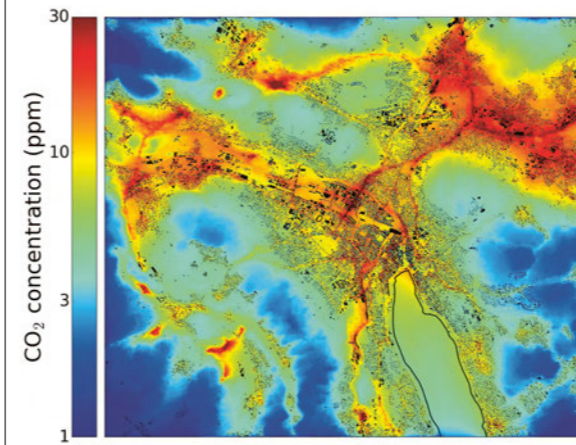
Dann schaut er zurück aufs 20. Jahrhundert. Es sei das Jahrhundert der Physik gewesen. Nasa, Raumfahrt, Kernspaltung,

oben
Michel Calame diskutiert mit seiner Mitarbeiterin Sahana Sarkar

unten
Mit Tochter Emily beim Wandern im Glarnerland

CO₂-Lokalüberwachung

Die Schweiz erhält ein weltweit einzigartig dichtes CO₂-Messsystem aus 300 Sensoren, die permanent und hochpräzise die Konzentration des Treibhausgases in der gesamten Schweiz erfassen. Die 300 batteriebetriebenen und über das ganze Land verteilte CO₂-Sensoren übermitteln ihre Daten in Echtzeit über das Internet der Dinge, das Low-Power-Netzwerk der Swisscom. Bisher gab es schweizweit für die Messung von CO₂ nur wenige Standorte. Dieses weltweit einzigartig dichte Sensornetzwerk erfasst die räumlichen und zeitlichen Änderungen der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Lukas Emmenegger, Leiter des Empa-Labors für Luftfremdstoffe/Umwelttechnik, erklärt: «Das CO₂-Sensornetzwerk wird



Verteilung der CO₂-Konzentration in der Stadt Zürich, gemittelt über die Jahre 2013 / 2014. Mit den Messwerten aus dem neuen Sensornetz werden solche Modellrechnungen künftig exakter.

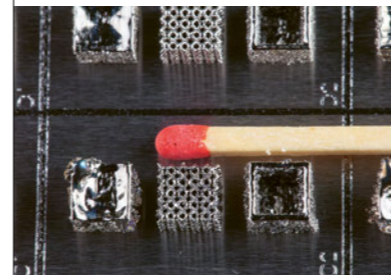
die Grundlagen liefern, um die natürlichen und vom Menschen verursachten Quellen und Senken von CO₂ in der Schweiz besser zu verstehen.»

CarboSense4D, so der Name des Netzwerks, ist eine Zusammenarbeit zwischen der Empa, dem «Swiss Data Science Center» (SDSC) des ETH-Bereichs und dem «Center for Climate Systems Modeling» (C2SM). Wichtige Partner sind zudem das Empa-Spin-off Decentlab sowie Swisscom. Die CO₂-Sensoren werden an Antennenstandorten der Swisscom sowie an vielen anderen Stationen, zum Beispiel von Meteo Schweiz, montiert und senden ihre Messwerte in die Cloud-Infrastruktur von Decentlab, von wo sie in die SDSC-Rechenzentren gelangen. CarboSense4D ist zugleich ein Modellprojekt, das die Verwendbarkeit preisgünstiger CO₂-Sensoren im Bereich der Datenwissenschaften unter Beweis stellen soll.

<http://www.carbosense.ch/>

Legierungen aus dem Laserdrucker

Neue Designer-Legierungen für die Luft- und Raumfahrt können künftig gezielt im 3-D-Laser-Schmelzverfahren (Additive Manufacturing) hergestellt werden. Pionierarbeit auf diesem Gebiet leistete der Empa-Forscher Christoph Kenel, der heute an der Northwestern University (Chicago) arbeitet. Die Empa verleiht ihm den Forschungspreis des Jahres 2017. Titan-Aluminium-Legierungen vereinen mehrere im Leichtbau für Luft und Raumfahrt begehrte Eigenschaften: Sie sind leicht, sehr fest und zugleich oxidationsresistent, auch bei hohen Temperaturen. Ziel der preisgekrönten Dissertationarbeit von Christoph Kenel war es, diese Legierungen mit Nanopartikeln aus Mineraloxiden zu versehen, die gleichmässig im Metall verteilt sind. So lassen sich die mechanischen Eigenschaften und die Oxidationsbeständigkeit der Legierungen im Hochtemperaturbereich deutlich verbessern. Der Empa-Forscher benutzte dazu eine 3-D-Laser-Schmelz-Anlage, die mit Hilfe eines Laserstrahls aus Metallpulver komplexe Bauteile formt. Betreut wurde die Forschungsarbeit von Christian Leinenbach aus der Empa-Abteilung Advanced Materials Processing.



links
Diese feinstrukturierten Probekörper aus oxidverstärkter Titan-Aluminium-Legierung entstanden im Rahmen der Dissertationarbeit.

rechts
Christoph Kenel erhält den Preis von Brigitte Buchmann, Mitglied des Direktoriums der Empa.



SWISS BAU

BRINGT ALLES ZUSAMMEN.

16. – 20. Januar 2018

Besuchen Sie die Empa im
Swissbau Innovation Lab in Basel!
Wir zeigen, zusammen mit Partnern,
was Digitalisierung im Baubereich
bedeutet.

Halle 1.1, Stand L88



Besuchen Sie die Empa
auf dem Autosalon in Genf!
Wir sind zu Gast auf dem Stand der
Erdöl-Vereinigung und zeigen
nachhaltig produzierte Treibstoffe
der nächsten Generation.

Halle 6, Stand 6239

Veranstaltungen

23. Februar 2018

Empa-FSRM-Kurs Graphen
und Kohlenstoff-Nanoröhrchen
www.empa-akademie.ch/graphen
Empa, Dübendorf

8. März 2018

VGQ Technikertag 2018
Zielpublikum: Mitglieder VGQ und Interessierte
www.vgq.ch
Empa, Dübendorf

12. – 13. April 2018

3-Länder-Korrosionstagung
Zielpublikum: Industrie und Wissenschaft
www.empa-akademie.ch/3-Länder
Empa, Dübendorf

23. – 24. April 2018

C-A-S-H II – 2nd Workshop on
Calcium-Silicate Hydrates Containing Aluminium
Zielpublikum: Industrie und Wissenschaft
www.empa-akademie.ch/cash
Empa, Dübendorf

Details und weitere Veranstaltungen unter
www.empa-akademie.ch

Ihr Zugang zur Empa:

portal@empa.ch
Telefon +41 58 765 44 44
www.empa.ch/portal



@EmpaMaterialScience



Empa_CH



EmpaChannel



Empa



empa_materials_science