



WSS

WERNER SIEMENS-STIFTUNG

WSS

WERNER SIEMENS-STIFTUNG

Report 2025

Wir fördern Innovationen in Technik und Natur- wissenschaften

Die Werner Siemens-Stiftung unterstützt pionierhafte technische und naturwissenschaftliche Projekte in Forschung und Lehre an Universitäten und Hochschulen vornehmlich in Deutschland, Österreich und in der Schweiz, die höchsten Ansprüchen genügen und zur Lösung relevanter Probleme unserer Zeit beitragen. Sie finanziert die Startphase dieser innovativen Projekte mit namhaften Beträgen – mit dem Ziel, dass die angeschobenen Projekte nach ein paar Jahren eigenständig weiterlaufen oder die daraus resultierenden Innovationen industriell genutzt werden. Zudem fördert die Werner Siemens-Stiftung Initiativen in den Bereichen Erziehung, Ausbildung und Nachwuchsförderung, insbesondere in den Sparten Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik, Medizin und Pharmazie.

Vorwort

Spitzenforschung ist hochkomplex. Um zu beurteilen, wie hochkarätig und aussichtsreich ein wissenschaftliches Projekt ist, braucht es enorme Erfahrung und immenses Fachwissen. Beides bringt der Wissenschaftliche Beirat der Werner Siemens-Stiftung (WSS) mit. Nur dank der Expertise und der hervorragenden Arbeit dieses Gremiums kann die WSS ihrem Anspruch gerecht werden: Forschungsprojekte zu fördern, die massgeblich dazu beitragen, wichtige Herausforderungen unserer Zeit zu bewältigen.

Altershalber kommt es im Wissenschaftlichen Beirat zu Veränderungen. Vor einem Jahr übernahm Michael Hengartner (Seite 144) den Vorsitz von Gianni Operto. Auf Ende 2025 nun ist Matthias Kleiner zurück-

getreten (Seite 148). Als ehemaliger Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Leibniz-Gemeinschaft kennt er die Spitzenforschung in Mitteleuropa wie kaum ein Zweiter. Von seinem Wissen durfte die WSS 13 Jahre lang profitieren – nicht zuletzt, als er den Vergabeprozess des WSS-Jahrhundertprojekts souverän leitete. Im Namen des Stiftungsrates und des Beirates der Familie bedanke ich mich bei Matthias Kleiner für die grossartige Arbeit.

Sein Nachfolger ist ebenfalls eine Ausnahmeerscheinung in der Forschungswelt. Es freut mich sehr, dass wir Chemie-Nobelpreisträger Benjamin List als neues Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats gewinnen konnten (Seite 154). Ich wünsche ihm einen guten Start – und bin überzeugt,

dass der Wissenschaftliche Beirat auch in den kommenden Jahren viele überraschende, förderungswürdige Projekte aufspüren wird.

Genau wie dieses Jahr: Im vorliegenden Report stellen wir Ihnen nicht weniger als fünf neu unterstützte Projekte vor. In Bern und Basel arbeitet ein Forschungsteam an einem neuartigen Quantencomputer-Ansatz (Seite 36). In Freiburg im Breisgau wollen Forschende ultradünnen Solarzellen zum Durchbruch verhelfen (Seite 62). In Dresden tüftelt ein Team an Methoden, um Metallbauteile ohne energieintensives Einschmelzen zu recyceln und zu verbessern (Seite 26). In Zürich entwickelt eine Gruppe ein Kontrastmittel, das Komplikationen im Körper frühzeitig anzeigt (Seite 98). Und

ebenfalls in Zürich testen Forschende einen Hautersatz, der Kindern mit grossflächigen Verbrennungen neue Perspektiven eröffnet (Seite 108).

Bereits in voller Fahrt befindet sich das WSS-Forschungszentrum catalaix in Aachen, das den Ideenwettbewerb zum 100-jährigen Bestehen unserer Stiftung für sich entschied. Sein katalytischer Ansatz, um eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe zu schaffen, ist enorm breit – und bereits liegen erste Ergebnisse vor (Seite 78).

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre!

Hubert Keiber,
Obmann des Stiftungsrats der
Werner Siemens-Stiftung

Inhalt

Report 2025

- 2 Förderleitlinien
- 4 Vorwort
- 6 Inhalt
- 8 Forschung im Bild

Fokus: Materialien

- 26 **Metall-Recycling neu gedacht**
Das neu geförderte Projekt 2nd Life Metal Components will aus Alblech Hightech-Bauteile fertigen.
- 36 **Chemie, Physik – und ein Quantensprung**
Ein stabiler, effizienter Quantencomputer ist das Ziel des neu unterstützten Forschungszentrums MoIQ.
- 50 **Die Liste**
Zwölf verblüffende Fakten zu Materialien.
- 54 **Werkstoffe von morgen**
Drei WSS-Projekte arbeiten am Materialbaukasten der Zukunft.
- 62 **Solarzellen von höchster Effizienz**
Ein neu unterstütztes Projekt will höchsteffiziente Tandem-Solarzellen marktfähig machen.
- 72 **«Ohne Materialforschung keine Fortschritte»**
Empa-Direktorin Tanja Zimmermann über ultraleichte Brückenkonstruktionen, hitzebeständige Drohnen und lebenden Zement.

WSS-Forschungszentrum catalaix

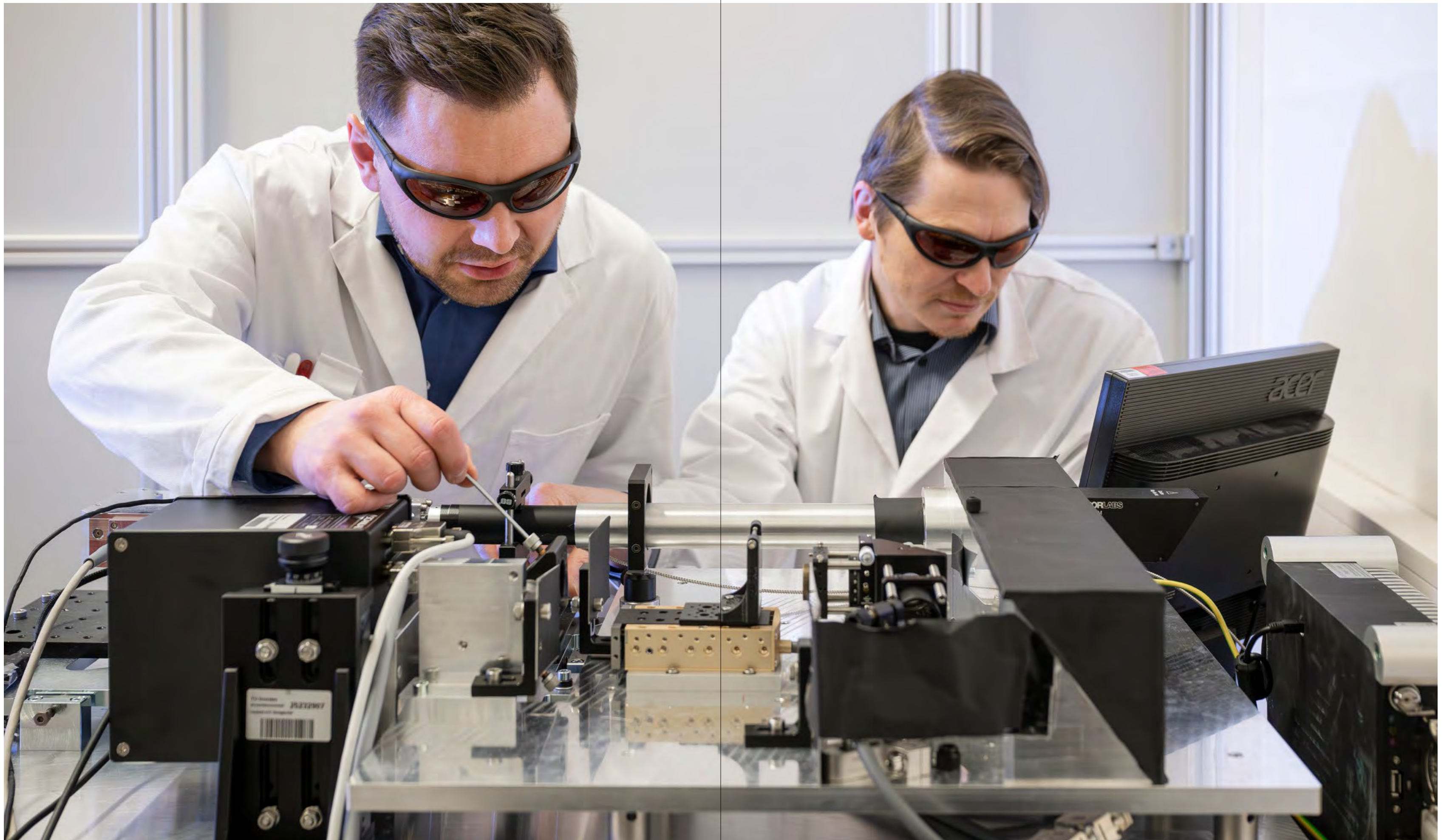
- 80 **Kompass im Kunststoff-Dschungel**
Der Arbeitsbereich Systembewertung identifiziert sinnvolle Anwendungsfelder für die catalaix-Chemie.
- 86 **Die Natur hilft mit**
Mikroorganismen haben eine Vielzahl von Enzymen entwickelt, die sich zum Kunststoffabbau nutzen lassen.
- 89 **Welt aus Plastik**
Kunststoffe prägen unseren Alltag – aber nicht jeder Kunststoff eignet sich für jede Anwendung.
- 92 **Restströme aus dem Gelben Sack**
Was in der Sortieranlage übrig bleibt.

Laufende Projekte

- 98 **Frühwarnsystem im Körper**
In einem neu unterstützten Projekt entsteht ein Kontrastmittel, das OP-Komplikationen anzeigt.
- 108 **Haut aus dem Labor**
Ein innovativer Hautersatz wird dank WSS-Finanzierung erstmals bei Menschen getestet.
- 110 **Fit für die Zukunft**
Das Werner Siemens Imaging Center holt mit dem Exzellenzcluster iFIT eine Millionenförderung ab.
- 112 **Kontrolle über Quanteneigenschaften**
Topmoderne Rastertunnelmikroskope und hochkarätige Publikationen prägen das CarboQuant-Jahr.
- 114 **Welche Interessen prägen die Klimapolitik?**
Das Projekt CERES besetzt die vorgesehene Professur für politische Ökonomie in der Klimapolitik.
- 116 **Digital überwacht**
Eine Studie am Zentrum für digitales Vertrauen zeigt, wie Menschen Überwachungsmethoden beurteilen.
- 118 **«Talentförderung stärkt Innovationskraft»**
Die WSS führt ihre Talentförderung weiter – zur grossen Freude der Schweizerischen Studienstiftung.
- 122 **Suchen, rechnen, testen**
Das Team von Benjamin List verfolgt mehrere Strategien auf dem Weg zur künstlichen Photosynthese.
- 124 **Schalten, praktisch ohne Energie**
Das Atomschalter-Projekt erhält eine Zusatzförderung und nimmt das Schaltenergie-Limit ins Visier.
- 126 **Abtauchen in der Ägäis**
Das MARUM-Team hat vor der griechischen Insel Milos sein Tiefsee-Monitoring-System erfolgreich getestet.
- 128 **Forschungswunder an der Weltausstellung**
Das robotergesteuerte Laserskalpell von MIRACLE II reiste an die Expo 25 in Japan.
- 130 **Viel Betrieb im Bedretto-Tunnel**
Vielversprechende Projekte und ein neuer Seitentunnel für das BedrettoLab im Gotthardmassiv.
- 132 **Zuverlässige Diagnose von Hirntumoren**
Dank eines Medtech Entrepreneur Fellowships bringt Yanan Zhang einen neuartigen Bluttest auf den Markt.
- 134 **Intelligentes Implantat auf dem Prüfstand**
In seinem letzten Förderjahr weist das Projekt Smarte Implantate noch einmal beachtliche Erfolge vor.
- 136 **Wasserstoff im Gestein**
Das Team von Martin Saar will mit seinem neuartigen MRI-Gerät ein Wasserstoff-Rätsel zu lösen.
- 138 **Prall gefüllte Pipeline**
Fortschritte, Publikationen, Förderzusagen: Beim Projekt Paläobiotechnologie läuft es rund.
- 140 **Die Knorpelregeneration rückt näher**
Die verschiedenen Arbeitsgruppen im Projekt TriggerINK machen rasche Fortschritte.

Die Werner Siemens-Stiftung

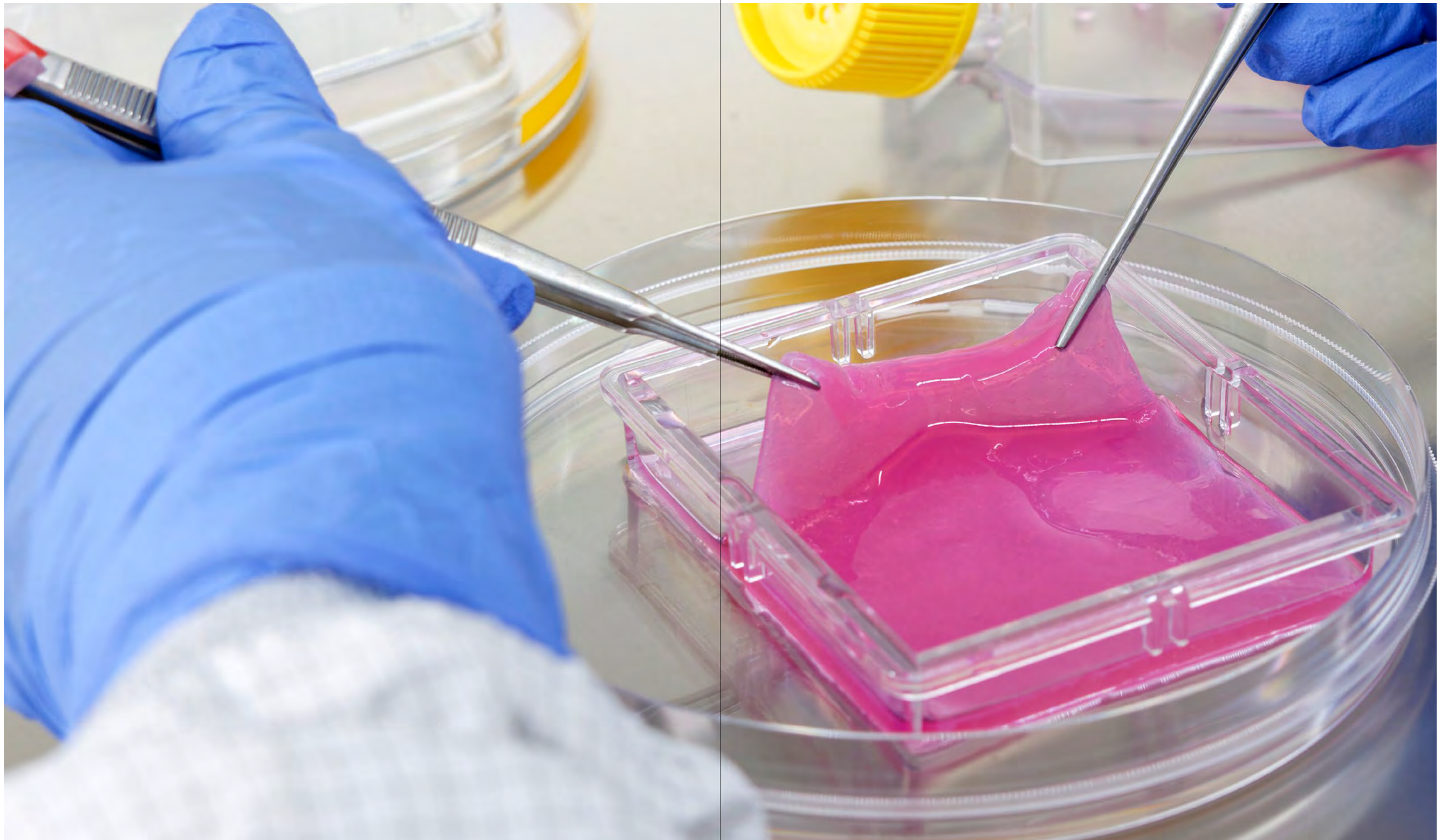
- 144 **«Ein Fördersystem, das extrem gut funktioniert»**
Vor einem Jahr übernahm Michael Hengartner den Vorsitz des Wissenschaftlichen Beirats. Eine erste Bilanz.
- 148 **«Die Stiftung ist mir ans Herz gewachsen»**
13 Jahre lang prägte Matthias Kleiner die Projektsuche der WSS mit. Nun tritt er ab. Ein Abschiedsinterview.
- 154 **Nobelpreisträger im Wissenschaftlichen Beirat**
Benjamin List übernimmt den Sitz von Matthias Kleiner.
- 156 **Gremien**
- 157 **Vergabeprozess**
- 158 **Impressum**



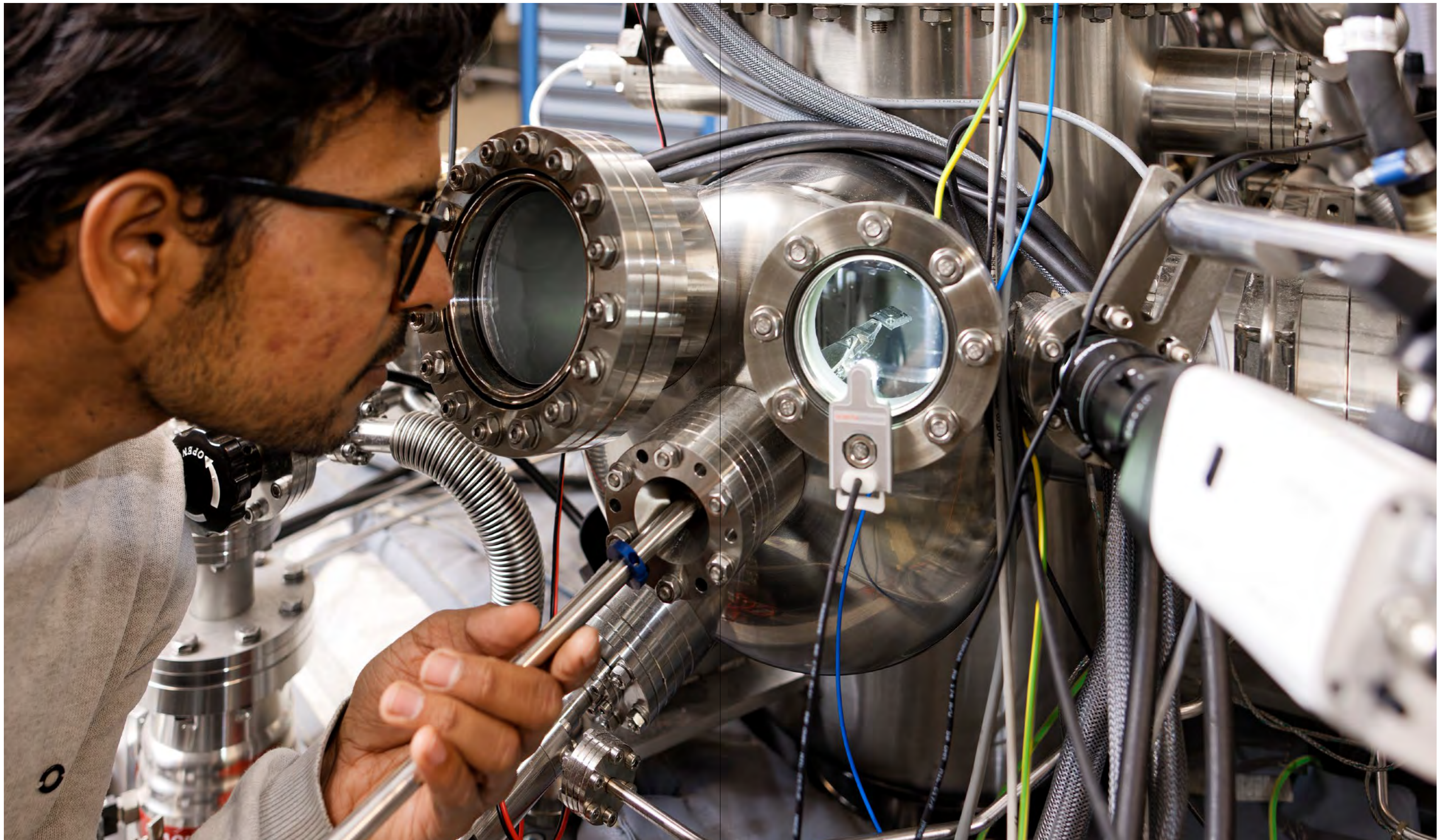
Schutzbrille auf! An der TU Dresden wird ein Lasergerät eingestellt, mit dem sich Metalloberflächen schmutzabweisend machen lassen.



Znünipause tief im Berg: Im BedrettoLab im Gotthardmassiv laufen oft Ausbauarbeiten und Forschungsprojekte gleichzeitig.



Fast echt: Das Universitäts-Kinderspital Zürich entwickelt einen Hautersatz, der natürlicher Haut extrem nahekommt.



