

plus

bild der wissenschaft

Sprühende Ideen

Die aktuelle Dynamik in
der Materialforschung



FORSCHUNG INTERDISZIPLINÄR

FORSCHUNGS-

TAG 2015

22. JULI 2015

LIEDERHALLE

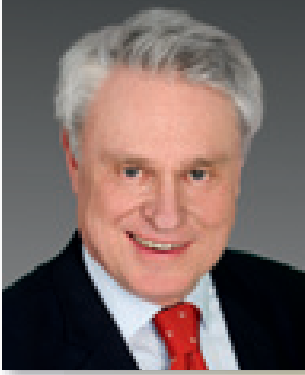
STUTTGART

Weitere Informationen auf:
www.bwstiftung.de/forschungstag

Baden-
Württemberg
Stiftung



WIR STIFTEN ZUKUNFT



Wolfgang Hess,
Chefredakteur

Clevere Tricks und Erfindergeist

Es gibt Themen, die die breite Öffentlichkeit wenig faszinieren. Werkstoffforscher haben mit einem solchen Aufmerksamkeitsdefizit ihre Probleme. Manche unter ihnen geben das unumwunden zu. Beleg für das Manko ist schon der Blick auf die Themen der Wissenschaftsjahre, die in Deutschland seit 2000 veranstaltet werden. Da gab es ein Jahr der Physik, der Technik, der Geowissenschaften, ein Jahr der digitalen Gesellschaft und sogar der Chemie. Doch das Jahr der Werkstoffforschung sucht man vergebens.

Dabei ist die Werkstoffforschung gerade für ein so industrialisiertes und gleichzeitig rohstoffarmes Land wie Deutschland essenziell. Denn technische Innovationen und damit neue Produkte lassen sich häufig nur dann entwickeln, wenn neue oder zumindest optimierte Werkstoffe zur Anwendung kommen. Wie spannend die Suche danach ist, wie trick- und erfindungsreich sich dabei Wissenschaftler ans Werk machen, offenbart Ihnen diese Sonderausgabe von bild der wissenschaft.

Ganz gleich, ob es sich um für den Körper besser verträgliche Implantate handelt, um Computerchips, die sich selbst konstruieren, oder um aufprallhemmende Helme, die Seeigel-Stacheln nachempfunden sind, – die Baden-Württemberg Stiftung unterstützt eine Vielzahl erfolgversprechender Forschungsansätze, die das Grundlagenstadium schon verlassen haben und auf dem Weg in Industrieanwendungen sind.

Die hier vorgestellten Entwicklungen haben bereits zu einer Reihe von Patentanmeldungen geführt. Erteilte Patente gehören dann der Stiftung. Lizenzen dafür sollen vor allem an die Industrie im Südweststaat vergeben werden.

Das Stiftungsvermögen in Höhe aktuell 2,4 Milliarden Euro stammt übrigens aus dem Verkauf der Anteile am Energieversorger EnBW im Jahr 2000. Mit diesem Modul einer cleveren Forschungs- und Industriepolitik will Baden-Württemberg punkten: Auf dass dort der Wohlstand weiter wächst.

3 Zur Sache

4 Farne als Vorbild

In der Materialforschung hat eine neue Ära begonnen – etwa mit Werkstoffen nach Beispielen aus der Natur.

12 Sanfter Körperkontakt

Speziell präparierte Oberflächen machen Implantate besser verträglich.

16 Anders ist anders

Ein Heidelberger Physikstudent will den „Wunderstoff“ Graphen nutzbar machen.

19 Die Kamera, die alles sieht

Sie vermisst Zähne und spürt selbst winzigste Kratzer in Zahnrädern auf.

20 Das kleinste Labor der Welt

Viren können auch nützlich sein, etwa als Baustoff für Biosensoren.

22 „Wir sind Weltmarktführer der winzigen Strukturen“

Zeiss-Vorstand Hermann Gerlinger erklärt, wodurch Mikrochips immer leistungsfähiger werden.

27 Impressum

28 Scharfblick auf heiße Zellen

Durch hoch präzises Laserbohren lassen sich Solarzellen effizienter herstellen.

32 Chips aus der Biosuppe

Elektronische Bauteile sollen sich künftig von alleine zusammensetzen.

36 Das Haus der Highlights

Ein neuer Laborbau in Freiburg dient als Schaufenster innovativer Technologien.

38 Kleine Blitze mit großer Wirkung

Nanodiamanten lassen sich als Quelle für einzelne Photonen nutzen.

42 Auf Luft gebaut

Seeigel-Stacheln dienen als Vorbild für besonders robuste Produkte.



„SPRÜHENDE IDEEN“
Wissenschaftler aus Baden-Württemberg entwickeln neuartige Materialien und Verfahren, etwa um Energie effizienter zu nutzen, Menschen bei Unfällen zu schützen oder für die Medizintechnik.

Farne als Vorbild

Das Periodensystem der nutzbaren Elemente ist nicht größer geworden. Doch in der Materialforschung hat ein neues Zeitalter begonnen – auch mithilfe der Natur.

von Frank Frick



Schwimmfarn im Visier: Der Physiker Thomas Schimmel hat eine Salvinia-Pflanze in eine Druckzelle gebracht. Darin kann er untersuchen, wie gut ihre Oberfläche den sie umgebenden Luftfilm bei Über- oder Unterdruck festhalten kann.

Fotos: W. Scheible für bfw

Thomas Schimmel ist immer für eine Überraschung gut. Wenn der Professor vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) die Bedeutung neuer Materialien vermitteln will, verzichtet er darauf, auf einem Computerbildschirm Animationen von elektrisch angetriebenen Leichtbaukarossen, futuristischen Gebäuden oder gewagten Brückenkonstruktionen zu zeigen. Er präsentiert auch nicht Ausstellungsstücke wie einen Mikrochip oder den Teil einer Turbinenschaufel. Stattdessen greift er zu einem Trinkglas auf seinem Schreibtisch, in dem eine unscheinbare grüne Pflanze schwimmt.

Dabei fragt der Physiker sein Gegenüber: „Was fällt Ihnen als Erstes ein, wenn Sie den Begriff Materialien hören – Stahl, Beton, Aluminium oder andere Konstruktionswerkstoffe?“ Um danach hinzuzufügen: „Dabei vergessen wir oft, dass sich bei den Materialien komplett Neues getan hat.“ Er zeigt auf die Pflanze, die er als *Salvinia molesta* vorstellt.

Dieser Schwimmfarn hat eine besondere Eigenschaft: Drückt man ihn unter Wasser, werden seine Blattoberflächen nicht nass. Thomas Schimmel weist auf den silbrigen Glanz auf den untergetauchten Blättern hin, den man sieht, wenn man schräg auf die Pflanze schaut. Hervorgerufen wird der Glanz durch eine dünne Luftschicht auf der Blattoberfläche, die das Licht spiegelt. Dieses Luftkleid verhindert, dass die Blattoberflächen mit Wasser benetzt werden. Daher tauchen sie auch trocken wieder aus dem Wasser auf. Besonders erstaunlich: Das Luftkleid unter Wasser bleibt wochenlang erhalten.

Salvinia molesta breitet sich in den Tropen und Subtropen, im Sommer aber auch bei uns im Gartenteich, sehr rasch aus und ist dort auch als Wasserunkraut verrufen. Um zu erklären, wie es die Pflanze schafft, unter Wasser für lange

Zeit ein Luftkleid anzulegen, weist Thomas Schimmel auf die feinen Härchen auf der Blattoberfläche hin, die mit bloßem Auge gut zu erkennen sind. Die weiteren Details lassen sich dagegen nur mit Mikroskopen und modernen Analysemethoden entschlüsseln: Die Härchen sind in Form eines Schneebesens angeordnet. Die Blattoberflächen samt der Haare sind ex-

trem wasserabweisend – im Fachjargon: superhydrophob – und sind dafür mit winzigen Wachskristallen überzogen, die viel kleiner sind als ein Mikrometer.

„Wir haben schnell gelernt, solche Oberflächen mit hydrophoben haarförmigen Strukturen nachzubauen“, sagt Schimmel. Sie konnten tatsächlich Luft unter Wasser festhalten. „Aber“, be-

dauert Schimmel, „leider nur für einige Minuten.“ Danach bildeten sich kleine Bläschen und die Luft war weg. Daraufhin untersuchten die Wissenschaftler um Schimmel und den Bonner Botaniker Wilhelm Barthlott die Pflanze noch genauer. Sie stellten fest, dass die Härchen an ihren Spitzen keine Wachskristalle besitzen und dort wasserliebend – superhydrophil – sind. Ein geschickter Trick der Natur: Nach wie vor kann beim Eintauchen der Blätter kein Wasser zwischen die Härchen eindringen. Doch die eingeschlossene Luft kann auch später nicht wieder entweichen, weil an der Grenzschicht zwischen Luftkleid und Wasserfilm das Wasser gleichsam an den Haarspitzen klebt. „Die Luft müsste sozusagen viele kleine ‚Klettverschlüsse‘ öffnen, um sich zu befreien“, erläutert Schimmel.

Vier Jahre im Wasser – und trocken

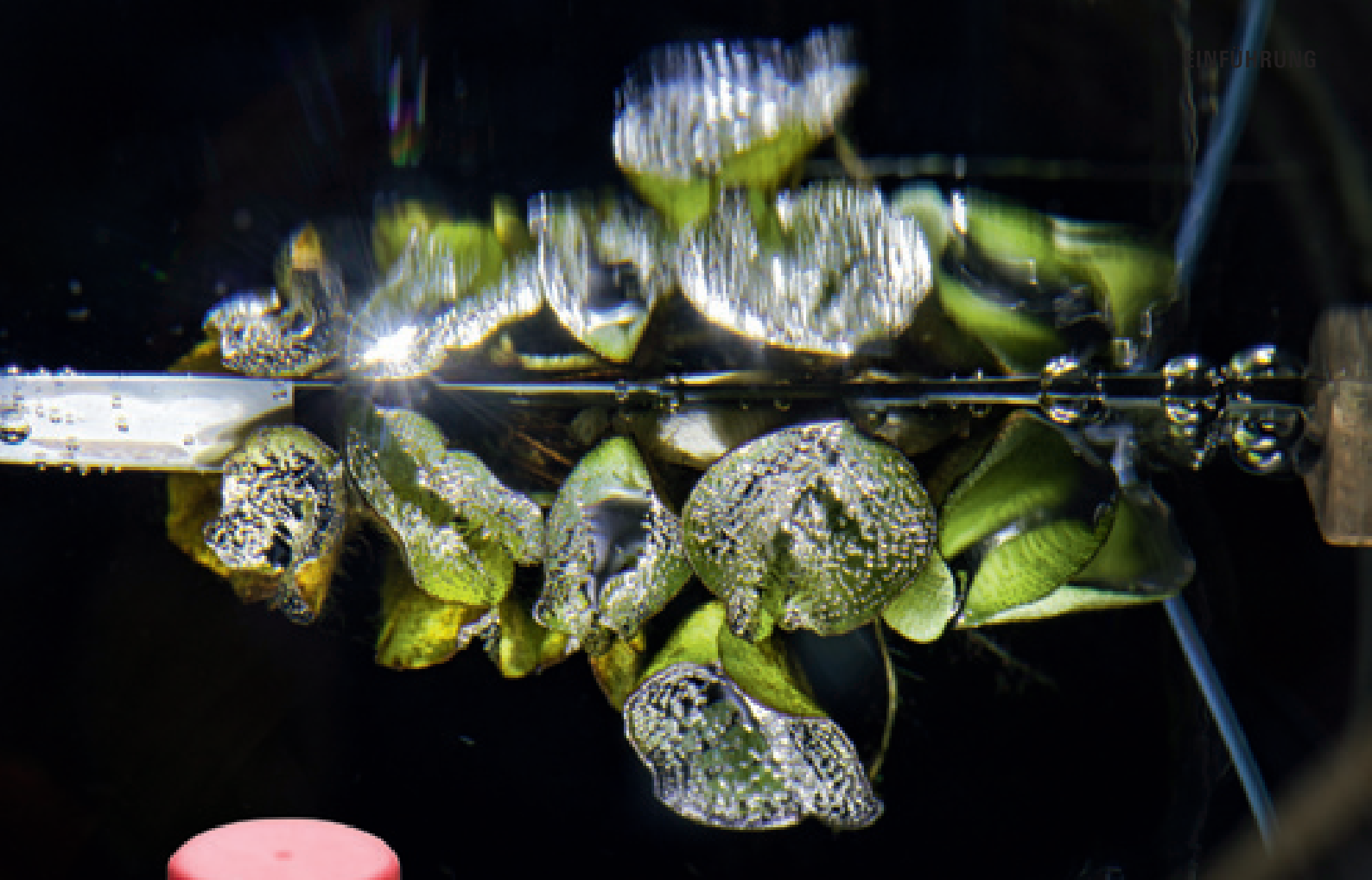
Wie wichtig die hydrophilen Härchen-Enden für die Stabilität des Luftkleides sind, wiesen die Wissenschaftler nach, indem sie die Pflanze, wie Schimmel schmunzelnd berichtet, „ein bisschen ärgerten“: Sie deckten die Haarspitzen mit einer hauchdünnen Schicht eines wasserabweisenden Materials ab. Dadurch konnte der Schwimmfarn die Luft nicht mehr festhalten. Im nächsten Schritt stellten die Forscher eine künstliche Oberfläche nach dem Vorbild der *Salvinia* her und legten sie ins Wasser: „Heute, mehr als vier Jahre später, liegt sie dort noch immer – trocken“, freut sich Schimmel. Das Luftkleid ist nicht zerrissen.

Dieses Resultat ist weit mehr als eine nette akademische Spielerei, entstanden aus einer zufälligen Naturbeobachtung. Wilhelm Barthlott hatte bereits 1995 Industrie und Öffentlichkeit aufhorchen lassen, als er herausfand, warum Wasser und Schmutz an Lotusblumen-Blättern abperlen. Die Blätter bestehen aus einer hydrophoben Oberfläche mit winzigen, regelmäßig verteilten Noppen, auf denen der Dreck sitzt wie ein Fakir auf einem Nagelbrett. Seitdem haben Unternehmen selbstreinigende Fassaden und Gläser entwickelt, die auf dem Lotus-Effekt basieren.

Dass der *Salvinia*-Effekt wirtschaftlich und ökologisch einmal bedeutsam werden könnte, war Barthlott vom Bonner



Die Spitzen der feinen Strukturen auf der Schwimmpflanze ziehen Wasser an, während der Rest der Blattoberfläche wasserabweisend wirkt.



Trockentauchen: Die künstlichen Oberflächen, die Forscher in Karlsruhe nach dem Vorbild der Blätter des Schwimmfarns hergestellt und ins Wasser gelegt haben, verharren dort bereits seit über vier Jahren – ohne ihre schützende Lufthülle abzugeben.

Durch die vollständige Reflexion des Lichts erscheinen die rundherum mit Luftbläschen bedeckten Blattoberflächen des üppig grünen Schwimmfarns silbrig glänzend. Das Kleid aus Luft sorgt dafür, dass die Blattoberflächen der Salvinia-Pflanze auch unter Wasser nicht nass werden. Dieser Effekt begeistert und inspiriert die Wissenschaftler.

Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen und Thomas Schimmel von Anfang an klar. Denn der Salvinia-Effekt könnte gleich drei Probleme der Schifffahrt deutlich verringern: Fouling, Korrosion und Reibung. Ein Schiff, das im Wasser von einer dünnen Lufthülle umgeben ist, würde nicht von Algen und anderen im Wasser lebenden Mikroorganismen besiedelt. Dieses Mikro fouling, das die Reibung und somit den Treibstoffverbrauch erhöht, wird derzeit üblicherweise mit teuren und umweltgefährdenden Chemikalien bekämpft. Außerdem rostet Stahl an Luft langsamer als in Wasser – besonders in aggressivem Salzwasser. Schließlich setzt Luft dem Schiffskörper weniger Widerstand entgegen als Wasser. Insofern würde ein Luftkleid à la Salvinia die Kosten für Treibstoff und Chemikalien verringern – ebenso wie den Ausstoß von klimaschädlichem Kohlendioxid. Daher haben Barthlott und Schimmel in den letzten Monaten Patente angemeldet und

unter anderem an Verfahren gearbeitet, mit denen sich auch große Flächen mit Strukturen beschichten lassen, die den Salvinia-Effekt hervorrufen.

Drei Merkmale für das Neue

Doch was macht von Salvinia inspirierte Materialien zu einem typischen Vertreter des komplett Neuen, das Thomas Schimmel in der Werkstoffforschung ausgemacht hat? Eine Besonderheit ist sicher der Umstand, dass Forscher Prinzipien aus der Tier- und Pflanzenwelt auf technische Systeme übertragen haben. Allerdings: Die sogenannte Bionik hat zwar Erfolge vorzuweisen, deckt aber nur einen kleinen Teil der Materialforschung ab.

Vielmehr sind es vor allem drei Merkmale, die das Neue charakterisieren:

- Konventionelle Materialien aus herkömmlichen Molekülen oder Atom-Kombinationen bekommen durch kontrollierte Strukturierung auf verschiedenen

Längenskalen – Nanometer, Mikrometer, Millimeter – neue Eigenschaften und neue Funktionen.

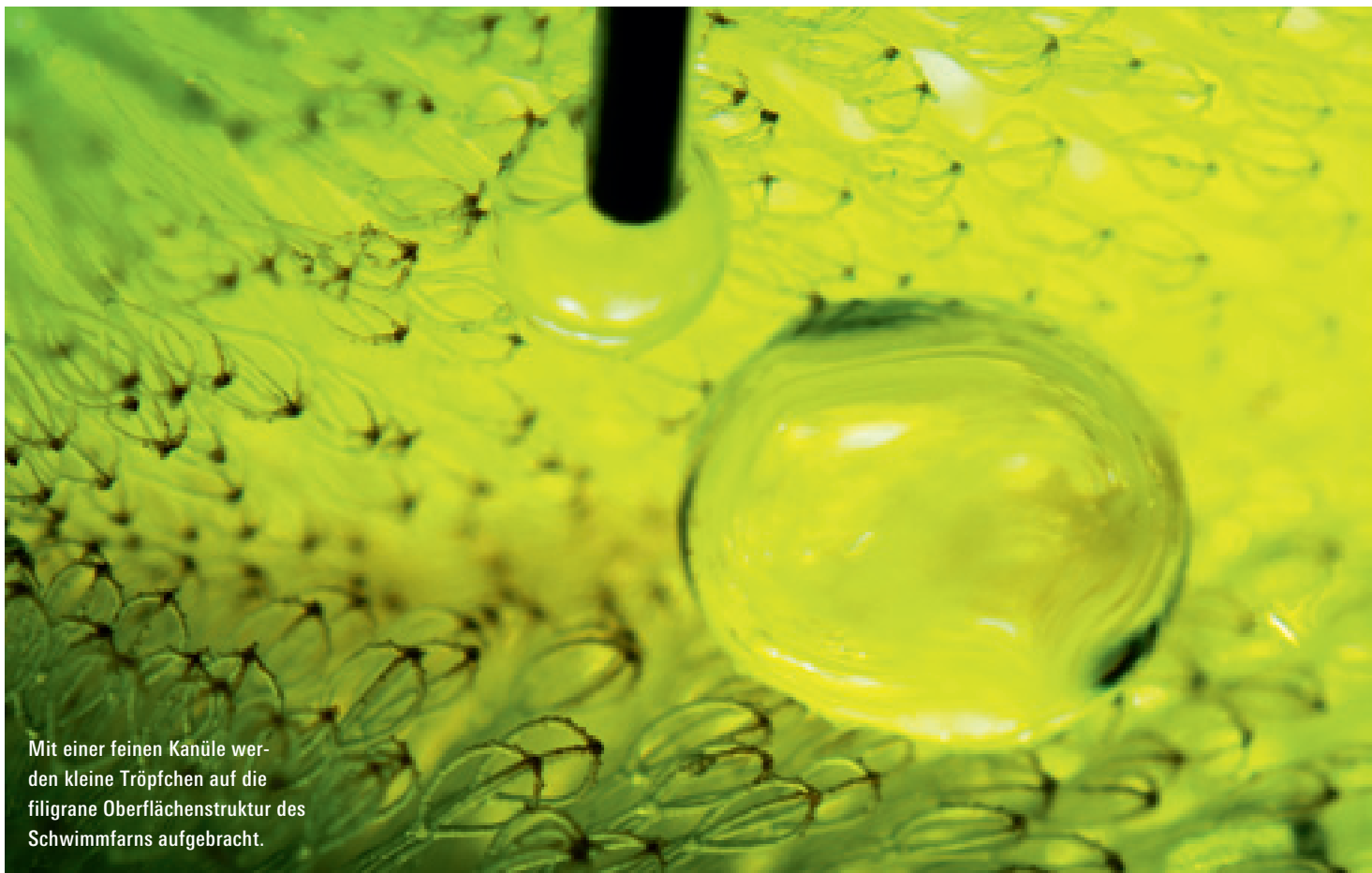
- Eine vergleichsweise winzige Menge an Material – etwa eine wenige Molekül-Durchmesser dünne Beschichtung auf einer Oberfläche – bewirkt bei einem Objekt eine große Änderung der Eigenschaften. Das heißt zugleich: Der Umgang mit Rohstoffen ist sehr effizient und es wird vergleichsweise wenig Energie für die Materialherstellung verbraucht. Diese hohe Effizienz ist ein großer Pluspunkt, wenn man angesichts endlicher Ressourcen daran denkt, dass auch unsere Enkel noch Rohstoffe benötigen, um ihre Bedürfnisse zu befriedigen.

- Eine sehr kleine Menge an Material ist entscheidend für die Funktionsweise bestimmter Geräte oder gar für eine Technologie. Somit erhält eine geringe Werkstoffmenge enorme wirtschaftliche Bedeutung.

Alle drei Punkte finden sich bei den Salvinia-inspirierten Materialien wieder. Zum einen sind da die Härchen, eine

Die Baden-Württemberg Stiftung

Als das Land Baden-Württemberg im Jahr 2000 seine Anteile unter anderem am Energieversorgungsunternehmen EnBW verkaufte, floss der Erlös in eine Stiftung ein: die Landesstiftung Baden-Württemberg, die inzwischen Baden-Württemberg Stiftung heißt. Deren Vermögen von aktuell etwa 2,4 Milliarden Euro ist zum größten Teil in Investmentfonds, Immobilien und Unternehmensbeteiligungen angelegt – die Zinsen, die diese Anlagen abwerfen, dienen zur Finanzierung einer breiten Palette von gemeinnützigen Programmen und Projekten in Bildung, Forschung, sozialen und kulturellen Aktivitäten. Jahr für Jahr gibt die in Stuttgart ansässige Stiftung dafür rund 50 Millionen Euro aus. Viele Programme und Projekte gehen aus Ideen der Stiftung hervor und werden von dieser initiiert. Im Bereich Bildung ist ein wichtiges Ziel, Talent und Erfindergeist junger Menschen in Baden-Württemberg zu fördern. Zudem wird der internationale Austausch von Schülern und Studenten unterstützt, zum Beispiel durch Auslandsstipendien oder die Förderung ausländischer Stipendiaten, die Baden-Württemberg kennenlernen wollen. Im Sozial- und Kulturbereich liegen Schwerpunkte auf der Prävention von Gewalt, der Integration von Menschen mit Migrationshintergrund und der Inklusion: der Einbindung von Kindern mit einem Handicap in den regulären Schulalltag. Bei der Forschung setzt die Stiftung auf naturwissenschaftliche und technische Methoden und Verfahren, die die Leistungsfähigkeit Baden-Württembergs als attraktiver Forschungsstandort stärken. Beispiele dafür sind Programme und Projekte aus Photonik, Robotik, Umwelt- und Energietechnik sowie den Lebenswissenschaften. Dabei ist stets ein wichtiges Ziel, Forscher verschiedener Standorte des Landes in Kooperationen zusammenzubringen, um deren verschiedenen Kompetenzen zu bündeln.