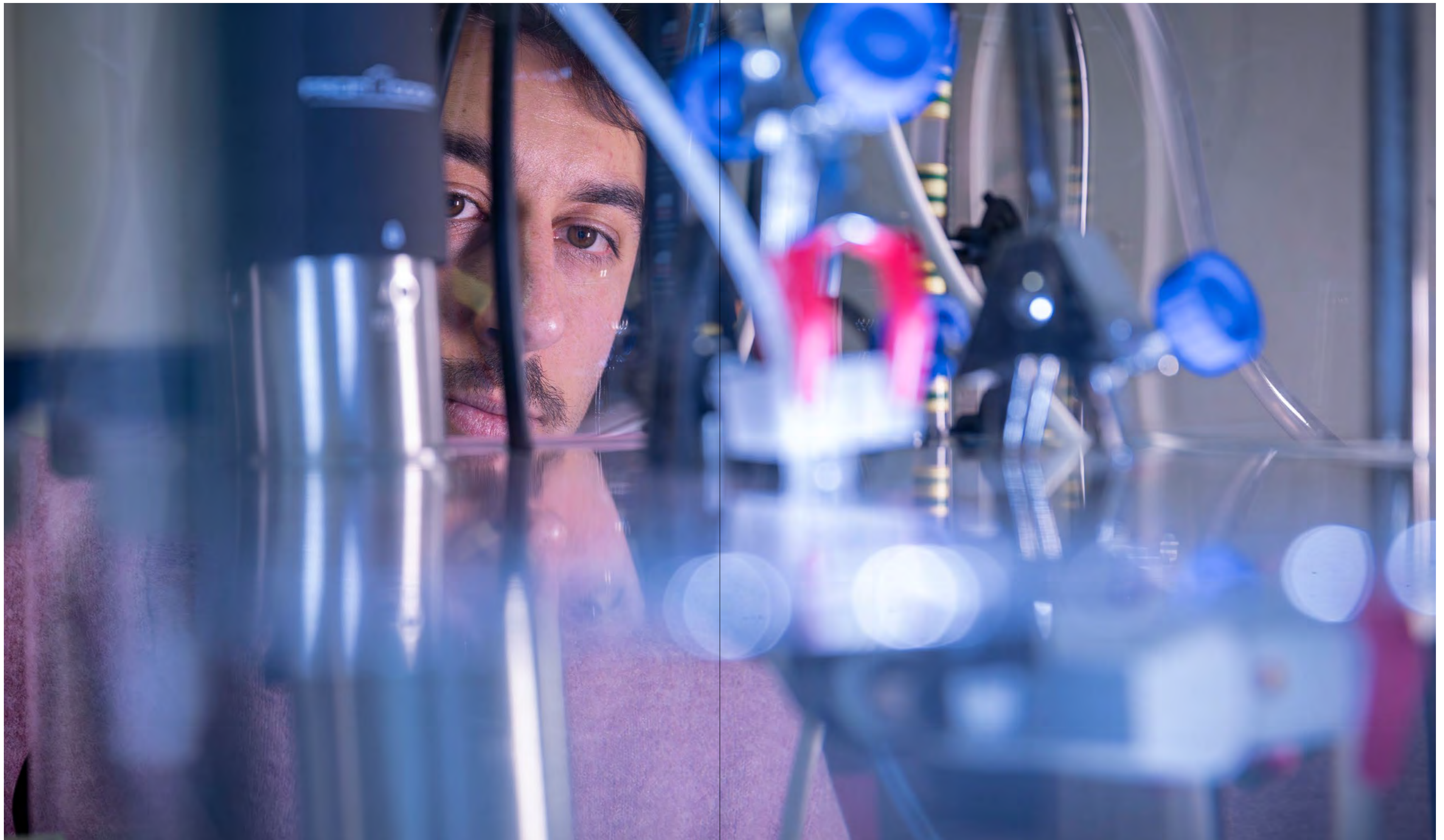
Höchste Präzision: In Hochleistungsmikroskopen an der Universität Basel werden neuartige Quantenmaterialien untersucht.



Tauchfahrt geglückt: Das MARUM-Team testet sein Unterwasser-Monitoring-System vor der griechischen Insel Milos.



Schicht für Schicht: Am Fraunhofer ISE in Freiburg i. Br. entstehen mithilfe einer topmodernen Epitaxie-Anlage neuartige, hocheffiziente Solarzellen.



Achtung flüssig! Um die Verhältnisse im Körper zu simulieren, testen die Forschenden des SonoGuard-Projekts ihren Frühwarn-Sensor im Wasser.



Gemeinsam voran: In einem Grossprojekt wie dem WSS-Forschungszentrum catalaix sind regelmässige Workshops und Ideenaustausche wichtig.



Materialien

Materialien und Werkstoffe sind die Grundsteine für Innovation. Sie erhöhen den Wirkungsgrad von Solarzellen, bestimmen die Bauweise von Brücken, Häusern oder Fahrzeugen – und werden es in Zukunft vielleicht erlauben, revolutionäre Quantencomputer zu bauen. Unser Fokus zeigt, wie von der Werner Siemens-Stiftung unterstützte Projekte hochwertige Werkstoffe erforschen und entwickeln – und damit die Welt von morgen mitgestalten.



Biegen statt schmelzen

Neu unterstütztes Projekt «2nd Life Metal Components»

Aus Altblech wird Hightech-Bauteil

An der TU Dresden entsteht ein völlig neuer Ansatz für das Wiederverwenden von Metallbauteilen. Im neu unterstützten Projekt «2nd Life Metal Components» werden alte Metallbauteile nicht eingeschmolzen, sondern präzise zerschnitten, neu geformt und laserveredelt. So erhalten die Bauteile nicht nur ein zweites Leben, sondern auch bessere Eigenschaften als zuvor.



Der Kochtopf, die Konservendose, das Handygehäuse und die Motorhaube eines Autos sind bloss vier Beispiele von Hunderten: Viele unserer wichtigsten Alltagsgegenstände bestehen aus Metallen. Sie sind robust und langlebig – und verglichen beispielsweise mit Kunststoffen gut recycelbar. Doch um sie wiederverwendbar zu machen, werden Metallbauteile heute grösstenteils eingeschmolzen. «Der Grossteil des Energieaufwandes zur Herstellung eines neuen Bauteils wird für das Betreiben der Schmelzöfen benötigt», sagt Alexander Brosius, Professor für Formgebende Fertigungsverfahren an der Technischen Universität (TU) Dresden.

Gemeinsam mit Andrés Fabián Lasagni, Professor für Laserbasierte Fertigung an der TU Dresden, will Brosius die Wieder- und Weiterverwendung von Metallbauteilen nachhaltiger machen. Im Projekt «2nd Life Metal Components» entwickeln sie Methoden, um den Einschmelzprozess zu umgehen und um die Eigenschaften der recycelten Metallteile gezielt zu verbessern. Die Werner Siemens-Stiftung unterstützt das innovative Vorhaben in den kommenden acht Jahren mit insgesamt 13 Millionen Euro.

Wie der neuartige Ansatz funktioniert, demonstriert das Team in der Versuchshalle und in den Labors auf dem Campus der TU Dresden. Alexander Brosius hat die alte Ölwanne eines Nutzfahrzeugs als Anschauungsbe-

ispiel mitgebracht. Es handelt sich um ein Metallbauteil von der Grösse eines Wäschekorb, aber mit mehreren Vertiefungen und Erhöhungen. Solche Metallteile möchten die Forschenden künftig Stück für Stück auftrennen, aufbereiten und zu neuen Bauteilen umformen.

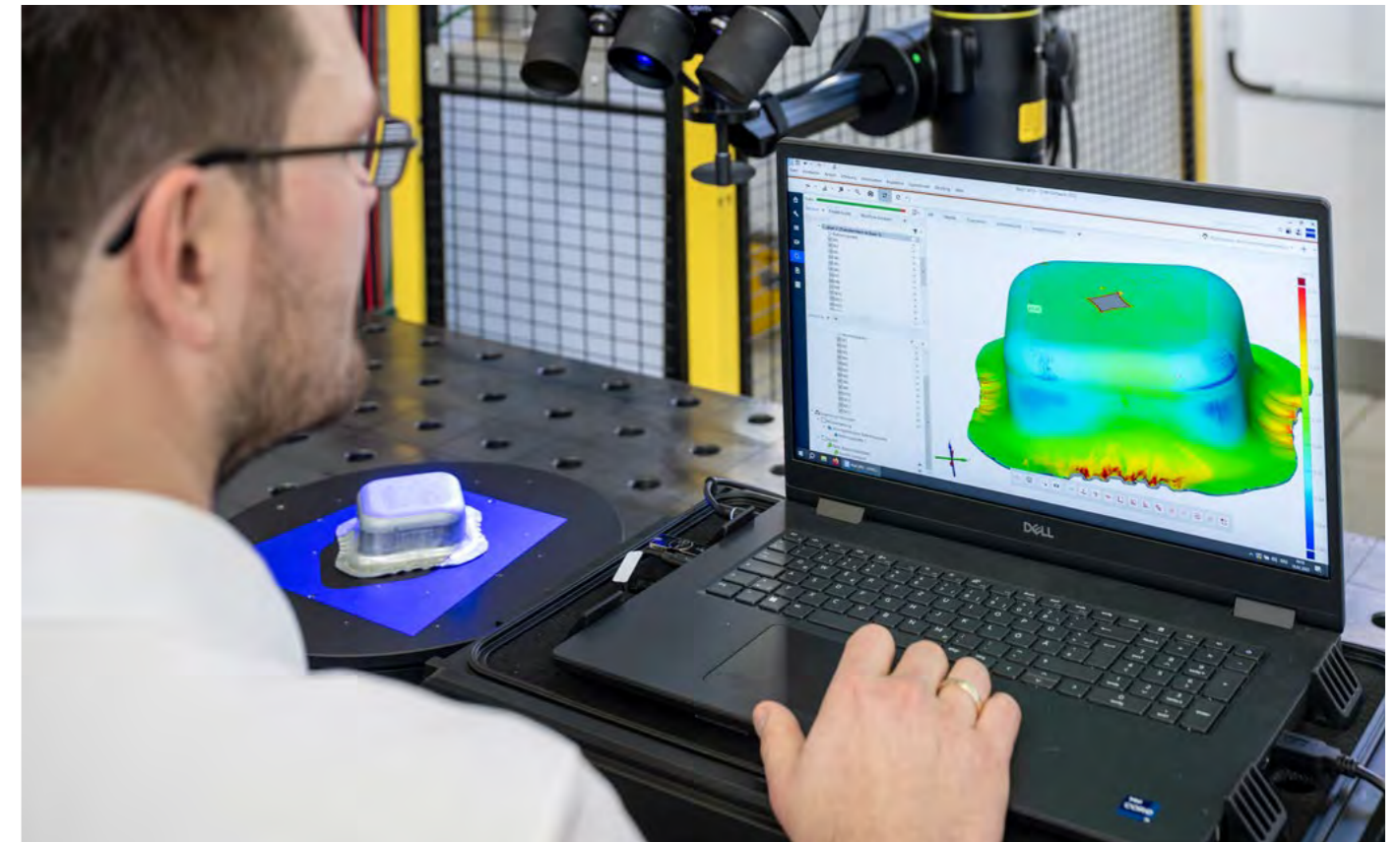
Schnittplanung mit 3D-Scanner

Was einfach klingt, erfordert eine komplexe Kette von Prozessschritten, die in den kommenden Jahren aufgebaut wird. «Als Erstes müssen wir entscheiden, welche Teile wir wofür weiterverwenden können», erklärt Brosius. Die Ölwanne etwa besitzt einen flachen Boden, der sich gut als Bestandteil eines neuen Werkstücks eignet. Sie hat aber auch Krümmungen, Rillen und Unregelmässigkeiten, die eine Weiterverwendung erschweren.

Brosius fährt mit dem Finger einigen Biegungen entlang. «Hier und hier könnte man schneiden und dann das Blechteil in die Fläche drücken», sagt er. Flache Blechstücke sind die Voraussetzung, um neue Platten, sogenannte Platinen herzustellen, aus denen durch Umformen das gewünschte Bauteil entsteht. Das Schneiden an den richtigen Stellen verhindert, dass sich beim Flachpressen – das Team nutzt für diesen Vorgang die Bezeichnung Planarisieren – eines ausgedienten Werkstücks Falten und Risse bilden. Für industrielle Prozesse reicht es natürlich nicht, die Schnittstellen im alten Me-



Andrés Fabián Lasagni (links) und Alexander Brosius leiten das Projekt «2nd Life Metal Components».



Ein altes Metallbauteil wird zuerst in einem 3D-Scanner mithilfe von Laserlicht von allen Seiten vermessen. Daraus entsteht ein dreidimensionales Abbild mit seiner exakten Geometrie.

tallbauteil mit blossen Auge zu ermitteln, wie Alexander Brosius es im Ölwanne-Beispiel tut. Der Entscheid für die Schnittplanung muss auf einer möglichst genauen Datenlage erfolgen und automatisiert ablaufen.

Dazu entwickelt Brosius' Team ein 3D-Scan-System. Um es vorzuführen, haben die Forschenden ein Aschenbecher-förmiges Metallbauteil auf einen Drehteller gestellt. Während sich das Objekt dreht, wird es mithilfe von Laserlicht von allen Seiten vermessen. Die Laserstrahlen erzeugen ein streifenförmiges Muster. Jede Erhebung, Vertiefung oder Krümmung im Bauteil führt zu einer charakteristischen Veränderung des Streifenmusters. Daraus lässt sich ein dreidimensionales Abbild erstellen, sodass die genaue Geometrie des Bauteiles gespeichert ist.

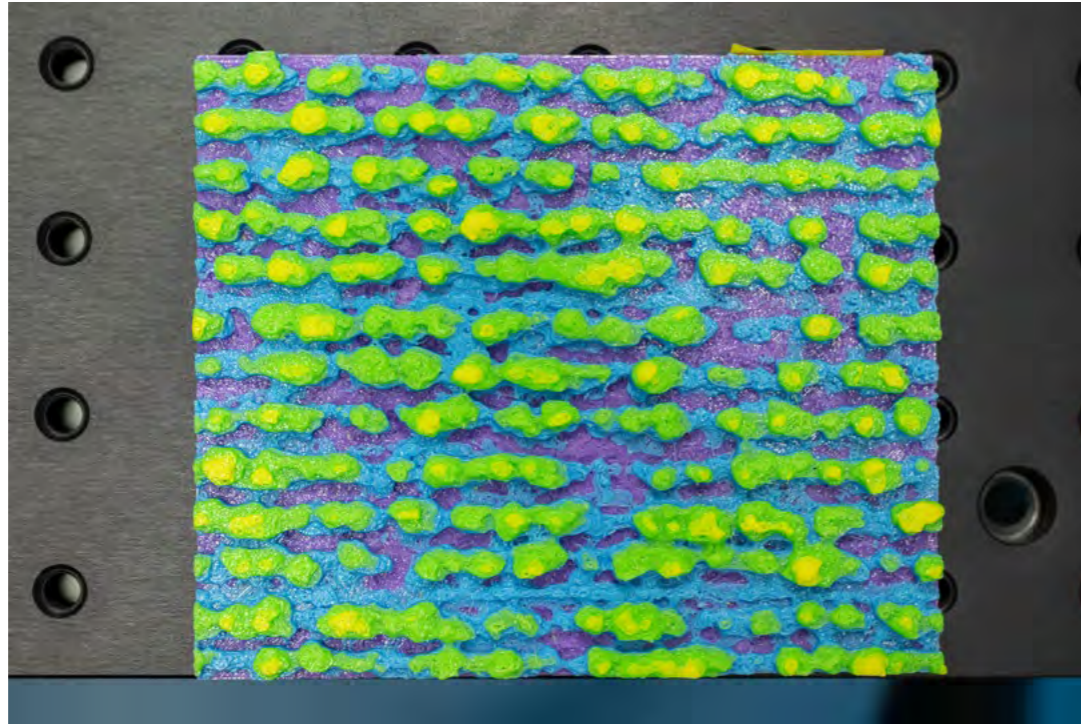
Schneiden und flachdrücken

Um zu entscheiden, wo die Auftrennung erfolgen soll, reichen diese Angaben jedoch nicht. Wichtig sind auch andere Eigenschaften des Bauteils. Um welches Material handelt es sich? Aluminium oder Stahl? Fester oder weicher Stahl? In welcher Stärke? Die Ölwanne beispielsweise ist zwar aus einem einzigen Blechstück gefertigt. Doch manche Partien sind dicker, andere dünner, manche fester, andere weicher. Diese Ungleichheiten entstünden im Lauf der Herstellung durch die Umformung, sagt Brosius. «Man muss sie kennen und abbilden, um zu entscheiden, wozu man ein Bauteil nutzen kann.»

Aufgrund der geplanten Schnitte berechnet nun ein Programm, wie das Blechteil aussehen wird, nachdem es in die Ebene gedrückt wurde. Erst dann erfolgt der Schnitt. Dieser Arbeitsschritt geschieht mit einer Laserstananlage. Die Anlage in der Versuchshalle hat die Grösse eines Tischtennistisches. Sie enthalte eine 3D-Laserzelle, dank der sich auch dreidimensionale Strukturen auftrennen liessen, erklärt Laser-Experte Andrés Fabián Lasagni.

Tangram für Könner

Sind die Stücke eines alten Metallbauteiles aufgetrennt und in die Ebene gepresst, folgt der nächste Schritt. Aus mehreren Stücken wird eine Platine zusammengeschnitten, welche die Form, die Grösse und die Werkstoffeigenschaften hat, die es für die Umformung zu einem neuen Werkstück braucht. Die Aufgabe ähnelt dem Zusammensetzen eines Puzzles oder eines Tangrams – allerdings mit ungleich höherem Schwierigkeitsgrad. Denn Form, Grösse, Material und Blechstärke variieren von Metallstück zu Metallstück. Schon die korrekte Anordnung ist eine Herausforderung. Zudem gilt es, kritische Bereiche auf der entstehenden Platine zu beachten. Beim Umformen zu einem dreidimensionalen Werkstück wie der Ölwanne werden nämlich bestimmte Bereiche der Platine besonders stark belastet – dort dürfen keine dünnen oder zu weichen Zuschnitte eingesetzt werden.



Eine im Labor von Andrés Fabián Lasagni mit Lasermethoden strukturierte Oberfläche unter starker Vergrößerung.



Bei den Laser-Strukturierungsmethoden spielt die Geschwindigkeit eine entscheidende Rolle für die industrielle Anwendbarkeit.

Die Forschenden entwickeln deshalb ein Programm, das berechnet, wo auf der Platine die kritischen Bereiche liegen. Danach schlägt es vor, wie die zur Verfügung stehenden Blechteile zusammengesetzt werden können, damit möglichst wenige und möglichst gerade Schweißflächen und keine Risse beim geplanten Umformungsprozess entstehen. «Die Komplexität ist derart hoch, dass wir nicht auf reine Rechenleistung setzen», sagt Alexander Brosius. «Stattdessen arbeiten wir mit Heuristiken und Logiken, um unsere Modelle Stück für Stück zu optimieren.»

Das Zusammenschweißen geschieht mit Lasern aus dem Labor von Andrés Fabián Lasagni. Schwierig werde es, wenn dabei zwei ungleiche Teilstücke aufeinandertreffen, erklärt er. «Sie können sich bei denselben Prozessparametern völlig unterschiedlich verhalten.» In solchen Fällen muss er die optischen Eigenschaften der beiden Stücke aufeinander abstimmen. Das geschieht mit einer Oberflächenstrukturierungsmethode, die Lasagni später im Prozess auch zur Verbesserung der Blechteile benutzt.

Zerrissen und zerknittert

Liegt die Blechplatine vor, geht es aber erst einmal ans Umformen zu einem neuen Bauteil. Dies geschieht durch das Tiefziehen – ein Umformverfahren, das seit rund 200 Jahren existiert und aus der Metallbearbeitung nicht wegzudenken ist. In einer Presse wird die Blechplatine an ihren Rändern zwischen einer Halterung und einer Matrize eingespannt und über einen Stempel gedrückt. So entsteht die gewünschte Bauteilgeometrie, zum Beispiel die Form der Wanne.

Eine Schwierigkeit beim Tiefziehprozess ist es, den optimalen Einspann-Grad zu finden. Sind die Randstücke zu wenig stark eingespannt, rutschen sie rasch und beginnen zu zerknittern und Falten zu werfen. Sind sie stark eingespannt, drohen sie zu zerreißen. «Deshalb werden beim herkömmlichen Tiefziehen grosse Mengen von Schmiermitteln gebraucht, um Falten und Risse zu vermeiden», sagt Alexander Brosius.

In den letzten Jahren hat er ein neues Tiefziehverfahren entwickelt, das ohne Schmiermittel auskommt. Es beruht auf wellenförmigen Vertiefungen in Halterung und Matrize, die ineinandergreifen. Spannt man das Blech ein, wird die Auflagefläche kleiner und es erhält mehr Spielraum. Es rutscht beim Tiefziehprozess besser nach, bekommt keine Falten. Ohne dieses neuartige Verfahren, das sogenannte makrostrukturierte Tiefziehen, wäre das aktuelle WSS-Projekt nicht möglich. Denn dank des grösseren Spielraums beim Einspannen lassen sich auch Blechplatinen bearbeiten, die unterschiedliche Dicken aufweisen.

In der Versuchshalle haben die Forschenden eine Platine, die aus zwei verschiedenen Blechstärken besteht, in ihre Tiefziehpresse eingespannt. Auf Knopfdruck wird sie mit einer Kraft von bis zu 2300 Kilo-Newton über den Stempel gezogen. Der Vorgang dauert nur wenige Sekunden. Dann hält Alexander Brosius eine T-förmige Schale in seinen Händen. Noch sei nicht alles

perfekt, sagt er, während er sie begutachtet. Er deutet auf zwei Stellen. «Hier gibt es noch leichte Wölbungen, die wir wegbekommen müssen.»

Im Rahmen des Projektes will er zudem das makrostrukturierte Tiefziehen weiterentwickeln. Statt zwischen Rillen soll das Blechstück künftig zwischen drehbaren, versetzten Kugeln eingespannt werden. Damit wären die Auflageflächen noch geringer. «Und wir können unterschiedliche Kugelgrössen verwenden. So vermeiden wir Wölbungen, die entstehen, wenn an manchen Stellen zu viel Zug auf das Blech wirkt.»

Das neue Metallteil aus unterschiedlichen Altblechstücken liegt nun also vor. Doch die Forschenden wollen nicht nur recyceln, sondern ihre neuen Bauteile auch gezielt verbessern. Dazu kommt die Expertise der Forschungsgruppe von Andrés Fabián Lasagni ins Spiel. Lasagnis Spezialität ist die sogenannte laserbasierte Oberflächenfunktionalisierung. Er entwickelt Methoden, mit denen sich Metalle und andere Materialien wasser-, schmutz- oder bakterienabweisend machen lassen.

Dazu erzeugt er mit dem Laser sehr feine Oberflächenstrukturen, deren laterale Auflösung zwischen 1 und 10 Mikrometern liegt. Möglich werde dies mit einer hochspezifischen Methode, der Direkten Laserinterferenz-Strukturierung, erklärt Lasagni. Dabei wird der Laserstrahl aufgefächert in mehrere Teilstrahlen, die sich auf der Oberfläche zu einem Interferenzmuster überlagern. Solche Muster erzeugen Bereiche mit hoher und niedriger Laserintensität. Wo viel Laserlicht auftrifft, wird Material abgetragen, die dunklen Bereiche bleiben unberührt.