Mit einer feinen Kanüle werden kleine Tröpfchen auf die filigrane Oberflächenstruktur des Schwimmfarns aufgebracht.

Strukturierung auf der Millimeter-Skala, und die Wachskristalle, eine Strukturierung auf der Nanoskala. Fachleute sprechen in diesem Fall auch von einer hierarchischen Strukturierung, weil erst das Zusammenspiel zwischen einer übergeordneten Struktur auf der größeren Längenskala und einer untergeordneten Struktur auf der kleineren Längenskala die Funktion – hier das Festhalten der Luft – ermöglicht. Von seiner chemischen Zusammensetzung her weist der Schwimmfarn dagegen keine Besonderheiten auf: Wie andere Pflanzen auch, bestehen er und seine Blätter vor allem aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Die Materialien stellt der Schwimmfarn über die Photosynthese und andere natürliche Stoffwechselvorgänge her.

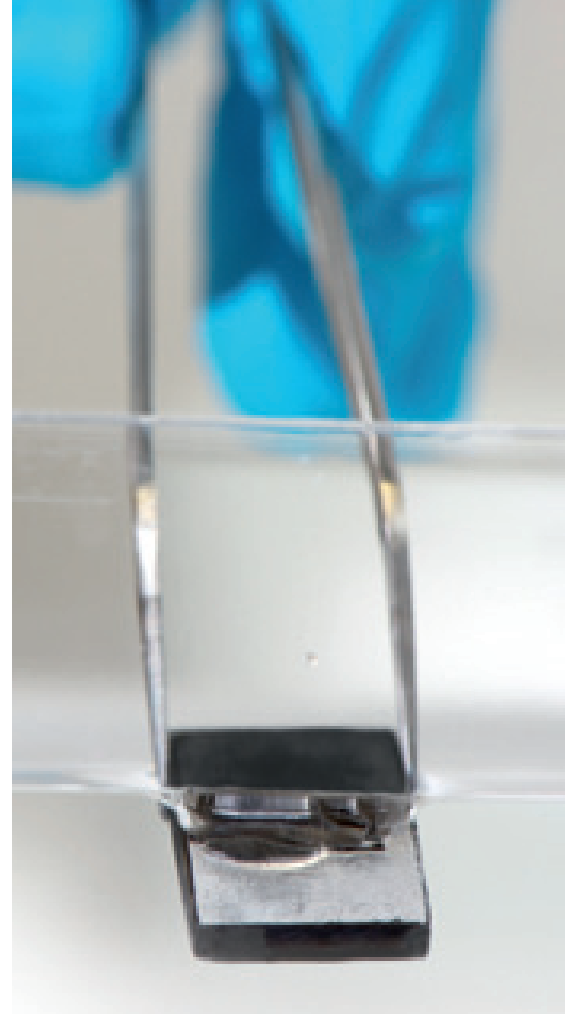
Zweitens – auch wenn das bei den Salvinia-inspirierten Stoffen noch Zukunftsmusik ist: Eine Beschichtung von wenigen Millimetern Dicke, die überdies größtenteils aus Luft besteht und entsprechend wenig Material für ihre Herstellung benö-

Lernen von der Natur: Die Forscher versuchen, die außergewöhnlichen Eigenschaften der Salvinia-Blätter technisch nutzbar zu machen.

tigt, könnte einmal Reibung und Treibstoffverbrauch eines Ozeanriesen mit einem Materialgewicht von typischerweise etwa 30 000 Tonnen stark verringern.

Drittens: Natürlich wäre neben der ökologischen auch die wirtschaftliche Bedeutung einer solchen Beschichtung immens. Ein Ozeanfrachtschiff zum Beispiel verbraucht pro Tag rund 100 Tonnen Treibstoff. Angenommen, durch das Luftkleid ließen sich 20 Prozent davon einsparen, so würde jedes Frachtschiff nach derzeitigen Marktpreisen täglich rund 9000 Euro Spritkosten einsparen.

„In gewisser Hinsicht hängt die ganze Weltwirtschaft ab von kleinen Töpfchen funktionsbestimmender Materialien“, sagt Schimmel. Ein Beispiel dafür liefern die Smartphones, von denen 2013 weltweit mehr als eine Milliarde Exemplare verkauft wurden. Deren Touch-Displays ent-



Die beiden Physiker Moritz Fischer (vorn) und Ingo Medebach analysieren die Pflanzenoberfläche von *Salvinia molesta* mithilfe spezieller Lichtmikroskopie-Techniken.

halten das leitfähige und zugleich transparente Indiumzinnoxid. Bezogen auf das Gesamtgewicht eines Handys beträgt der Indium-Anteil nur rund 0,002 Prozent. Doch ohne die maximal fünf Tonnen Indium, die für die Smartphone-Bildschirme weltweit benötigt werden, gäbe es die heutige Gerätegeneration nicht – und mit ihr wäre der gigantische Wachstumsmarkt der Apps und der IT-basierten Dienstleistungen nicht der, der er ist.

Wirtschaft und Alltag am Chip-Tropf

Ein anderes Beispiel sind Chips zur Datenspeicherung, deren Funktion letztlich von der Strukturierung einer Silizium-Oberfläche abhängt. Würde man alle Chips dieser Welt durch einen virtuellen Klick auf einmal außer Betrieb setzen, gingen nicht nur alle unsere Computerdaten verloren. Es gäbe zudem vielerorts ein Verkehrschaos, die Bankenwelt geriete durcheinander und es ginge sprichwörtlich das Licht aus, weil auch die Kraftwerke per Computer gesteuert werden.

Wie eine winzige Menge Material auf der Oberfläche eines Gegenstands dessen Eigenschaften bestimmen kann, zeigt sich etwa am Auto: Dass die Karosserie nicht mehr rostet, dafür sind effektive und immer dünnere Korrosionsschutzschichten verantwortlich. Dünne Beschichtungen auf dem Dach sorgen bei manchen Nullenergiegebäuden dafür, dass Sonnenlicht in Richtung hin zur Photovoltaik-Anlage reflektiert wird. Thomas Schimmel hat noch ein besonders drastisches Beispiel parat: „Ob ein Patient mit einer künstlichen Herzklappe überlebt, entscheidet sich ebenfalls durch eine hauchdünne Schicht – für das Blut sind nur die oberen zwei Moleküllagen der Klappe entscheidend. Aus welchem Material der Rest besteht, ist dem Blut weitgehend egal.“

Dass auch bei altbekannten Materialien noch völlig Neues zu entdecken ist, zeigt etwa das Element Silber – heute meist

eingesetzt für Schmuck und als Kontaktmaterial in elektronischen Geräten. Seine antibakteriellen Eigenschaften sind zwar prinzipiell schon länger bekannt, doch erst in Form nanometerkleiner Partikel oder als hauchdünne Beschichtung ist das Silber für Wundauflagen, OP-Geräte und Textilien attraktiv geworden. Mit Silber lassen sich aber auch winzige Bauteile für mögliche künftige Computer herstellen, die mit Licht arbeiten. Fachleute sprechen dabei von plasmonischen Bauteilen: Plasmonen sind wellenförmige Veränderungen der Elektronendichte auf der Oberfläche von Metallen, die zum Beispiel durch Licht angeregt werden können.

Schließlich haben die Karlsruher Forscher um Schimmel aus Silber den kleinsten Transistor der Welt hergestellt. Bei ihm wird ein elektrischer Strom zwischen zwei winzigen Kontakten durch Umlagern eines einzigen Atoms ein- und

ausgeschaltet. Solch ein „Einzelatom-Transistor“ ist nicht nur winzig klein. Viel wichtiger ist, dass der Energieverbrauch eines atomaren Transistors aus Silber nur ein zehntausendstel so groß ist wie der von herkömmlichen Silizium-Transistoren. „Das Periodensystem ist nicht größer geworden, doch die Möglichkeiten, es zu nutzen, wachsen Monat für Monat“, resümiert Schimmel.

Und der Markt für wertschöpfende Werkstoffe wächst auch – weitaus stärker als die Weltwirtschaft insgesamt. Das jedenfalls prophezeit das skandinavische Unternehmen Oxford Research in einer Studie, die es 2012 im Auftrag der Europäischen Union erstellt hat. Darin definieren die Analysten etwas schwammig: „Wertschöpfende Materialien sind Werkstoffe, die für das Wirtschaftswachstum und die industrielle Wettbewerbsfähigkeit strategisch wichtig sind – und die die

Pflanzen und Tiere zeigen, wie es geht



Für viele Probleme hat die Natur bereits eine optimale Lösung gefunden. Aus Eigenschaften und Fähigkeiten von Pflanzen und Tieren können Ingenieure daher exzellente Ideen für technische Anwendungen gewinnen. Einige Beispiele: Lebende Bäume lassen sich als Baustoff in Gebäude integrieren (1), die Struktur des Haars des Eisbärrells dient als Vorbild für solarthermische Elemente (2), Holz weist den Weg zu effizienten Filtern (3), Lianen können Beschädigungen selbst reparieren – eine Fähigkeit, die Forscher auch bei Rissen in Brücken nutzbar machen wollen (4). Der Schwimmfarn umgibt sich im Wasser mit einem Luftkleid – das lehrt Schiffbauer, wie sich die Reibung des Schiffsrumpfs verringern lässt (5). Selbst reinigende Oberflächen nach dem Prinzip der Lotusblume werden bei Dachziegeln eingesetzt, auf denen Schmutz abperlt (6), Autokonstrukteure nutzen besonders leichte Bauteile, die wie Gräser aufgebaut sind (7), und die Oberfläche von Geckofüßen schafft eine enorme Haftkraft (8).

großen Herausforderungen unserer Zeit ansprechen.“ Zu diesen Herausforderungen zählt es beispielsweise, die Menschheit sicher und klimaneutral mit Energie zu versorgen oder in einer älter werdenden Gesellschaft möglichst viele Menschen gesund zu erhalten. Um zu erläutern, wie wertschöpfende Materialien von neuen und fortschrittlichen Materialien abzugrenzen sind, benötigen die Studienautoren rund acht DIN-A4-Seiten. Jedenfalls soll der Umsatz der wertschöpfenden Materialien von rund 100 Milliarden Euro im Jahr 2008 über 186 Milliarden Euro 2020 auf bis zu 1000 Milliarden im Jahr 2050 steigen.

Bei aller Begeisterung für das Neue in der Wissenschaft betont Thomas Schimmel auch, dass es in der Materialforschung häufig darum geht, Stoffeigenschaften und Herstellungsprozesse mit viel Mühe und Planung in kleinen Schritten zu verbessern. Wie erfolgreich diese Herangehensweise sein kann, zeigt die stete Weiterentwicklung in der konventionellen Halbleitertechnologie, auf der unsere heutige Informationstechnik beruht. Doch Schimmel ist überzeugt, dass Wissenschaftler auch Freiräume brauchen, in denen sie ungewöhnliche Ideen gebären und verfolgen können. „Wer fragt: Wussten Sie, dass mehr als 90 Prozent

solcher Ideen nicht zum Erfolg führen?, dem könnte man antworten: Wussten Sie schon, dass nahezu 100 Prozent aller großen technologischen Durchbrüche nicht im Voraus geplant waren? Verbesserungen kann man planen, komplett neue Ideen und Konzepte aber brauchen Freiräume.“ Fördergelder, die den Wissenschaftlern diesen Freiraum lassen oder erst verschaffen, seien besonders wertvoll.

Tatsächlich, sagt Schimmel, verbinde die Baden-Württemberg Stiftung ihre Förderzusagen mit einem Vertrauensvorschuss statt mit einem Misstrauensvorschuss. Und da die Ideen für ungewöhnliche Forschungsprojekte oft beim zwanglosen Gespräch zwischen Wissenschaftlern verschiedener Fachrichtungen und unterschiedlichen Alters entstünden, sei es genau richtig, dass die Stiftung auch Konferenzen und den wissenschaftlichen Austausch fördere. Eine dieser Tagungen findet jährlich in Bad Herrenalb im Nordschwarzwald statt. Dort treffen sich die Wissenschaftler des Kompetenznetzes Funktionelle Nanostrukturen. Nach dem Mittagessen oder der Kaffeepause bleiben dort immer wieder interessante Papierservietten zurück, beschrieben mit neuen Ideen und Projektskizzen während spontaner Diskussionen. Auf so einer Tagung lernten sich auch der Karlsruher Physiker Schimmel und der Bonner Biologe Barthlott kennen – es war die Geburtsstunde der erfolgreichen Forschung am tropischen Schwimmpflanz *Salvinia molesta* und seinen künftigen Anwendungen.

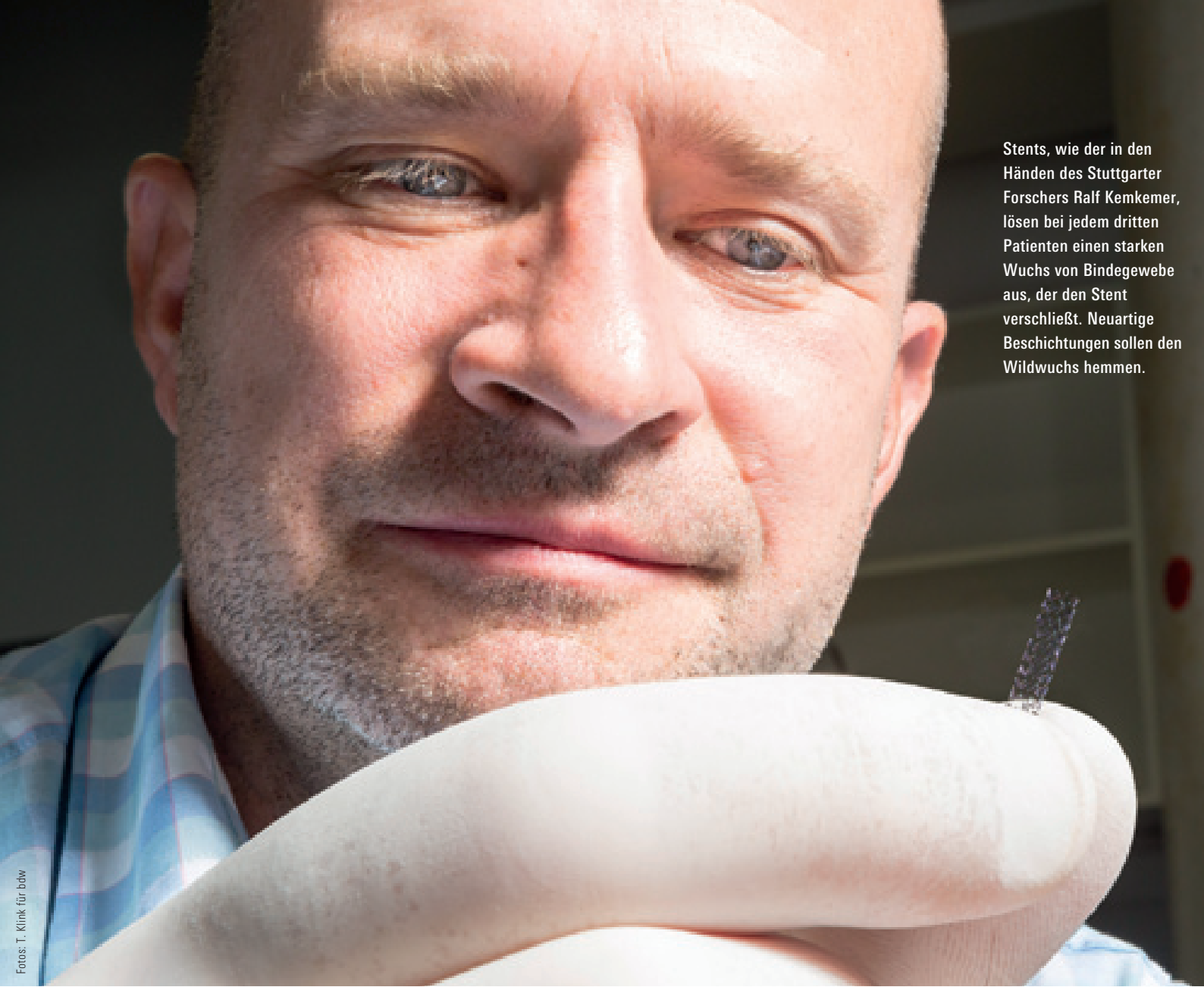


Fotos: T. Klink für bdw

Anregende Diskussion in der Kaffeepause: Auf Forschertagungen wie dem jährlichen Workshop des baden-württembergischen Kompetenznetzes Funktionelle Nanostrukturen in Bad Herrenalb wurden bereits viele pfiffige Ideen geboren.

Auch die Struktur der Blattoberflächen des Schwimmpflanzs knüpften sich die Wissenschaftler einst bei einer solchen Tagung vor – auf einer Papierserviette.



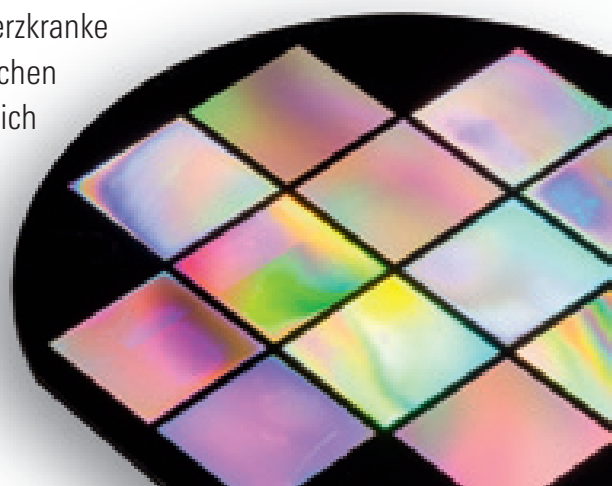


Stents, wie der in den Händen des Stuttgarter Forschers Ralf Kemkemer, lösen bei jedem dritten Patienten einen starken Wuchs von Bindegewebe aus, der den Stent verschließt. Neuartige Beschichtungen sollen den Wildwuchs hemmen.

Sanfter Körperkontakt

Implantate lassen Parkinson-Kranke weniger zittern und herzkrank Menschen länger leben. Dank speziell präparierter Oberflächen sollen die eingepflanzten Prothesen künftig besser verträglich sein und ihre Energie direkt aus dem Körper beziehen.

von Frank Frick



Die Stromstöße des Zitteraals sind so stark, dass sie sogar Maulesel und Pferde betäuben können, die einen Fluss durchqueren. Das berichtete jedenfalls der berühmte deutsche Naturforscher Alexander von Humboldt, nachdem er um 1800 das Gebiet der Flüsse Orinoco und Amazonas in Südamerika bereist hatte. Die moderne Welt kennt andere Möglichkeiten, um die erstaunlichen Eigenschaften dieser Fische ins rechte Licht zu rücken: Ein YouTube-Video zeigt die flackernde Beleuchtung eines Weihnachtsbaums in einem japanischen Einkaufszentrum. Die elektrische Energie dafür produziert ein Zitteraal, der in einem Aquarium schwimmt.

Amin Rustom vom Stuttgarter Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme (MPI-IS) nutzt dieses Video, wenn er seine Forschung präsentiert. „Tatsächlich haben uns die elektrischen Fische und damit die Natur inspiriert, uns damit zu beschäftigen, ob sich nicht Hirn- oder Herzschrittmacher, Cochlea-Implantate oder implantierte Blutzuckersensoren mit körpereigener elektrischer Energie betreiben lassen“, sagt der Wissenschaftler, dessen Labors sich im Biophysikalischen Institut der Universität Heidelberg befinden. Das hieße zugleich: Künftig wären elektronische Implantate nicht mehr auf Batterien angewiesen, die regelmäßig ausgetauscht werden müssen.

Der Zitteraal erzeugt seine Stromimpulse mithilfe von elektrischen Organen – umgebildeten Muskeln, die einen großen Teil seines Körpers ausmachen. Das wirft sofort die Frage auf: Existieren überhaupt auch menschliche Zellen, die elektrische Energie produzieren? Ja, denn Zellen werden von Membranen begrenzt. In diesen Membranen gibt es Proteine, die elektrisch geladene Teilchen – Ionen – aus der Zelle ausschleusen oder gezielt passieren lassen. Solche Ionenkanäle oder Ionenpumpen sind dafür verantwortlich, dass zwischen der Innen- und der Außenseite der Membran eine elektrische Spannung von rund 70 Millivolt auftreten kann. „Weil das sehr wenig ist, muss man

auf jeden Fall die Spannung vieler Zellen gleichzeitig abgreifen“, sagt Rustom.

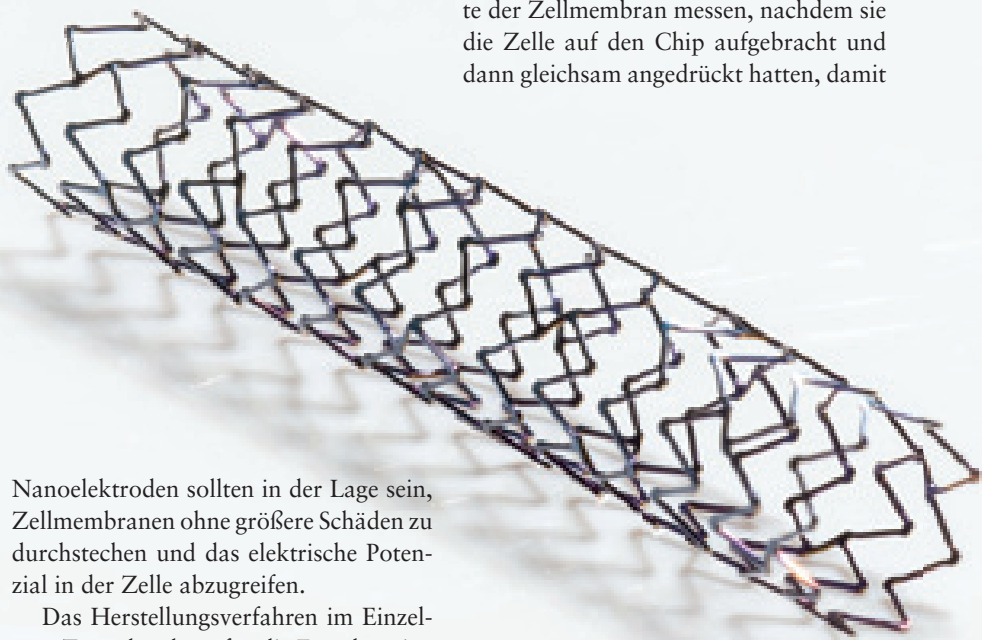
Ob es tatsächlich gelingen kann, auf diese Weise zu technisch nutzbaren Spannungen und Stromflüssen zu kommen, war unklar, als die Wissenschaftler vom MPI-IS, von der Universität Heidelberg und vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vor über drei Jahren ihr Forschungsprojekt starteten. Zwar hatten die Forscher zuvor die elektrischen Fähigkeiten von Zellen abgeschätzt. „Doch wie viel Strom man den Zellen sozusagen abzapfen kann, ohne ihre natürlichen Funktionen einzuschränken, ließ sich nicht seriös vorhersagen“, sagt Rustom.