Die Eigenschaften, die sich so erzeugen lassen, sind beeindruckend. Lasagni nimmt in einem seiner Labore ein Metallstück in die Hand und sprüht Wasser darauf. Augenblicklich perlt das Wasser ab, das Metall bleibt völlig trocken. Solche wasserabweisenden Oberflächen sind hochinteressant für die Industrie – mit dem Wasser perlen auch Schmutzpartikel ab, das Blech wird korrosionsbeständig. Antimikrobielle Oberflächen wiederum sind beispielsweise in der Medizintechnik wichtig.

Winzige Hügellandschaften

Wie aber kann die Oberflächenstruktur Bakterien fernhalten oder Wasser abweisen? Lasagni erklärt dies anhand von Bildern, die mit einem extrem hochauflösenden Konfokalmikroskop gemacht wurden. Es zeigt: Die laserstrukturierten Oberflächen sind Berg-und-Tal-Landschaften in Miniaturform. Die Abstände zwischen den Spitzen seien entscheidend, erklärt Lasagni. «Wenn ein Bakterium zu gross ist, um zwischen zwei Spitzen Platz zu finden, kann es sich nur auf den Spitzen festhalten – so wird die Auflagefläche klein, es rutscht weg.»

In Lasagnis Laboren stehen diverse Laseranlagen zur Verfügung. Mit ihnen erforscht er die besten Methoden, um die gewünschten Effekte zu erzeugen. «Und wir arbeiten an der Geschwindigkeit», sagt er. Braucht es zu lange, um ein Werkstück wasserabweisend zu machen, wird die Methode nicht industriell verwendbar.

Momentan liegt der – von Lasagni gehaltene – Weltrekord beim Lasern solcher Strukturen bei einem Quadratmeter pro Minute. Und weitere Fortschritte liegen in Reichweite.

Intensiv untersucht Lasagnis Gruppe momentan, welchen Einfluss die Rauheit einer Oberfläche auf die Laserbearbeitung hat. «Die Metallteile, die wir bearbeiten, stammen vom Schrottplatz – sie sind nicht mehr glatt», sagt der Forscher. Erste Experimente zeigen laut ihm, dass die Rauheit der Oberfläche einen Einfluss darauf hat, wie viel Laserenergie für die Oberflächenfunktionalisierung benötigt wird.

Mit der Veredelungs-Technik stellt das Forschungsteam in Zukunft Metallbauteile her, die bessere Funktionalitäten aufweisen als die Ausgangsprodukte. Damit lasse sich der optische Nachteil, der mit dem Verzicht auf das Einschmelzen einhergeht, mehr als wettmachen,

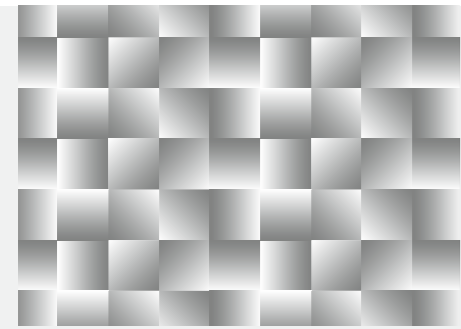
hofft Lasagni. Zumal er ein weiteres Ass im Ärmel hat. Laserstrukturen ermöglichen nämlich auch die Kennzeichnung der Bauteile. «Das ist einerseits wichtig im Upcycling-Prozess, wir müssen jederzeit wissen, welche Art von Metall in welchem Bauteil steckt», sagt Lasagni. Andererseits sind Bauteil-Informationen wie Zusammensetzung, Eigenschaften oder Herkunft auch für die Industrie interessant.

Auch aus diesem Teilprojekt haben die Laser-Experten bereits Fortschritte zu vermelden. Auf einem Laborisch steht eine armgrosse Konstruktion. Es ist eine Erkennungsoptik für die geplanten Lasergravuren. Lasagni legt ein bearbeitetes Metallplättchen darunter – und die Optik misst die Beugungswinkel, die durch die Laserstrukturen entstanden sind, und deren Positionen. Damit die eingelasserten Informationen geschützt bleiben, wollen die Forschenden sie in einer Nut verstecken und die Informationen in einem digitalen Zwilling ablegen.

Schritt für Schritt zur Modellfabrik

Nach und nach wird das Team nun die einzelnen Schritte seiner Prozesskette entwickeln, optimieren und am Ende zusammenbringen. Dazu soll eine Modellfabrik mit einer Fertigungsstrasse dienen. An Beispielen lässt sich dort aufzeigen, wie aus bestimmten Ausgangsteilen automatisiert neue Metallbauteile entstehen. «Bevor Firmen unsere Methode anwenden, wollen sie sehen, dass sich die Prozesse für eine Produktion im grossen Massstab eignen», sagt Alexander Brosius.

Die Idee eines Metall-Upcyclings in die Anwendung zu bringen, ist das grosse Ziel des Dresdner Teams. Ganz ohne ein gesellschaftliches Umdenken werde es aber nicht gelingen, sagt Brosius. «Heute wollen wir von allem nur das Neueste und Beste – jedes Teil muss makellos sein und darf keine Delle und keinen Fehler haben.» Die schmelzfrei produzierten Werkstücke aus Dresden aber werden nicht ganz glatt und eben sein. Für eine lackierte Aussenfläche eines Autos sind sie kaum geeignet. «Aber in anderen Fällen können wir uns von unseren optischen und ästhetischen Maximalansprüchen lösen», findet Brosius. Eine Ölwanne in einem Auto sieht man nicht. Sie muss nicht perfekt sein, sondern einfach nur halten und funktionieren.



2nd Life Metal Components

Metalle sind wertvolle Werkstoffe. Am Ende ihrer Lebensdauer werden deshalb die meisten Metallbauteile eingeschmolzen und zu neuen Bauteilen verarbeitet. Das Einschmelzen benötigt jedoch enorm viel Energie. Das Projekt «2nd Life Metal Components» an der Technischen Universität Dresden will diesen Schritt umgehen – und rezyklierte Metallteile gleichzeitig mit neuen, verbesserten Eigenschaften ausstatten.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

13 Mio. Euro

Projektdauer 2025–2032

Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Alexander Brosius, Professur für Formgebende Fertigungsverfahren, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Andrés Fabián Lasagni, Professur für Laserbasierte Fertigung, Technische Universität Dresden

Quantenrechnen mit Molekülen

Neu unterstütztes Projekt «MolQ»



Im Forschungszentrum MoIQ übernimmt die Chemie eine Hauptrolle. Das ist aussergewöhnlich für ein Quantencomputerprojekt.

Qubits, bei denen die Chemie stimmt

Wenn Forschungsdisziplinen zusammenspannen, eröffnen sich ganz neue Perspektiven. Im neu von der Werner Siemens-Stiftung unterstützten Forschungszentrum MoIQ arbeiten Physiker der Universität Basel und Chemiker der Universität Bern an molekularen Quantensystemen auf Supraleitern. Gemeinsam wollen sie einen stabilen und energieeffizienten Quantencomputer entwickeln.



In den Chemielabors an der Universität Bern entstehen ganz spezielle Moleküle, mit deren Hilfe sich Quanteninformationen speichern lassen.

Wo gelingt der Durchbruch zum Quantencomputer der Zukunft? In den Labors milliardenstarker Tech-Giganten wie Microsoft, Google oder IBM? Vielleicht. Vielleicht aber auch in altherwürdigen Räumlichkeiten der Universitäten Bern und Basel. Hier verfolgt das neue WSS-Forschungszentrum für molekulare Quantensysteme (MolQ) eine innovative Strategie, um stabile, energieeffiziente Quanteneinheiten zu bauen. Die Werner Siemens-Stiftung unterstützt das Vorhaben in den kommenden elf Jahren mit 15 Millionen Schweizer Franken.

Wer verstehen möchte, wie der neue Ansatz funktioniert und was ihn derart speziell macht, muss zuerst nach Bern reisen – in die in die W. Inäbnit Labors für molekulare Quantenmaterialien von Privatdozentin Shi-Xia Liu am Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie der Universität Bern. Studierende und Doktorierende arbeiten hier mit Kolben, Messzylindern, Pipetten und Spektrometern. In den Abzügen, kastenartigen Arbeitsflächen mit einer Glasfront, laufen Reaktionen ab. Hinweise auf einen Quantencomputer, wie ihn sich vielleicht Laien vorstellen, sucht man auf den ersten Blick vergeblich.

Und doch entstehen hier jene Moleküle, die den innovativen Ansatz von MolQ überhaupt erst möglich machen. Shi-Xia Liu ist darauf spezialisiert, flache, ringförmige Gerüste aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen in Moleküle umzubauen, die ganz neue Eigenschaften aufweisen. Dazu ersetzen sie und ihre Mitarbeitenden einige der Kohlenstoffatome dieser sogenannten Aromaten

durch Stickstoffatome und ergänzen sie mit Halogenen, zum Beispiel Brom oder Chlor.

Das klingt einfach und sei auf dem Papier rasch erledigt, sagt Shi-Xia Liu. «Aber im Labor kann das diverse Syntheseschritte erfordern und Tage oder Wochen dauern.» Die besondere Eigenschaft dieser neuen Moleküle ist es, dass sie in der Lage sind, einzelne Elektronen aufzunehmen. Genau dies macht sie für die Entwicklung von Quantenmaterialien interessant. Denn solche ungepaarten Elektronen verfügen über einen Eigendrehimpuls, den sogenannten Spin. Das daran gekoppelte magnetische Moment, so hoffen die Forschenden, lässt sich zum Bau von Quantenbits (Qubits) nutzen.

Beliebige Werte statt nur 0 oder 1

Qubits sind die Rechenelemente von Quantencomputern – es sind die Äquivalente zu den sogenannten Bits, den kleinsten Informationseinheiten in herkömmlichen Computern. Während Bits nur zwei Zustände – ausgeschaltet (0) oder eingeschaltet (1) – einnehmen, können Qubits einen beliebigen Wert zwischen 0 und 1 annehmen, und damit theoretisch unendlich viele Zustände. Deshalb sind Quantencomputer in der Lage, nicht nur eine Rechenoperation nach der anderen durchzuführen, sondern mehrere gleichzeitig.

Bis Quantencomputer kommerziell verfügbar sind, ist es allerdings noch ein weiter Weg. Erste Geräte existieren, doch sie dienen erst zu Testzwecken oder für

Nischenanwendungen. Aktuell dreht sich der Wettlauf um den Quantencomputer noch immer um die Frage, welche Technik die erfolgversprechendste ist. Es existieren diverse Ansätze, um Qubits herzustellen und somit Quanteninformationen zu speichern. Jede hat ihre Vor- und Nachteile (siehe Seite 44).

Praktisch alle Methoden, um Qubits herzustellen, würden von der Physik ausgehen und einzelne Atome oder Lichtteilchen verwenden, sagt Silvio Decurtins. Der emeritierte Chemie-Professor war viele Jahre der Mentor von Shi-Xia Liu und arbeitet auch im MolQ-Projekt eng mit ihr zusammen. Schon vor 30 Jahren, sagt Decurtins, hätten Theoretiker die Voraussetzungen für den Bau von Qubits definiert. «Was wir brauchen, sind Materialien, die diese Kriterien erfüllen.»

Spiel mit Energieniveaus

Genau hier komme die Chemie ins Spiel – jene Wissenschaft, die den Aufbau, die Eigenschaften und Umwandlungen von Stoffen untersucht. «Der französische Chemiker Marcelin Berthelot hat einmal gesagt: «La chimie crée son objet», sagt Decurtins. Chemiker also erschaffen ihre Untersuchungsobjekte selbst – und die Möglichkeiten zur Schaffung von Materialien mit neuen Eigenschaften sind im Chemielabor nahezu unbegrenzt.

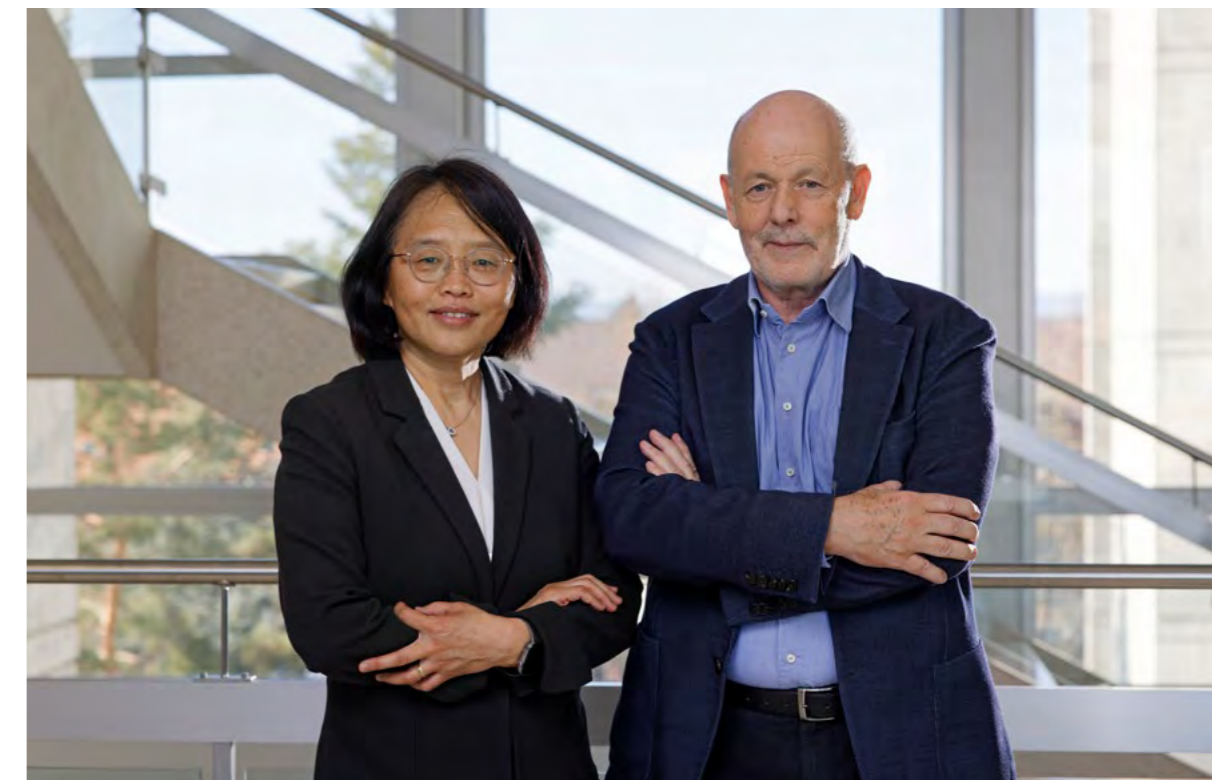
Allerdings kommen die Eigenschaften der Moleküle, welche die Forschungsgruppe von Shi-Xia Liu erschafft, erst im Zusammenspiel mit der Physik zum Tragen. Sie

werden im MolQ-Projekt auf einer supraleitenden Unterlage deponiert. Von solchen Metall-Oberflächen, auf denen Strom ohne Widerstand fliesst, nimmt jedes Molekül ein zusätzliches Elektron auf und erhält dadurch sein magnetisches Moment. «Es ist ein Spiel mit Energieniveaus», erklärt Shi-Xia Liu, «nur wenn das Niveau des freien Orbitals unseres Moleküls knapp unter jenem des Supraleiters liegt, springt ein Elektron über.»

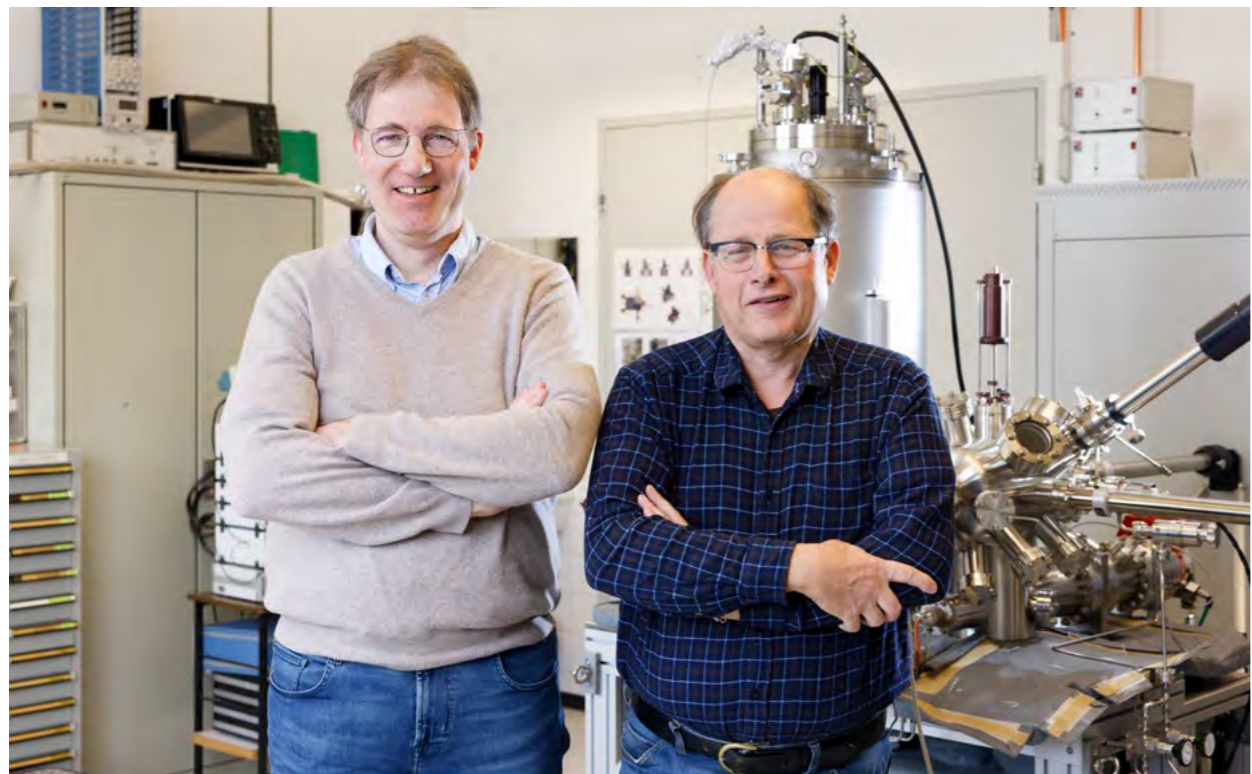
Das Verschmelzen von Molekül und Supraleiter ist der eigentliche Kern des MolQ-Projekts. Auf der Metalloberfläche ordnen sich die Moleküle aufgrund der chemischen Bindungen zu Molekülgittern an, sogenannten molekularen Inseln mit genau kontrollierter Grösse, Struktur und Ausrichtung. Dieses hybride Material weist noch eine weitere Besonderheit auf: Es ist topologisch. Das heisst: Seine spezielle Struktur verhindert, dass es durch äussere Einflüsse wie Störungen oder Defekte seine grundlegenden Eigenschaften verliert.

Supraleitende Randströme

Zuständig für den Bau der Supraleiter und für das Aufbringen der Moleküle sind die Teams um Ernst Meyer und Dominik Zumbühl am Departement Physik der Universität Basel. Die beiden leiten das MolQ-Projekt. Sie haben diverse Hochleistungsmikroskope und -geräte zur Verfügung, mit denen sie die neuartigen Materialien mit atomarer Auflösung untersuchen und sogar chemische Reaktionen in Gang bringen können.



Shi-Xia Liu und ihr langjähriger Mentor Silvio Decurtins sind die führenden Köpfe im Chemie-Teil von MolQ.



Dominik Zumbühl (links) und Ernst Meyer teilen sich die Gesamtprojektleitung von MolQ und treiben den physikalischen Forschungsteil an der Uni Basel voran.

Ihr Ziel ist es, die Moleküln Inseln auf dem Supraleiter so anzuordnen, dass die Ladungen und magnetischen Momente sogenannte supraleitende Randströme erzeugen. Auf diesen Randströmen fliesst Ladung verlustfrei ringförmig um die molekularen Inseln. So wird es möglich, das System als Informationsspeicher mit Qubit-Rechenelementen zu nutzen. «Die Verknüpfung von topologisch geschützten Molekülen mit supraleitenden Randströmen ist der völlig neuartige Ansatz, der das MolQ-Konzept einzigartig macht», sagt Ernst Meyer.

Und zu einem Konzept mit vielen Vorteilen: Erstens wird die Grösse von molekularen Qubits im einstelligen Nanometer-Bereich liegen – es findet also eine enorme Anzahl auf einem einzigen Chip Platz. Zweitens ist der Energieverbrauch dank der supraleitenden Technik sehr klein. Und drittens trägt auch der topologische Schutz zur Effizienz bei. Denn Quantenzustände sind extrem flüchtig und instabil. Meist schleichen sich schon nach kurzen Rechenzeiten Fehler ein. Bei den meisten Techniken wird deshalb ein Grossteil der verbauten Qubits zur Fehlererkennung und -behebung benötigt.

Einkristall oder Aufdampfen

Für die Herstellung der Supraleiter untersuchen die Forschenden verschiedene Ansätze, wie Ernst Meyer erzählt. Eine Möglichkeit ist das Erzeugen von sogenannten Einkristallen aus Materialien wie Blei oder Niob. Der grosse Vorteil von Einkristallen ist, dass sie homogene, perfekte

Gitterstrukturen bilden: Ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften sind überall gleich. Allerdings ist ihre Herstellung aufwändig und teuer.

Die Alternative ist das Aufdampfen einer hauchdünnen Supraleiter-Schicht auf einen Silizium-Wafer. Ein solches Vorgehen könnte weniger teuer und für eine industrielle Anwendung einfacher sein. Silizium-Wafer werden schon heute für den Bau von Solarzellen in grossem Stil produziert. Auf der Supraleiter-Schicht werden dann Elektroden angelegt, zum Beispiel aus Niob oder Niob-Titan, um den Strom fliessen zu lassen – und das Ganze wird mit den chemischen Molekülen aus Bern verbunden.

An den Grenzen der Messmöglichkeiten

Die chemischen Moleküle in verschiedenen Anordnungen und den Stromtransport auf verschiedenen Supraleiter-Oberflächen zu untersuchen, gehöre zu den wichtigen ersten Schritten im MolQ-Projekt, erzählt Meyer. Dazu dienen Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskope, von denen das Departement Physik mehrere besitzt – und welche die Physiker zum Teil sogar selbst gebaut haben.

«Für die Transportmessungen stossen wir damit aber an Grenzen», sagt Meyer. Zwar seien Messungen mit dem hauseigenen Rastertunnelmikroskop machbar. «Aber wir müssten die Supraleiter-Molekülprobe mit einer Isolatorschicht versiegeln und die Messungen unter

Reinraum-Bedingungen im Kryostat bei 100 Millikelvin durchführen», sagt er.