Nur praktische Versuche konnten weiterhelfen. Die Wissenschaftler entwarfen daher eine Strategie, um eine Anordnung von elektrisch gut leitfähigen Elektroden herzustellen, die weniger als ein zehntausendstel Millimeter – 100 Nanometer – dünn und trotzdem robust sind. Diese

würde, folgen zwei weitere Verfahrensschritte: Der gesamte Elektroden-Chip – Durchmesser: 2,4 Zentimeter – wird mit einer isolierenden Kunststoffschicht überzogen, die danach ausschließlich an den Spitzen der Nanoelektroden weggeätzt wird (siehe Grafik S. 15). „Die Herstellung des Chips ist ohne großen Aufwand an Geräten und Arbeit routinemäßig möglich, die Kosten für das Gold fallen wegen der nur geringen Materialmengen nicht ins Gewicht“, erläutert Rustom.

Erste Experimente an Schleimpilzen

Für die ersten Versuche mit dem Elektroden-Chip griffen er und seine Kollegen der Einfachheit halber nicht zu Kulturen menschlicher Zellen, sondern zu einem Schleimpilz. Denn von ihm lassen sich einzelne Zellen züchten, die größer sind als der gesamte Chip. Und tatsächlich: Die Forscher konnten die elektrische Spannung zwischen der Innen- und Außenseite der Zellmembran messen, nachdem sie die Zelle auf den Chip aufgebracht und dann gleichsam angeedrückt hatten, damit



Nanoelektroden sollten in der Lage sein, Zellmembranen ohne größere Schäden zu durchstechen und das elektrische Potenzial in der Zelle abzugreifen.

Das Herstellungsverfahren im Einzelnen: Zunächst dampfen die Forscher eine dünne Schicht Gold auf Filtermembranen aus Kunststoff auf. Dann scheiden sie das Gold auf elektrochemische Weise ab und füllen so die feinen Poren des Filters mit dem Edelmetall auf. Anschließend entfernen sie die Kunststofffolie, sodass nur die Goldschicht übrig bleibt, aus der in regelmäßigen Abständen Nanonadeln – ebenfalls aus Gold – herausragen. Weil die so entstandene Anordnung von Nanoelektroden zu einem Kurzschluss führen

In Blutadern eingesetzte Stents sorgen unter anderem dafür, dass die Herzkranzgefäße bei Menschen mit Herzinfarktrisiko offen bleiben.

Schonende Oberfläche: Auf diesem beschichteten Plättchen, einem Wafer, befinden sich – für das menschliche Auge unsichtbar – wenige Nanometer tiefe Rillen. Solche Strukturen können Implantate verträglicher machen.



die Elektroden die Membran durchdringen konnten. Die Spannung betrug über viele Stunden hinweg rund 50 Millivolt. Veränderten die Forscher gezielt etwa die Luftfeuchtigkeit in der Umgebung des Schleimpilzes, so reagierte dessen Membran darauf mit messbaren Spannungsschwankungen – ein Ergebnis, das den Weg zum Einsatz des Chips als Sensor für Zellreaktionen weist.

Von den experimentellen Resultaten ermutigt, wandten sich die Wissenschaftler Kulturen menschlicher Bindegewebs- und Muskelzellen zu. Sie ließen die Zellen in einem Gefäß, das mit Nährmedium gefüllt war, auf den Elektroden-Chip absinken. Die nadelförmigen Elektroden durchstachen die Membranen der Zellen und lieferten über längere Zeit hinweg elektrischen Strom mit einer Leistung von rund zehn milliardstel Watt. Das erscheint zwar extrem wenig. Doch, so

Oben: Um nanometerfein strukturierte metallische Oberflächen zu untersuchen, vermisst sie Doktorand Sebastain Weber an einer Sicherheitswerkbank.

Rechts: Der in Heidelberg tätige Max-Planck-Wissenschaftler Amin Rustom präsentiert eine nanostrukturierte Gold-Oberfläche, ein Hoffnungsträger für viele Patienten.

Rustom: „Wie andere Arbeiten gezeigt haben, genügt diese Leistung, um kleine implantierte Sensoren zu betreiben und deren Messwerte im Minutentakt per Funk nach außen zu übermitteln.“ So haben die Wissenschaftler zwar noch keine neue Energiequelle für große und energiefressende Implantate wie Herzschrittmacher erschließen können. Doch mit der im Nanometer-Maßstab strukturierten Oberfläche ihres Nadel-Chips haben sie die Grundlagen beispielsweise für künftige energieautonome Implantate gelegt, die Körperfunktionen von Patienten permanent überwachen.

Inspirierende Stützröhrchen

Die Oberflächen von Implantaten sind noch in anderer Hinsicht bedeutsam: Sie entscheiden darüber, inwieweit der Körper ein Implantat als fremd wahrnimmt und entsprechend reagiert. So bezieht Ralf Kemkemer vom Stuttgarter Max-Planck-Institut seine Inspiration nicht aus den Eigenschaften exotischer Organismen,



sondern aus zahlreichen Gesprächen mit den Herstellern von Stents – jenen kleinen Röhrchen, die Ärzte unter anderem in Herzkranzgefäße einsetzen, um diese offen zu halten und so die Gefahr eines Infarktes zu verringern.

Klassische Stents bestehen aus Edelstahl und bringen ein Problem mit sich: Bei bis zu 30 Prozent der Patienten bildet sich aufgrund der Wundheilung zu viel neues Bindegewebe. Es verschließt langsam den Stent – ein Vorgang, den Mediziner Restenose nennen. Maßgeblich für die Restenose verantwortlich ist das übersteigerte Wachstum von glatten Muskelzellen, die das Gerüst der Blutgefäße bilden. Für Abhilfe sollen Stents sorgen, die Medikamente freisetzen – zum Beispiel Wirkstoffe, die auch zur Krebsbekämpfung eingesetzt werden. Doch auch diese Stents gelten als nicht perfekt: Bei ihnen ist das Risiko erhöht, dass sich aufgrund von Gerinnungsprozessen Blutpfropfen bilden. „Insofern verfolgen wir seit Längerem die Idee, die innere Oberfläche herkömmlicher Stents so zu strukturieren, dass sie ohne Arzneistoffe das überschießende Wachstum von verschiedenen Zelltypen wie den glatten Muskelzellen hemmt“, sagt Kemkemer.

Üblicherweise untersuchen Wissenschaftler die Wirkung von Implantaten auf den Körper mithilfe bestimmter tierischer Zellen, die sehr lange in Kultur gehalten werden können und gleichsam unsterblich sind. Kemkemer und seinem Team ist dieses Vorgehen zu realitätsfern. Stattdessen nutzen die Stuttgarter Wissenschaftler menschliche Zellen, die bei Operationen abgefallen sind und direkt aus Herzkranzgefäßen stammen. Außerdem unterscheiden sie bei ihren Experimenten zwischen den glatten Muskelzellen und den Endothelzellen, die die innere Wand der Blutgefäße auskleiden. Doch das ist noch nicht alles: „Wir berücksichtigen, dass der Körper möglicherweise je nach Alter unterschiedlich reagiert, indem wir das Alter der Zellsponder in unsere Auswertung mit einbeziehen“, betont Kemkemer, der nicht nur Forschungsgruppenleiter am MPI-IS ist, sondern auch Professor an der Hochschule Reutlingen.

Die Kunststoff-Oberflächen, die die Forscher mit den Zellen in Kontakt bringen, haben zwei besondere Merkmale:

Zum einen haben sie im regelmäßigen Abstand von einigen Mikrometern Rillen, die maximal 300 Nanometer tief sind. Zum anderen befinden sich darauf winzige Noppen aus Gold. Den Abstand der Noppen können die Forscher in einem Bereich von 30 bis 150 Nanometern gezielt einstellen. Ähnlich wie bei den Elektroden-Chips von Amin Rustom haben auch die Wissenschaftler um Kemkemer zur Herstellung dieser Oberflächen verschiedene Routineverfahren innovativ kombiniert.

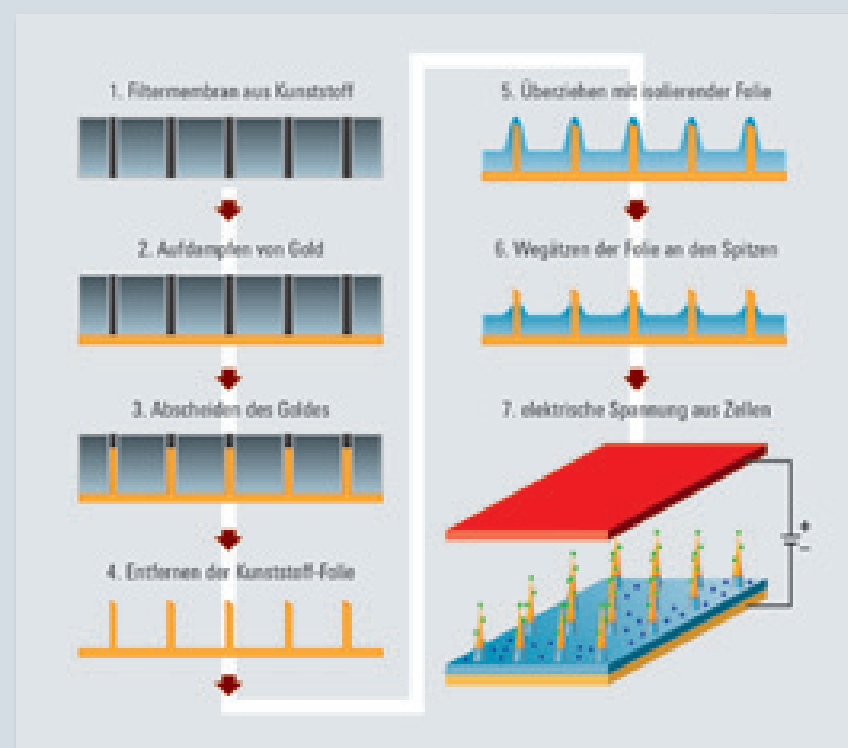
Brachten die Stuttgarter Forscher solche Oberflächen mit Endothelzellen oder glatten Muskelzellen zusammen, so wuchsen und teilten sich diese deutlich weniger als auf herkömmlichen glatten Oberflächen. „Dass strukturierte Oberflächen diese hemmende Wirkung haben, hatten wir und andere Arbeitsgruppen auch früher schon beobachtet“, berichtet Kemkemer. Wirklich neu ist ein anderes Resultat der Experimente: Die Wachstums- und Teilungsrate war bei Zellen von 45- bis 65-jährigen Testpersonen

auf den strukturierten Oberflächen um meist deutlich mehr als die Hälfte verringert, bei 20- bis 30-Jährigen lediglich um höchstens 25 Prozent.

„Unsere Ergebnisse zeigen, wie sich bei älteren Patienten durch eine geschickte Wahl der Oberflächentopografie möglicherweise gezielt das Wachstum der glatten Muskelzellen hemmen lässt“, resümiert Kemkemer. Mit anderen Worten: Besitzen die Stent-Oberflächen Nanorillen mit bestimmten Abständen und Tiefen sowie charakteristisch angeordnete Nanonoppen, könnten sie gerade für ältere Patienten vorteilhaft sein. „Allerdings ist der Weg von unseren eher grundlegenden Ergebnissen bis zu einem optimierten Stent noch weit“, betont Kemkemer.

Doch er und seine Projektpartner haben ebenso wie die Wissenschaftler um Amin Rustom den Anfang gemacht, um Implantate mithilfe neuartiger Oberflächen zu verbessern. Und schon der griechische Philosoph Aristoteles wusste: Der Anfang ist die Hälfte vom Ganzen. ●

Goldene Spitzen



Um die goldenen Nadeln zur Nutzung der Zellspannung herzustellen, wird auf eine Filtermembran aus Kunststoff eine Goldschicht aufgebracht (1–3). Nach dem Ätzen des Kunststoffs (4) erhalten die Goldnoppen einen Überzug aus Folie (5), die an den Spitzen entfernt wird (6).

Anders ist anders

Gerrit Anders hat schon als Schüler den Wunderstoff Graphen erforscht und wurde dafür mehrfach ausgezeichnet. Im Studium entwickelt er nun eine Methode, um das Kohlenstoff-Material industriell herzustellen.

von Eva Wolfangel

Sein Herz schlägt für Graphen: Der wundersame Stoff, dessen Struktur Gerrit Anders als Grafik auf seinem Rechner zeigt, besteht aus Kohlenstoff-Atomen, die in Sechseringen angeordnet sind und in einer ultradünnen Ebene liegen.



Ein Streber sieht anders aus. Der junge Mann mit Bartstoppeln, ausgebleichten Jeans und Turnschuhen ohne Schnürsenkel empfängt seinen Besuch im Foyer des Physikalischen Instituts der Universität Heidelberg. Ein Büro hat er nicht. Schließlich ist er ein normaler Zweitsemester-Student mit 19 Jahren, der mit seinem Tablet-PC zwischen Mensa, Vorlesungssaal und Foyer pendelt. Dennoch hat Gerrit Anders bereits eine Forschungsgruppe an der Uni – und das macht ihn dann doch zu einem ungewöhnlichen Studenten.

Denn als sich der Abiturient 2013 für ein Studium der Physik, Chemie und Psychologie an der Uni Heidelberg bewarb, hatte er bereits seine eigene Forschung im Gepäck: Schon als Schüler hatte er sich mit der Herstellung von Graphen beschäftigt, einem von vielen Forschern als „Wunderstoff“ bezeichneten Material. Im Keplerseminar der Heidehof-Stiftung – einem Förderprogramm für naturwissenschaftlich begabte Schüler – erforschte er das neue Material, das so hart ist wie ein Diamant, dabei stärker als Stahl und zudem extrem leitfähig.

Das einzige Problem: Es gibt noch kein industriell taugliches Herstellungsverfahren für Graphen. Das will Gerrit ändern. Offenbar mit Erfolg: Schon als Schüler zog er mit seinen Arbeiten zwei Mal in den Landes-Wettbewerb Baden-Württemberg von „Jugend forscht“ ein und gewann schließlich 2013 den ersten Platz beim Artur Fischer Erfinderpreis der Baden-Württemberg Stiftung. Seine Methode der Graphen-Synthese beeindruckte anschließend auch die Jury des bundesweiten Wettbewerbs „i hoch 3“, den das Berliner Ministerium für Wirtschaft und Technologie ausrichtet: Anders setzte sich in diesem Wettstreit sogar gegen Einreichungen aus Universitäten durch und siegte auch hier. „Sein Verfahren könnte ein Meilenstein in der Herstellung von Graphen sein“, urteilte damals die Baden-Württemberg Stiftung.

Anders selbst will das so nicht stehen lassen: „Ich habe zumindest noch nichts gefunden, was gegen diese Einschätzung spricht“, sagt er vorsichtig – wohlwissend, dass sein Verfahren noch scheitern kann. Eine Hauptschwierigkeit besteht darin, dass Graphen ein zweidimensio-

naler Stoff ist – der einzige, den Physiker kennen. Was Wissenschaftler noch vor gut zehn Jahren für unmöglich hielten, soll jetzt ein Material der Zukunft werden: Graphen besteht aus einer einzigen dünnen Graphit-Schicht – nur einen Atom-Durchmesser stark. In der Vergangenheit hatten etliche Forschergruppen versucht, die Schichten aus Graphit voneinander zu trennen und daraus Graphen herzustellen. Aber das war nicht effektiv genug.

Weg von der Verbrennung!

Auch eines der heute gebräuchlichen Verfahren, die Pyrolyse, hält Gerrit für wenig zukunftstauglich: Dabei wird mit Temperaturen um die 1000 Grad Celsius gearbeitet. Das verschlinge nicht nur enorm viel Energie, sondern sei auch nicht für die Industrie geeignet, meint der Physikstudent: „Eine Verbrennung ist eine unkontrollierte Reaktion.“

Gerrit Anders arbeitet stattdessen bei tiefen Temperaturen und mit sogenannten Aromaten – chemischen Substanzen wie Benzol, bei denen sechs Atome ringförmig angeordnet sind: „Die sind schon

mittag im Freibad oder im Café verbringen und sich am Abend mit Gerrit treffen, um gemeinsam fürs Studium zu büffeln.

Aus der Ferne könnte man sich Gerrit Anders nun tatsächlich als Streber vorstellen oder als einen, dem der Ruhm zu Kopf steigt und der neunmalklug die Doktoranden im Labor belehrt. Doch beides ist grundfalsch. Er ist kein engstirniger Wissenschaftler, der nur Zahlen und Formeln im Kopf hat, und auch kein verdurter Physikstudent, der es nicht schafft, die Vorzüge seines Faches in verständliche Worte zu fassen.

Im Gegenteil: Gerrit Anders schwärmt mit großen, leuchtenden Augen vom Spaß am Experimentieren und von der netten Gesellschaft am Physikalischen Institut. Und er ist alles andere als ein Langweiler, der nur ein Thema kennt. Wenn er Zeit findet neben der Forschung an Graphen und dem Physikstudium, trainiert er abends Aikido oder spielt Badminton. Außerdem will er im kommenden Semester als zweites Fach Psychologie studieren. Auch mit Beachvolleyball hat er gerade angefangen. „So als Versuch“, sagt er und lacht. Vielleicht auch als Zugeständnis an

**„Ich finde es einfach so interessant,
dass ich mich in Vieles reingekniet und es
schließlich doch verstanden habe.“**

eben und müssen sich nur noch zweidimensional verknüpfen“, sagt er. Dieses „nur noch“ hat mit komplexen chemischen Reaktionen zu tun, in denen der junge Forscher bestehende Wasserstoff-Bindungen durch andere chemische Bindungen ersetzt und dabei darauf achten muss, dass diese auch stabil genug sind – damit nicht alles zerfällt. Doch der Student versichert, dass er dafür eine Lösung gefunden hat. Mehr will Gerrit Anders allerdings nicht verraten, denn derzeit läuft ein Patentverfahren, mit dem er seine Methode vor Nachahmern schützen will.

Die Sache ist jedenfalls kompliziert und hält Gerrit Stunde für Stunde im Labor. Freiwillig und ohne Bezahlung? Das mag für Außenstehende seltsam wirken. Aber er hat einfach nur ein anderes Hobby als seine Kommilitonen, die den Nach-

seine Freunde, die auch einfach mal etwas Banales mit ihm machen wollen.

Doch im Vordergrund steht für ihn die Forschung. Ihn treibt der gleiche Enthusiasmus an wie andere Jugendliche, die tagein, tagaus mit dem Skateboard in der Pipeline einen Salto üben. Und die diesen dann, einmal geschafft, immer weiter verbessern und unermüdlich daran feilen, ein noch besserer Skater zu werden. Ähnlich fühlt sich die Forschung für Gerrit nicht nach Arbeit an, sondern eher nach Hobby. „Da steckt viel Leidenschaft drin“, sagt er. Und klassische Studentenpartys? „Nach dem Lernen lassen wir oft den Abend gemeinsam ausklingen“ – mit Spielkarten und dem einen oder anderen Bier.

Den Stolz über seine Erfolge trägt Gerrit Anders wenig nach außen. Er ist selbstgenügsam und bescheiden. Nur wer

Obwohl er der Forschung im Physiklabor an der Uni einen großen Teil seiner Zeit widmet, kommt bei Gerrit Anders auch der Sport nicht zu kurz, vor allem das Badminton.



genau nachfragt, bekommt eine Ahnung davon, wie sehr sich der junge Mann freut, dass seine Forschung gewürdigt wird. „i hoch drei ist ein echter Erfinderwettbewerb“, sagt er und strahlt wie ein Grundschüler, der zu Hause sein Zeugnis voller Einsen vorzeigt.

Roboter halfen beim Aufräumen

Der Erfindergeist begleitet ihn offenbar schon seit früher Jugend. Im Keller des elterlichen Hauses in Althütte bei Stuttgart lagert ein Kosmos-Chemiekasten. Damit hat er – häufig zusammen mit seinem Vater, ebenfalls einem Physiker, – „alles gemacht, was man machen kann“: sowohl vom Hersteller des Chemiekastens vorgesehene Experimente als auch selbst ersonnene. Als Jugendlicher konstruierte er außerdem Legotechnik-Roboter, die ihm beim Aufräumen seines Zimmers halfen. „Das war ein reines Faulheitskonstrukt“, sagt Gerrit Anders heute grinsend. Immerhin hat diese kreative „Faulheit“ den Schüler zu ingenieurtechnischen Höchstleistungen motiviert.

Als 2010 – Gerrit war da gerade 15 – die beiden russischen Wissenschaftler Andre

Geim und Konstantin Novoselov für ihre Graphen-Forschung mit dem Nobelpreis für Physik geehrt wurden, machte dies das „Wundermaterial“ bei einer großen Öffentlichkeit bekannt. Die Berühmtheit des exotischen Stoffs erreichte auch den Schüler in Althütte. „Ich wollte sofort Solarzellen daraus bauen“, sagt er heute und lacht über seine damalige Naivität. Schließlich war der Wunderstoff noch lange nicht so weit, dass sich daraus Dinge herstellen ließen. Doch bis heute hoffen die Wissenschaftler, eines Tages aus Graphen beispielsweise extrem

leistungsfähige Computerchips, aufrollbare Smartphones oder federleichte Flugzeuge bauen zu können. Aber bis dahin ist es noch ein weiter Weg. Denn bislang beißen sich die Forscher die Zähne aus an der Massenproduktion der zweidimensionalen Kristalle.

Ob Gerrit Anders' Verfahren schließlich als Meilenstein in die Geschichte des Graphen eingehen wird, steht noch in den Sternen. Allerdings: Auch die Jugendlichen in der Pipeline enden nicht alle als Skateboard-Weltmeister. Aber eine gute Zeit bleibt trotzdem eine gute Zeit. ●

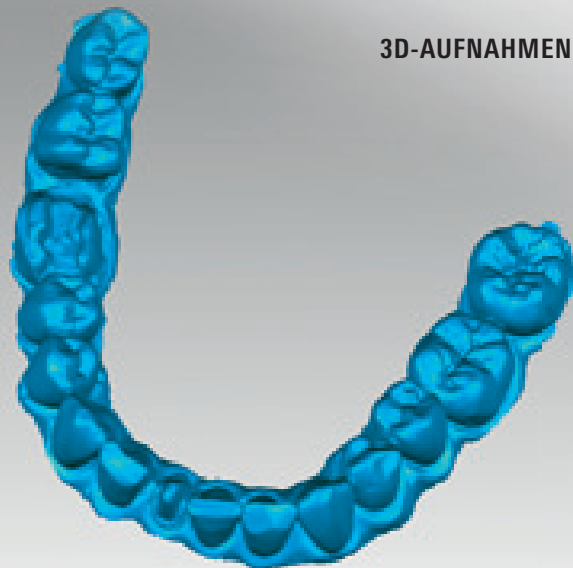
Dünne Flunder aus der Bleistiftmine

Es klingt simpel, was die Physiker Andre Geim und Konstantin Novoselov 2004 schafften: Mit einem gewöhnlichen Klebestreifen zogen sie Material von Graphit ab – dem Kohlenstoff-Material, aus dem Bleistiftminen hergestellt werden. Sie wiederholten das, bis eine Schicht übrig war, die nur aus einer einzigen Lage von Kohlenstoff-Atomen bestand: Graphen, ein zweidimensionaler Kristall. In der extrem dünnen Substanz können sich Elektronen nur in zwei Richtungen bewegen. Diese Besonderheit verleiht Graphen außergewöhnliche Eigenschaften: Es ist äußerst biegsam und zugleich extrem robust. Elektrischer Strom fließt darin schneller, als in den meisten anderen Stoffen. Das macht Graphen für technische Anwendungen interessant. Was aber noch fehlt, ist ein Verfahren, um das Material einfach und billig in großer Menge herzustellen.

Die Kamera, die alles sieht

Ulmer Physiker haben eine Kamera entwickelt, die Zähne dreidimensional vermisst. Künftig soll sie auch Kratzer in Metalloberflächen erkennen.

von Bernd Müller



Wer eine Brille kauft, erwartet zu Recht, dass er damit die Erdbeere rot und den Himmel blau sieht. Das Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik an der Universität Ulm baut dagegen absichtlich „Brillen“, die möglichst schlecht „sehen“. Ihre Linsen bilden in der Nähe nur blaues Licht scharf ab, in der Ferne rotes. Das Ulmer Team stellt aber keine Sehhilfen für menschliche Augen her, sondern solche, die in Kameras für medizinische Anwendungen zum Einsatz kommen – insbesondere für die Zahnmedizin. Zum Beispiel zum Vermessen des Gebisses: Statt mit ekliger Knetmasse nehmen immer mehr Zahnärzte den Gebissabdruck mit einer 3D-Kamera auf. Das in Ulm entwickelte Gerät sendet weißes Licht durch eine Optik aus und misst das von den Zähnen reflektierte Licht durch dieselbe Optik. Dabei befinden sich die kleine Lichtquelle und die Detektionsblende im gleichen Abstand zu dieser, Fachleute nennen das

konfokal. Die Kamera bildet Farben extra schlecht ab. Ist die Distanz zum Zahn gering, dominiert auf dem Bild blaues Licht, ist der Zahnschmelz weiter weg, überwiegt rotes Licht. Über die Farbintensität lässt sich so die Entfernung bestimmen.

Dieses Verfahren ist nicht neu. Doch die Ulmer haben es parallelisiert, indem sie 1300 Bildpunkte mit ebenso vielen Mikrolinsen in eine Kamera gebaut haben, die in die Mundhöhle hinein passt. Die Zähne lassen sich auf 30 Mikrometer genau dreidimensional vermessen. Ein Bild ist in wenigen Millisekunden aufgenommen, ein ganzer Kiefer etwa in einer Minute. In diesem Tempo und mit dieser Präzision ist das neu und revolutionär.

Überwachung von Lebensmitteln

Unser Institut kommt zwar aus der Medizintechnik, „aber wir suchen für unsere Entwicklungen auch Anwendungen in anderen Branchen“, sagt Institutsdirektor

Die Technologie aus Ulm ermöglicht es, Zähne bis auf 30 Mikrometer genau dreidimensional zu vermessen. Ein kompletter Kiefer ist damit in einer Minute erfasst.

Raimund Hibst. Messgeräte für Umwelttechnik und Lebensmittelüberwachung hat sein Team bereits entwickelt. Auch an der 3D-Messtechnik ist die Industrie sehr interessiert. Für manche Anwendungen wünschen sich Unternehmen neben den 3D-Koordinaten weitere Informationen, etwa über die Rauheit von Metalloberflächen oder Kratzer auf Zahnrädern. So entstand die Idee, die Kamera so weiterzuentwickeln, dass sie sogar Strukturen erkennt, die kleiner als ein Mikrometer sind. Das Projekt „3D-plus – Produktionsumfeldgerechtes Multifokales Messsystem für die kombinierte Erfassung von Topographie und lokaler Mikro- und Nanostruktur“ finanziert die Baden-Württemberg Stiftung mit 420 000 Euro. Projektpartner ist Sven Simon, Leiter des Instituts für Parallele und Verteilte Systeme der Uni Stuttgart, dessen Forscher für die schnelle Datenauswertung sorgen.

Im Unterschied zur Kieferkamera ist noch ein zweiter Chip seitlich versetzt angebracht. Glatte Oberflächen reflektieren das Licht exakt wie ein Spiegel, Kratzer dagegen streuen es in alle Richtungen. Die zweite Kamera misst das seitlich reflektierte Licht. Vor allem längliche Kratzer oder Spuren vom Schleifen macht sie sichtbar. Auch für diese Kamera gibt es schon Interessenten – doch wer das ist, darf Raimund Hibst nicht verraten: „Ich habe einen ganzen Ordner mit Geheimhaltungsvereinbarungen im Schrank.“ ●

Materialdefekte blitzschnell aufgespürt: Mit der neuartigen Kamera lassen sich selbst winzige Schrammen auf einem Zahnrad zuverlässig und präzise erkennen.





Bausteine für Biosensoren (von links): Hartmut Gliemann mit einem Träger für Tabakmosaikviren, Stefan Walheim mit präparierten Mikrochips, Christina Wege mit einem Modell der Viren-DNA.

Das kleinste Labor der Welt

Viren gelten als böse. Doch sie können auch nützlich sein – etwa bei der Entwicklung von Biosensoren.

von Roland Bischoff

Wenn Christina Wege und Hartmut Gliemann erzählen, wie sie molekulare Bausteine zu neuen Strukturen kombinieren, um damit eines Tages ein Minilabor zu bauen, ist ihre Begeisterung zu hören. Wissenschaftlichen Laien kann sich schon die Assoziation aufdrängen, die beiden würden Lego-Steine aufeinanderstapeln.

In der Tat arbeiten die Stuttgarter Molekularbiologin und der Karlsruher Chemiker mit Bauklötzchen – allerdings mit sehr kleinen im Nanometer-Maßstab. Das visionäre Ziel ihres Forschungsprojekts „Seriell angeordnete, kombinatorisch aktive Virusgerüste als Biosensor-Ensembles“: das Minilabor auf einem fingernagelgroßen Chip, mit dem sich

Fotos: T. Klink für bfw

chemische Substanzen auch in geringster Konzentration sofort und sicher bestimmen lassen. Etwa Pestizide und Hormone im Grundwasser, aber auch Blutwerte bei einer Operation im Krankenhaus.

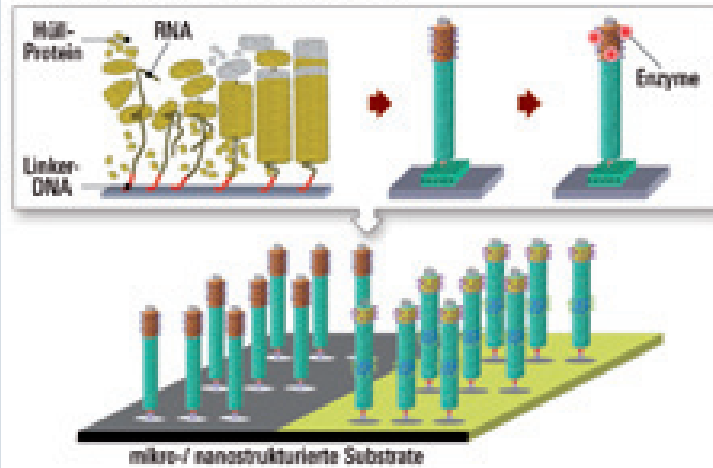
Die Bauteile für das „Lab-on-a-Chip“ sind nicht nur mikroskopisch klein – zum Teil fügen sie sich auch wie von Geisterhand selbst zu neuen Formen zusammen. Dahinter stecken Viren, genauer gesagt: Tabakmosaikviren, kurz TMV. Bevor sie sich vermehren, dringt ihr Erbgut – die Ribonukleinsäure (RNA) – über kleine Verletzungen wie abgeknickte Blatthärchen in Tabakpflanzen ein. Dadurch färben sich deren Blätter stellenweise braun. Für Menschen und Tiere sind TMV ungefährlich. Sie können aber viele Pflanzenarten befallen. Landwirte und Pflanzenzüchter sehen sie als Schädlinge. Mikrobiologen und Virologen nutzen sie dagegen gern als „Haustierchen“ im Dienst der Forschung.

Die 300 Nanometer langen und 18 Nanometer dicken Tabakmosaikviren bestehen aus einem RNA-Strang, den rund 2100 Protein-Moleküle umhüllen. Ein nackter Strang bringt infizierte Pflanzenzellen dazu, neue Hüllproteine zu produzieren, die sich um die RNA legen – ein neues Virus entsteht. Diesen Kopiermechanismus der Natur nutzen die Forscher, um spezielle TMV herzustellen, die als Sensoren in einem Lab-on-a-Chip dienen. Einen ersten Prototyp haben Christina Wege, Hartmut Gliemann und ihre Teams schon gebaut.

Im Institut für funktionelle Grenzflächen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) behandelte Gliemann dafür zunächst kleine Silizium-Plättchen mit „molekularer Tinte“. Sie dient als Klebstoff. Mit der Spitze eines Rasterkraftmikroskops tupfte er die Tinte im Abstand von fünf mal fünf Nanometern auf die glatte Oberfläche. Anschließend wurde „Linker-DNA“ hinzugegeben, die an den klebrigen Rasterpunkten hängenblieb. Es ist, als würde man kurze Fadenstücke mit einem Tropfen Leim auf eine Glasplatte kleben. „Damit“, sagt Gliemann, „war die spätere Anordnung der TMV-Stäbchen auf der Fläche festgelegt.“ Christina Wege und ihre Mitarbeiter am Biologischen Institut der Uni Stuttgart sorgten im nächsten Schritt für die räumliche Strukturierung auf den vorbehandelten Silizium-Plättchen. Sie streuten RNA-Stränge

Saatbeet für Viren-Sensoren

Geordnetes Wachstum von Tabakmosaikviren



Auf Silizium wird mit Linker-DNA Tabakmosaikviren-RNA „geklebt“. Daran ordnen sich Hüllproteine an. So entstehen Viren-Stäbchen, die mit Enzymen versehen werden.

bzw-Grafik: Quelle: Christina Wege (Uni Stuttgart)

der Tabakmosaikviren darauf, die sich an die Linker-DNA koppelten. Dann gaben sie Hüllproteine hinzu, die sich von allein rings um die RNA-Stränge anordneten – es entstanden Viren-Stäbchen. Im Grunde läuft dabei die natürliche Vermehrung von Tabakmosaikviren ab, nur dass die neuen Exemplare ortsfest gebunden sind.

Sensible Enzyme auf Stäbchen

Dann müssen die TMV-Stäbchen funktionalisiert werden. An ihre Hüllproteine lassen sich Substanzen mit diversen Reaktionsgruppen heften, etwa Enzyme, die für spezifische Reaktionen sorgen und so bestimmte Substanzen eindeutig nachweisen. „Bei unserem Biosensor-Prototyp setzten wir Glukoseoxidase und Peroxidase ein“, erklärt Hartmut Gliemann. Für den Demonstrator hat er zwei kleine, miteinander verbundene Durchflusszellen aus Kunststoff entwickelt, in denen sich die Trägerplättchen mit den TMV-Stäbchen befinden. So lässt sich das empfindliche Mikro-Messsystem auch in einer rauen technischen Umgebung einsetzen. In der ersten Zelle befinden sich Stäbchen mit Glukoseoxidase, die TMV-Derivate in der zweiten Zelle tragen Peroxidase. Lässt man eine farblose Glukose-Lösung durch die Zellen fließen, startet eine Enzymkaskade. Am Ende entsteht unter anderem ein grün gefärbtes Salz. „Die Grünfärbung ist der Nachweis, dass die Lösung Glukose enthielt und die ruhig gestellten, mit Enzymen versehenen Tabakmosaikviren-

Stäbchen wirklich als Biosensoren dienen können“, fasst Wege zusammen.

Ein Vorteil dieser „Bottom-up“-Strategie, bei der sich die molekularen Bauteile von selbst anordnen: Auf Mikrochips lassen sich nanometerkleine 3D-Strukturen erschaffen. Eine Herausforderung ist es, die TMV-Stäbchen so aufzurichten, dass alle stets senkrecht stehen. Dies wird es erlauben, viele Viren mit mehreren funktionalen Gruppen auf engstem Raum zu packen und so die Einheiten weiter zu verkleinern. Eingebunden in das ambitionierte Projekt ist deshalb auch Stefan Walheim vom KIT-Institut für Angewandte Physik. Der Physiker versucht mit raffinierten Methoden, die TMV in dauerhafte Hab-Acht-Stellung zu bringen. Dazu bedampft er die Trägerplättchen mit metallorganischen Schichten, die die Viren-Stäbchen schrittweise aufrichten sollen. Dass das klappt, lassen elektronenmikroskopische Aufnahmen vermuten. Noch ist es ein langer Weg zum Lab-on-a-Chip. Doch die Forscher aus Stuttgart und Karlsruhe arbeiten weiter an der Realisierung ihrer Vision und setzen dabei Nano-baustein auf Nano-baustein.



„Wir sind Weltmarktführer der winzigen Strukturen“

Mit innovativen Materialien und Produktionsverfahren sorgt der Bereich Semiconductor Manufacturing Technology von Zeiss dafür, dass Mikrochips für Computer und Smartphones immer leistungsfähiger werden. Zeiss-Vorstand Hermann Gerlinger erklärt, wie das Unternehmen das seit Jahrzehnten schafft.

Das Gespräch führten Ralf Butscher und Wolfgang Hess

Herr Dr. Gerlinger, bitte erklären Sie unseren Lesern kurz, was der Zeiss-Bereich Semiconductor Manufacturing Technology macht.

Wir stellen hochpräzise Optiken her, mit denen sich modernste Mikrochips produzieren lassen – sowohl Prozessoren als auch Speicherbausteine. Sie stecken in fast allen Smartphones, Tablets und PCs von sämtlichen großen Herstellern. Zeiss ist auf diesem Gebiet absoluter Weltmarktführer.

Welche Bedeutung hat diese technologische Leistung?

Die Schaltkreise auf Computerchips basieren auf Milliarden winziger Halbleiter-Transistoren. Wir sorgen dafür, dass sich deren Strukturen immer kleiner machen lassen. Dadurch passen immer mehr Transistoren auf einen Chip, was für sinkende Kosten pro Funktion sorgt.

Unsere Endkunden sind heute in der Lage, mit Tricks Strukturen von weniger als 20 Nanometer Breite herzustellen. Ein menschliches Haar ist etwa 2000 Mal so dick. Die extreme Miniaturisierung in den letzten Jahrzehnten hat einen direkten Einfluss auf den Preis: Während ein Megabit Speicher vor 40 Jahren rund 100 000 Dollar gekostet hat, gibt es ihn heute für einen hundertstel Cent. Etwas Vergleichbares kann keine andere Industriebranche vorweisen.

Was sind die Folgen?

Dass Computerchips immer kleiner und billiger werden, hat Anwendungen ermöglicht, die früher unvorstellbar waren. Und: Der Energieverbrauch pro Transistor ist inzwischen so gering, dass man mobile Superrechner für die Hosentasche bauen kann. So hat ein modernes Tablet dieselbe Rechenleistung wie 1985

eine Cray – der damals leistungsstärkste Supercomputer. Wir schaffen die Voraussetzung, um die mikroelektronischen Strukturen einer Vorlage, der sogenannten Maske, zu verkleinern und mithilfe von Licht auf einen Wafer zu übertragen. Auf dieser Scheibe aus Silizium lassen sich so Chips mit einer riesigen Zahl von Transistoren unterbringen.

Man hört seit vielen Jahren, dass bald Schluss sei mit der Miniaturisierung der Elektronik. Aber es geht offenbar doch noch weiter. Wie gelingt das?

Die ganze Physik der optischen Abbildung steckt in einer einfachen Formel: Die Auflösung verbessert sich, wenn man Licht mit kleinerer Wellenlänge zum Belichten verwendet, oder wenn die Abbildungsoptik einen größeren Öffnungswinkel hat, die Apertur. Zusätzlich hängt die Auflösung über den Proportionalitätsfaktor k_1 von weiteren Eigenschaften des optischen Systems sowie von Prozessfaktoren ab. An diesen drei Parametern können wir drehen, zum Beispiel an der Wellenlänge: Vor 20 Jahren haben wir Chips mit 365 Nanometern belichtet, heute läuft die Produktion bei 193 Nanometern. Die Apertur war damals rund 0,5, heute sind wir bei 1,35. Der k_1 -Faktor betrug vor 20 Jahren zwischen 0,5 und 1, jetzt liegt er nahe bei 0,25. All das hat die Auflösung erheblich verbessert.

Das ist aber nicht alles, oder?

Zusätzlich nutzen wir ein paar Kniffe. So ist eine Apertur von 1,35 erst mög-

Hermann Gerlinger

studierte Physik an der Universität Würzburg, wo er 1983 promovierte. 1984 wechselte der gebürtige Bad Mergentheimer (*1953) als Projektleiter Spektroskopie zu Zeiss nach Oberkochen. 1990 übernahm er die Leitung des Produktbereichs Optische Prozessmesstechnik, fünf Jahre später wurde er Entwicklungsleiter Systemtechnologie für Lithografie-Optik – ein Geschäftsbereich, dessen operative Leitung ihm 1997 übertragen wurde. Seit 1999 ist Gerlinger für den Unternehmensbereich Semiconductor Manufacturing Technology verantwortlich. 2001 wurde er Vorstandsvorsitzender (später: Vorsitzender der Geschäftsführung) der Halbleitersparte des Zeiss-Konzerns. Seit 2006 ist er zudem Mitglied im Konzernvorstand. Dass Zeiss heute in Oberkochen die weltweit modernste Fabrik für Lithografie-Optik betreibt, ist auch sein Verdienst.

„Wenn Sie Deutschland genauso glatt polieren würden wie wir die Oberflächen aus Quarzglas, wäre die Zugspitze nur den Bruchteil eines Millimeters hoch.“

lich dank eines Verfahrens, das man in der Mikroskopie seit über 100 Jahren kennt: die Immersion. Dazu bringt man zwischen die letzte Linse des Objektivs und den Wafer eine Flüssigkeit. Bei 193 Nanometern Lichtwellenlänge genügt destilliertes Wasser. Das ermöglicht einen größeren Öffnungswinkel und somit eine höhere Auflösung. Darüber hinaus haben wir und unser strategischer Partner, die niederländische Firma ASML, etliche Prozesstricks ermöglicht, die eine zusätzliche Miniaturisierung erlauben.

Was hat man sich darunter vorzustellen?

Eines dieser Verfahren ist das sogenannte Double Patterning: eine Doppelbelichtung. Dazu wird zunächst eine erste Gruppe von Strukturen belichtet und geätzt. Danach verwenden wir eine weitere Maske, deren Strukturvorlage um eine halbe Periode verschoben ist. Es gibt also eine zweite Belichtung und Ätzung. Dadurch lassen sich Strukturen erzeugen, die doppelt so dicht sind. Das ist inzwischen ein gängiges Verfahren in der Halbleiterfertigung. Schon Ende der 1970er-Jahre hatten Experten erstmals den baldigen Tod der optischen Lithografie vorhergesagt. Doch wir haben die Technologie immer weiter entwickelt.

Das war sicher nicht einfach?

Nein. Damit einhergegangen sind unglaublich schwierige Entwicklungen. Bei 365 Nanometern Wellenlänge kann man mit verbessertem optischen Glas arbeiten. Bei 193 Nanometern dagegen braucht man ein spezielles Quarzglas, das eigens dafür entwickelt werden musste. Zudem ist beim Bearbeiten eine enorme Präzision erforderlich: Die Linsen werden aus einem dicken Quarzglasblock herausgeschnitten und poliert.

Um den hohen Ansprüchen zu genügen, muss der Brechungsindex der Linse extrem gleichmäßig sein: Er darf um maximal 10^{-7} bis 10^{-8} variieren. Zusätzlich waren auch neue Polierverfahren nötig. Und wir mussten neue Korrekturmethoden entwickeln. Die UV-Strahlung bei 193 Nanometern Wellenlänge ist sehr energiereich und belastet die optischen Elemente. Obwohl das Quarzglas sehr robust ist, verändert sich seine Brechzahl, wenn es sich erwärmt. Das müssen wir ausgleichen. Die Verfahren dazu haben wir selbst entwickelt.

Der Bereich Semiconductor Manufacturing Technology von Zeiss ist führend bei Forschung und Entwicklung?

Korrekt. Was die Entwicklung und Herstellung der Materialien betrifft, haben wir natürlich Partner. Das machen Zulieferer, die aber mit unserem hohen Entwicklungstempo Schritt halten müssen. Das zu organisieren, erfordert eine enge Zusammenarbeit und ein erstklassiges Netzwerkmanagement. Neben hochwertigen Werkstoffen ist feinste Sensorik und Mechatronik erforderlich, um die Optik nachregeln zu können. Auch da arbeiten wir eng mit Partnern in der Industrie sowie mit Universitäten und Forschungsinstituten im In- und Ausland zusammen.

Wie wird die Entwicklung weitergehen?

Das wichtigste Ziel in der Roadmap – dem Fahrplan für die weitere technologische Entwicklung – ist ein Sprung bei der Wellenlänge: von 193 Nanometern auf 13,5 Nanometer, in den Bereich des extremen ultravioletten Lichts (EUV). Das realisieren wir gerade. Zusammen mit ASML haben wir die ersten Systeme bei Kunden installiert. Sie können mit den Anlagen, die ASML mit unseren Optiken baut, ihre Fertigungsprozesse für EUV entwickeln.

Was ist anders beim extremen ultravioletten Licht?

Es gibt kein Material, das bei 13,5 Nanometern transparent ist. Daher können wir nicht mehr mit Linsen arbeiten, sondern müssen Spiegel nutzen. Das ist ein Problem, denn physikalisch ist der Reflexionsgrad begrenzt: Jeder Spiegel wirft maximal 70 Prozent des einfallenden Lichts zurück. Da die Optik üblicherweise aus mehreren Spiegeln besteht, kommt auf dem Wafer nur ein kleiner Teil des anfänglich ausgesendeten Lichts an. Das bedeutet auch: Es bleibt viel Energie in den Spiegeln, die sich dadurch aufheizen. Wir benötigen daher ein Material, das sich durch Wärme kaum ausdehnt.

Mussten Sie dieses Material neu entwickeln?

Es gab bereits ein spezielles Material mit besonders geringer thermischer Ausdehnung, das ursprünglich für die Astronomie verwendet und dann für die Raumfahrt weiterentwickelt wurde. Allerdings musste es für unsere Anwendung noch einmal wesentlich verbessert werden. Die Oberfläche dieses Materials lässt sich extrem glatt polieren. Wir machen das mit einer Genauigkeit von unter 100 Pikometern. Das entspricht einem Angström und liegt im atomaren Größenbereich. Wenn Sie Deutschland genauso glatt polieren würden, wäre die Zugspitze nur den Bruchteil eines Millimeters hoch. Ein Problem ist, dass für extreme ultraviolette Strahlung selbst Luft undurchsichtig ist. Daher müssen wir im Vakuum arbeiten. Es lassen sich da nur Materialien verwenden, die im Vakuum nicht ausgasen oder sich verändern. Viele Werkstoffe, die wir früher eingesetzt haben, sind daher jetzt tabu.

Spielt bei solchen Anforderungen auch der Preis eine Rolle? Oder ist das, was Sie anbieten, so exquisit, dass die Kunden dafür alles bezahlen?

Der Preis spielt sogar eine große Rolle. Ein wesentlicher Punkt in der Halbleiter-Roadmap ist, dass die Kosten pro Funktion ständig sinken: Für das gleiche Geld gibt es immer mehr Funktionen. Zum Beispiel kostet ein Solid-State-Laufwerk mit 128 Gigabyte heute um die 50 Euro – vor zehn Jahren war es noch unbezahlbar. Hinzu kommt der Energieverbrauch. Mobile Geräte sind nur praktikabel, wenn ihre Batterie in der Lage ist, sie lange genug zu betreiben.