Mehr Möglichkeiten bieten würde ein topmodernes, neuartiges Rastertunnelmikroskop, dessen Finanzierung das MolQ-Team momentan abklärt. Mit ihm müssten die Forschenden nicht in den Reinraum und könnten auf die Versiegelungsschicht verzichten, welche die Untersuchungen erschwert. Zudem liesse sich der Stromtransport an mehreren Stellen der Probe messen.

Unterschiedliche Bauteile möglich

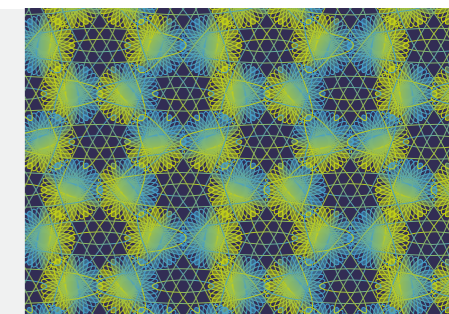
Erste Untersuchungen der chemischen Moleküle auf Supraleiter-Oberflächen sind vielversprechend. Die Forschenden testeten verschiedene Molekül-Anordnungen – und fanden faszinierende Effekte. «Je nachdem, wie wir die Moleküle gruppieren, entwickeln sie unterschiedliche elektronische Eigenschaften», erzählt Meyer. «Wir sehen bereits, dass wir unterschiedliche Bauteile herstellen können, die in einem Computer essenziell sind.»

Ein Beispiel ist die simple Aneinanderreihung einiger Moleküle. «In solchen Reihen verhalten sich die Moleküle so, dass wir sie als Speicherelemente nutzen können», sagt Meyer. Bei im Dreieck angeordneten Molekülen

entdeckten die Forschenden gar etwas völlig Unerwartetes: Erhöhten sie die Spannung in einen bestimmten Bereich, fiel plötzlich der Strom ab. Dies ist ungewöhnlich, denn die meisten Materialien weisen bei steigender Spannung steigenden Strom auf.

«Dieses Phänomen lässt sich zum Beispiel für die Erstellung von Schwingkreisen nutzen», erklärt Ernst Meyer. Ein Schwingkreis ist ein Schaltkreis, der periodische elektrische Schwingungen erzeugt. Solche Bauteile seien auch bei den Qubits in einem Quantencomputer unerlässlich, sagt Meyer. «Wir werden beispielsweise sehr hohe Taktfrequenzen benötigen.»

Der Start ist dem MolQ-Team also geglückt. Man darf gespannt sein, auf welche weiteren überraschenden Erkenntnisse die Forschenden auf dem Weg zu einer neuartigen molekularen Quantenelektronik stossen werden.



MolQ

Quantencomputer sind der Heilige Gral der Informationstechnik. Um die Grundlagen dafür zu legen, verfolgt das WSS-Forschungszentrum für molekulare Quantensysteme (MolQ) an den Universitäten Basel und Bern einen neuartigen Ansatz: Im Zusammenspiel zwischen Chemie und Physik sowie Theorie und Experiment entwickelt es sogenannte topologisch geschützte Quanteneinheiten auf supraleitenden Materialien. Solche Quanteneinheiten sind besonders stabil, leistungsfähig und energieeffizient.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

15 Mio. Schweizer Franken
Projektdauer 2025–2035
Projektleitung Prof. Dr. Ernst Meyer, Departement Physik, Universität Basel (Gesamtprojektleitung)
 Prof. Dr. Dominik Zumbühl, Departement Physik, Universität Basel (Gesamtprojektleitung)
 PD Dr. Shi-Xia Liu, Departement für Chemie, Biochemie und Pharmazie, Universität Bern (Leitung Bern)

Wettstreit der Quantensysteme

Es gibt diverse Ansätze, Quantencomputer zu entwickeln. Jeder hat seine Vor- und Nachteile. Welches System sich durchsetzen wird, ist noch offen. Ein Überblick über einige der Favoriten.

Supraleitende Schaltkreise

Sie bestehen aus supraleitenden Drähten, in denen Strom verlustfrei hin und her schwingt. Qubits werden durch Mikrowellenstrahlen angesteuert und manipuliert. Operationen lassen sich damit sehr schnell ausführen, allerdings kollabieren die Qubits rasch wieder. Ein weiterer Nachteil der Methode: Die Schaltkreise müssen bis fast auf den absoluten Nullpunkt von minus 273,15 Grad Celsius heruntergekühlt werden.

Ionenfallen

Ionisierte Atome oder Moleküle werden eingefangen und durch elektromagnetische Felder und Laser manipuliert. Die so entstehenden Qubits sind sehr stabil und lassen sich mit hoher Genauigkeit kontrollieren. Die Kehrseite der Medaille: Berechnungen mit Ionenfallen-Quanten sind sehr langsam. Zudem ist es bisher schwierig, grosse Qubit-Mengen auf einem Chip zu realisieren.

Neutrale Atome

Bei dieser Methode werden Atome mit ausgeglichener Ladung eingefangen und manipuliert. Das geschieht durch gebündelte Laserstrahlen, die sie so stark abbremsen, dass sie sich kaum mehr bewegen. Solche Plattformen lassen sich sehr gut skalieren und müssen nicht in Kryostaten, also einem Tieftemperatur-Kühlgerät, platziert werden. Solche Qubits sind aber störanfällig und benötigen komplexe Lasertechniken und -aufbauten.

Photonen

Lichtteilchen (Photonen) werden in sogenannten Wellenleitern durch den Prozessor geführt. Durch optische Komponenten oder Photodetektoren werden sie miteinander verbunden und manipuliert. Photonische Qubits brauchen keine extreme Kühlung. Allerdings ist die Wechselwirkung zwischen Photonen gering und die Programmierbarkeit solcher «fliegender Qubits» eingeschränkt.

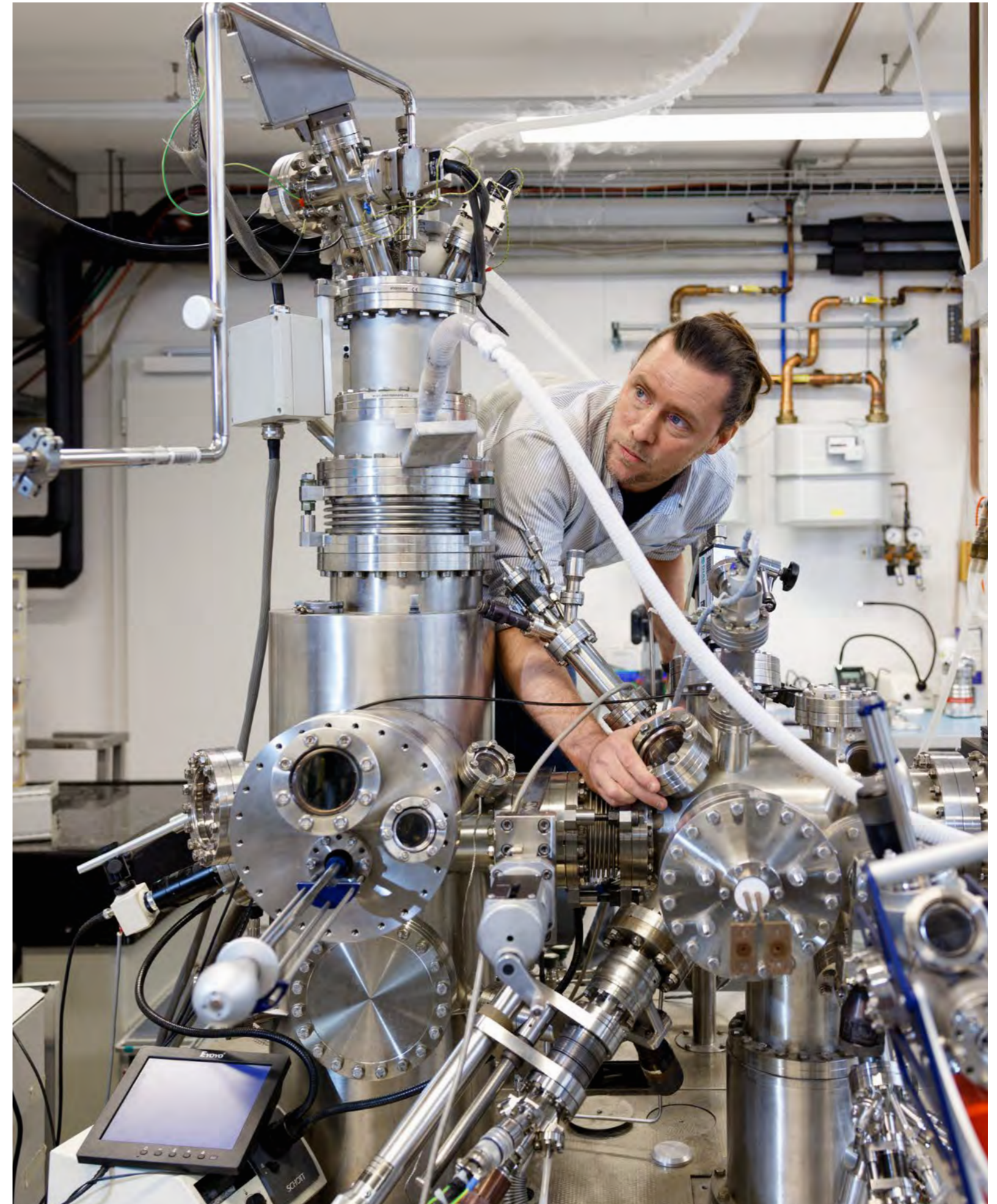
Quantenpunkte

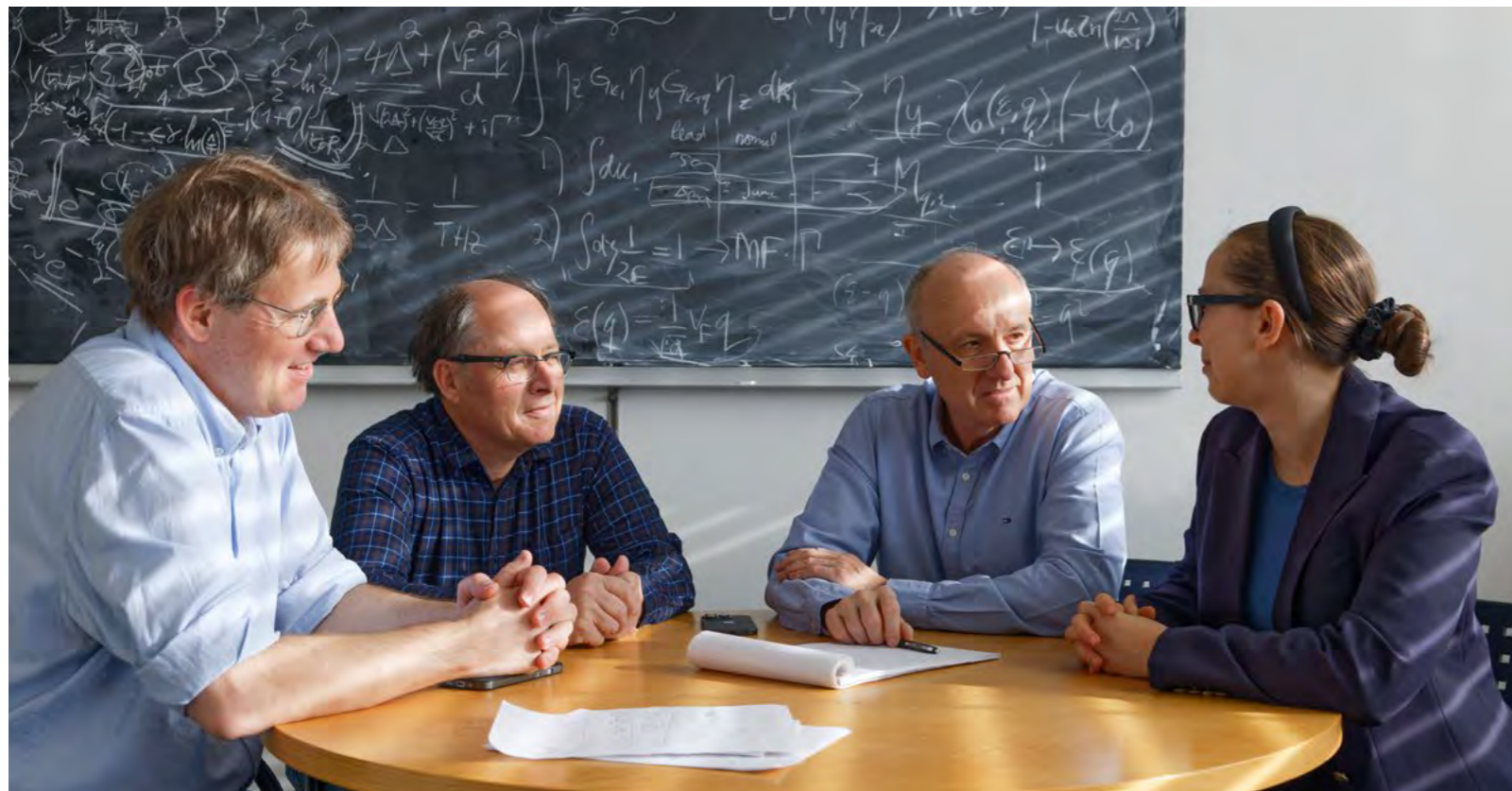
Elektroden erzeugen in Halbleitern ein elektrisches Feld, in dem sich einzelne Elektronen einfangen lassen. In diesen Quantenpunkten können Spin-Zustände der Teilchen durch Mikrowellen gesteuert werden. Ein grosser Vorteil solcher Methoden ist, dass sie auf der bereits bestehenden Halbleitertechnologie aufbauen. Allerdings müssen Quantenpunkte auf beinahe absolute Nulltemperatur gekühlt werden und benötigen sehr reine Materialien.

Diamantgitter

In künstlich gezüchtete Diamantgitter werden gezielt Fremdatome und somit ein zusätzliches Elektron eingebaut. Dessen Spin-Zustand lässt sich durch Laserlicht kontrollieren. Diamant-Qubits sind kompakt und lassen sich bei Raumtemperatur betreiben. Der Nachteil: Bis heute ist es schwierig, eine grosse Anzahl Qubits zu erzeugen und zu kombinieren.

Die Physiker an der Universität Basel arbeiten mit ausgeklügelten Hochleistungsmikroskopen, die sie zum Teil selbst gebaut haben.





Teamwork ist Trumpf: Dominik Zumbühl und Ernst Meyer im Gespräch mit den Theoretikern Daniel Loss und Jelena Klinovaja.

«Es ist stets ein Zusammenspiel»

Das Projekt MolQ wagt sich in unbekannte Gebiete der Quantenphysik. Es braucht eine enge Begleitung durch theoretische Modellierungen. Jelena Klinovaja und Daniel Loss von der Universität Basel leiten diesen Projektteil. Klinovaja erzählt, wo die Theorie ansetzt und welche Arbeiten besonders schwierig sind.

Jelena Klinovaja, Sie übernehmen gemeinsam mit Daniel Loss die theoretischen Arbeiten im MolQ-Projekt. Was beinhaltet das?

In MolQ werden Moleküle gebaut, die anschliessend für Messungen verwendet werden. Wir Theoretiker unterstützen diese beiden Bereiche auf verschiedenen Ebenen. Zum einen helfen wir, die bei den Messungen erzeugten Daten zu analysieren. Zum anderen können die Theorien auch vorschlagen, was gemessen werden sollte, damit wir überhaupt den Effekt finden können, den wir identifizieren wollen.

Was ist mit den unterschiedlichen Molekülen, welche das Chemie-Team herstellt?

Das ist eine weitere Aufgabe: Diese Moleküle können unterschiedlich angeordnet werden. Bei manchen kann man theoretisch vorhersagen, dass sie sehr interessant sind. Aber es ist stets ein Zusammenspiel. Vielleicht sagen die Chemiker, dass es experimentell gar nicht möglich ist, die von uns Theoretikern bevorzugte Anordnung zu erreichen. Diese Interaktion ist das Schöne an dem Projekt.

Welche Berechnungen oder Konzepte sind besonders anspruchsvoll?

Die topologisch geschützten Phasen sind nicht leicht zu identifizieren, es laufen weltweit Bemühungen dazu. Und momentan arbeiten wir mit einzelnen Elektronen und ihren magnetischen Momenten. Wir wollen aber letztlich topologische Phasen erzeugen, die durch Elektron-Elektron-Wechselwirkungen entstehen. Solche kollektiven Anregungen sind eine grosse Herausforderung.

Es gibt viele Möglichkeiten, Qubits herzustellen. Wie schätzen Sie aus theoretischen Überlegungen den MolQ-Ansatz ein?

Es ist ein sehr riskanter Ansatz, weil wir über dieses molekulare topologische System noch nicht viel wissen. Aber es gibt einige theoretische Hinweise darauf, weshalb solche Qubits sehr interessant sein könnten. Deshalb sollte man diesen Molekül-Ansatz unbedingt erforschen.

Sehen Sie auch Knackpunkte, an denen das Konzept scheitern könnte?

In der Physik muss man immer damit rechnen, dass etwas schiefgehen kann. Aber oft scheitert man nicht, weil etwas gar nicht funktioniert. Viel eher erkennt man, dass es einen besseren Ansatz gibt. Vielleicht sehen wir nach fünf Jahren, dass unsere ursprüngliche Konfiguration nicht optimal war und wir auf eine andere supraleitende Plattform wechseln sollten. Wir müssen flexibel sein und uns an den Ergebnissen orientieren.

Die Topologie ist ein wichtiger Aspekt von MolQ (siehe Text Seite 38). Sie gehen davon aus, dass sich dank dieses Schutzes die Kohärenzzeiten der Qubits von Nanosekunden auf Mikrosekunden verlängern könnten. Das ist immer noch ziemlich kurz.

Es geht weniger um die absoluten Zeiten. Viel wichtiger ist, wie viele Rechenoperationen sich in dieser Zeit durchführen lassen. Und die genannten Zahlen sind sogar eher die niedrigste Grenze, die man aus theoretischer Sicht erwartet. Aber natürlich gibt es einen Kompromiss, den man eingehen muss.

Welchen?

Ein sehr gut geschützter Zustand kann durch die Umgebung nicht gut verändert werden. Aber das bedeutet auch, dass es für uns Forscherinnen und Forscher schwieriger wird, Manipulationen durchzuführen. Vor dieser Herausforderung stehen alle Qubit-Plattformen.

Die Quantenwelt stellt unsere Vorstellung der Wirklichkeit infrage. Es gibt Teilchen, die zwei Zustände aufs Mal einnehmen oder die miteinander gekoppelt sind, obwohl sie weit voneinander liegen. Wie kommt man solchen Phänomenen in der Theorie auf die Spur?

Die Quantenmechanik lässt sich anhand von Berechnungen relativ gut begreifen. Die Mathematik dahinter ist keine Hexerei. Wer beginnt, sie zu studieren, braucht etwas Zeit, versteht sie aber bald besser. Aber es gibt viele Möglichkeiten, diese Gleichungen zu interpretieren – es wird dann eher

philosophisch. Und die Quantenmechanik lässt sich im Alltag nicht intuitiv beobachten.

Wie gross sind die Fortschritte rund um das Quantencomputing?

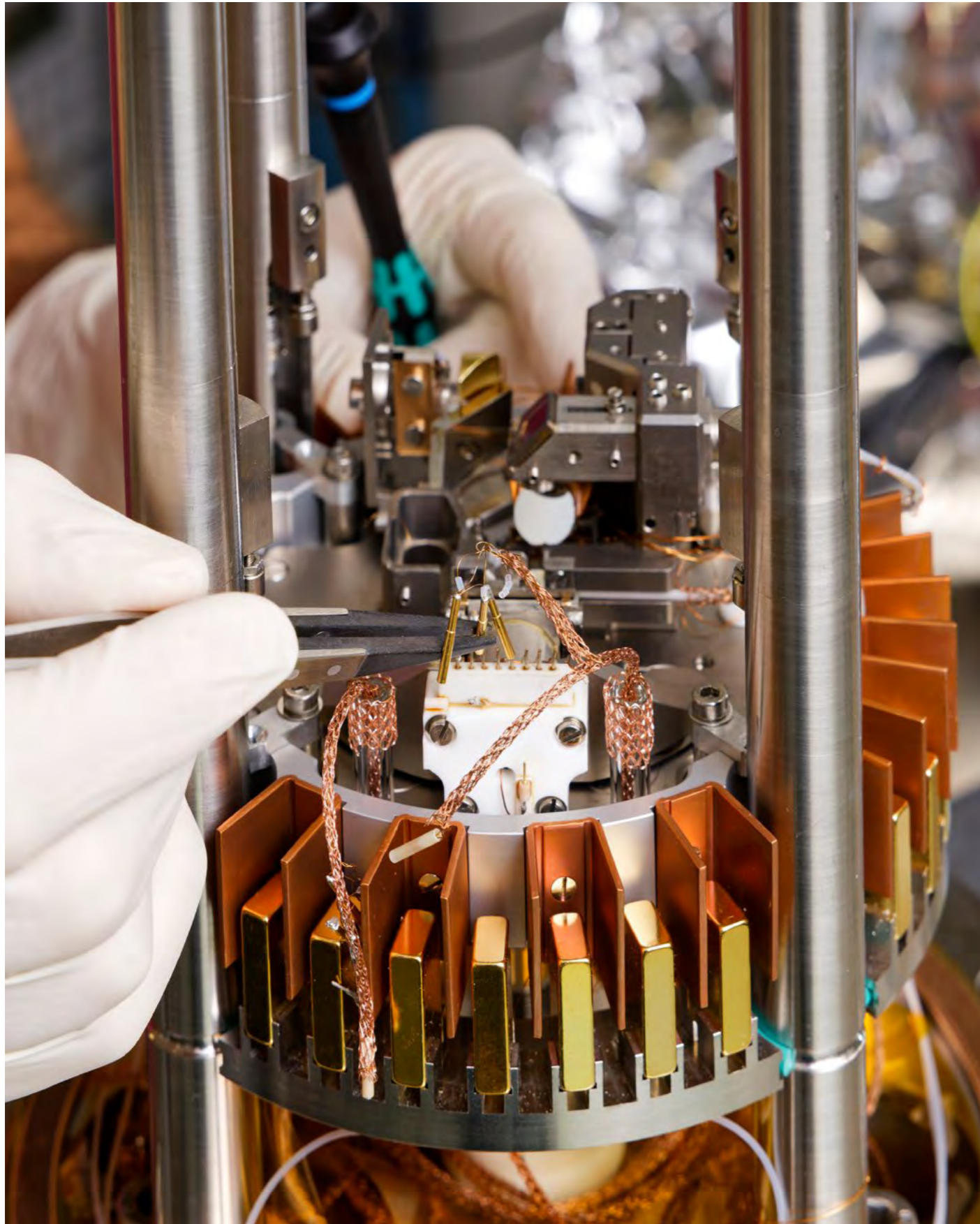
Es sind riesige Fortschritte. Viele Qubit-Plattformen waren vor 20 Jahren noch unbekannt oder steckten in den Kinderschuhen. Heute haben wir eine gewisse Kontrolle darüber. Aber es gibt noch grosse Herausforderungen. Es geht heute nicht mehr nur darum, ein einzelnes Qubit zu erstellen, sondern auch Qubits zu koppeln und zu skalieren.