Was werden die Anwender von den Fortschritten merken?

Wenn man den Energieverbrauch betrachtet, lassen sich Speicher- und Logikbausteine bauen, die dieselbe Leistung und Funktionalität haben wie bisher – aber weniger Energie benötigen.

Andersherum: Bei gleicher Batterieleistung kann man viel mehr Funktionen in das Gerät packen.

Was erwartet uns als Nutzer?

Die Weiterentwicklung der Spracherkennung wird dazu führen, dass Sie ein Interview wie dieses, das Sie per Diktierfunktion mit Ihrem Smartphone aufgenommen haben, nicht mehr mühselig abtippen müssen. Es wird gleich als Textdatei gespeichert, die Sie nur noch korrigieren müssen – per Sprachbefehl. Ein anderes Beispiel ist das Videostreaming. Heute lassen sich Filme aus dem Internet nur in lausiger Qualität herunterladen. Künftig wird qualitativ hochwertiges Videostreaming möglich sein, auch bei Videotelefonaten oder -konferenzen – übers Handy und an jedem Ort der Welt.

Finden Sie genügend Mitarbeiter, um solche Entwicklungen voranzutreiben?

Der Bereich Halbleitertechnik hat bei uns etwa 3000 Mitarbeiter, die meisten davon in Deutschland. Davon sind rund 1000 in Forschung und Entwicklung tätig. Ingenieure und Naturwissenschaftler hierher zu bekommen, ist nicht schwierig. Dabei kommt uns jedoch

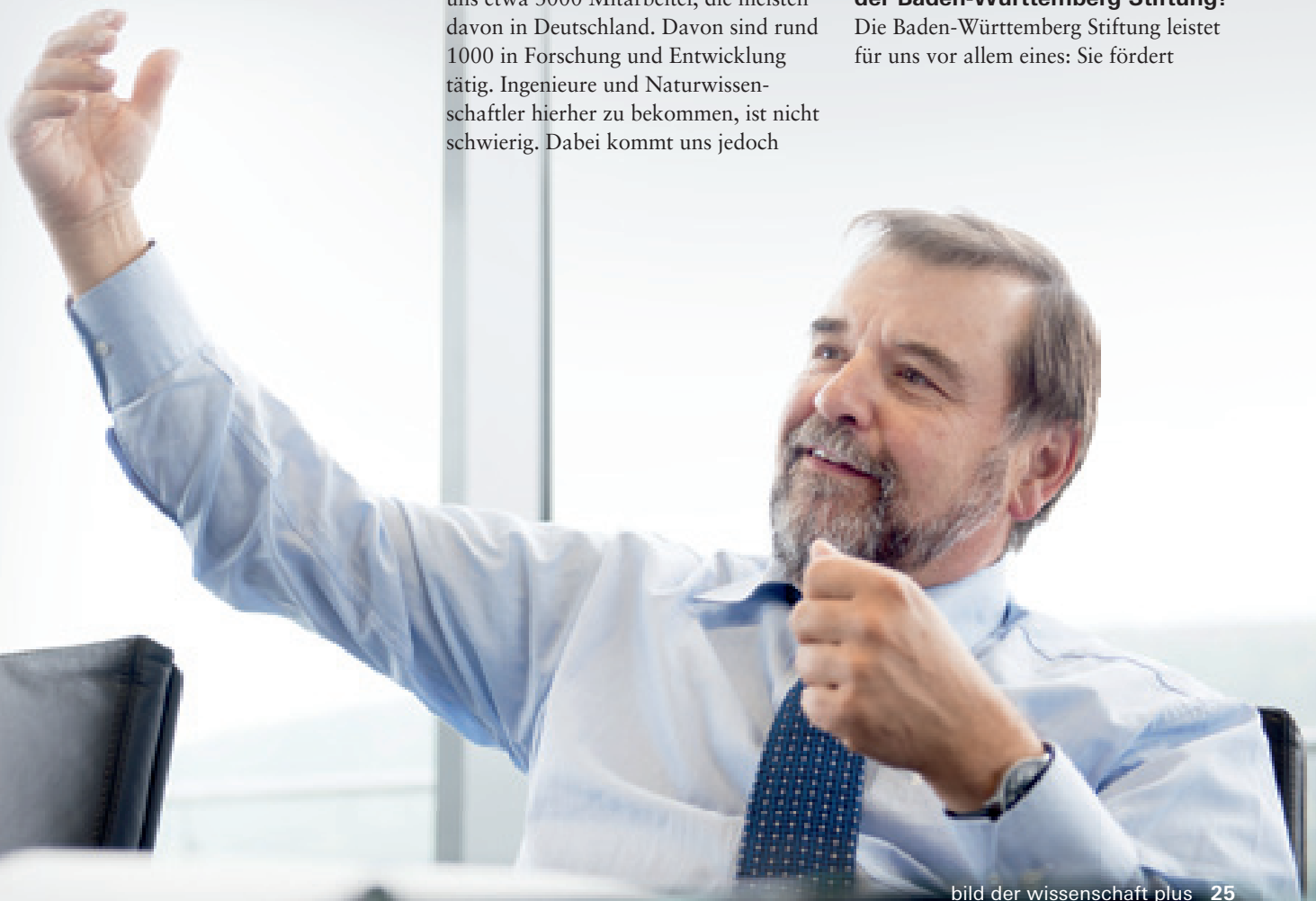
zugute, dass wir einen exzellenten Ruf haben. Wir bieten technologisch extrem anspruchsvolle Arbeitsplätze und zudem sehr gute Arbeitsbedingungen.

Sind Ihre Mitarbeiter vorwiegend in Mitteleuropa ausgebildet oder kommen auch Bewerber aus anderen Winkeln der Welt?

Wir haben Mitarbeiter aus 49 Nationen. Doch die meisten Bewerber haben deutsche Nationalität und kommen von Hochschulen in Deutschland. Wir kümmern uns zudem selbst intensiv um eine spezifische Ausbildung. Die Art von Optik, mit der man es hier zu tun hat, lernt man an keiner Universität der Welt kennen. Wir haben daher in den letzten 15 Jahren ein sehr nützliches Instrument entwickelt: den „Campus“. Da sind unsere erfahrenen Fachleute als Trainer für ihre jüngeren Kollegen tätig. Das macht vielen von ihnen enormen Spaß – und bringt einen hohen Wert.

Inwiefern hilft Ihnen das Wirken der Baden-Württemberg Stiftung?

Die Baden-Württemberg Stiftung leistet für uns vor allem eines: Sie fördert



intensiv die Ausbildung und Forschung an den Hochschulen der Region. Die Absolventen brauchen wir, um neue Verfahren und Sensoren zu entwickeln. Im Innovationsnetz für Optische Technologien Photonics BW, das für die Baden-Württemberg Stiftung als Projektträger für innovative Forschungsthemen aktiv ist, können wir Fachleute für uns rekrutieren und eine Infrastruktur schaffen, die uns zuarbeitet. Daher unterstützen wir auch die Aktivitäten der Baden-Württemberg Stiftung, die tragfähige Strukturen für die Zukunft schafft.

Was kann die Politik leisten, damit Sie noch besser für die Zukunft gerüstet sind?

Die Politik sollte die Rahmenbedingungen an die Bedürfnisse unserer Branche anpassen. Die Halbleiterindustrie ist eine zyklische und sehr volatile Branche. Wir müssen uns an die Rhythmen der Chiphersteller und unseres Partners ASML anpassen, der unsere Optiken in seine Lithografie-Geräte integriert – das heißt: an große Schwankungen im Geschäft. Mit einem starren Arbeitszeitsystem geht das nicht gut. Stattdessen brauchen wir hohe Flexibilität. Wir spüren immer als Erste den Ab- oder Aufschwung. Da können wir nicht lange im Voraus planen, da wir extrem nah am Puls des Marktes arbeiten. Daher verlangen wir unseren Mitarbeitern ein hohes Maß an Flexibilität ab.



bdw-Chefredakteur Wolfgang Hess, Technologieredakteur Ralf Butscher und Rudi Beer, Bereichsleiter Forschung der Baden-Württemberg Stiftung (von rechts) beim Interviewtermin in Oberkochen.

Wie viele Mitarbeiter sind bei Ihnen im Unternehmen gewerkschaftlich organisiert?

Ein recht geringer Prozentsatz. Wir haben einen engagierten Betriebsrat. Die Mitarbeiter wissen, dass wir nicht auf Vorrat produzieren können. Das ist eine Eigenheit der Halbleiterindustrie: Die Chips von heute sind morgen veraltet. Die Innovationszyklen unserer Kunden sind extrem kurz. Und wenn unsere Kunden einen neuen Chip mit neuen Eigenschaften produzieren wollen, brauchen sie dazu von uns eine fortentwickelte Technologie. Wir sind daher ständig am Verbessern. Im Prinzip kommen wir nie richtig in die Serienproduktion, sondern befinden uns immer in der Weiterentwicklung.

Wie viele Anlagen liefern Sie pro Jahr aus?

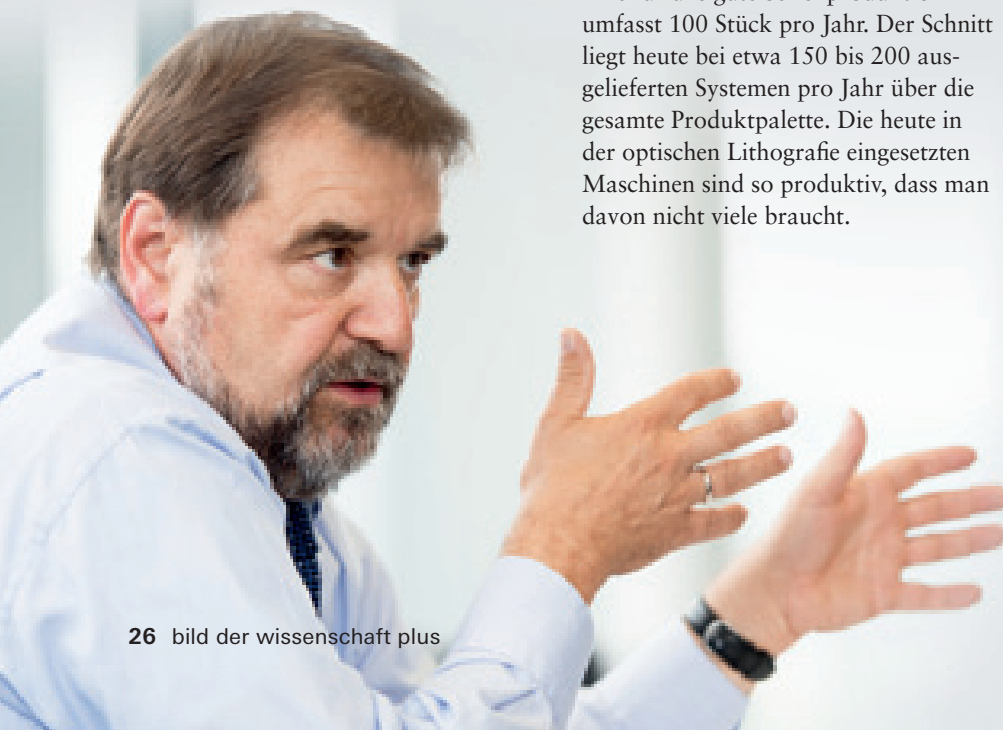
Eine für uns gute Serienproduktion umfasst 100 Stück pro Jahr. Der Schnitt liegt heute bei etwa 150 bis 200 ausgelieferten Systemen pro Jahr über die gesamte Produktpalette. Die heute in der optischen Lithografie eingesetzten Maschinen sind so produktiv, dass man davon nicht viele braucht.

In der organischen Elektronik lassen sich Chips aus Kunststoff einfach und billig fertigen. Bringt das Ihr Geschäft ins Wanken?

Das glaube ich nicht. Ich sehe die organische Elektronik als Ergänzung, bei der es um neue Anwendungen geht: etwa biegsame Bildschirme und Elektronik-Komponenten, die in Kleidung integriert sind. Sie haben recht einfache Funktionen, die wenig Leistung erfordern. Eine konventionelle Elektronik aus Silizium wäre da zu teuer und zu anfällig. Doch wenn es um Hochleistung geht, sehe ich keine Chance für die organische Elektronik. Die Entwicklung der Siliziumtechnologie wird noch lange weitergehen.

Wie lange wird das extreme ultraviolette Licht dafür reichen?

EUV hat so viel Potenzial für eine weitere Verkleinerung der Strukturen, dass das bis weit ins nächste, wahrscheinlich sogar bis ins übernächste Jahrzehnt reichen wird. Wir können zudem die Prozess-tricks, die wir entwickelt haben, auch bei dieser Technologie anwenden. Das werden wir nicht mehr verlernen. Man muss natürlich fragen: Wann hat das Ganze physikalische Grenzen? Irgendwann wird man in Bereiche vordringen, wo die Quantenphysik zuschlägt: Die Heisenbergsche Unschärferelation sorgt dann dafür, dass ein Elektron nicht mehr „weiß“, wo es sich aufhält. Dafür wird an alternativen Konzepten geforscht: unter anderem an Quantencomputern und optischen Computern. Allerdings: Wo genau die physikalische Grenze für die herkömmliche Mikroelektronik liegt, lässt sich aus heutiger Sicht nicht sagen.



Als Untergrenze galt ja mal die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Da sind Sie schon drunter ...

Wir sind sogar weit darunter. Insofern meine ich: Um die nächsten ein bis zwei Jahrzehnte ist mir nicht bange.

Sie sind seit rund 30 Jahren bei Zeiss. Was hat Sie so lange im Unternehmen gehalten?

Das ist eine Frage, die ich mir nie stelle. Ich bin nach meiner Promotion von der Uni Würzburg zu Zeiss gekommen. In Würzburg hatte ich das Angebot gehabt, als Akademischer Rat zu arbeiten. Doch ich bin nicht der typische Forscher. Beim Einstellungsgespräch bei Zeiss wurde ich gefragt: „Sie haben einen guten Abschluss, sind in der Forschung tätig – warum gehen Sie jetzt in die Industrie?“ Ich habe geantwortet: „Ich möchte endlich mal etwas machen, wofür die Leute Geld bezahlen.“ Hier hatte ich die Chance, Wissenschaft und Wirtschaft zu verbinden. Das hat mich von Anfang an fasziniert. Als ich Mitte der 1990er-Jahre in die Halbleitertechnik einstieg, hatte der Bereich 37 Beschäftigte. Dann ist er schnell gewachsen. Zusammen mit ASML waren wir extrem erfolgreich, wurden vom Nobody zum Marktführer. Die Zahl der Beschäftigten stieg auf 3000. Diesen Aufbau konnte ich maßgeblich beeinflussen, hatte große Gestaltungsfreiheit. Es gab so viele Herausforderungen und so viel Befriedigung, dass ich weder Zeit noch Lust hatte, mich anderswo nach einem Job umzuschauen.

Wie nah sind Sie als Topmanager an den aktuellen Fragen in Forschung und Entwicklung dran?

Mit Licht zum Mikrochip: die optische Lithografie

Ob in Handys, Autos oder Waschmaschinen – in vielen Geräten des Alltags stecken Mikrochips, die die technischen Apparaturen zu leistungsfähigen Computern machen. Für die enorme Rechenpower moderner Computerchips sorgen Milliarden von Transistoren, die sich auf einer Fläche von der Größe eines Fingernagels befinden und als Prozessoren oder Speicher für digitale Daten dienen. Um die immense Zahl an elektronischen Bauteilen und dazwischen verlaufenden Leiterbahnen auf so engem Raum unterzubringen, ist ein ausgefeiltes Fertigungsverfahren erforderlich: die optische Lithografie.

Bei dieser Technologie werden die filigranen Strukturen der Mikroelektronik, die auf einer Maske vorgezeichnet sind, mithilfe einer hochauflösenden, verkleinernden Projektionsoptik, die aus zahlreichen Linsen beziehungsweise Spiegeln aufgebaut ist und durch einen Laser beleuchtet wird, auf ein Halbleiter-Material wie Silizium projiziert. Das Silizium – in Form einer dünnen Scheibe, eines sogenannten Wafers – wird vor der Belichtung behandelt, beispielsweise mit einem lichtempfindlichen Lack überzogen. Das Laserlicht löst dann in dem Lack eine chemische Reaktion aus, die das Material verändert. So lassen sich anschließend belichtete und nicht belichtete Bereiche unterscheiden und zum Beispiel nur die belichteten Teile des Lacks entfernen. Auf diese Weise entstehen Schritt für Schritt die gewünschten Mikrostrukturen. Je kürzer die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts, desto feinere Strukturen können mithilfe der optischen Lithografie erzeugt werden.

Ich kann nicht mehr bei allen technologischen Details mitreden. Aber durch meine Erfahrung und meine Ausbildung als Physiker verstehe ich, was die technisch kritischen Elemente sind. So kann ich, zusammen mit unseren Fachleuten, richtungsweisende Entscheidungen treffen.

Wie eng ist der Kontakt zu Ihren Mitarbeitern?

Wenn es irgendwie geht, gehe ich gerne und oft in den Betrieb und rede mit den Leuten – mit den Entwicklern und mit den Beschäftigten in der Fertigung. Dort finde ich stets ein offenes Ohr. Und die Leute reden auch offen mit mir. Nur so schafft man es, Mitarbeiter zu motivieren und dazu zu bringen, in Hochzeiten mehr als das übliche Pensum zu leisten.

Was erhoffen Sie sich für die nächsten Jahre?

Ich wünsche mir, dass wir in den nächsten zwei Jahren vollends den Durchbruch mit der EUV-Technologie schaffen. Da ist in der Branche noch einiges zu tun. Doch die optischen Systeme, die wir bereits testen, zeigen, dass das Verfahren unglaubliches Potenzial hat. Die Optik funktioniert und kann perfekte Strukturen erzeugen. Wir haben die Kapazität unserer Fabrik in den letzten Jahren in Vorbereitung auf die neue Technologie fast verdoppelt und so eine wichtige Voraussetzung für die Volumenproduktion geschaffen. Technologie und Wissenschaft liefern mir nur dann volle Befriedigung, wenn sie auch mit wirtschaftlichem Erfolg verbunden sind.

IMPRESSUM

SPRÜHENDE IDEEN

Eine Sonderpublikation von bild der wissenschaft in Zusammenarbeit mit der Baden-Württemberg Stiftung

ERSCHEINUNGSTERMIN: 1/2015

HERAUSGEBERIN: Katja Kohlhammer

VERLAG: Konradin Medien GmbH

Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen

CHEFREDAKTEUR: Wolfgang Hess

PROJEKTLÉITUNG: Ralf Butscher

REDAKTIONELLE MITARBEIT:

Natalie Rupprich, Henrike Wiemker

GRAFISCHE GESTALTUNG: Peter Kotzur

BILDREDAKTION: Ruth Rehbock, Susanne Söhling

REDAKTION BADEN-WÜRTTEMBERG STIFTUNG:

Maren Emmerich, Simone Plahuta, Rudi Beer

VERTRIEB: Kosta Poullos

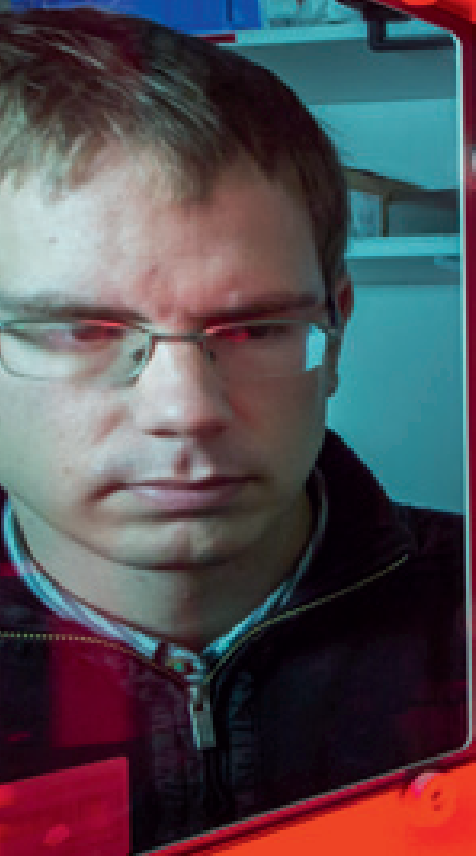
DRUCK: Konradin Druck GmbH

Kohlhammerstr. 1–15, 70771 Leinfelden-Echterdingen

Weitere Exemplare können Sie kostenlos anfordern bei:
Leserservice bild der wissenschaft

Tel. 01805-260155

leserservice@wissenschaft.de



Scharfblick auf heiße Zellen

Mit einer neuartigen Präzisionskamera schauen Freiburger Forscher beim Bohren winziger Löcher zu. Denn sie wollen Solarzellen effizienter machen.

von Roland Bischoff





Mit der ultraschnellen Kamera, die die Freiburger Forscher entwickelt haben (rechts oben im Bild), lässt sich nicht nur das Bohren, sondern auch das Schweißen per Laserstrahl präzise überwachen.

Es geht um winzige Bruchteile von Sekunden und Millimetern. Wenn Wissenschaftler zweier Freiburger Fraunhofer-Institute das Durchbohren einer Solarzelle um einen Wimpernschlag verkürzen oder auf einem Silizium-Wafer, auf dem die Zelle sitzt, einen Quadratmillimeter mehr für das Einfangen des Sonnenlichts nutzen, scheint der dabei erzielte Fortschritt minimal: Nur um etwa 0,1 Prozentpunkte konnten die Forscher den Wirkungsgrad von Photovoltaik-Zellen steigern. Doch hochgerechnet auf alle weltweit installierten Solarmodule entspricht der scheinbar winzige Gewinn der Leistung eines großen Kohlekraftwerks. Erreicht wurde diese Steigerung der Effizienz im Forschungsprojekt „InLas“ (Inline Laserprozessregelung in der Photovoltaik durch analoge Bildverarbeitung).

Auch das Bearbeiten der quadratischen Siliziumplatten in einem Labor des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE erscheint auf den ersten Blick wenig spektakulär. Die 15 mal 15 Zentimeter großen Wafer laufen auf einem Minifließband automatisch in die schrankgroße Laserstation. Darin sieht man durch eine dunkle Trennscheibe für kurze Zeit ein orangerotes Licht leuchten – und dann kommen die dünnen Platten scheinbar unverändert aus der Anlage heraus. Doch wenn ISE-Forscher Jan Nekarda einen der bearbeiteten Wafer vor eine starke Lichtquelle hält, sieht man im Gegenlicht mehrere Reihen winziger Löcher. Die sind bei hocheffizienten Solarzellen notwendig, um den Strom von der Vorder- auf

die Rückseite abzuleiten, auf der die elektrischen Anschlusskontakte sitzen.

Die Löcher haben einen Durchmesser von lediglich einem zehntel Millimeter. Gebohrt werden sie mit einem Laserstrahl. Die Fraunhofer-Forscher verwenden dazu einen gepulsten Laser, der seine Energie nicht permanent, sondern stoßweise abgibt. Um ein Loch durch die maximal 0,2 Millimeter dünnen Silizium-Platten zu bohren, sind mehrere Pulse notwendig. „Die schnellste Methode, um die reihenförmig angeordneten Löcher zu bohren, ist das sogenannte Drilling-on-the-Fly. Dabei streicht der gepulste Laserstrahl entlang der Lochlinien mehrfach über den Wafer“, erläutert Nekarda, der am ISE den Bereich Photovoltaik-Laserprozessentechnik leitet.

Bei jedem Durchgang lenkt ein beweglicher Spiegel den Laser so, dass der energiereiche Strahl auf tausendstel Millimeter genau mehrmals dieselben Stellen trifft und dort jedes Mal ein wenig Silizium abträgt. Die Abtragstiefe pro Laserstoß liegt zwischen 5 und 10 Mikrometern, also zwischen 0,005 und 0,01 Millimetern.

Weil die Dicke der Wafer immer etwas schwankt, variiert die Zahl der für das Bohren benötigten Laserstöße. Um zu garantieren, dass alle Löcher vollständig durchbohrt werden, führt man den Laserstrahl in der Regel häufiger als notwendig über den Wafer. Dadurch erhöht sich aber die Bohrdauer, insbesondere bei bestimmten Wafer-Typen, bei denen bis zu 20 000 Löcher zu bohren sind. „Das Laserbohren ist als Verfahren zwar konkurrenzlos, doch bei der Bearbeitungszeit lässt sich noch viel verbessern“, konstatiert Daniel Carl vom Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM. „Im Projekt InLas haben wir deshalb untersucht, wie wir mit einem sehr schnellen Bildver-

arbeitungssystem den Bohrvorgang kontrollieren können, um überflüssige Laserstöße zu vermeiden.“

Das von dem Leiter der Arbeitsgruppe Inline-Messtechnik angesprochene Bildverarbeitungssystem ist in der Tat extrem schnell. Es kann in jeder Sekunde 20 000 Bilder nicht nur erkennen, sondern auch auswerten. Das erlaubt es den Forschern, das Laserbohren in Echtzeit zu kontrollieren und sofort zu beenden, sobald ein Loch komplett durchbohrt ist. „Dadurch ist – je nach Typ der Solarzelle – eine Zeitersparnis von deutlich über 10 Prozent zu erreichen“, fasst Daniel Carl zusammen. „Dank InLas lassen sich Wafer also schneller und damit kostengünstiger bearbeiten.“

Turbokamera nach Vorbild des Gehirns

Kernstück für die Echtzeit-Kontrolle des Laserbohrens sind sogenannte CNN-Kameras, die für eine besonders schnelle Bilderkennung optimiert sind. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass die Bildverarbeitung direkt auf dem lichtempfindlichen Chip der Kamera stattfindet. Möglich wird das durch die besondere Struktur der CNN oder Zellularen Neuronalen Netze. Bei ihnen sind – nach dem Vorbild der Nervenzellen des Gehirns – die einzelnen Pixel auf dem Chip räumlich und zeitlich miteinander verknüpft. Räumlich ist jeder Pixel mit drei mal drei Nachbarpixeln verbunden, die zeitliche Verknüpfung umfasst bis zu sieben aufeinander folgende Zustände. „Vereinfacht gesagt ist jeder Pixel ein kleiner Computer, dessen Stärke in der Bildverarbeitung liegt“,



Erfolgreiches Team aus zwei benachbarten Fraunhofer-Instituten: Jan Nekarda (rechts) und Andreas Blug (links) vom ISE sowie Daniel Carl (Mitte) vom IPM mit dem ausgebauten Modul einer CNN-Kamera. Damit lassen sich Fehler bei Laserproduktionsprozessen unmittelbar erkennen und klassifizieren. Rechtes Bild: Wenn ein Laser Löcher in einen Silizium-Wafer bohrt, erzeugt das einen spektakulären Funkenregen.

erläutert Daniel Carl. Durch die parallele Verarbeitung der Bildinformationen lassen sich Auswerteraten von bis zu 28 000 Aufnahmen je Sekunde erzielen. Das sind Werte, bei denen andere Hochgeschwindigkeitskameras passen müssen.

Die CNN-Kamera im InLas-Projekt ist so in die Bearbeitungsanlage eingebaut, dass sie entlang des Laserstrahls direkt auf die Bohrstelle blicken kann. Möglich wird das durch einen Strahlteiler, der für das Laserlicht durchlässig ist, das aus dem Bohrloch reflektierte Licht aber in Richtung der CNN-Kamera lenkt. Carl nennt einen weiteren Vorzug der Bildverarbeitung auf dem Chip: „Es ist weder ein zusätzlicher PC noch ein zusätzlicher Datentransfer nötig. Die Regelungssignale, mit denen der Laserstrahl gesteuert wird, kommen direkt aus der Kamera.“ Wollte man ein vergleichbares konventionelles Bildverarbeitungssystem nutzen, müsste dessen Rechner in der Liga der Supercomputer spielen und eine Rechenleistung von mehreren Tera-Flops besitzen, also über eine Billion Operationen in der Sekunde abarbeiten.

Zelluläre Neuronale Netze sind seit 2007 kommerziell erhältlich – also keine Erfindung der Fraunhofer-Physiker. Deren Verdienst ist es, das Potenzial von CNN zur automatischen Prozesssteuerung erkannt und verwirklicht zu haben. Nicht zu Unrecht wirbt das Institut für

Physikalische Messtechnik bei potenziellen Industriekunden mit dem Slogan „Wir messen so schnell, wie Sie produzieren!“

Dass man einen Produktionsprozess mithilfe von CNN-Kameras in Echtzeit überwachen und steuern kann, haben die IPM-Wissenschaftler erstmals bei der Drahtproduktion erfolgreich demonstriert. Beim Herstellen von Draht wird ein Metallstrang mit hoher Geschwindigkeit durch eine Reihe sogenannter Ziehsteine gezogen, deren Öffnungen nach und nach enger werden und so den Draht immer dünner werden lassen. Wegen der starken Reibung sind die Ziehsteine hohem Verschleiß ausgesetzt und können die Drahtoberfläche beschädigen. Dort entstehen Defekte wie Quer- und Ziehriefen oder Rattermarken. Die Schäden sind zwischen einem hundertstel Millimeter und einigen Millimetern groß. Doch schon kleinste Fehlstellen an der Drahtoberfläche führen mitunter zu großen Problemen beim späteren Einsatz – etwa im Kabelbaum eines Autos oder beim Herzschrittmacher im Brustkorb eines Patienten.

Um Mikrodefekte schon während des Ziehens zu erkennen, beobachten die IPM-Forscher den schnell vorbeiziehenden Draht mit vier CNN-Kameras. Dank der Bildverarbeitung und einer leistungsstarken Beleuchtung erkennt das Inspektionssystem Fehlstellen zuverlässig und vollständig – was herkömmliche

Bildverarbeitungssysteme nicht schaffen. Das ermöglicht es dem Hersteller, die Fehler zu beurteilen. Das inzwischen am Markt angebotene System verarbeitet bis zu 10 000 Bilder pro Sekunde in Echtzeit. Die Belichtungszeit und damit die Grenze für scharfe Aufnahmen beträgt rund zehn Mikrosekunden.

Fehler werden zuverlässig erkannt

Für das Team aus der IPM-Abteilung Produktionskontrolle ist es jedes Mal eine Herausforderung, die anspruchsvolle Messtechnik an eine neue Fertigungsumgebung anzupassen. „Ob Drähte oder Rohre, ob Stahl, Aluminium oder Kupfer – unser System entdeckt selbst kleinste Oberflächenfehler, klassifiziert diese und dokumentiert sie in einer Datenbank“, betont Daniel Carl stolz. Der Kunde, also beispielsweise ein Drahthersteller, kann dann selbst entscheiden, welche Fehler noch tolerabel sind und bei welchen die Produktion gestoppt werden soll.

Mit dem von der Baden-Württemberg Stiftung in den vergangenen Jahren geförderten InLas-Projekt haben die Freiburger Inline-Messtechniker gezeigt, dass sich ihr CNN-System nicht nur für die Drahtinspektion, sondern auch für die Herstellung von Silizium-Wafern eignet. Ging es beim Laserbohren vor allem darum, den Produktionsprozess zu beschleunigen,

Sachtes Schneiden im Verbundstoff

befasste sich der zweite InLas-Projektabschnitt mit der sogenannten Laserkantenisolation, um die Fläche der Solarzelle zu optimieren. Dabei durchschneidet ein Laserstrahl die photovoltaische Schicht auf der Oberseite des Wafers möglichst nah am Rand, um die notwendige elektrische Isolation gegenüber der Unterseite zu erzielen. Das Team um Daniel Carl konnte zeigen, dass ein CNN-System auch diesen speziellen Produktionsschritt optisch erkennen und in Echtzeit zuverlässig regeln kann. Durch die höhere Präzision lässt sich die Oberfläche der Solarzelle besser ausnutzen – der Wirkungsgrad steigt.

Jetzt hoffen die Freiburger Fraunhofer-Wissenschaftler, dass neben Drahtproduzenten auch andere industrielle Hersteller auf das zum Patent angemeldete Verfahren setzen, um ihre Produktion zu opti-

Auch bei anderen Fertigungsprozessen sind Laser heute das Werkzeug der Wahl: etwa beim Schneiden von CFK, mit Kohlenstofffasern verstärkten Kunststoffen. CFK-Bauteile sind leichter als vergleichbare Elemente aus Stahl, stehen diesen aber bei der Festigkeit in nichts nach. Und wie ihre metallischen Konkurrenten lassen sich CFK in der industriellen Fertigung mit Lasern bearbeiten – ein wichtiger Schritt hin zur wirtschaftlichen Massenproduktion von Leichtbaukomponenten. Doch anders als Metalle sind CFK ein inhomogenes Gebilde aus diversen Materialien. Welche Konsequenzen das für die Laserbearbeitung hat, untersuchen Forscher am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart und am Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik (ILM) der Uni Ulm. Das Ulmer Team um Peter Mayr befasst sich im Projekt „Care-Cut – Grundlagen zur Laserbearbeitung von Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff“ mit den thermischen und optischen Eigenschaften der neuen Werkstoffe. Die Stuttgarter Kollegen um Rudolf Weber erkunden, was passiert, wenn Laserlicht auf CFK trifft.

Beim Trennen von Metallen schmilzt ein energiereicher Laserstrahl das Material und erzeugt so eine Schnittfuge. Bei CFK-Werkstoffen ist das komplizierter: Weil Kohlenstoff bei normalem Umgebungsdruck nicht schmilzt, muss der Laser die daraus bestehenden Fasern auf die Sublimationstemperatur von rund 3600 Grad Celsius bringen. Dann geht Kohlenstoff vom festen Zustand direkt in die Dampfphase über. Das Problem: Die Hitze schädigt entlang der Schnittkante die Kunststoffmatrix, die schon bei wenigen Hundert Grad Celsius schmilzt. Wie sich die Wärme und die Schadenszone ausbreiten, hängt vor allem von der Intensität des Laserstrahls ab, wie die Stuttgarter Forscher herausgefunden haben. Je nach Einstellung des Lasers und je nach Sorgfalt bei seiner Handhabung messen die Schäden zwischen einem tausendstel Millimeter und mehreren Millimetern.

„Solche Wärmeeinflusszonen lassen sich nicht komplett vermeiden“, sagt Margit Wiedenmann, die am IFSW Simulationsmodelle entwickelt. Doch die Physikerin hat auch eine gute Nachricht: Wenn man den Laser richtig steuert, bleiben die Schadstellen so klein, dass sie im praktischen Einsatz – etwa im Automobil- oder Gerätebau – keine Rolle spielen. CFK schneidet man in der Regel mit gepulsten Lasern, die keinen permanenten Strahl aussenden, sondern kurze Lichtblitze. Dabei entscheidet neben der Stärke auch die Dauer der Pulse über die Qualität einer Schnittfuge. Am geringsten – so haben die CareCut-Forscher herausgefunden – sind Wärmeschäden, wenn die Laserpulse extrem kurz sind und zugleich sehr hohe Energiemengen in den Werkstoff hineintragen.

Bei der Echtzeit-Qualitätskontrolle in der Herstellung von Draht hat sich die innovative Kamera-Technologie bereits bewährt. Mehrere Kameras beobachten den rasch vorbeiziehenden Draht, eine leistungsstarke Bildverarbeitung erkennt sofort mögliche Materialdefekte.

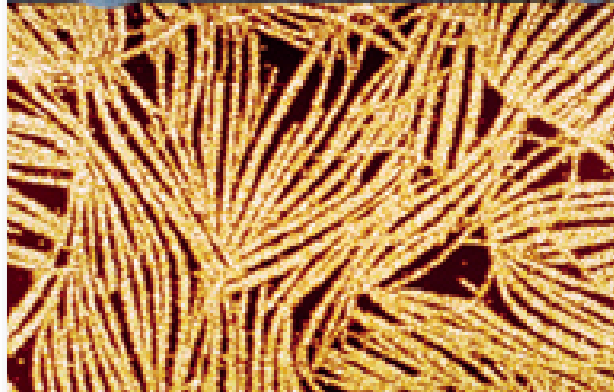
mieren. In der Photovoltaik könnten das neben Wafer-Herstellern auch Produzenten von Fertigungsanlagen sein. Dass die vielversprechenden Forschungsergebnisse des InLas-Projekts gerade zu der Zeit erreicht wurden, als die Solarindustrie durch energiepolitische Verwerfungen in eine wirtschaftliche Krise geriet und wenig Interesse an photovoltaischen Innovationen zeigte, war in gewisser Weise Pech.

Daniel Carl ist trotzdem zuversichtlich: „Die Mittel der Baden-Württemberg Stiftung waren für uns sehr hilfreich. Dadurch konnten wir eine sinnvolle Technologie nochmals weiterentwickeln, die ein breites Potenzial im Flugzeug- und Automobilbau sowie in der Medizin hat.“ ●

Chips aus der Biosuppe

Die herkömmlichen Fertigungsverfahren der Mikroelektronik stoßen an Grenzen. Daher sollen sich Computerbauteile künftig selbst aus einzelnen Molekülen formen.

von Klaus Jacob



Hauchdünne Stoffe aus der Retorte: Zaklina Burgard (rechts) und Achim Diem aus dem Forschungsteam von Joachim Bill begutachten Proben aus keramischem Papier auf der Basis von Vanadiumoxid – nutzbar etwa für Akkus oder Katalysatoren.

Meister der Nanostrukturen: Der Chemiker Joachim Bill kreiert Bio-Schablonen nach dem Vorbild der Natur. Hier zeigt er vergrößerte Gebilde aus Viren auf einem Siliziumchip.

Vor fast 50 Jahren stellte Gordon Moore eine seltsame Regel auf: Die Komplexität von integrierten Schaltkreisen, postulierte er, werde sich alle zwei Jahre verdoppeln. Als Mitgründer des Computerchip-Herstellers Intel wusste der Amerikaner, wovon er sprach. Trotzdem hat er wohl kaum damit gerechnet, dass sein „Moore'sches Gesetz“ im Prinzip bis heute gilt, auch wenn es nur rund 20 Monate dauert, bis sich die Zahl der Transistoren pro Mikrochip verdoppelt hat. Top-Prozessoren bringen es inzwischen auf mehr als zwei Milliarden Schalter. Trotz dieser beeindruckenden Entwicklung hat sich der Fertigungsverfahren von Mikrochips nicht prinzipiell



verändert. Silizium als Halbleitermaterial und die Lithografie als Reproduktionsmethode, das sind die klassischen Zutaten.

Unnütze Abwärme als Stromfresser

Doch die Tradition stößt zunehmend an ihre Grenzen. Zum einen laufen die Kosten davon: Wer heute eine Fertigungsanlage errichten will, muss mehrere Milliarden Euro in die Hand nehmen. Zum anderen entwickeln moderne Chips so viel Wärme, dass die Architektur von Computern zunehmend davon bestimmt wird. Und die Energie für die unnütze Abwärme der Mikroelektronik verschlingt rund zehn Prozent des gesamten weltweit

produzierten elektrischen Stroms – ein ökologisches Damoklesschwert.

Eine Gruppe von Wissenschaftlern aus Baden-Württemberg will einen ganz neuen Weg einschlagen, um all diese Nachteile auf einen Schlag loszuwerden. Was die Forscher vorhaben, klingt wie Science Fiction: Die elektronischen Bauteile sollen von selbst wachsen, ähnlich wie ein Baum oder ein Embryo. „Man setzt eine Lösung an, geht in die Mensa – und wenn man zurückkommt, ist alles fertig“, beschreibt Thomas Schimmel augenzwinkernd den Grundgedanken. Der Leiter des Instituts für Angewandte Physik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat sich für das ehrgeizige Projekt mit

dem Stuttgarter Chemiker Joachim Bill zusammengetan. Wenn die beiden Experten begeistert von ihren Arbeiten erzählen, kann man die Skepsis gegenüber diesem utopischen Unterfangen verlieren. Natürlich stecken die Pioniere noch in der Grundlagenforschung, sodass frühestens in zehn Jahren mit ersten Anwendungen zu rechnen ist. Doch sie haben schon eine Menge Vorarbeit geleistet – bis vor zwei Jahren unabhängig voneinander.

Bill forscht am Institut für Materialwissenschaft der Universität Stuttgart sowie am nahe gelegenen Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme, das sich ursprünglich mit der Herstellung von Keramik befasst hat. Schon lange suchte



Der Karlsruher Physiker Thomas Schimmel entnimmt einem Thermo- bad einen Wafer, den sein Mitarbei- ter Stefan Walheim (im Hintergrund) weiter bearbeitet und analysiert.

man dort nach einem Weg, die Fertigungs- kosten von Computerchips zu senken. In den 1990er-Jahren entstand die Idee, von der Natur abzukupfern. Denn Lebewesen sind zweifellos die besseren Keramiker. Biokeramiken wie Zähne, Muschelschalen und Schneckenhäuser, im Laufe der Jahrmilliarden auf Hochleistung getrimmt, haben hervorragende Eigenschaften. Ein Zahn hält problemlos Jahrzehnte, obwohl er täglich stark beansprucht wird. Und das Beste: Er braucht für seine Herstellung keinen Brennofen mit Temperaturen von 1000 Grad Celsius und mehr. Biomineralien bilden sich bei Raumtemperatur wie von selbst. Wenn es gelingt, diesen natürlichen Prozess nachzuahmen, so die Überlegung, würde man nicht nur eine Menge Kosten und Energie sparen. Es würde auch neue Anwendungen erlauben. Zum Beispiel könnte man eine DVD mit einer hauchdünnen Keramikhaut beschichten und dadurch kratzfest machen. Bisher scheitern solche Materialverbünde an den hohen Temperaturen, die für die Keramikerstellung nötig sind.

Die Stuttgarter Wissenschaftler haben den natürlichen Prozess der Biomineralisation studiert, wobei sie sich vor allem das schillernde Perlmutter zum Vorbild nahmen, aus dem etwa Muschelschalen aufgebaut sind. Das Problem: Lebewesen bestehen aus lebenden Zellen. Wie kann sich daraus eine harte, leblose Perlmutter- schicht bilden, die eine genau definierte Form hat? Die Natur nutzt dafür einen Trick: Sie baut zunächst eine Vorlage aus organischem Material, eine Schablone. Daran docken von selbst anorganische Moleküle aus dem Meer an. So entsteht die gewünschte Struktur. Chemiker nennen eine solche Bio-Schablone ein Template. Muscheln bauen auf diese Weise spröde Plättchen aus Aragonit – einem kalziumhaltigen Mineral – wie Ziegelsteine übereinander. Als Mörtel dienen Proteine, sodass im Verbund das sehr bruchfeste Perlmutter entsteht.

Man braucht also nur eine geeignete Schablone zu nehmen und in eine Lösung mit den Wunsch-Substanzen zu tauchen. Doch ganz so einfach ist es nicht. Denn die

Natur baut vorwiegend mit Kalk – einem Stoff, der Materialwissenschaftler nicht vom Hocker reißt. Die interessieren sich eher für Oxide von Zink, Titan, Vanadium oder Zirkonium: Materialien mit herausragenden mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften, aus denen man Akkus, Brennstoffzellen oder Katalysatoren herstellen kann. „Die Natur ist auf diese Elemente nicht eingestellt“, sagt Bill. Daher musste er ihr in einer Art künstlicher Evolution auf die Sprünge helfen. Inzwischen hat der Chemiker den Bogen raus und kann hauchdünne Schichten aus den hochwertigen Materialien produzieren. Wiederholt er die Prozedur, formen sich mehrere Lagen übereinander – wie beim Vorbild Perlmutter.

Alle drei Sekunden eine Kopie

Thomas Schimmel hat sich dem Thema von einer anderen Seite genähert. Sein Forschungsgebiet sind die Template. Er hat gezeigt, was für erstaunliche Möglichkeiten solche organischen Matrizen

bieten. Dafür hat der Karlsruher Physiker auf einen herkömmlichen Silizium-Wafer eine nanometerdünne Schicht aus zwei unterschiedlichen Polymeren aufgebracht, die in einem bestimmten Muster verteilt sind. Dann hat er den Wafer in eine Lösung gesteckt, in der frei bewegliche Moleküle beider Polymere schwammen. Schon nach drei Sekunden hatte sich eine exakte Kopie des Musters gebildet, denn Polymer A hatte sich an Polymer A angelagert und B an B. Das lief ab wie die Reproduktion des Erbguts DNA. Bis auf den Nanometer stimmte der Nachbau mit dem Original überein. Das Replikat ließ sich problemlos von der Unterlage abziehen. Das Templat blieb erhalten, bereit zur nächsten Nutzung. So lassen sich damit Tausende Kopien erstellen.

2012 schlossen sich die beiden Wissenschaftler zusammen. Geholfen hat ihnen dabei das Kompetenznetz Funktionelle Nanostrukturen (KFN), das seit zwölf Jahren Nanotechnologie-Forscher aus Baden-Württemberg zusammenbringt und unterstützt. Die Baden-Württemberg Stiftung hat bereits über 42 Millionen Euro in diesen regionalen Verbund gesteckt – mit sichtbarem Erfolg: Der Anteil des Bundeslands an der deutschen Nanoforschung ist in dieser Zeit, gemessen an der Zahl der Veröffentlichungen, von 20 auf mehr als 30 Prozent gestiegen. Baden-Württemberg ist zu einer Hochburg der winzigen Strukturen geworden.

Schimmel und Bill haben schnell gemerkt, dass sie sich prima ergänzen: Der eine sorgt für die Schablonen, der andere macht daraus feste mineralische Bauteile. Das Projekt „selbstwachsende Elektronik“ war geboren. Die Vorteile liegen auf der Hand. Mit seinen Bio-Kopien, die dem Original bis aufs Molekül gleichen, ist Schimmel dem herkömmlichen Herstellungsverfahren der Elektronik weit überlegen. Bisher wird das zur Fertigung von mikroelektronischen Bauteilen benutzte Silizium durch eine Maske belichtet, wobei die Auflösung vor allem von

der Art des Lichts abhängt. Zwar nutzen die Unternehmen Strahlung mit immer kürzerer Wellenlänge, bis in den Röntgenbereich. Doch es bleibt eine Unschärfe, die durch Streueffekte noch wächst.