Was braucht es für den Durchbruch?

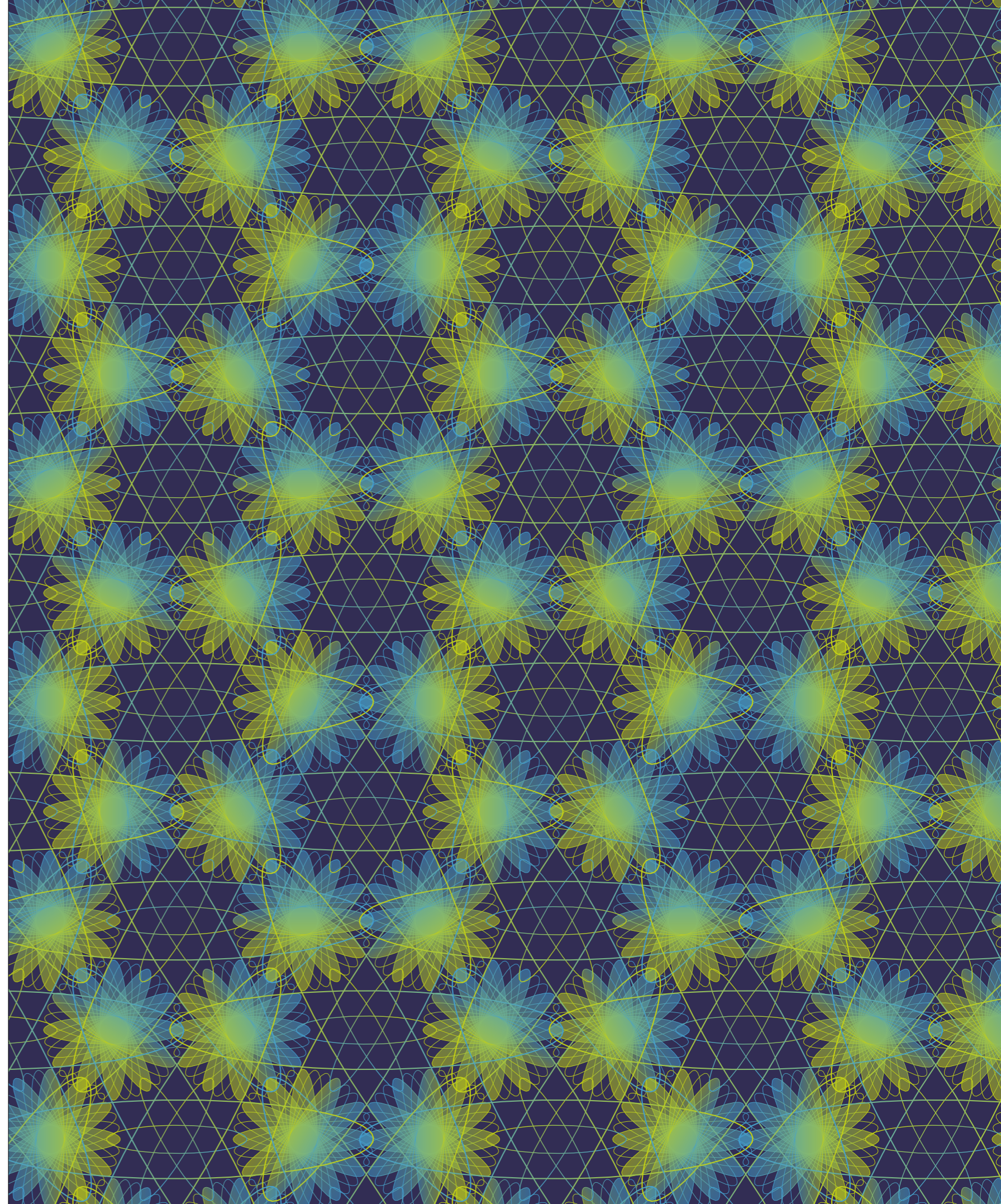
Für einen Durchbruch braucht es manchmal eine ganz bestimmte Zutat. Bei der künstlichen Intelligenz fehlte es lange an Rechenleistung und leistungsstarken Chips. Beim Quantencomputing ist meiner Meinung nach eine bestimmte Materialqualität erforderlich. Wenn Qubits derzeit nicht funktionieren, liegt das meist an einer Unvollkommenheit oder Unordnung des Materials.

Ist das einer der grossen Vorteile des MolQ-Ansatzes?

Ja. Wir arbeiten mit Molekülen. Und Moleküle sind, ähnlich wie Atome, reproduzierbar. Im Vergleich zu Kristallgittern weisen sie viel weniger Defekte auf. Durch die molekularen Bindungen entstehen stets dieselben, vorhersagbaren Strukturen. Das ist eine wichtige Voraussetzung, um die sensiblen Quanteneffekte zu erzeugen.



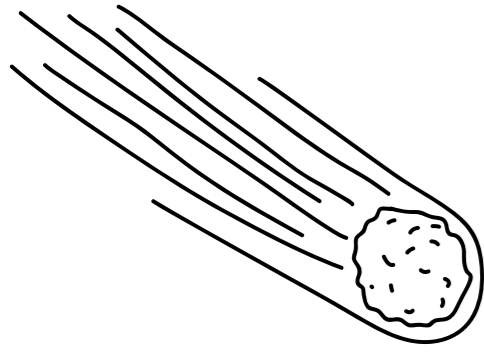
Präzisionsarbeit: Um die empfindlichen Geräte vorzubereiten, braucht es ruhige Hände.



Zwölf verblüffende Fakten zu Materialien

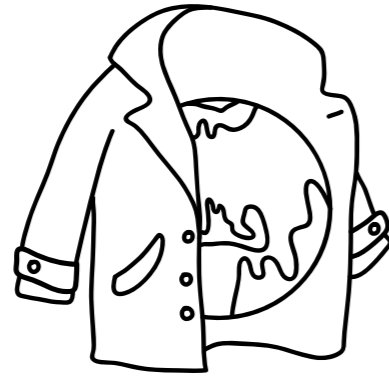
Die teuerste Substanz, der älteste Kleber, das häufigste Mineral: Ein paar Superlative und weitere vergnügliche Befunde über Materie und Materialien.





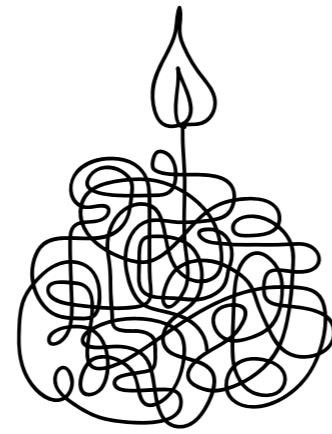
Ausserirdisches Eisen

Im 3400 Jahre alten Grab von Pharao Tutanchamun wurden mehrere eiserne Gegenstände gefunden, etwa ein kunstvoll gearbeiteter, 35 Zentimeter langer Dolch. Das Besondere: Das Eisen stammt nicht von der Erde, sondern von einem Meteoriten, wie sein hoher Nickelanteil beweist.



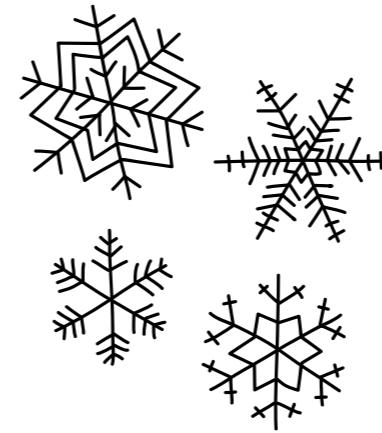
So häufig, so unbekannt

Das häufigste Mineral der Erde heisst Bridgmanit. Nie gehört? Tatsächlich wurde es an der Erdoberfläche erst einmal gefunden, in einem Meteoriten. Damit es entstehen kann, braucht es sehr hohe Temperaturen und Drücke, wie sie im Erdmantel (ab 660 km Tiefe) herrschen. Dort unten gibt es so viel Bridgmanit, dass es insgesamt auf einen Anteil von 38 Prozent am Erdvolumen kommt.



Brennendes Metall

Eisen ist brennbar. Nur ist es in Normalform schwer zu entzünden, weil zu wenig Sauerstoff an das dichte Material herankommt. Ein luftiges Gebilde wie Stahlwolle hingegen lässt sich sogar zum Entfachen von Feuer verwenden: Je nach Sorte brennt Stahlwolle lichterloh, wenn man ein Streichholz daran hält.



Wandelbarer Schnee

Die Vorstellung einer statischen Schneedecke ist falsch, wie Forschende mithilfe von Computertomografen festgestellt haben. Der Schnee ist ständig in Bewegung, seine Struktur permanent in Umwandlung begriffen. Überall bilden sich neue Schneekristalle und alte verschwinden – nur wenige Kristalle sind älter als drei Tage.



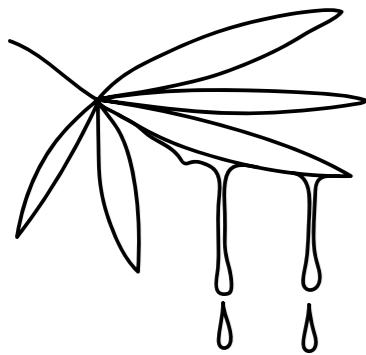
Mittelalterliche Nanotechnik

Viele Skulpturen des Mittelalters sind von einer Goldschicht überzogen, die nur 30 Nanometer dick ist und trotzdem sehr regelmässig aufgetragen wurde. Erstaunlich, dass dies mit einfachem Handwerkszeug möglich war. Mit den ultradünnen Schichten liess sich viel Material und vor allem Geld sparen.



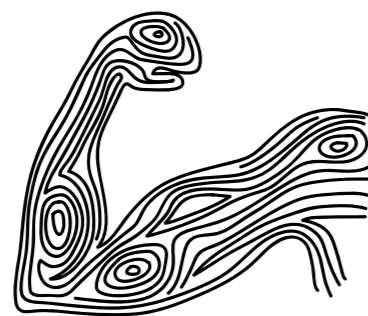
Maximal radioaktiv

Polonium-210 gehört zu den radioaktivsten Substanzen überhaupt: Ein Milligramm strahlt mit 166 Gigabecquerel – das heisst, pro Sekunde zerfallen 166 Milliarden Atome. Die starke Strahlung macht Polonium-210 bereits in winzigen Mengen tödlich giftig. Der russische Ex-Geheimdienstler Alexander Litwinenko wurde 2006 damit ermordet.



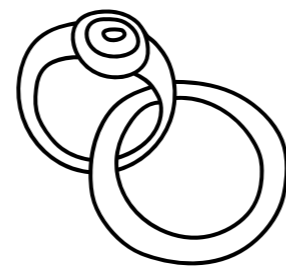
Uralter Kleber

Schon vor 100 000 Jahren stellten unsere Vorfahren einen Stoff her, mit dem sie Steinklingen an ihre Speere klebten. Sie gewannen ihn durch Destillation aus den Blättern der Steineibe. Er hat gute mechanische Eigenschaften und klebt stärker als alle natürlich vorkommenden Stoffe wie zum Beispiel Harz.



Starkes Holz

Ein Holzwürfel von vier Zentimetern Kantenlänge kann einem Druck von vier Tonnen standhalten. Es ist die faserige Struktur, die Holz so stabil macht – besonders, wenn die Last entlang der Faserrichtung wirkt. Überdies ist Holz elastisch: Unter Druck verformt es sich, statt gleich zu brechen.



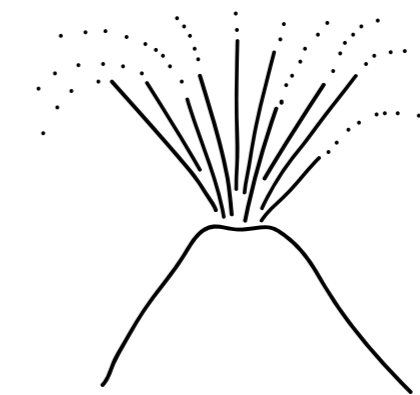
Ungerade Jubiläen

Silber- (25 Jahre) und Gold-Hochzeit (50 Jahre) kennt jeder. Aber haben Sie schon mal von der Aluminiumhochzeit (37 ½ Jahre) gehört? Ein paar weitere unbekannte Jubiläen: Messinghochzeit (45 Jahre), Uranhochzeit (53 Jahre), Platinhochzeit (55 Jahre), Quecksilberhochzeit (63 Jahre), Gusseisenhochzeit (73 Jahre).



Das teuerste Material

Antimaterie macht sich sehr rar im Universum. Immerhin hat man am Forschungszentrum CERN in Genf für ein paar hundert Millionen Franken innert zehn Jahren ein Milliardstel Gramm Antimaterie erzeugt. Daraus kann man einen Preis von etwa 100 Billionen pro Gramm errechnen, was die Antimaterie mit Abstand zum teuersten je hergestellten Material macht.



Unverwüster Beton

Römische Betonbauten, etwa das Pantheon in Rom, stehen seit zweitausend Jahren. Ihr Geheimnis ist die Vulkanasche, mit der die Römer ihren Zement anrührten – sie sorgt für besondere Stabilität. Hinzu kommen kleine Kalkklümpchen im Material, die dazu führen, dass sich Risse von selbst wieder schliessen: Römischer Beton ist selbstheilend.



Kein Kreislauf

Pro Kopf und Jahr werden in der Schweiz 16 Tonnen Material verbraucht. Mehr als vierzig Prozent davon sind Mineralien (vor allem Kies und Sand); hinzu kommen Erze, fossile Energieträger und Biomasse. Nur sieben Prozent des verbrauchten Materials sind recycelt – 93 Prozent sind neu.



Im Zentrum des Projekts von Ueli Angst an der ETH Zürich stehen die Vorgänge an den Grenzflächen zwischen Beton und Stahl.

Materialien, die die Zukunft formen

Ohne die Entwicklung neuer Materialien gäbe es heute weder Smartphones noch Flugzeuge. Und längst arbeiten Forschende am «Materialbaukasten» der Zukunft. Die drei WSS-Projekte «Künstliche Muskeln», «Klimafreundlicher, dauerhafter Stahlbeton» und «Thermoelektrische Materialien» tragen dazu bei – in ganz unterschiedlichen Gebieten und mit ganz unterschiedlichen Ansätzen.

Materialien sind die Motoren der gesellschaftlichen Entwicklung. In der Steinzeit benutzten Menschen Steine, Knochen und Fasern, um Werkzeuge und Waffen herzustellen. In der Bronzezeit entdeckten sie, dass eine Legierung aus Kupfer und Zinn ein Material ergab, das härter und haltbarer war als Stein. Es entstanden bessere Werkzeuge, Waffen und Kunstgegenstände; spezialisierte Handwerke und Handelsnetzwerke konnten sich etablieren.

Wie genau die Menschen damals die neuen Materialien und Verfahren entdeckten, kann heute niemand mehr rekonstruieren. Zumal die Geschichte zeigt, dass selbst grosse Forscher oder Erfinder rasch in Vergessenheit geraten können. Wer kennt schon den belgisch-amerikanischen Chemiker Leo Baekeland, der im

Jahr 1907 den ersten synthetischen Kunststoff – das Bakelit – entwickelte?

Doch ohne die Entwicklung und Verbesserung von Materialien und Materialeigenschaften gäbe es unsere moderne Welt nicht: keine Brücken, Smartphones, Elektroautos, Flugzeuge und Solarzellen. Und die Entwicklung ist längst nicht abgeschlossen. Auch heute tüfteln Forschende an neuen Materialien und entwickeln innovative Produkte aus neuartigen Werkstoffen. Das Feld ist breit: Es reicht von der Erforschung gänzlich neuer Eigenschaften, etwa mit Quantenmaterialien, bis zur Verbesserung oder Veränderung von altbekannten Stoffen.

Ein Beispiel für Letzteres ist das WSS-Projekt «Klimafreundlicher, dauerhafter Stahlbeton», das von Ueli Angst am Departement Bau, Umwelt und Geomatik der ETH Zürich geleitet wird. Bereits vor über 2000 Jahren nutzten die alten Römer einen Beton aus natürlichen Rohstoffen, um Aquädukte oder Bauwerke wie das Pantheon zu bauen. Mitte des 19. Jahrhunderts kam die Idee auf, den spröden Beton mit einem dehnbaren Material, nämlich Stahl, zu verstärken.

«Diese Entwicklung ermöglichte letztlich die Industrialisierung», sagt Ueli Angst. «Denn Stahl und Beton bilden eine Supersymbiose, sind weltweit in grossen Mengen verfügbar und äusserst robust.» Mit dieser Kombination wurden enorm stabile, dauerhafte, tragfähige Konstruktionen möglich – und damit statisch anspruchsvolle Bauwerke wie Brücken mit grossen Spannweiten. Diese Bauweise hat sich bewährt. Doch der Zahn der Zeit kann auch dem Stahlbeton zusetzen: Namentlich die Korrosion des Stahls kann Lebensdauer und Sicherheit von Bauwerken beeinträchtigen, im Extremfall mit katastrophalen Folgen. «Angesichts dessen erstaunt es, dass man bis heute nicht versteht, was bei der Korrosion in Stahlbeton-Bauten auf molekularer Ebene über die Jahre geschieht», sagt Angst.

Entgegen der Lehrmeinung

Genau dies möchte er in seinem Projekt ändern – nicht nur, weil die Korrosion hohe Kosten verursacht. Die Wissenslücken rund um die Korrosionsvorgänge im Stahlbeton haben nämlich eine weitere Folge: Sie erschweren die Anwendung neuer, nachhaltiger Betonbaustoffe in der Praxis. «Dabei wäre ein Umdenken dringend nötig», sagt Ueli Angst.

Das Problem liegt in einer scheinbar unlösbaren Verknüpfung zwischen dem Korrosionsschutz und den hohen CO₂-Emissionen bei der Betonherstellung. Beton enthält einen hohen Anteil des Bindemittels Zement. Dessen traditionelle Herstellung aus Kalkstein und Tonmineralien verbraucht nicht nur viel Heizenergie im Brennofen, sondern basiert auf einer chemischen Reaktion, der sogenannten Kalzinierung, die grosse Mengen CO₂ freisetzt. Beim Anmischen von Zement mit Wasser entsteht danach eine basische Lösung, welche die Auflösung des Stahls bremst. «Nach heutiger Lehrmeinung ist nur ein solch hochalkalischer Stahlbeton gegen Korrosion geschützt», erklärt Ueli Angst. «Bei modernen,

umweltfreundlichen Betonen wird dieser alkalische Schutzschild beeinträchtigt, was demnach ein Dauerhaftigkeitsproblem darstellt.»

Er selber hat mit seiner Forschung aber bereits aufgezeigt, dass die Lehrmeinung nur beschränkt gilt. Die Korrosion von Stahl im Beton lässt sich auch verhindern, wenn andere Faktoren unter Kontrolle gehalten werden, etwa der Transport von Wasser durch das zementöse Porensystem oder die chemische Zusammensetzung der Lösung, die sich in den Betonporen befindet. Viele dieser Prozesse müssen allerdings zuerst grundlegend erforscht werden. Erst mit diesem Wissen wird es möglich sein, neue Strategien oder Materialien zu entwickeln, die die breite Anwendung von umweltfreundlichem Beton ermöglichen.

Wie genau solche nachhaltigen Strategien aussehen werden, hängt von vielen Faktoren ab. Für gewisse Anwendungsfälle wird es möglich sein, weniger alkalische Zemente zu verwenden, die trotzdem korrosionsbeständig sind. Für andere braucht es vielleicht zusätzliche Ansätze wie Beschichtungen, die Beton und Stahl vor Feuchtigkeit schützen. Oder neuartige Inhaltsstoffe, die den Feuchtigkeitsgehalt im Beton ausgleichen.

Atom für Atom untersuchen

Eine Schlüsselrolle in Ueli Angsts Projekt nehmen die komplexen Vorgänge an der Grenzfläche zwischen Beton und Stahl ein. Die Porengrössen im Beton reichen von Nanometern bis Zentimetern und können sich mit der Zeit verändern. Je nach Bedingungen – etwa bei trockenem Wetter oder wenn ein Betonpfeiler im Wasser steht – finden unterschiedliche chemische Reaktionen zwischen Stahl und Beton statt. Tritt etwa Wasser in die Betonporen ein, reagieren darin gelöste Gase wie CO₂ mit anderen Betonbestandteilen. Diese Prozesse wiederum sind verknüpft mit elektrochemischen Prozessen an der Metalloberfläche.

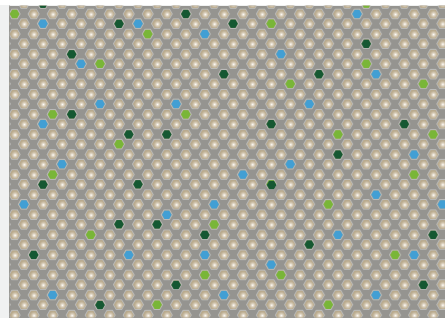
Ueli Angst hat in dem Projekt, das Anfang 2025 begonnen hat, inzwischen vier Doktorandenstellen besetzt. In einer geht es darum, genau diese Übergangsstelle zwischen Stahl und porösem Beton in atomarer Genauigkeit zu untersuchen. Mit einer sogenannten tomografischen Atomsonde werden Atome von der Oberfläche einer Probe abgelöst und ihre Masse bestimmt. «Damit können wir diesen entscheidenden Bereich Atom für Atom rekonstruieren», sagt Angst.