Flüssigkeitsbad statt Chipfabrik

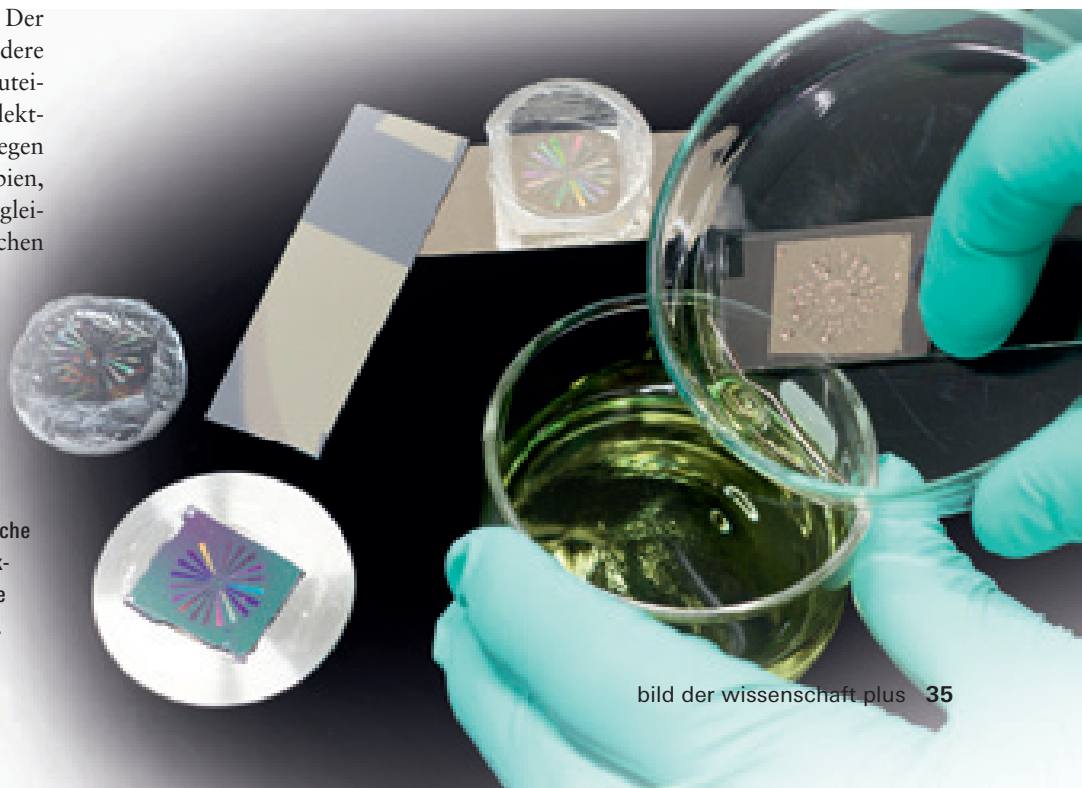
Der Karlsruher Physiker und der Chemiker aus Stuttgart stellen sich den alternativen Herstellungsprozess so vor: Am Anfang steht ein Templat, das die Form des Bauteils vorgibt. Es wird von einem Kraftmikroskop erzeugt, das mit seiner atomfeinen Spitze Strukturen bis zu einer Größe von wenigen Nanometern formen kann. Von der organischen Vorlage werden in einer Flüssigkeit zahlreiche Kopien erzeugt. Diese wandern anschließend in eine andere Lösung, die daraus innerhalb weniger Stunden das Bauteil aus anorganischen Mineralien aufbaut. Dass man die Mineralien dabei sogar dotieren – also gezielt mit Fremdatomen spicken – und somit verbessern kann, hat das Team bereits gezeigt. Und das alles passiert bei Raumtemperatur, ohne großen Aufwand. „Man braucht keine milliardenteure Fabrik mehr“, schwärmt Schimmel, „es genügt ein paar Leute mit einer guten Idee.“

Mit dem von der Natur inspirierten Verfahren lassen sich nicht nur Prozessoren, Solarzellen oder Sensoren herstellen. „Man kann auch neue Sachen machen, an die wir heute noch gar nicht denken“, ist

Schimmel überzeugt. Denn man ist nicht auf Silizium angewiesen, sondern kann auch mit anderen Materialien arbeiten. Anorganische und organische Komponenten mischen – kein Problem. Und Schimmel träumt davon, den „kleinsten Transistor der Welt“, den sein Team 2004 entwickelt hat, zu integrieren. Er besteht aus zwei Kontakten, die durch ein einziges Atom verbunden sind oder getrennt werden. Zum An- und Ausschalten braucht der Winzling ein Tausendstel der Energie eines herkömmlichen Transistors – und produziert fast keine Wärme. Das Hitze-Problem von Computern wäre vom Tisch.

Wenn Schimmel von den Möglichkeiten der selbstwachsenden Elektronik spricht, kennt er kaum Grenzen. Warum nicht das Erbgut DNA als Matrize verwenden und so der Natur auch noch ihr wichtigstes Patent klauen? Schon heute ist es möglich, das Lebensmolekül im Labor nach Belieben zusammenzubauen. Man könnte es so einrichten, dass dabei eine definierte dreidimensionale Form entsteht. Wenn daraus elektronische Bauteile wüchsen, hätten sie eine räumliche Struktur. Die Elektronik würde von zwei Dimensionen, wie heute üblich, in die dritte Dimension übergehen. Die Rechenpower von Computern würde dadurch explodieren. So bekäme die alte Bezeichnung „Elektronengehirn“ einen neuen Sinn. Die Kluft zwischen Technik und Natur hätte sich endgültig geschlossen. ●

Im Kopiervorgang zur Elektronik: Mit einem speziellen Stempel wird die Oberfläche eines Wafers so beschichtet, dass die elektronischen Strukturen darauf wachsen. Sie lassen sich so tausendfach vervielfältigen.



Das Haus der

Mit einem Neubau für moderne Labors zeigen Freiburger Solarforscher, was technisch bereits heute an Effizienz und regenerativer Energienutzung möglich ist.

von Klaus Jacob

Rund 40 Prozent der Energie, die in Deutschland verbraucht wird, fließt in Gebäude. Dort sorgt sie vor allem für ein angenehmes Raumklima – Heizen, Kühlen, Lüften, Be- und Entfeuchten – und dient zur Warmwasserbereitung und für künstliche Beleuchtung. Wer den Energieverbrauch und damit den Ausstoß von Treibhausgasen reduzieren will, muss deshalb im Bausektor ansetzen. In den letzten Jahren hat der Gesetzgeber die Vorschriften bereits schrittweise verschärft. Bald zieht er die Daumenschrauben noch fester an: Die Gebäude-richtlinie der EU „Directive on Energy Performance of Buildings“ (EPBD) gibt vor, dass ab 2021 neue Gebäude nach dem Standard von Niedrigstenergiehäusern errichtet werden müssen, öffentliche Bauten sogar schon ab 2019. Gebäude mit einer hohen Gesamteffizienz sollten dann nur noch wenig Energie für Heizung,

Schaufenster der Energietechnik: In dem neuen Institutsgebäude demonstrieren die Wissenschaftler die Praxistauglichkeit von neuartigen Kältespeichern und von Solarmodulen in der Fassade.

Highlights

Warmwasser, Lüftung und Kühlung beziehen. Die Vorschrift ist eine finanzielle und technologische Herausforderung. Das Freiburger Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, eine führende Forschungseinrichtung für regenerative Energie, hat bei einem eigenen Laborneubau nun gezeigt, wie Bauherren künftig selbst hohe Hürden meistern können. Der Neubau sieht zwar von außen aus wie ein normales Institutsgebäude, steckt aber voll innovativer Technik.

Das viergeschossige Gebäude mit einer Nettogrundfläche von 4200 Quadratmetern stellt enorme Anforderungen an die Klimatisierung, denn darin sind Labore untergebracht, die sehr sensibel auf Veränderungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit reagieren. In einem Raum, in dem Laser winzige Strukturen auf fotoaktive Materialien schreiben, darf die Temperatur nur um 0,1 Grad Celsius schwanken. Zudem haben die Maschinen einen erheblichen Kühlbedarf, der sogar mehr Energie benötigt als die Gebäudeheizung.

Die erste Idee für eine klimafreundliche Lösung war, das Grundwasser für die Kühlung anzuzapfen. Ein Grundwasserstrom ist zwar in erreichbarer Tiefe vorhanden, doch er wird von einem benachbarten Gebäude im Sommer zum Kühlen genutzt und dadurch aufgeheizt. Daher entschied sich das Planungsteam für eine ausgefallene Lösung: einen Kältespeicher mit Wasserfüllung.

Ein Kältespeicher hat bei der Klimatisierung eine ähnliche Funktion wie ein Pumpspeicherkraftwerk bei der Stromversorgung: Ist Kälte preiswert und reichlich vorhanden, etwa bei niedrigen Außentemperaturen, wird er gefüllt, bei hohem Kältebedarf wird er angezapft. Meist handelt es sich um einen zylindrischen Tank, möglichst hoch, damit sich die Flüssigkeit in seinem Inneren akkurat thermisch schichten kann: oben warm, unten kalt. Nur mit einer guten Schichtung lässt sich der Speicher optimal nutzen. Denn jede Vermischung reduziert die Kältemenge, die sich abzapfen lässt. In

Freiburg fehlte allerdings der Platz, um einen Tank aufzustellen. Außen ging es nicht, weil sich der Neubau passgenau zwischen alte Gebäude und Straßen einfügt, und innen nicht, weil der Maschinenpark jeden Quadratmeter benötigt.

Also musste der Tank unter den Keller ausweichen – die denkbar schwierigste Variante. Zum einen lastet das Gebäude darauf, sodass Wände und Bodenplatte sehr massiv ausgelegt werden mussten: 234 Kubikmeter Beton und 74 Tonnen Bewehrungsstahl verschlang die Kammer mit ihren 100 Quadratmetern Grundfläche. Vor allem aber war die geringe Höhe von lediglich 5 Metern eine Herausforderung. Es musste gewährleistet sein, dass sich die Wassersäule beim Be- und Entladen nicht durchmischt, obwohl der Temperaturunterschied zwischen oben und unten nur 4 bis 5 Grad Celsius beträgt. Die Wissenschaftler mussten sich etwas einfallen lassen. Eine Gruppe des Instituts für Mechanik und Thermodynamik der Technischen Universität Chemnitz simulierte und testete, bis sie schließlich spezielle Diffusoren entwickelt hatte, die fast keine Wirbel erzeugen. Von diesen Ergebnissen, sagt Doreen Kalz vom Fraunhofer ISE, die für das Energiekonzept des Neubaus zuständig ist, werden auch andere Bauprojekte profitieren können.

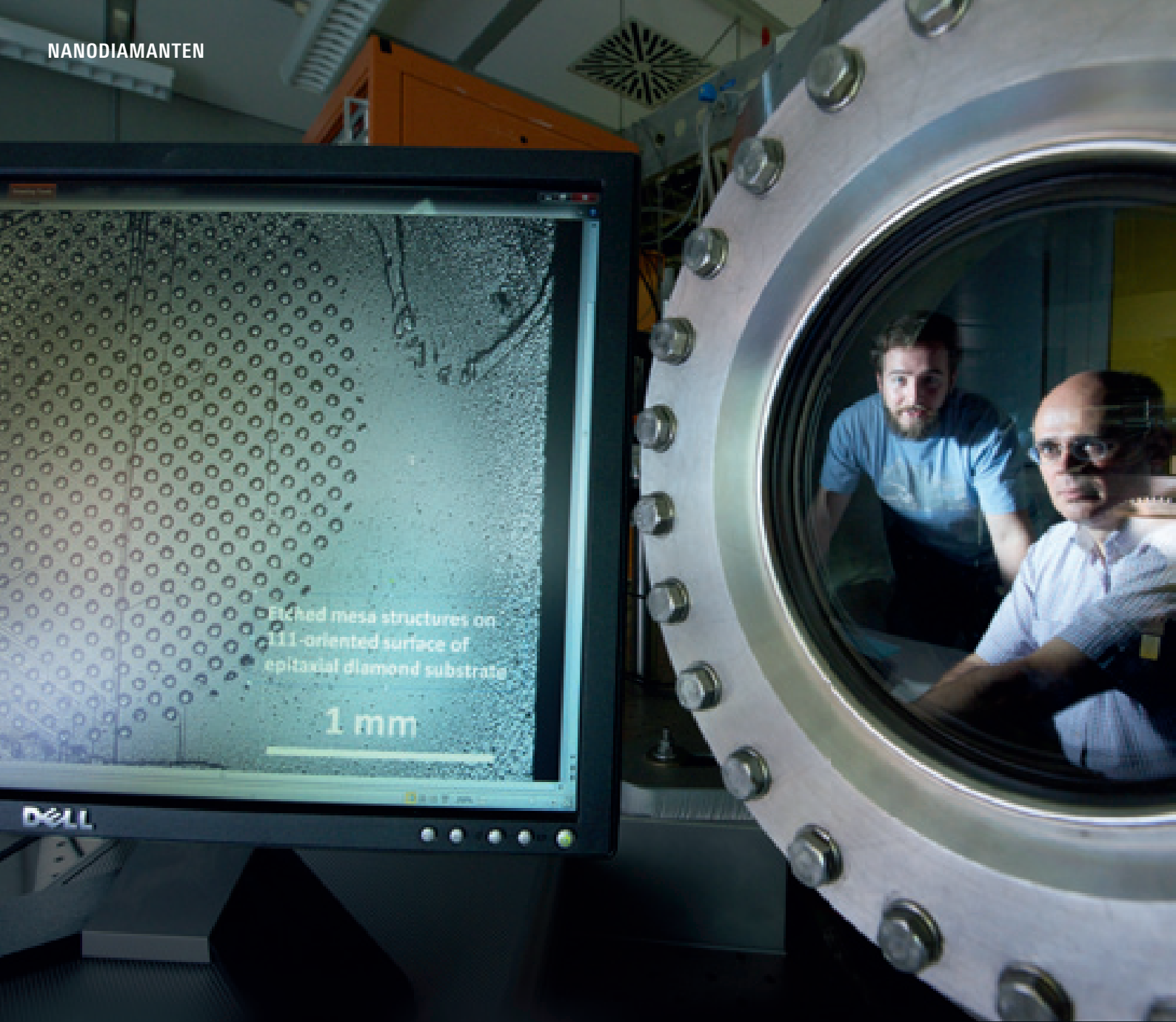
Strom aus der Hauswand

Ein weiteres Highlight des Gebäudes – wenn man von einer innovativen, sparsamen Wärmepumpe absieht, die Wärme und Kälte produzieren kann – sind Photovoltaik-Module, die in die Fassade eingelassen sind. Bisher sieht man die glitzernden Stromproduzenten nur auf Dächern oder freistehend auf Feldern und Wiesen. „Doch das reicht nicht aus, wenn die EU-Gebäuderichtlinie greift“, sagt Tilmann Kuhn vom Fraunhofer ISE. Er glaubt, dass dann die „gebäudeintegrierte Photovoltaik“, sein Spezialgebiet, gefragt sein wird. Derzeit hat sie einen schweren Stand. Zum einen, weil man an der Fassade weniger Strom ernten kann als auf dem Dach. Vor allem aber, weil

daß nötig sind. Der Markt hat sich aber auf Standardgrößen eingeschwenkt. Wer Maßanfertigungen braucht, muss sich derzeit an kleine Firmen wenden, die in Handarbeit produzieren und etwa den dreifachen Preis verlangen. „Das muss nicht sein“, meint Kuhn. Bei einer automatisierten Fertigung im großen Maßstab reduziere sich der Aufschlag auf nur noch 10 bis 30 Prozent. Er sieht hier eine Chance für die heimische Industrie.

Doch beim Institutsgebäude ging es weniger um Kosten, als darum, neue Wege aufzuzeigen. In die Frontfassade sind neuartige, leistungsstarke Module integriert, die Forscher am Fraunhofer ISE entwickelt haben. Sie fallen kaum auf, weil sie bündig mit den steinernen Fassadenelementen abschließen, also nicht überstehen. Andere Module, ebenfalls eine Entwicklung der Freiburger Solarexperten, stecken in den Fensterscheiben eines Seminarraums. Durch die schräge Anordnung der Zellen wirken sie wie eine Jalousie: Beim Blick von oben sind sie transparent, von unten dagegen undurchsichtig. So liefern sie nicht nur Strom, sondern bieten auch Sonnenschutz und senken den Kühlbedarf. Damit man einen freien Blick hat, sind die Module nur im unteren Teil der Fenster angebracht, vom Boden bis in Brüstungshöhe.

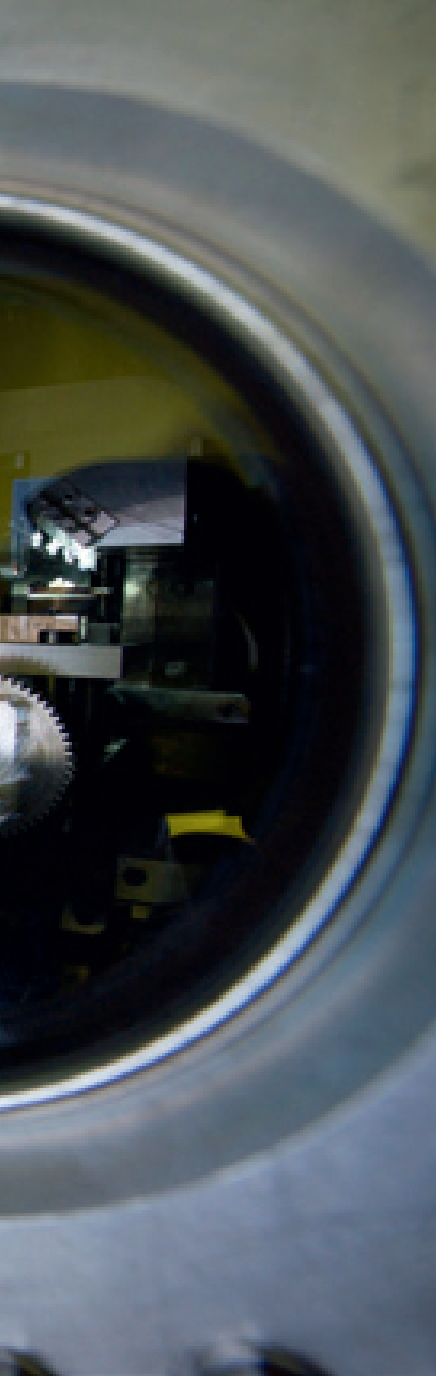
Das Gebäude, das 2013 fertiggestellt wurde, hat insgesamt 10,2 Millionen Euro gekostet, die sich Bund und Land je zur Hälfte teilen. Den Anteil des Landes von 5,1 Millionen Euro finanzierte die Baden-Württemberg Stiftung. Inzwischen ist das Haus an der Freiburger Heidenhofstraße selbst zum Forschungsobjekt geworden, denn die Klimatisierung wird mit zahlreichen Sensoren überwacht. Die Ergebnisse sollen zeigen, ob die Praxis das liefert, was die Theorie versprochen hat. Der Kältespeicher, das haben Thermosensoren bereits belegt, arbeitet einwandfrei. Das Wasser schichtet sich tatsächlich ruhig und wirbelfrei. Das Gebäude, davon ist Kalz überzeugt, „kann als Vorlage für Gewerbe- und Produktionsgebäude mit großem Kältebedarf dienen.“ ●



Kleine Blitze mit großer Wirkung

Physiker aus Stuttgart und Freiburg wollen die erste Lichtquelle bauen, die bei Raumtemperatur einzelne Photonen abgibt – aus Nanodiamant. Damit lassen sich Daten sicher verschlüsseln.

von Bernd Müller



Die Forscher Felipe Favero (links) und Andrej Denisenko spiegeln sich in der Scheibe eines „Implanters“. Damit lassen sich Defektzentren in Diamant platzieren. Sie verbergen sich unter den Mikrolinsen, die auf dem Monitor links zu sehen sind.

Der Physiker Jörg Wrachtrup zeigt eine künstlerische Darstellung seiner Arbeit: Die Stangen stellen Laserstrahlen dar, die Kugel symbolisiert einen Spin, die Stelen tragen Formeln.



Es gibt weißen Sand, gelben Sand in allen Schattierungen und schwarzen Sand, etwa auf einigen Kanareninseln. Aber gibt es auch grünen Sand? Jörg Wrachtrup dreht das kleine Fläschchen zwischen den Fingern und lässt die leuchtend grünen Körnchen wie in einer Sanduhr innen an der Glaswand nach unten rieseln. Für Sand sind die Kristalle irgendwie zu farbig und zu perfekt geformt. „Die Farbe kommt vom Stickstoff“, verrät der Forscher, der das 3. Physikalisches Institut der Universität Stuttgart leitet. Und warum der perfekte Glanz? „Weil es Diamanten sind.“ Das ist kein Wunder: Nanodiamanten sind Wrachtrups Spezialgebiet. In die winzigen Edelsteine baut er gezielt Verunreinigungen ein – in diesem Fall Stickstoff-Atome – und zwingt ihnen so Eigenschaften auf, die ein normaler Diamant nicht hat. Zum Beispiel leuchten seine präparierten Exemplare, wenn man eine elektrische Spannung anlegt.

Im Projekt „Spintronik bei Raumtemperatur – Elektrolumineszenz einzelner Defekte und spinabhängiger Ladungstransport“ der Baden-Württemberg Stiftung hat sich der Stuttgarter Quantenphysiker vorgenommen, eine sogenannte Einzelphotonen-Quelle zu bauen, die diesen Namen wirklich verdient. Solche Lichtquellen senden ein einzelnes Lichtteilchen

nach dem anderen aus – niemals zwei Photonen gleichzeitig und auch nicht längere Zeit gar keines. Ideal wäre es, wenn alle paar Nanosekunden ein Photon den Kristall verlassen würde. Echte Einzelphotonen-Quellen gibt es bisher nicht. Zwar verkauft das Schweizer Unternehmen ID-Quantique ein Produkt unter diesem Namen, doch das ist eine konventionelle Lichtquelle, in der Laserlicht bloß so stark abgeschwächt wird, dass nur noch einzelne Photonen herauskommen. Aber manchmal sind es eben auch zwei oder keines – nicht optimal für Anwendungen in der Sicherheitstechnologie.

Quanten verraten jeden Lauscher

Das Ziel: die abhörsichere Datenübertragung via Glasfaserkabel. Das gelingt mithilfe von Quantenkryptographie. Mit Lichtquanten lassen sich verschlüsselte Informationen übertragen. Abhören ist möglich, aber Sender und Empfänger erkennen sofort, wenn die Leitung angezapft wurde. Das verdanken sie einer besonderen Eigenschaft der Quantenphysik: Jede Messung verändert den Zustand von Mikroobjekten. Um Lichtteilchen in diese Situation zu bringen, braucht man Einzelphotonen-Quellen. Je perfekter sie arbeiten, desto sicherer und schnell-

ler lassen sich damit Daten übermitteln. „Unechte“ Einzelphotonen-Quellen gibt es seit rund zehn Jahren. Neben den abgeschwächten Lasern von ID-Quantique existieren auch andere Konzepte – etwa von Peter Michler, dem Direktor des Instituts für Halbleiteroptik und Funktionelle Grenzflächen der Universität Stuttgart. Er erzeugt Licht aus Quantenpunkten – das sind winzige Halbleiterstrukturen, die nur aus wenigen Hundert Atomen bestehen. Doch die Herstellung klappt nur bei extrem tiefen Temperaturen von rund 10 Kelvin (minus 263 Grad Celsius). Das ist in Ordnung im Labor, aber untauglich für ein kommerzielles Produkt.

Mit seinen echten Einzelphotonen-Quellen ist Jörg Wrachtrup, der 2014 mit dem Max-Planck-Forschungspreis ausgezeichnet wurde, auf der Überholspur. Die neuartigen Quantenemitter funktionieren wie herkömmliche Halbleiter-Leuchtdioden: Man legt an sie eine elektrische Spannung an, dann leuchten

sie. Dieses Zünden des Leuchtens gelingt bei Zimmertemperatur, ohne weitere Hilfsmittel. Das Geheimnis steckt im Aufbau des Diamanten: Wie eine herkömmliche Diode aus Silizium hat er einen negativ-dotierten (n) und einen positiv-dotierten (p) Bereich. Die sogenannte Dotierung erfolgt durch gezielte Verunreinigung mit Fremdatomen – die n-Dotierung mit Phosphor, die p-Dotierung mit Bor. „Das Dotieren mit Bor ist einfach, mit Phosphor dagegen ist es eine hohe Kunst“, sagt Wrachtrup.

Ein Fremdatom je 10 Millionen Atome

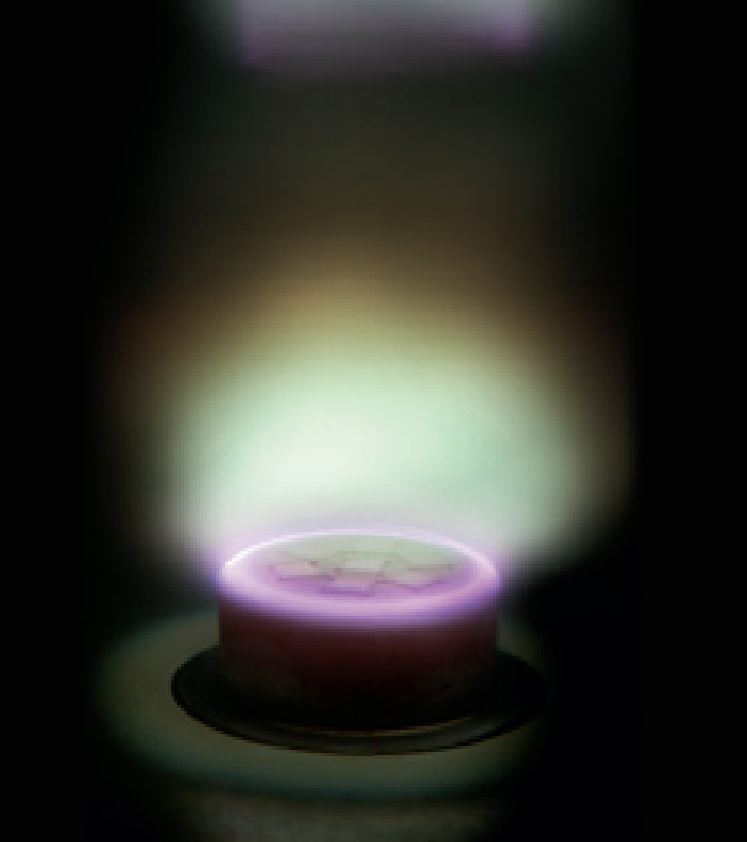
Diese Kunst beherrscht das Team von Christoph E. Nebel am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF in Freiburg. Die Physiker dort sind Experten darin, gezielt Verunreinigungen aus einzelnen Atomen in Diamanten einzubringen. Und sie können ultrareinen Diamant herstellen. Vor allem diese Fähigkeit

ist es, die sie als Partner im Projekt der Baden-Württemberg Stiftung einbringen. Denn zwischen der n- und p-dotierten Schicht der Leuchtdiode liegt noch eine dritte, extrem reine Diamantschicht. Auf etwa 10 Millionen Kohlenstoff-Atome kommt dort nur ein einziges Fremdatom – das ist zurzeit Weltspitze. Und in diesem Niemandsland aus Kohlenstoff platzieren die Freiburger genau ein Stickstoff-Atom. Dieses sogenannte Farbzentrum gibt den Diamant-Kristallen in Jörg Wrachtrups Fläschchen ihren grünen Schimmer. Durch Kombination des Stickstoff-Atoms mit einer Kohlenstoff-Fehlstelle – einem leeren Platz im Kristallgitter – entsteht die Einzelphotonen-Quelle, die Photon für Photon aussendet, wenn man eine elektrische Spannung anlegt.

Rieselnden Sand in kleinen Flaschen kann Jörg Wrachtrup aber nicht gebrauchen. Er benötigt für seine Einzelphotonen-Quellen winzige Stäbchen aus Diamant, 200 Nanometer (0,0002 Milli-



Mithilfe von Mikrowellen und einem Plasma stellen Teamleiter Christoph Nebel und Doktorandin Claudia Widmann in dieser Anlage Diamant von höchster Reinheit her.

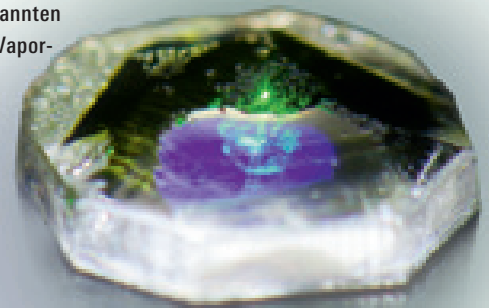


Produktive Wolke: In dem leuchtenden Plasma aus Wasserstoff und Methan wachsen neue Diamanten auf sieben kleinen Substraten desselben Materials.

geeignet. Und es ist das einzige fremde Substrat, auf dem Diamant wächst. Die Diamant-Technologie werde sich in den nächsten Jahren schnell hin zu Halbleiter-Anwendungen entwickeln, sodass eine Massenfertigung von Bauelementen möglich werde, verspricht Christoph Nebel.

Der Stuttgarter Physiker Jörg Wrachtrup verfolgt mit seinem Team andere Ziele. Er will den Klimawandel bremsen. Dazu nutzt er eine Eigenschaft seiner Diamanten, die man aus der Welt der Silizium-Halbleiter kennt. Leuchtdioden verwandeln Strom in Licht, Solarzellen Licht in Strom. Die Nanodiamanten können das auch. Beleuchtet man sie, erzeugen sie

Glänzendes Resultat: ein Diamant-Kristall nach der Abscheidung im sogenannten Mikrowellen-Plasma-Chemical-Vapor-Deposition-Reaktor.



meter) dünn und fünf Mikrometer (0,005 Millimeter) lang. An deren Spitze lässt sich eine Glasfaser andocken, die die ausgesandten Lichtteilchen weiterleitet.

Die Herstellung der begehrten Diamant-Leuchtdioden grenzt an Alchemie. Das Fraunhofer-Team gibt Diamant-Kristalle als Substrat in einen Mikrowellenofen und pumpt ein Gasgemisch aus Methan und Wasserstoff hinein. Die Mikrowellen lassen darin ein Plasma entstehen, wobei das Methan ein Wasserstoff-Atom verliert. Das Restmolekül mit einem Kohlenstoff-Atom lagert sich auf den Diamant-Kristallen ab, der Kohlenstoff bildet mal Graphit und mal neuen Diamant. Weil der aggressive Wasserstoff den Graphit wegätzt, den Diamant aber nicht, wächst langsam Schicht für Schicht ein ultrareiner Diamant – mit einer Geschwindigkeit von einem Mikrometer pro Stunde. Wie das Team um Christoph Nebel darin Bor-, Phosphor- und einzelne Stickstoff-Atome einbaut, ist Betriebsgeheimnis. „Bei der Diamant-Elektronik sind wir in Deutschland konkurrenzlos“, sagt der Fraunhofer-Forscher. Nur in Frankreich und Japan gebe es ähnlich versierte Gruppen.

In dem Projekt der Baden-Württemberg Stiftung haben sich in Freiburg und Stuttgart zwei Teams zusammengetan, deren Ziele unterschiedlicher nicht sein könnten. Das Team am Freiburger Fraunhofer IAF hat sich auf die Leistungselek-

tronik eingeschossen. Die wird überall dort gebraucht, wo man starke Ströme schalten muss, etwa in den Umrichtern von Wind- oder Photovoltaik-Kraftwerken. Für Christoph Nebel ist das bisher gebräuchliche Silizium da nur ein Zwischenschritt hin zur Diamant-Elektronik. „In Diamant sind die Ladungsträger beweglicher und die Wärmeleitfähigkeit ist besser“, schwärmt der Physiker. „Diamant ist konkurrenzlos“. Der Haken: Es gibt keine Wafer aus Diamant. Wafer sind die dünnen Scheiben, die als Basis für die Herstellung elektronischer Bauelemente dienen. Aus Silizium gibt es Wafer mit Durchmessern von bis zu 12 Zoll (30 Zentimeter). Viele Hundert Mikrochips lassen sich daraus herstellen.

Auf dem Weg zum Massenprodukt

Die Diamant-Körnchen, die das Freiburger Fraunhofer-Team für die Quantenphysiker in Stuttgart herstellt, sind davon noch meilenweit entfernt. Denn um einen Wafer aus Diamant wachsen zu lassen, braucht man echten Diamant in Massen als Ausgangsmaterial. „Da würde sogar Queen Elizabeth vor Neid erblassen“, scherzt Nebel. Derzeit bemühen sich die Forscher, Diamant-Wafer zu entwickeln, die als Grundlage keinen Diamant benötigen, sondern das Metall Iridium. Es ist billiger und damit für größere Wafer

Elektronen. Der Diamant will diese negativen Ladungsträger wieder loswerden. „Eine sehr ungewöhnliche Eigenschaft“, sagt Wrachtrup. Mit den Elektronen könnte man Kohlendioxid spalten und so aus dem Treibhausgas reinen Kohlenstoff und Sauerstoff erzeugen. Dieser Mechanismus ist der Motor allen Lebens: die Photosynthese, dank der Pflanzen wachsen und gleichzeitig Sauerstoff abgeben. Die Physiker um Wrachtrup wollen große, mit Diamantenstaub beschichtete Solarpaneele bauen, die das Sonnenlicht sammeln und das Kohlendioxid, etwa aus Auto- oder Kraftwerksabgasen, spalten.

Theoretisch ist so ein photochemischer Katalysator möglich – in der Praxis aber ist er schwer herzustellen. Denn um in den Stickstoff-Zentren im Diamant einen Ladungsträger herauszulösen, braucht es die Energie zweier Lichtquanten aus dem Sonnenlicht, was hohe Lichtintensitäten erfordert. Im Labor geht das. Aber mit Sonnenlicht? „Das hat noch keiner versucht“, sagt Jörg Wrachtrup. Vielleicht werden er und sein Team bald die Ersten sein, denen der Versuch gelingt. ●

Auf Luft gebaut

Warum sind Seeigel-Stacheln so robust? Tübinger Wissenschaftler haben die Antwort gefunden. Jetzt dürfen sie ihre Erkenntnisse in einem Sonderforschungsbereich erweitern.

von Bernd Müller

Seeigel: Das sind nicht nur die nadelbewehrten schwarzen Diademeel, die schmerzhaften Wunden reißen, wenn man am Strand ohne Schuhe ins Wasser geht. Seeigel gibt es auch in Varianten ohne spitze Stacheln, etwa *Phyllacanthus imperialis* und *Heterocentrotus mamillatus*. Dieser sieht so aus, als hätte jemand dicke Esstäbchen aus dem Sushi-Lokal in eine Schokokugel gespießt. Außen braun, ähneln die Stacheln innen weißer Tafelkreide. Sie sind auch ebenso leicht und porös. Mit den Stiften an seinem Körper verkeilt sich der Stachelhäuter in kleinen Höhlen der Karibik an Felsen, wo ihn weder Wellen noch Drückerfische herausbrechen können. Selbst rohe Gewalt überstehen die bizarren Tierchen.

Vorbild für Ingenieure und Architekten: Aus dem Aufbau der Seeigel-Stacheln (hier das Skelett eines Lanzenseiegels, *Phyllacanthus imperialis*) lassen sich konstruktive Anregungen für Schutzhelme, Motorhauben und Gebäudestrukturen gewinnen.

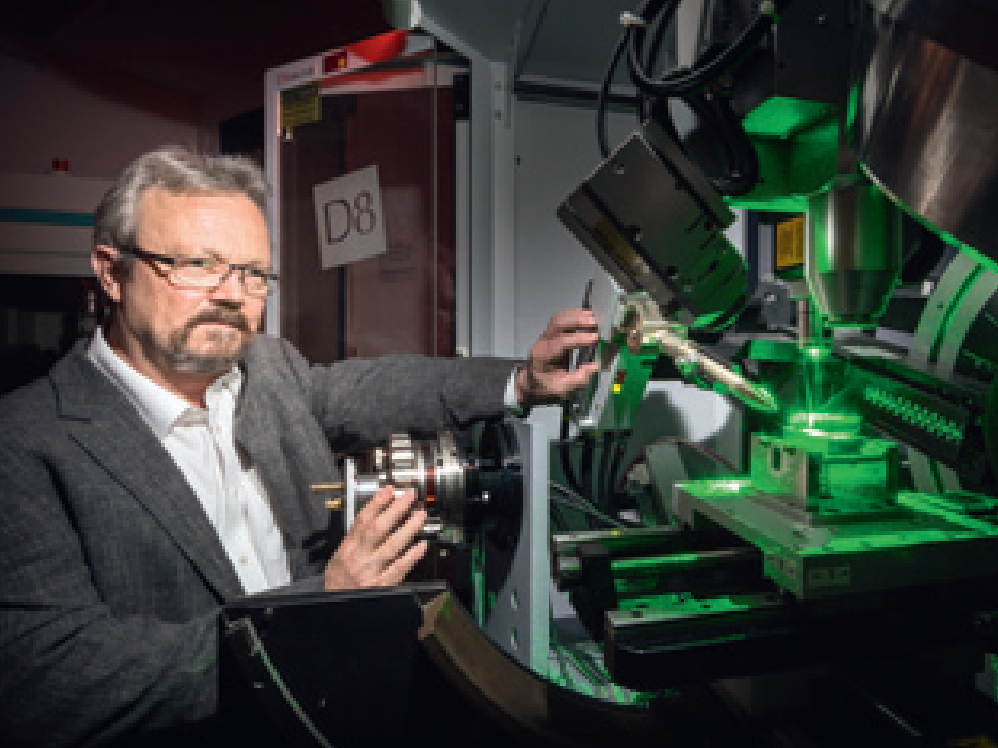
Klaus Nickel, Professor für angewandte Mineralogie an der Universität Tübingen, würde das Material der Stacheln gerne nachbauen – für Sturzhelme oder als Crashelement an Autos. In einem Projekt der Baden-Württemberg Stiftung hat er untersucht, was die Stacheln der Seeigel so einzigartig macht. Es ist ihr innerer Aufbau: Die Gebilde aus Kalkspat (Kalzit) bestehen zu 60 Prozent aus Luft, sind also sehr porös und erzeugen weder Auf- noch Abtrieb. Sonst würde der Seeigel an der Wasseroberfläche dümpeln oder zu Boden sinken. Der Stachel ist kein einzelner Kristall, sondern besteht aus vielen „Mesokristallen“: rund 50 Nanometer kleinen Einkristallen aus Kalkspat. Drückt man

ein Stück Kalkspat zusammen, würde er einfach abscheren und durchbrechen – wie man das von Porzellan kennt. Doch der Stachel des Seeiegels sackt nur ein paar Millimeter zusammen, dann ist er wieder stabil. Ein hungriger Drückerfisch – oder die Presse im Laborexperiment – muss erneut Druck aufbauen, bis die nächste Schicht bricht. Der Seeigel gibt zwar nach, aber eben immer nur ein bisschen.

Spitze Kappen schützen den Kern

Das Team in Tübingen hat per Computertomografie untersucht, wie der Seeigel das macht. Das Bild aus dem Röntgen-Scanner zeigt, dass die Mesokristalle zu größeren Strukturen zusammengefasst sind, die wie spitze Kappen aufeinander stecken. Sie sorgen dafür, dass das Mate-





Dorn auf dem Experimentiertisch:
Der Tübinger Mineraloge Klaus
Nickel untersucht die innere
Struktur eines Seeigel-Stachels
mithilfe von Röntgenstrahlung
und grünem Laserlicht.

rial unterhalb einer Zone, in der sich der Kristall beim Zusammenpressen quasi pulverisiert, intakt bleibt.

Nickel ist fasziniert: „Die Natur baut hierarchisch.“ Ist ein mechanisches Prinzip ausgereizt – hier die Stabilität der Mesokristalle –, baut sie einfach im größeren Maßstab ein neues darüber: die Kappen. Und die Natur ist erfinderisch: Für jedes mechanische Problem findet sie eine Lösung. Zusammen mit Freiburger Forschern untersuchen die Tübinger auch die erstaunlich harten Macadamianüsse, die mit normalen Nussknackern nicht zu öffnen sind. Und Pomeles: die großen Pampelmusen sind im Gegensatz zu den Nüssen so leicht verformbar, dass sie beim Aufprall auf dem Boden liegen bleiben, ohne nochmal hochzuspringen. Ultrahart und ultraweich: „Die Natur hat viele Methoden, um Energie unschädlich zu machen“, schwärmt Nickel.

Im Projekt der Stiftung hat seine Arbeitsgruppe Konzepte getestet, mit denen sich das Seeigel-Wundermaterial künstlich herstellen lässt. Gut klappt diese Methode: Man lässt eine Suspension aus Aluminiumoxid, Kartoffelstärke und Wasser trocknen. Die fein verteilten Stärketeilchen zersetzen sich beim anschließenden Erhitzen und bilden Poren, während das Oxid zusammenbäckt. Zurück bleibt das poröse Aluminiumoxid, das ähnliche Eigenschaften hat wie der Kalzit des Seeigels – aber nur fast. „Noch sind die mechanischen Eigenschaften nicht ganz so gut wie beim Seeigel“, gibt Nickel zu. Das robuste

Tierchen baut seine Stacheln nach einem anderen Prinzip: Es drückt Flüssigkeit durch den porösen Stachel in eine Art Haut, unter der mithilfe von Proteinen Kalk ausgeschieden wird. Daraus bilden sich dann geordnete kleine Kristalle. Allerdings hatte die Natur auch viel Zeit, um diese pfiffige Methode zu entwickeln: Seeigel leben seit rund 500 Millionen Jahren auf der Erde, entsprechend perfektioniert ist ihr Stachelschutz.

Erdbebenschutz nach Seeigel-Art

Für das Material der Seeigel-Stacheln gibt es viele Anwendungen, bei denen die Energie eines Aufpralls geschluckt werden muss. Schutzhelme oder fußgängerfreundliche Motorhauben an Autos wurden schon genannt. Auch ein Erdbebenschutz wäre denkbar. Vielen hat sich der Einsturz des World Trade Centers ins Gedächtnis gebrannt. Die beiden Türme wurden oben von den Flugzeugen getroffen, stürzten aber wie in einer Kettenreaktion Stockwerk für Stockwerk in sich zusammen. Wären sie riesige Seeigel-Stacheln gewesen, wäre das nicht passiert. Dann hätten einige Etagen die Energie des Einschlags geschluckt, während die Struktur darunter intakt geblieben wäre.

Solche Ideen greift der Sonderforschungsbereich 141 auf, den die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) 2014 bewilligt hat. „Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien in Biologie und Architektur – Analyse, Simulation und Umsetzung“

ist als ein Transregio-Sonderforschungsbereich angelegt. Das heißt, er kombiniert die Expertise mehrerer Regionen oder Universitäten – in diesem Fall aus Tübingen, Stuttgart und Freiburg. Die Partner wollen prüfen, ob man Baustoffen wie Beton Seeigel-Eigenschaften beibringen kann. Ein Augenmerk liegt auf der Skalierung, also etwa auf der Frage, wie man nach den Prinzipien, die man aus den nur zentimetergroßen Stacheln mit ihren Nanometerkristallen gelernt hat, Wolkenkratzer bauen kann und wie die Natur dieses Problem lösen würde. Das Team an der Universität Stuttgart möchte außerdem wissen, welche anderen nützlichen Funktionen solche Materialien hätten. Taugt eine Hausfassade nach dem Vorbild des Seeigels als Wärmedämmung? Und kann das Material Feuchtigkeit aufnehmen wie ein Schwamm? Wegen der großen Porosität ist das wahrscheinlich. Das wäre interessant etwa für den Bau von Fahrradhelmen, unter denen man nicht schwitzt.

Mit dem Projekt, in dem die Wissenschaftler aus Tübingen mit einem Team um Thomas Stegmaier am Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf bei Esslingen zusammengearbeitet haben, hat die Baden-Württemberg Stiftung einen guten Riecher bewiesen. Sie hat gezeigt, wie man mit relativ wenig Geld aussichtsreichen Forschungsthemen zum Durchbruch verhilft. Insgesamt finanzierte die Stiftung das Projekt „Neue Materialien für leichte, stoffdurchlässige Einschlagschutzsysteme: Seeigel als Modellsystem“ mit rund 360 000 Euro. Davon flossen zwei Drittel nach Tübingen und ein Drittel nach Denkendorf. Der neue SFB erhält von der DFG gut 9 Millionen Euro über knapp vier Jahre. Klaus Nickel betont: „Ohne das Projekt der Baden-Württemberg Stiftung würde es den Sonderforschungsbereich nicht geben.“

Auf dem Treppchen: Materialien der Superlative

Das derzeit **leichteste** Material der Welt ist Aerographen – ein Gemisch aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen, Graphen und viel Luft. Die Dichte dieses Feststoffs ist geringer als die von gasförmigem Helium und beträgt nur etwa ein hundertstel der Dichte von Styropor.

Eine **extrem hohe** Dichte haben Neutronensterne: Ein Kubikzentimeter wiegt bis zu 2,5 Billionen Tonnen. Ein Neutronenstern-„Würfelzucker“ würde also ziemlich schwer im Magen liegen.

In der Medizin und Kosmetik kennt man es unter dem Namen Botox: Botuliumtoxin Typ A ist eines der **stärksten bekannten Gifte**. Ein Gramm davon könnte eingeatmet weit mehr als eine Millionen Menschen töten.

Betrachtet man das gesamte Universum, ist das **häufigste Element** Wasserstoff. Auf der Erde hingegen herrschen Sauerstoff, Eisen und Silizium vor – allerdings mit sehr unterschiedlicher Verteilung: Eisen befindet sich vor allem im Erdkern, Silizium in der Erdkruste und Sauerstoff macht einen Großteil der Ozeane aus.

Das **seltenste** Element der Erde heißt Astat. Während jedes Jahr etwa 2500 Tonnen Gold aus der Erde geholt werden, schätzt man das weltweite natürliche Vorkommen des radioaktiven Halogens auf lediglich 25 bis 50 Gramm.

Bei Normaldruck sind am absoluten Nullpunkt (minus 273,15 Grad Celsius oder 0 Kelvin) alle Elemente fest – außer Helium, das sich in einer flüssigen oder suprafluiden Phase befindet. Der **Siedepunkt** des Edelgases liegt bei 4 Kelvin.

Das extrem seltene, silberweiß glänzende Übergangsmetall Rhenium wird hingegen erst bei fast 5600 Grad Celsius zu einem Gas: die **höchste bekannte Siedetemperatur**.

Die **höchste Schmelztemperatur** ist die von Tantalhafniumkarbid: 4215 Grad Celsius. Zum Vergleich: Stahl schmilzt je nach Legierungsanteilen bei 1200 bis 1500 Grad Celsius.

Diamant ist der **härteste** natürliche Stoff, bei Hitze aber mit Bornitrid schleifbar. Inzwischen lassen sich auch härtere Materialien künstlich herstellen, zum Beispiel aggregierte Diamant-Nanostäbchen, die natürlichen Diamant ritzen.

Mit einem Preis von etwa 100 Millionen Euro pro Kilogramm sind Diamanten auch die **teuersten** Edelsteine. Noch weitaus teurer aber wäre Anti-Wasserstoff, wenn man ihn kaufen könnte. Er lässt sich nur mit immensem Aufwand und für wenige Minuten im Labor erzeugen. Geschätzte Kosten pro Kilogramm: 60 Billionen Euro.