Ein anderer Doktorand untersucht, wie sich die Poren im Zementstein verhalten, wenn Wasser eingeschwemmt wird. Verschliessen sie sich? Werden sie grösser? Ein weiterer Forschungszweig beschäftigt sich mit der Rolle von gelöstem CO₂ im Wasser. Kann es unter bestimmten Bedingungen in einer Betonporenlösung als Katalysator für die Auflösung des Eisens im Stahl dienen? Alle diese unterschiedlichen Forschungsrichtungen dienen einem Ziel: ein möglichst umfassendes Verständnis der Korrosion zu gewinnen.

Mit einem ganz anderen Materialtyp beschäftigt sich ein Team um Yves Perriard und Yoan Civet am Zentrum

für künstliche Muskeln am Standort Neuenburg der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Im Vergleich zu Stahl und Beton steckt er geradezu in den Kinderschuhen: Erst seit den 1990er-Jahren werden sogenannte dielektrische Elastomer-Aktoren (DEA) untersucht und entwickelt. Sie bestehen aus einem dünnen, enorm elastischen Kunststoff, der zwischen zwei Elektroden gespannt wird und sich beim Anlegen einer Spannung dehnt. So wird elektrische Energie direkt in mechanische Arbeit umgewandelt.

Der Elastomer-Film kann aus verschiedenen Materialien bestehen: meist aus Silikon, Acryl oder Kautschuk. «Die Suche nach dem idealen Material für dielektrische Elastomer-Aktoren ist der Heilige Gral in der Community», sagt Yoan Civet. Ein Elastomer muss sich möglichst



Klimafreundlicher, dauerhafter Stahlbeton

ETH-Professor Ueli Angst untersucht die komplexen Korrosionsprozesse in Stahlbeton unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. Als Erstes analysiert sein Team die Korrosionsvorgänge auf der molekularen Ebene. Später werden die gewonnenen Erkenntnisse auf der mittleren und schliesslich auf der Meter-Skala überprüft. Ziel ist das Bereitstellen von Wissen, Testmethoden und Modellen, die den Korrosionsschutz auch bei klimafreundlichen Stahlbetonbauten sicherstellen. Damit wird es der Baubranche möglich, vermehrt klimafreundliche Betonarten zu verbauen und zum Klimaschutz beizutragen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

10 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2025–2034

Projektleitung

Prof. Dr. Ueli Angst, Departement Bau, Umwelt und Geomatik, ETH Zürich



Künstliche Muskeln

Herzschwäche, Gesichtslähmungen, Inkontinenz: Diese drei muskulären Probleme gehen die Forschenden des Zentrums für künstliche Muskeln an der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) am Standort Neuenburg mit einem hochinnovativen Ansatz an: Sie entwickeln künstliche Muskeln aus neuartigen, enorm elastischen Materialien, die mit Elektroden versehen sind. Über Batterien, die der Patient oder die Patientin auf sich trägt, lassen sich diese Gewebe durch das Anlegen einer elektrischen Spannung dehnen und kontrahieren – wie echte Muskeln.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

12 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2018–2029

Projektleitung

Prof. Dr. Yves Perriard, Direktor des Zentrums für künstliche Muskeln und des Integrated Actuators Laboratory (IAI), EPFL, Schweiz



An der EPFL in Neuenburg baut ein Team um Yves Perriard und Yoan Civet zylinderförmige Kunstmuskeln aus Elastomer-Materialien.

stark dehnen lassen, dabei möglichst viel Energie speichern und gleichzeitig einem starken elektrischen Feld standhalten.

Das EPFL-Team verwendet solche Materialien, um eine Art künstliche Muskeln zu entwickeln, die beispielsweise bei Herzkrankheiten oder Gesichtslähmungen zum Einsatz kommen könnten. «Aber vor einigen Jahren haben wir in Zusammenarbeit mit Forschenden einer französischen Universität selbst nach dem perfekten DEA-Material gesucht», erzählt Civet. «Wir fanden drei sehr gute Materialien. Leider handelte es sich bei allen um Flüssigkeiten, die für unsere Zwecke nicht geeignet waren, weshalb wir uns für ein kommerziell erhältliches Folienmaterial entschieden.»

Nun aber rückt die Materialsuche erneut in den Fokus des Teams, wie Yves Perriard erklärt. Der Grund dafür sind die enormen Fortschritte, die das Team bei der Entwicklung seines Vorzeigeprojekts gemacht hat: eines Kunstmuskels zur Unterstützung des Herzens. In einer aktuellen Publikation haben die Forschenden ein «Kunstherz» präsentiert, das aus einer mehrschichtigen DEA-Röhre in einer zylinderförmigen Kunststoff-Vakuumkammer besteht. Beim Anlegen einer Spannung bläht sich das DEA unter dem Innendruck der Vakuumkammer auf und erzeugt einen Sog, der Blut in das Gerät zieht. Sobald das elektrische Feld deaktiviert wird, zieht sich der Aktor zusammen und drückt das Blut heraus.

Leistung enorm verbessert

Das Gerät wiegt weniger als 200 Gramm, hat einen sehr geringen Energieverbrauch und ist enorm leistungsfähig. «Wir erreichen damit – erstmals für eine DEA-basierte Pumpe – die Durchflussrate und den Druck des Herzmuskels», sagt Yves Perriard. «Das erlaubt es uns, das Herz nicht wie mit früheren Modellen bloss zu unterstützen, sondern sogar zu ersetzen.» Das Gerät könnte sich also für Patienten mit schwerer Herzschwäche eignen, bei denen das eigene Herz nicht mehr in der Lage ist, die Blutzirkulation aufrechtzuerhalten.

«Für die Chirurgen, mit denen wir zusammenarbeiten, wird unsere Entwicklung nun richtig interessant», sagt Perriard. Denn verglichen mit herkömmlichen Herzpumpen hätte das Neuenburger System klare Vorteile, vor allem, weil die weichen Materialien das durchfliessende Blut schonen. Das Team bereitet deshalb mit Hochdruck neue Tierversuche vor. «Wir planen Langzeitversuche mit Schafen. Wir wollen mindestens 30 Tage lang untersuchen, wie die Tiere mit unserer implantierten Herzpumpe leben», sagt Perriard.

Dafür brauchen die Forschenden ein äusserst zuverlässiges System, das auch nach Tausenden Lade- und Entlade-Vorgängen funktioniert. Zudem sei die Sicherheit eine grosse Herausforderung, erklärt Yves Perriard. Denn typischerweise benötigt der Betrieb von dielektrischen Elastomer-Aktoren Hochspannung im Kilo-Volt-Bereich. «Das ist für den Einsatz als Medizintechnikprodukt ein Nachteil, weil es Fragen bezüglich Patientensicherheit aufwirft.»

Material-Innovationen könnten eine entscheidende Rolle spielen, um diese Herausforderungen zu meistern. Das Team prüft deswegen, ob auf dem Markt leistungsfähigere DEA-Materialien erhältlich sind, die bei tieferer Spannung funktionieren. Es existierten beispielsweise Firmen, die hochwertige flüssige DEA-Materialien in einen Film umwandeln könnten, sagt Yoan Civet.

Gleichzeitig wird das Team seit Kurzem von einem Experten für Materialwissenschaften und Fertigungstechniken unterstützt. Er untersucht, ob sich handelsübliche DEA-Flüssigkeiten mithilfe anderer Komponenten verbessern lassen. «Dass wir selbst ein völlig neues Material entwickeln, ist aber illusorisch», sagt Civet. «Denn wir benötigen etwas, das nicht nur im Labor mit kleinen Mengen gut funktioniert, sondern sich in einer konkreten Anwendung im grösseren Massstab und langfristig bewährt.»

Nanokristalle mit Defekten

Buchstäblich von Grund auf entwickelt werden neue Materialien dagegen in einem dritten WSS-Projekt: Am «Werner Siemens Thermoelectric Laboratory» am Institute of Science and Technology Austria (ISTA) in Klosterneuburg bei Wien verwendet das Team um Maria Ibáñez Nanopartikel aus ganz bestimmten Materialien, um makroskopische Materialien herzustellen, die thermoelektrische Eigenschaften aufweisen. Das heisst: Sie wandeln Temperaturunterschiede in elektrische Spannung um – oder nutzen umgekehrt eine angelegte Spannung zur Wärmeübertragung. Der thermoelektrische Effekt wird zur Stromerzeugung oder für Wärmemanagement eingesetzt.

«Die Kernidee unserer Arbeit ist es, funktionelle anorganische Materialien zu entwerfen und zu kontrollieren», sagt Maria Ibáñez. Vereinfacht besteht der Trick darin, die Vorteile von strukturellen Unregelmäßigkeiten zu nutzen. «In unseren Materialien können wir Merkmale wie Defekte und Grenzflächen so einstellen, dass der Ladungs- und Wärmefluss durch den Festkörper optimiert wird», erklärt Ibáñez. Defekte sind Abweichungen von der idealen, regelmässigen Anordnung der Atome in einem Kristallgitter. Es gibt verschiedene Arten von Defekten: das Fehlen eines Atoms, den Ersatz eines Atoms durch ein anderes oder die Verschiebung einer Atomreihe. In grösserem Massstab spielen auch die Grenzen zwischen Kristallen, sogenannte Korngrenzen, sowie Poren eine wichtige Rolle.

Defekte können einen riesigen Einfluss auf die Eigenschaften eines Materials haben: «Allein durch die Veränderung der Art und der Dichte von Defekten können wir die elektrischen Eigenschaften eines Materials stark verändern», sagt Maria Ibáñez. Die Herausforderung sei es, die richtigen Defekte gezielt zu erzeugen. «Wir lernen, wie man Defekte über verschiedene Längenskalen hinweg kontrolliert, von atomaren Leerstellen bis hin zu Korngrenzen. Es ist jedoch nach wie vor eine Herausforderung, dieses Mass an Kontrolle auf vorhersehbare und skalierbare Weise zu erreichen.»

Die Nanopartikel, die Ibáñez und ihr Team als Ausgangsmaterialien verwenden, bestehen aus einem anorganischen Kern und Oberflächenteilchen wie Ionen, organischen Ketten oder Metallkomplexen. «Wir versuchen, die Eigenschaften des anorganischen Kerns – seine Zusammensetzung, Kristallphase, Grösse und Form – zu nutzen und die Oberflächenchemie so anzupassen, dass sich die gewünschten Defekte bilden», erzählt Ibáñez.

Die Vielfalt an Nanopartikeln mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften, die untersucht werden können, ist allerdings enorm. Deshalb benutzt die Forscherin Methoden, welche die Herstellung beschleunigen. Ein essenzieller Teil dafür ist der Aufbau eines Hochdurchsatz-Labors, in dem Proben automatisiert produziert und getestet werden können. Sie sei nun auf gutem

Weg mit diesem einzigartigen Labor und hoffe, dass es Mitte 2026 aufgebaut und einsatzbereit sein werde, sagt Ibáñez.

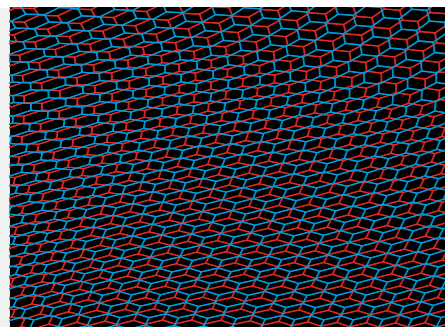
Daneben arbeitet die Gruppe mit unterschiedlichen innovativen Ansätzen, wie dem 3D-Druck. Im vergangenen Jahr stellte das Team in einer Publikation im Fachmagazin «Science» ein neu entwickeltes 3D-Druck-Verfahren vor, mit dem sich leistungsstarke thermoelektrische Materialien kostengünstig herstellen lassen. Bisherige Versuche mit dem 3D-Druck seien vor allem daran gescheitert, dass es nicht gelang, die einzelnen Partikel der Materialien so miteinander zu verbinden, dass sich eine gute elektrische Leitfähigkeit ergab, sagt Ibáñez.

Wiederverwenden statt verschwenden

Zur Herstellung ihrer «Druckertinte» mischen die Forschenden thermoelektrische Pulverpartikel mit einer Trägerlösung und Bindemitteln. Sie drucken die Tinte Schicht für Schicht auf eine Oberfläche und erhitzen diese Struktur, wodurch die Trägerlösung verdampft. Aufgrund der Eigenschaften der entwickelten Tinte führt die Erhitzung zu einer chemischen Umwandlung, welche die Partikel miteinander verbindet, dabei aber die gedruckte Struktur bewahrt. Mit dieser Methode gelang es den Forschenden, absolute Spitzenmaterialien zu erzeugen, deren thermoelektrische Leistung zu den höchsten bisher bei Raumtemperatur beobachteten zählt.

Einen weiteren Schwerpunkt legt die Gruppe auf die Nachhaltigkeit. «Mit unserem lösungsmittelbasierten Ansatz können wir Synthesen bei sehr niedrigen oder sogar Raumtemperatur durchführen und benötigen keine hochreinen Substanzen», sagt Maria Ibáñez. Der Nachteil: Die Lösungsmittel werden normalerweise am Ende des Prozesses entsorgt. Die Forschenden suchen nach Möglichkeiten, um solche Abfälle zu verhindern und keine Materialien zu verschwenden – auch hier mit Erfolg. «Wir konnten kürzlich nachweisen, dass Silberselenid selbst bei mehrfacher Wiederverwendung der Lösungsmittel hohe Leistungen erzielen kann», sagt Ibáñez.

Das Beispiel zeigt: Mit der Entwicklung, Verbesserung und der innovativen Anwendung von Materialien ist es nicht getan. Es gilt stets auch, sorgsam mit ihnen umzugehen.



Thermoelektrische Materialien

Ob im Computer, im Kühlschrank, an einem Fenster oder auf dem menschlichen Körper: Überall wo Temperaturunterschiede bestehen, lässt sich daraus theoretisch Strom gewinnen. Bis heute ist die Methode aber ineffizient und teuer. Die Physikerin Maria Ibáñez will das mit ihrer Forschungsgruppe am «Werner Siemens Thermoelectric Laboratory» am Institute of Science and Technology Austria (ISTA) ändern. Sie sucht nach neuen Materialien, die dank genau definierter Nanostrukturen die gewünschten Eigenschaften aufweisen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

8 Mio. Euro

Projektdauer 2020–2028

Projektleitung

Prof. Dr. Maria Ibáñez, Institute of Science and Technology Austria (ISTA), Österreich

Abayomi Lawal, Doktorand in der Forschungsgruppe von Maria Ibáñez am ISTA entwickelt aus Nanopartikeln thermoelektrische Materialien.





Im Tandem zur Solarrevolution

Neu unterstütztes Projekt «Höchsteffiziente Tandem-Photovoltaik»

Ultradünn und hocheffizient

Der Wirkungsgrad von Tandem-Solarzellen ist deutlich höher als jener der heutigen Silizium-Zellen. Doch um sie konkurrenzfähig zu machen, braucht es Innovationen bei den diversen Herstellungsschritten. Ein neu unterstütztes Team am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau (D) hat die Ideen dafür.

Der Campus des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau ist weitläufig. Und wenn Frank Dimroth einen von Gebäude zu Gebäude und von Innovation zu Innovation führt, bekommt man ein Gefühl dafür, wie komplex die Herstellung einer Solarzelle ist. Nicht irgendeiner Solarzelle. Sondern einer, die es so noch nicht gibt. Und die Europa eine zweite Chance eröffnen könnte, um in der weltweiten Solarindustrie einen Spitzenplatz zu erlangen.

Frank Dimroth ist Leiter der Abteilung III-V Photovoltaik und Konzentratortechnologie am Fraunhofer ISE. Er leitet gemeinsam mit ISE-Direktor Andreas Bett das Projekt «Nachhaltige Energiewende durch hocheffiziente Tandemphotovoltaik», das die Werner Siemens-Stiftung (WSS) in den kommenden 7½ Jahren mit insgesamt 14 Millionen Euro unterstützt. Weitere 1,4 Millionen Euro steuert die Fraunhofer-Gesellschaft bei.

100 Mal günstiger werden

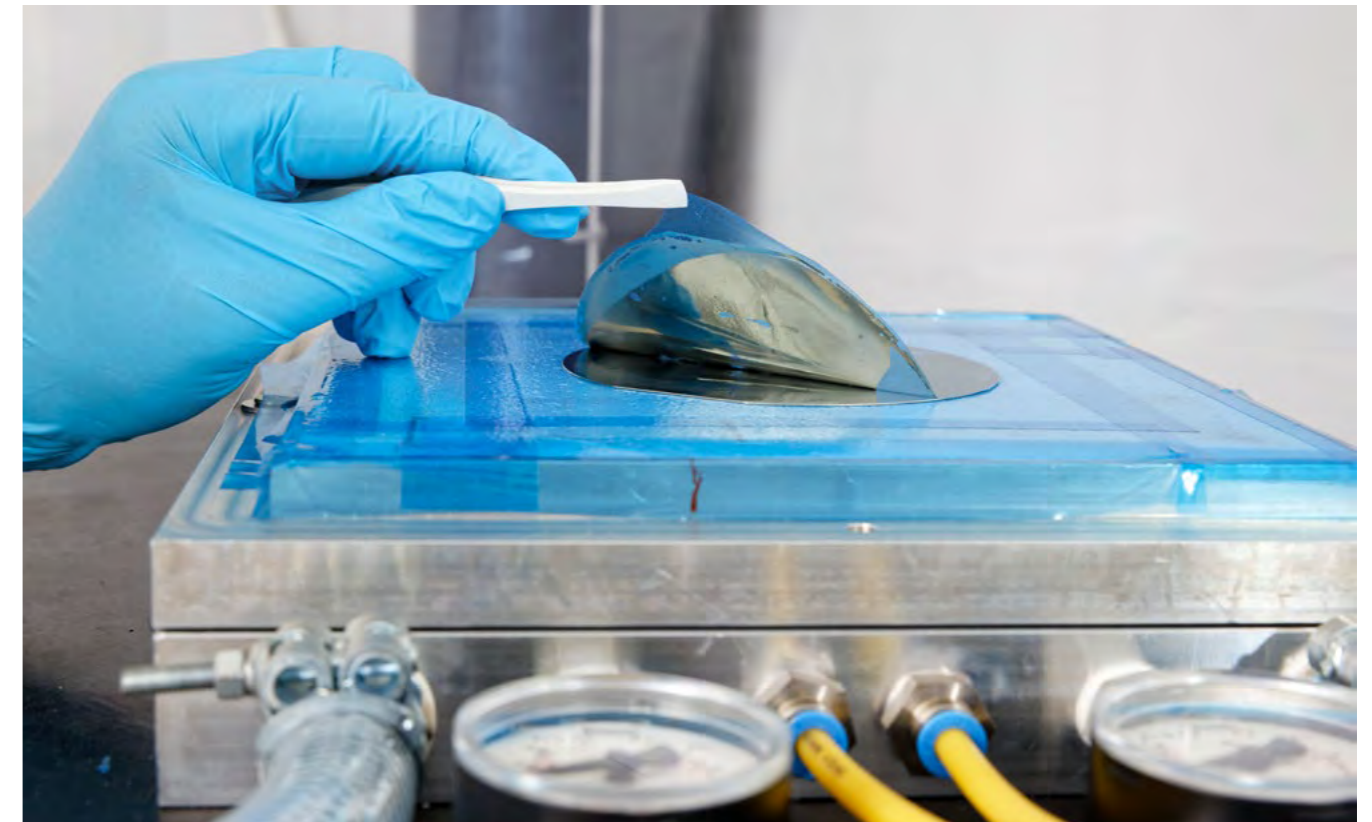
Im Zentrum des Projekts stehen sogenannte III-V-Mehrfach-Solarzellen. Sie bestehen aus zwei bis sechs übereinander gewachsenen Solarzellen, die sich aus Elementen der dritten und fünften Gruppe des Periodensystems zusammensetzen; etwa Gallium, Indium, Arsen oder Phosphor. Weil jede Schicht einen anderen Anteil des Sonnenlicht-Spektrums aufnimmt, erreichen solche «Tandem-Solarzellen» sehr hohe Wirkungs-

grade. Gegenüber den heute verwendeten Siliziumzellen lässt sich mit ihnen pro Fläche ungefähr ein Drittel mehr Leistung herausholen.

Das ist erklecklich – und würde den Flächen- und Ressourcenbedarf der Solarindustrie deutlich vermindern. Trotzdem haben sich Tandem-Solarzellen bisher erst in der Weltraumindustrie durchgesetzt, etwa um Satelliten mit Strom zu versorgen. «Unsere Ausgangsstoffe sind seltener und teurer als Silizium», erklärt Frank Dimroth. Zudem seien die Herstellungsverfahren heute noch aufwändig, weil es sich für den Nischenmarkt Weltraum nicht lohnte, Maschinen und Prozesse extra zu entwickeln, welche eine Massenproduktion zu günstigen Preisen ermöglichen. «Für die terrestrische Anwendung ist dies aber eine Notwendigkeit.»

Der Herstellungsprozess jeder III-V-Mehrfach-Solarzelle besteht aus drei Teilen: Als Erstes wird ein Wachstumssubstrat hergestellt, ein sogenannter Wafer. Als Zweites werden die III-V-Halbleiter schichtweise auf das Substrat aufgebracht – in einem Prozess, der als Epitaxie bezeichnet wird. Im dritten Teil, der sogenannten Prozessierung, wird die Solarzelle fertig gestellt, mit allen Kontakten, Entspiegelungsschichten und Separationsprozessen.

«Jeder dieser drei Teile trägt ungefähr ein Drittel zu den Kosten der Solarzelle bei, deshalb müssen wir alle drei angehen», sagt Frank Dimroth. Und zwar nicht bloss



Um eine Solarzelle zu bauen, braucht es ein Wachstumssubstrat, einen sogenannten Wafer. Die Forschenden am Fraunhofer ISE in Freiburg i. Br. wollen dieses Material mit einer cleveren Methode wiederverwendbar machen.

ein bisschen. Jeder Prozessteil muss um ein Vielfaches effizienter werden. «Unser Ziel ist es, den Prozess hundert Mal günstiger zu machen», sagt Dimroth. So viel höher liegen die Herstellungskosten für III-V-Mehrfach-Solarzellen verglichen mit Standard-Solarzellen heute.

Sollbruchstelle im Wafer

Für diesen Kraftakt wendet das Team diverse innovative Strategien an. Beim Wachstumssubstrat, den Wafern, geht es um Materialeinsparungen. Wafer sind ungefähr 0,3 Millimeter dicke Scheiben. Sie geben den III-V-Schichten, die später das Sonnenlicht einfangen, eine genaue Wachstumsstruktur vor. «Für unsere Solarzellen verwenden wir ein teures Material, Germanium», erklärt Dimroth. «Deshalb wollen wir die Unterlage nach der Herstellung entfernen und mehrfach wiederverwenden.»

Wie das funktioniert, zeigt er in einem Labor im Hauptgebäude des ISE. Wer es betreten will, muss einen Schutzkittel und Einweg-Überschuhe anziehen – Schmutzpartikel könnten die Experimente gefährden, an denen das Team hier arbeitet. Unter einem Abzug ist eine Halterung zu sehen, in die sich ein runder Wafer einspannen lässt. Die Scheibe wird dann in einem Becken mithilfe von Flusssäure und zwei Elektroden elektrochemisch behandelt.

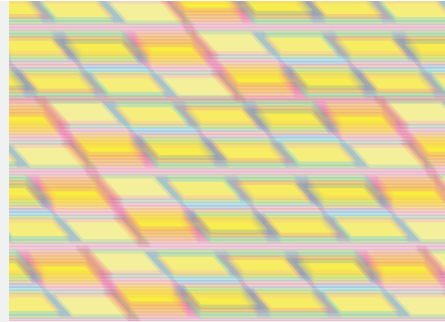
Dabei passiere zweierlei, erklärt Dimroth. «Wenn wir eine negative Spannung anlegen, führt das zu einer

hauchdünnen Ätzung auf der Oberfläche des Wafers.» Bei einer positiven Spannung schliessen sich die Oberflächen wieder. Die Kombination beider Schritte mit einem weiteren thermischen Ausheizschritt ermöglicht es, wenige hundert Nanometer unter der Oberfläche des Wafers eine poröse Schicht zu erzeugen.

Diese Schicht dient als eine Art Sollbruchstelle. «Am Ende des Herstellungsprozesses können wir die Halbleiterschichten vom Wafer abziehen und diesen mehrfach wiederverwenden», erklärt Dimroth. Um diese Technologie zu perfektionieren, braucht es allerdings intensive Forschung. «Wir haben gezeigt, dass wir die Schichten herstellen können. Aber wir haben den Ablöseprozess noch nicht im Griff.» Auf diese Frage konzentrierte sich eine der ersten Doktorarbeiten in dem Projekt, die im Oktober 2025 begann.

Einzigartige Epitaxie-Anlage

Vor der Substratablösung müssen die III-V-Halbleiterschichten der Solarzelle aufgebracht werden. Dies geschieht Schritt für Schritt in einer mehr als zehn Meter langen Anlage. Frank Dimroth führt den Besucher durch Flure und Treppenhäuser bis zum Epitaxie-Labor des ISE. Neben zwei bestehenden Anlagen befindet sich hier eine neue, die noch nicht ganz fertig eingerichtet ist. Sie soll diesen zweiten Solarzellen-Entwicklungsteil radikal beschleunigen.



Höchsteffiziente Tandem-Photovoltaik

Forschende am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau wollen einer neuen Art der Photovoltaik zum Durchbruch verhelfen: sogenannten Tandem-Solarzellen, die aus mehreren Halbleiterschichten bestehen. Zwar existiert diese Photovoltaik-Technik schon seit den 1980er-Jahren – doch bislang ist ihre Herstellung zu teuer für einen marktfähigen Einsatz. Das will das Freiburger Team ändern.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

14 Mio. Euro

Projektdauer 2025 – 2032

Projektleitung

Dr. Frank Dimroth, Leiter Abteilung III-V Photovoltaik und Konzentratortechnologie, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg i. Br.

Prof. Dr. Andreas Bett, Institut für Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Leiter Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg i. Br.

Die Maschinen, die heute für das Kristall-Wachstum von III-V-Mehrfach-Solarzellen verwendet werden, sind relativ langsam und haben einen geringen Durchsatz. Vor ungefähr vier Jahren hätten sich Expertinnen und Experten des ISE deshalb zusammengesetzt, um zu besprechen, wie eine effiziente Epitaxie-Anlage aufgebaut sein müsste, erzählt Dimroth. «Wir dachten, in einem halben Jahr hätten wir die Prozesse zusammen, aber das war zu optimistisch.»

Doch nun ist es so weit. In Zusammenarbeit mit deutschen Mittelstandsfirmen bauten die Forschenden eine Anlage, die perfekt auf die Bedürfnisse der III-V-Mehrfach-Photovoltaik zugeschnitten ist. «Wir wollen einen Prozess, der heute zwei Stunden dauert, auf fünf Minuten verkürzen», sagt Dimroth.

Der Epitaxie-Prozess funktioniert folgendermassen: Der Germanium-Wafer wird in eine Reaktionskammer gebracht. Währenddessen werden im Bauch der Anlage nach einer geheimen Formel die verschiedenen Halbleiter-Zutaten in einen gasförmigen Zustand gebracht, vermischt und mit Dotierstoffen versehen, um ihre elektrische Leitfähigkeit zu optimieren. Das Gemisch wird in die Reaktionskammer geleitet und mit einer Art Duschkopf auf den Wafer gesprüht. In der auf 700 Grad Celsius erhitzten Kammer setzen sich die Metallatome ab – und suchen sich ihren Platz im Kristallgitter des Wafers. Ungefähr 20 bis 40 Halbleiterschichten werden so abgeschieden. So entsteht eine nur wenige Mikrometer dicke, aber sehr effiziente Solarzellenstruktur.

Viel rascher aufgeheizt

Die neue Anlage steckt voller Innovationen. Eine ist ganz schlicht die Form der Reaktionskammer. Sie ist nicht rund wie bei der bisherigen Epitaxie-Anlage, sondern quadratisch. Dadurch entsteht weniger ungenutzte Fläche. «Allein dies wird einen Effizienzgewinn von 20 Prozent bringen», sagt Dimroth. Eine enorme Verbesserung ist auch eine neuartige Heiztechnik, mit der die Reaktionskammer innert einer Minute auf 700 Grad erhitzt wird. «Die Anlage nebenan benötigt dafür 20 Minuten», sagt Dimroth.

Über der Reaktionskammer ist zudem eine Stahlkiste angebracht. «Das ist ein Plasmagenerator, mit dem sich Gase ionisieren lassen», erklärt Frank Dimroth. Der Plasmagenerator, so seine Hoffnung, erleichtert die Zerlegung der Moleküle, sodass weniger Hitze benötigt wird, um die Metallatome auf den Wafer zu bringen. Allerdings könnte das Plasma das Solarzellenmaterial auch schädigen. Die erste Dissertation im Bereich Epitaxie untersucht deshalb unter anderem, ob der Plasmagenerator ein Vor- oder Nachteil für den Prozess ist. «Wir betreten hier wissenschaftliches Neuland», sagt Dimroth.

Der dritte Teil der Solarzellenproduktion, die Prozessierung, findet im «Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen» statt, welches das Fraunhofer ISE vor vier Jahren eröffnet hat. Hier werden die epitaxierten Wafer zu funktionierenden Bauelementen verarbeitet. Heutige



Ein topmoderner Tintenstrahldrucker ermöglicht es, Photolacke äusserst genau auf Solarzellen zu drucken. Das kann den Herstellungsprozess beschleunigen und den Materialverbrauch verringern.

Prozesse finden in Reinräumen statt, die aufwändig und teuer sind. Einige Räume sind gelb beleuchtet. Dort wird mit lichtempfindlichen Photolacken gearbeitet, um sogenannte Masken auf der Vorderseite der Zelle zu erzeugen. Anschliessend werden darauf hauchdünne Metallschichten aufgedampft und dann der Photolack wieder entfernt. Zurück bleiben feine, fingerartige Metallbahnen. «Diese Metalle sollen einen möglichst geringen Teil der Zelle bedecken, um deren Effizienz nicht zu verringern», sagt Dimroth.

Eine erste Dissertation in diesem Bereich untersucht, wie sich solche Fertigungsschritte bewähren, wenn die Tandem-Solarzellen-Folien nur noch wenige Mikrometer dick sind. Und wie man die Herstellung kostengünstiger machen könnte. Dazu gehört insbesondere auch, die heutigen Mikroelektronik-Techniken zu ersetzen durch Fertigungstechniken, wie sie die Silizium-Photovoltaik anwendet.

Den Lack aufdrucken

Ein Beispiel zeigt Dimroth in einem Laborraum im Obergeschoss. Hier steht ein ungefähr zwei auf zwei Meter grosser Tintenstrahldrucker. Mit diesem Gerät lassen sich Lacke so genau auf Solarzellen aufdrucken, dass man die hauchdünnen Bahnen für die Metallbedampfung direkt aussparen könnte. Das würde zwanzig Mal weniger lang dauern als die heutigen Prozesse und erst

noch weniger Lack benötigen. Noch allerdings braucht der Drucker Verbesserungen. Heute drucke er auf zehn Mikrometer genau, sagt Dimroth, nötig wären ungefähr fünf Mikrometer. «Wir wollen die Prozesse Schritt für Schritt schneller und skalierbarer machen – gleichzeitig müssen wir genügend exakt bleiben.»

Denn am Ende müssen die neuen Solarzellen nicht nur wirtschaftlich mit den herkömmlichen Siliziumzellen mithalten, sondern auch ihren überlegenen Wirkungsgrad beibehalten. «Wir wollen vermeiden, dass die Zellen im Verlauf der Herstellung an Effizienz verlieren», sagt Dimroth. «Unser Ziel ist es, Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 35 Prozent kostengünstig herzustellen.» Gelingt dies, steht einer neuartigen Photovoltaik nichts im Weg – und sie wäre erst noch «Made in Europe».



Bei der hochkonzentrierenden Photovoltaik besteht jedes Modul aus vielen Einheiten mit jeweils einer Linse und einer winzigen Solarzelle. Die Forschenden müssen kontrollieren, ob jede Solarzelle am richtigen Ort sitzt.

Hochkonzentriert zu günstigem Strom

Die Tandem-Solarzellen des Forschungsteams am Fraunhofer ISE in Freiburg im Breisgau lassen sich mit einer weiteren vielversprechenden Technik verbinden: mit der hochkonzentrierenden Photovoltaik. Das erlaubt enorm hohe Wirkungsgrade mit minimalem Verbrauch der Halbleiter-Materialien.

Eine spannende Entwicklung in der Photovoltaik ist die hochkonzentrierende Photovoltaik. Dabei verstärken kostengünstige Linsen das Sonnenlicht tausendfach und bündeln es auf eine wenige Quadratmillimeter kleine Solarzelle, die es in Strom umwandelt. Die Forschenden um Frank Dimroth vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg im Breisgau sind weltweit führend bei dieser Technologie. Sie haben vor einigen Jahren eine solche Solarzelle hergestellt, die unter 665-fach konzentriertem Sonnenlicht einen Wirkungsgrad von 47,6 Prozent erreicht – das ist Weltrekord.

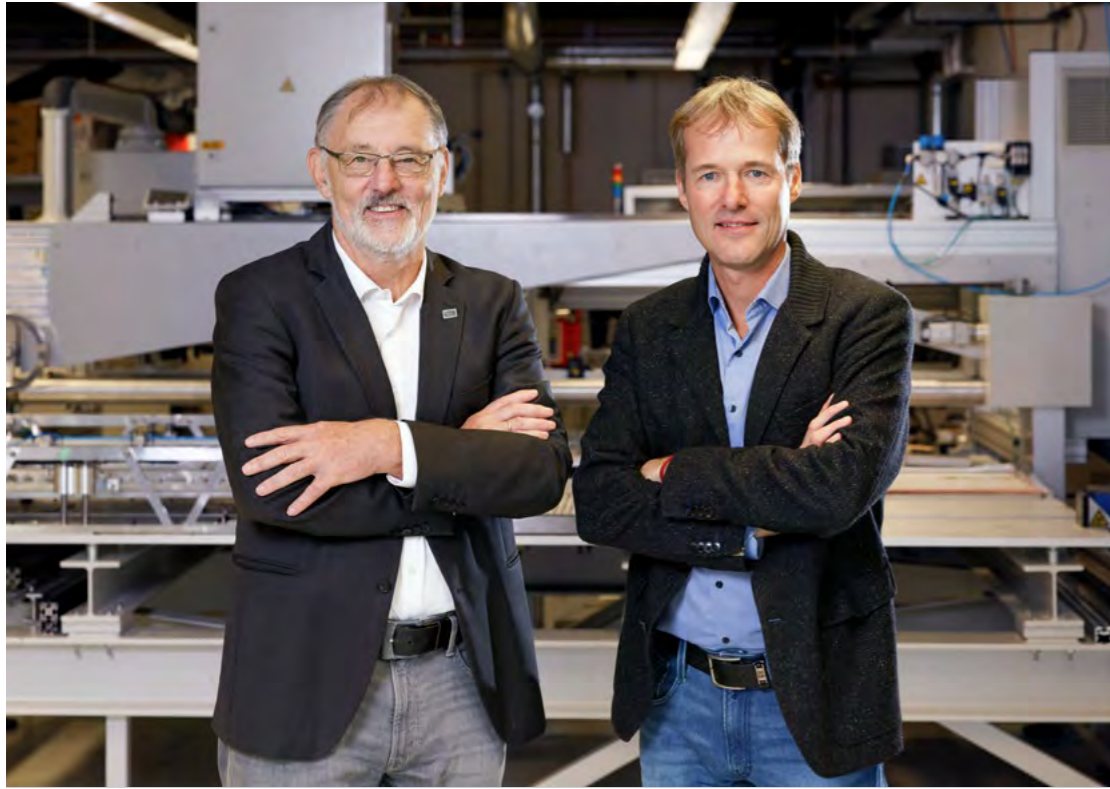
Die Kombination der III-V-Halbleiter-Mehrfach-Solarzellen mit der hochkonzentrierenden Photovoltaik ist ein weiterer wichtiger Teil des neuen WSS-Projektes. «Denn damit benötigen wir noch einmal 1000 Mal weniger Halbleitermaterial und kommen schneller zu wettbewerbsfähigen Stromgestehungskosten», sagt Frank Dimroth. Die Technologie ist bereits so weit fortgeschritten, dass das Team gerade eine Ausgründung namens Clearsun Energy plant, die hochkonzentrierende Solarmodule bauen und vermarkten soll. Mit dem Preisgeld aus der Endrunde des 100-Jahr-Jubiläumsprojekts der WSS hatte das Freiburger Team den ersten Schritt der Modul-Skalierung auf etwa die Grösse eines Computerbildschirms erfolgreich umgesetzt. Das Spin-off nimmt nun zwei auf vier Meter grosse Module in Angriff.

Die Herstellungsprozesse werden in zwei Labors auf dem Campus des ISE erforscht und verbessert. Auf einer Anlage werden die winzig kleinen Solarzellen auf eine Glas-Bodenplatte mit einer Leiterbahnstruktur aufgebracht. Im zweiten Schritt kommt ein kleiner Tropfen Silicon auf die Zelle und eine Glaskugel mit einem Durchmesser von nur 1,6 Millimetern. Um hohe Durchsätze in der Produktion zu erreichen, ist es wichtig, dass die Bauteile in Zukunft nicht mehr einzeln gesetzt werden, sondern alle auf einmal. Auch hier arbeitet das Team bereits an Lösungsansätzen.

Eine ausgeklügelte Idee

Frank Dimroth führt die ausgeklügelte Idee in einem Laborraum vor. Die Forschenden haben eine Schablone in der Grösse des Solarmoduls gebaut, die Vertiefungen dort aufweist, wo die Kugellinsen zu liegen kommen sollen. Werden Kugellinsen auf der Schablone verteilt, fallen sie in diese Vertiefungen. Ein Vakuum-Aufsatz greift sie dann alle auf einmal und setzt sie auf die Solarzellen im Modul. Noch bestehen Herausforderungen mit diesem System, wie Frank Dimroth sagt. «Wir müssen beispielsweise sicherstellen, dass die Linsen wirklich kugelsymmetrisch sind und sich nicht in den Aussparungen verkeilen.»

Abschliessend wird die Platte mit den Solarzellen und den Kugellinsen in einen Rahmen eingesetzt mit einem



Andreas Bett (links) und Frank Dimroth leiten das ambitionierte Projekt zur Tandem-Photovoltaik.

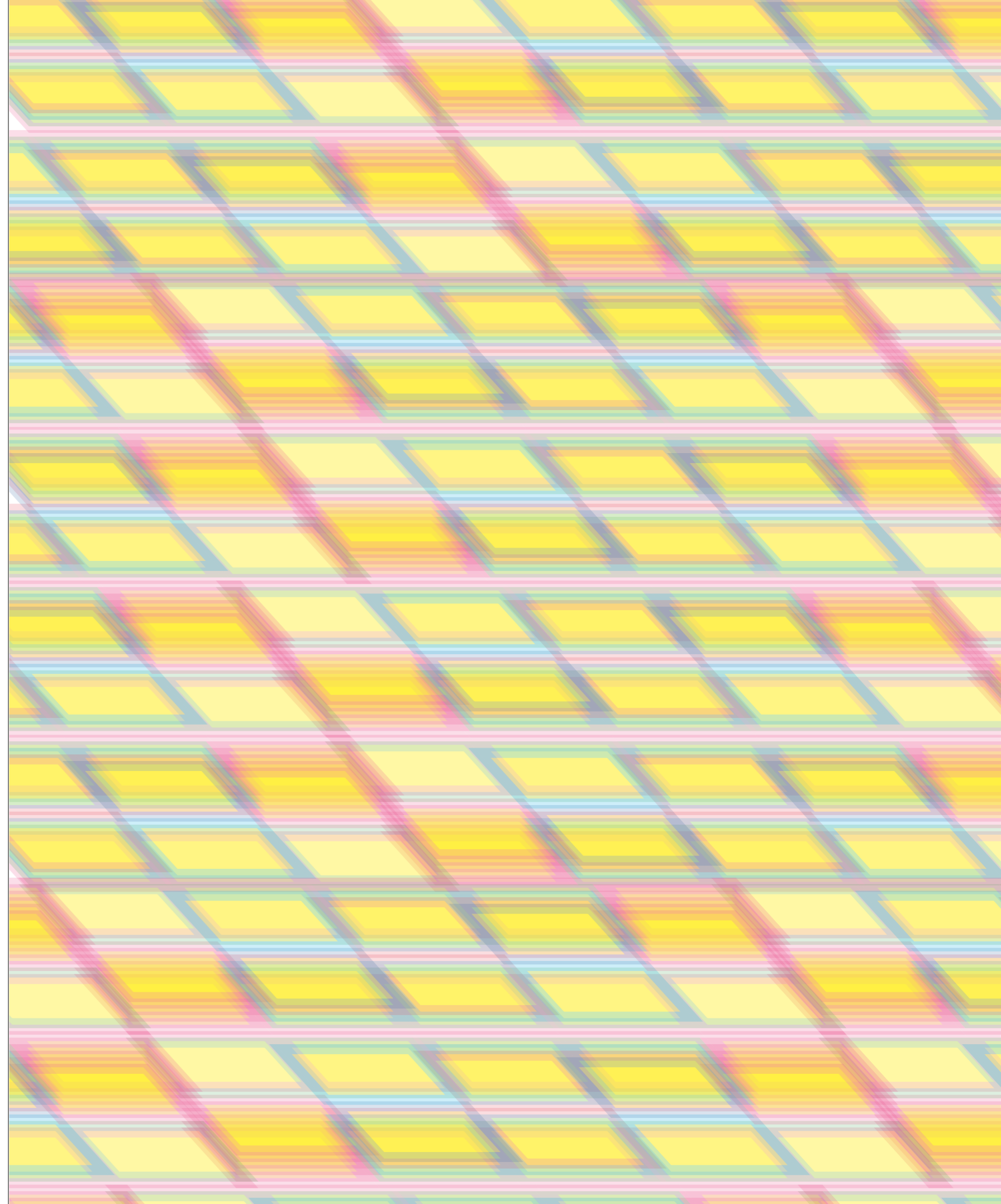
Vorderseitenglas, auf welchem weitere Linsen aus Silicon eingeprägt sind. Das Sonnenlicht wird in zwei Stufen durch Linsen und Glaskugeln konzentriert und erreicht eine 1000-fache Verstärkung der Intensität, bevor es in den Solarzellen in Strom umgewandelt wird.

Die Kosten minimieren

Hochkonzentrierende Solarmodule funktionieren dort sehr gut, wo die Sonneneinstrahlung intensiv ist, etwa in Südeuropa, den USA oder Afrika. Diffuses Licht, wie es in unseren Breitengraden oft herrscht, kann durch die Linsen nicht gebündelt werden und geht daher für die Stromerzeugung verloren. Damit die Konzentration perfekt funktioniert, müssen die Module zudem jederzeit genau zum Sonnenstand ausgerichtet werden. Solche nachgeführten Anlagen seien heute Standard, erklärt Dimroth.

Seine Vision ist es, die hochkonzentrierende Photovoltaik zur wirtschaftlichsten Stromquelle in sonnenreichen Regionen der Erde zu machen. Zudem sei die Technologie besonders ökologisch, da sie nur wenig Energie in der Herstellung benötigt und höchste Wirkungsgrade aufweist. Um diesen Prozess wirtschaftlich zu machen, könnten die ultradünnen Tandem-Solarzellen, die das Team im neuen WSS-Projekt entwickelt, entscheidend sein. Denn heutige Konzentrator-Module verwenden III-V-Halbleiter-Mehrfach-Solarzellen mitsamt ihrem Germanium-Substrat.

«Deshalb verursachen die Zellen trotz ihrer geringen Fläche noch immer fast die Hälfte der Kosten eines Moduls», sagt Dimroth. «Die ultradünnen Zellen, die wir entwickeln, bieten die Chance, die Herstellungskosten deutlich zu senken.» Gelingt es, die hauchdünnen Halbleiter-Zellen in die Konzentrator-Module zu integrieren, liesse sich nach Berechnungen des Fraunhofer ISE in sonnenreichen Ländern Solarstrom für weniger als zwei Cent pro Kilowattstunde produzieren.





Als Direktorin der Empa leitet Tanja Zimmermann ein Team von rund 1000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern.

Materialforschung für den Alltag

Effizientere Batterien, textile Sensoren, selbst heilender Zement: An der Empa werden Materialien in ihrer ganzen Breite erforscht. Empa-Direktorin Tanja Zimmermann erklärt, was Materialforschung bewirkt, wohin sie sich entwickelt – und weshalb Holz ihr Lieblingsmaterial ist.

Tanja Zimmermann, die Empa ist DIE Schweizer Einrichtung für Materialforschung. Woran würden wir es als Gesellschaft merken, wenn es keine Materialforschung mehr gäbe?

Rund zwei Drittel aller Innovationen basieren auf Materialentwicklungen. Ohne Materialforschung gäbe es keine Fortschritte, auch in unserem Alltag. Niemand könnte etwa eine neue Batterie oder einen medizinischen Sensor entwickeln.

Gibt es typische Beispiele von Materialien, die an der Empa entstehen?

Wir entwickeln und optimieren Materialien und Fertigungstechnologien vor allem in drei Bereichen: im Bauwesen, im Energie- und im Gesundheitsbereich. Das Spektrum reicht von der Grundlagenforschung bis zu Machbarkeitsstudien zusammen mit Industriepartnern. Im Energiebereich geht es zum Beispiel um neuartige und effizientere Batterie- oder Photovoltaiktechnologien. Es werden aber

auch ganz neue Materialklassen weiterentwickelt, wie etwa MXene, das sind zweidimensionale Nanomaterialien, die als Energiespeicher für die Elektronik und Sensorik interessant werden könnten.

Und in den anderen beiden Bereichen?

Bei Materialien für medizinische Anwendungen entwickeln wir etwa textile Sensoren für die Langzeit-EKG-Überwachung, die keine Metall-Elektroden mehr enthalten. Sie funktionieren zuverlässig über lange Zeit und verhindern Hautreizungen. Oder wir entwickeln einen speziellen Kleber, der undichte Stellen nach einer Operation im Bauchraum verschliesst und dank integrierter Sensoren sofort warnt, falls ein Leck entsteht. Im Baubereich stehen Konzepte aus der Kreislaufwirtschaft und die Ressourceneffizienz im Zentrum. Wir arbeiten beispielsweise an neuen Materialien, die mit deutlich weniger Beton und Stahl die gleiche Festigkeit

erreichen – deren Herstellung also viel geringere CO₂-Emissionen verursacht. Wir versuchen sogar, CO₂-negative Materialien zu entwickeln.

Was bedeutet das?

Selbst wenn die Menschheit heute aufhören würde CO₂ auszustossen, hätten wir immer noch zu viel davon in der Atmosphäre. Die CO₂-Konzentration würde nur sehr langsam wieder abnehmen. Darum müssen wir CO₂ aus der Atmosphäre entfernen, quasi aufräumen. Unser Ziel ist es, der Atmosphäre das überschüssige CO₂ zu entziehen, es dann aber nicht einfach in den Boden zu pumpen, sondern als Rohstoff zu nutzen. Dafür haben wir die Forschungsinitiative «Mining the Atmosphere» gestartet, an der inzwischen mehr als die Hälfte aller Empa-Labs teilnehmen. Wir untersuchen zum Beispiel, ob sich der Kohlenstoff aus dem CO₂ für keramische Werkstoffe wie Siliziumkarbid nutzen lässt. Oder wie wir den

Kohlenstoff in Baustoffen wie Beton einlagern können.

Das klingt nach Zukunftsmusik. Gibt es auch Empa-Innovationen, die bereits heute einen grossen Impact haben in der Gesellschaft?

Sehr viele. Unser Ziel ist es stets, Wirkung zu erzielen – für KMUs, generell für die Industrie, für das Gesundheitswesen, für die Gesellschaft. Wir haben zum Beispiel ein Verfahren entwickelt, mit dem man in wasserabweisenden Sporttextilien die problematischen PFAS-Chemikalien ersetzen kann. Oder wir bauen mit extrem hitzeresistenten Materialien eine Drohne, die direkt in ein Brandgeschehen fliegen kann, um Aufnahmen für die Feuerwehr zu machen, ohne Menschenleben zu gefährden. Und eine unserer Abteilungen hat über Jahre daran gearbeitet, kohlefaserverstärkte Kunststoffe zu entwickeln. Sie arbeitete schon vor ungefähr 20 Jahren mit dem Alinghi-Segelteam zusammen, das damals den America's Cup gewann. Nun kommen diese ultraleichten, aber auch enorm robusten Materialien im Grossmassstab in die Umsetzung – und zwar in Brücken und anderen Bauwerken. Damit lässt sich sehr viel Stahl ersetzen, die Konstruktionen werden viel leichter – bei den gleichen mechanischen Eigenschaften. Es gäbe noch viele andere Beispiele mit unzähligen Materialien.

«Nachhaltigkeit kann nur entstehen, wenn die Technologie dazu vorhanden ist.»

Wie hat sich die Materialforschung in den letzten Jahrzehnten entwickelt? Sie hat sich extrem gewandelt. Zum einen durch den Einsatz digitaler Technologien. Die heutige Materialentwicklung läuft computergestützt ab – mit Simulationen, Maschinellen Lernen, digitalen Zwillingen. Zum anderen haben sich die Analyse- und Charakterisierungsmöglichkeiten enorm verbessert. Was sich heute auf atomarer Ebene abbilden und unter-

suchen lässt, ist unglaublich. Auf diese Weise erkannte man zum Beispiel, dass sich Materialien im Nanobereich zum Teil ganz anders verhalten als im Mikro- oder Makrobereich. Und schliesslich ist die Materialforschung viel effizienter geworden. Heute ist es möglich, mit Hochdurchsatz-Anlagen Hunderte von Materialproben innert kürzester Zeit zu charakterisieren.

Auch die Empa selbst hat sich gewandelt, von der einstigen Materialprüfungsanstalt zur international anerkannten Forschungsinstitution. Wie wichtig ist die Materialprüfung noch für die Empa?

Die klassische Materialprüfung spielt heute an der Empa keine grosse Rolle mehr. Alles, was auch private Ingenieurbüros testen können, sollen sie übernehmen. Wir tragen aber weiterhin überall dort zur Materialprüfung oder -normierung bei, wo sehr spezifisches Know-how oder spezielle Anlagen notwendig sind.

Wo zum Beispiel?

Durch die Klimaerwärmung werden künftig andere Baumarten in unseren Wäldern wachsen. Fichten und Tannen, die bisher im Baubereich vor allem verwendet wurden, gehen zurück. In unserer Bauhalle entwickeln und testen wir deshalb zum Beispiel die Stabilität von Holzträgern aus Laubhölzern für grosse Bauten. Diese Ergebnisse fliessen in die Normierung ein. Und wir haben Teile der 2018 in Genua eingestürzten Morandi-Brücke untersucht. Dafür benötigt man ganz unterschiedliche Expertise gleichzeitig: etwa für Metalle und Korrosion, Beton und Ingenieurstrukturen. An der Empa haben wir Expertinnen und Experten in all diesen Bereichen.

Gibt es Forschungsbereiche, für die das Prüfwesen wichtig geblieben ist?

Ja, zum Beispiel bei Beton und Asphalt. Es gibt nicht überall private Firmen, die einen Prüf-Service anbieten und über entsprechende Infrastruktur verfügen. Und uns helfen solche Angebote, Vertrauen aufzubauen. Firmen kommen im Gegenzug auf uns zu für Forschungsprojekte. Überhaupt stand die Empa als Prüfanstalt ja immer für Qualität. Die Bevölkerung wusste: Was

von der Empa geprüft wurde, funktioniert – egal ob der Fussball für die WM oder das Kondom. Dieser Ruf ist auch heute für unsere Forschung wichtig.

Sie selbst kommen aus der Holzforschung. Was fasziniert Sie an diesem Material?

Holz ist ein unglaublich vielseitiges und spannendes Material. Es ist die einzige nachhaltig nachwachsende Ressource, über die wir in der Schweiz verfügen. Es ist leicht und trotzdem sehr stabil. Ich finde es faszinierend, wie die Natur es schafft, auf höchst effiziente Weise einen solch funktionalen Leichtbauwerkstoff herzustellen. Ausserdem ist Holz extrem gut modifizier- oder funktionalisierbar.

Was bedeutet das?

Wir haben Holz mit neuen Eigenschaften ausgerüstet, um etwa antimikrobielles, wasserabweisendes oder auch schwer entflammbares Holz zu erzeugen.

«Wir erzeugen antimikrobielles und schwer entflammbares Holz.»

Wie genau?

Man bringt zum Beispiel Mineralien ins Holz ein, um es feuerfest zu machen. Unsere ersten Versuche waren mit Kalk, der an die Zellwände angelagert wird. Etwas Ähnliches versuchen wir jetzt mit Kohlenstoff, um Holz zu einer noch grösseren CO₂-Senke und gleichzeitig für Mikroorganismen schwieriger zersetzbar zu machen. Um antimikrobielles Holz zu erzeugen, haben wir Jod chemisch an das enzymatisch aktivierte Holz gebunden.

Sie haben vor allem mit Nano-Zellulose geforscht. Was ist das?

Bei fibrillierter Zellulose, wie wir sie nennen, handelt es sich um Zellulosefibrillen, die Holz oder andere Pflanzenzellwände aufbauen und deren Durchmesser im Nanometerbereich und deren Länge im Mikrometerbereich liegen. Sie haben unglaubliche Eigenschaften für technische Anwendun-



Elektronik, Beton, Holz: Tanja Zimmermann kann Dutzende Beispiele aus der Empa-Materialforschung aufzählen.

gen. Man braucht nur wenige dieser Fibrillen in Wasser zu geben, dann erhält man ein festes, transparentes oder transluzentes Gel. Daraus ergeben sich diverse Anwendungsmöglichkeiten. Man kann es als Hydrogel nutzen. Oder Schwämme daraus herstellen, die so porös sind, dass sich damit CO₂ aus der Luft einfangen lässt. Wir haben auch Zellulose-Schwämme hergestellt, die Öl aufsaugen, Wasser aber nicht und so bei Ölverschmutzungen in Gewässern helfen können.

Gibt es noch andere Anwendungen?

Fibrillierte Zellulose lässt sich als Verstärkungsmaterial in Klebstoffen nutzen. Und wenn man sie stark verpresst, ist sie eine gute Sauerstoffbarriere. Wir haben daraus eine Sprühverpackung für Früchte und Gemüse entwickelt. Die fibrillierte Zellulose wird als wässrige Suspension auf das Lebensmittel gesprayed und trocknet als dünner Film ab. Vor dem Verzehr kann man sie einfach abwaschen, grundsätzlich könnte man sie sogar mitessen. Sie sorgt dafür, dass etwa

Gurken bis zu zwei Wochen länger halten.

Sie haben mit fibrillierter Zellulose sogar lebende Materialien erzeugt. Das ist noch gar nicht lange her. Es war das letzte grosse, vom Schweizerischen Nationalfonds finanzierte Projekt, das ich mitbetreut habe, auch noch in meiner Zeit als Empa-Direktorin. Wir haben Tinten entwickelt, die Nanozellulose und Kieselalgen, sogenannte Diatomeen, enthalten – und es geschafft, das Ganze mit einem 3D-Drucker zu drucken.

Was bringt das?

Kieselalgen sind Indikatoren für die Wasserqualität. Wir konnten Sensoren bauen, die auf Wasserverunreinigungen reagieren. So könnte man die Wasserqualität in Gewässern überwachen. Es ist aber noch einiges an Arbeit nötig, um aus dem Konzept einen praxistauglichen Sensor zu entwickeln. Es gibt weitere Ideen für den Einsatz von «lebenden Materialien». Zum Beispiel könnte man bestimmte

Bakterien in Zement einbringen, die in der Lage sind, bestimmte Nährstoffe in Calciumcarbonat umzuwandeln. Das liesse sich nutzen, um schwer zugängliche Risse im Zement auszubessern – eine Art selbst heilender Zement also.

Die Empa entwickelt laut ihrem Leitbild Materialien und Technologien für eine nachhaltige Zukunft. Welche Rolle spielen neue Materialien für Nachhaltigkeit?

Eine ganz wesentliche. Nachhaltigkeit kann nur entstehen, wenn die Technologie dazu vorhanden ist – sei es für Kreislaufwirtschaft, für Ressourceneffizienz oder durch Wiederverwendbarkeit. Auf der anderen Seite muss auch die Akzeptanz seitens der Gesellschaft vorhanden sein. Und am Ende muss sich die Energiewende auch wirtschaftlich auszahlen. In diesem Spannungsfeld arbeiten wir.

Woran scheitern Umsetzungen von der Forschung in die Praxis?

Das ist unterschiedlich. Wir haben



Tanja Zimmermann

Tanja Zimmermann ist Professorin für Materialwissenschaft und -technik an der ETH Zürich und an der EPFL in Lausanne und seit 2022 Direktorin des Materialforschungsinstituts Empa. Die 58-jährige studierte Holzwissenschaften und -technologie und promovierte zu den Grundlagen technischer Anwendungen von Zellulose. Sie baute an der Empa das Forschungsgebiet Zellulose-Nanokomposite auf und etablierte es in der Schweiz. Von 2011 bis 2017 leitete sie an der Empa die Forschungsabteilung Angewandte Holzforschung. Ab 2017 war sie Direktionsmitglied und Leiterin des Departements Functional Materials, das sich mit ganz unterschiedlichen Materialien befasste, von Holz- und Zellulose-basierten Werkstoffen über Beton und Asphalt, Hochleistungskeramik und Polymerfasern bis hin zu Materialien und Komponenten für Energieanwendungen.

von unseren mehr als 350 Schweizer Industriepartnern gelernt: Selbst wenn wir noch so tolle Materialien und Technologien entwickeln, funktioniert der Transfer in die Praxis nur dann, wenn es sich auch lohnt. Zudem hat man in der Vergangenheit oft vergessen, auch die Bevölkerung mitzunehmen. Man hat etwas entwickelt und geglaubt, die Gesellschaft werde es dann schon annehmen und nutzen. Aber der wichtigste Grund für ein Scheitern ist normalerweise die Skalierung: Etwas funktioniert im Labor, aber noch lange nicht in einem grösseren Massstab. Darum ist es wichtig, dass wir an der Empa über verschiedene Technologietransferplattformen verfügen, in denen wir Materialien auch im grösseren Massstab auf ihre Praxistauglichkeit testen.

Wo sehen Sie die Anwendungsfelder der Zukunft für Materialinnovationen?

Bei den Materialien rund um Energie- und Klimawandel gibt es noch viel zu erforschen, das wird ein Trend bleiben. Beim Thema Digitalisierung müssen wir aufpassen, dass wir in der Schweiz den Zug nicht verpassen – und unsere Nische suchen, weil wir nicht die Ressourcen haben, alle Aspekte zu bearbeiten. Die alternde Gesellschaft ist ebenfalls ein grosses Thema, und Technologien für die Weltraumforschung sind gerade im Trend. Bei einem weiteren Thema hätte ich noch vor einigen Jahren nie gedacht, dass es aufkommen würde.

Bei welchem?

Bei der Sicherheit und Verteidigung. Wir sind eine Bundesinstitution und verpflichtet, auch solche Themen zu untersuchen, wenn die Schweizer

Behörden diesbezüglich Bedürfnisse haben. Es geht dabei um Materialien und beispielsweise darum, wie man eine dezentrale Energieversorgung im Gelände sicherstellt oder wie man Körperfunktionen bei Soldaten im Einsatz überwacht.

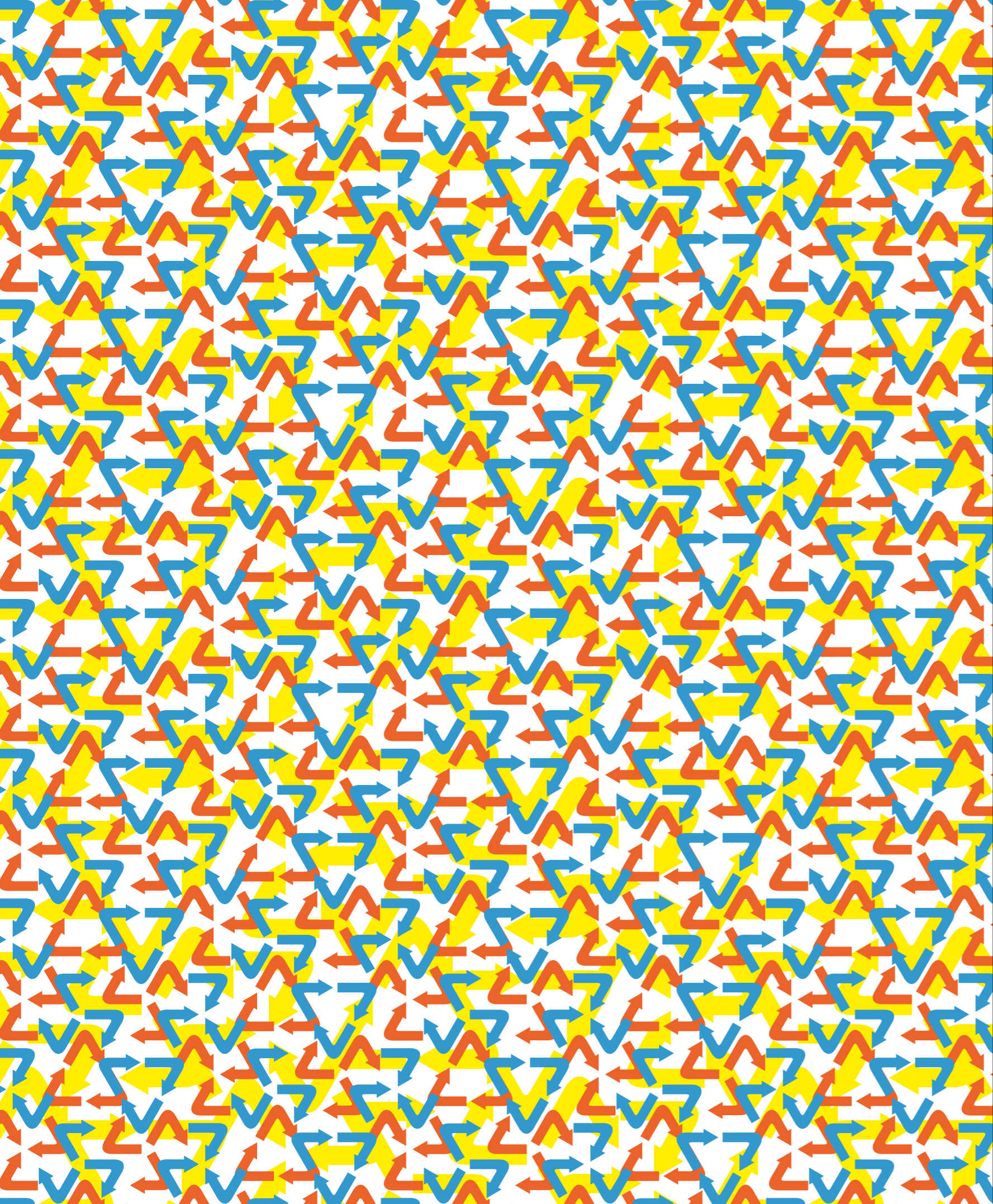
Wie können Stiftungen wie die WSS mithelfen, damit in Institutionen wie der Empa neuartige Materialien entstehen?

Wir sind Stiftungen unglaublich dankbar für ihre Unterstützung. Und ich glaube, gerade die Finanzierung des Empa-Projekts CarboQuant durch die WSS ist ein hervorragendes Beispiel für eine unglaublich vielversprechende Förderung mit exzellenten Forschenden. Aber ein solches Projekt braucht einen sehr, sehr langen Atem. Dass wir es dank der WSS über zehn Jahre weiterverfolgen können, mit hochkarätigen Instrumenten, ist unglaublich wertvoll.

Wenn die Empa morgen ein unkonventionelles, riskantes Forschungsprojekt ohne Rücksicht auf Förderlogik oder Politik starten dürfte – welches Thema würden Sie sofort wählen?

Das wäre etwas Visionäres, wie ich es zu Beginn des Gesprächs skizziert habe: der Versuch, mit «Mining the Atmosphere» Kohlenstoff aus der Luft zu holen, um den CO₂-Anteil in der Atmosphäre wieder auf das vorindustrielle Niveau zu senken und den Kohlenstoff gleichzeitig sinnvoll zu verwenden. Dazu braucht es eine sehr breite Zusammenarbeit – und, ganz wichtig: Wir müssen zuerst noch so weit kommen, dass wir genügend nachhaltige Energie erzeugen. Das alleine ist eine grosse Aufgabe und ein Vorhaben von riesengrosser Relevanz.

«Die klassische Materialprüfung spielt heute an der Empa keine grosse Rolle mehr.»



Kunststoffe im Kreislauf

WSS-Forschungszentrum «catalix»

Adlerblick auf den Kunststoffsektor

Für manche Kunststoffe lohnt es sich eher, katalytische Recyclingverfahren zu entwickeln, als für andere. Im WSS-Forschungszentrum catalaix identifiziert der Arbeitsbereich «Systembewertung» unter der Leitung von Grit Walther mögliche Anwendungsfelder.

Was sagen die Zahlen? Grit Walther (links) und Kathrin Greiff bewerten und modellieren Stoffströme. Ihre Resultate helfen bei der Entscheidung, auf welche Kunststoffsektoren catalaix das Hauptaugenmerk richten soll.



Die Welt des Plastiks ist vielfältig – und ziemlich unübersichtlich. Es existieren Hunderte Kunststoff-Typen für Tausende von Anwendungen, die in Millionen von Produkten stecken. Entsprechend schwierig sind auch die Wege zu verfolgen, auf denen Kunststoffe nach dem Ende ihrer Lebensdauer entsorgt oder recycelt werden. Diese Abfall- und Recycling-Ströme zu analysieren und zu modellieren ist die Aufgabe des Arbeitsbereichs «Systembewertung» im WSS-Forschungszentrum catalaix.

Geleitet wird der Bereich von Grit Walther, Leiterin des Lehrstuhls für Operations Management an der RWTH Aachen und Mitglied des fünfköpfigen catalaix-Kernteam. «Wir sind im Endeffekt so etwas wie ein Frühwarn- oder Transparenzsystem innerhalb des Forschungszentrums», sagt sie. «Unsere Aufgabe ist es, eine Gesamtsicht über die Herausforderungen im Kunststoffsektor entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu erarbeiten – und den chemisch-naturwissenschaftlich arbeitenden Kolleginnen und Kollegen zur Verfügung zu stellen.» Nur mit diesem Wissen lässt sich entscheiden, welche Technologien vielversprechend sind und welche Forschungsrichtungen wirtschaftliche Chancen haben.

In einem ersten Schritt verschaffen sich die Forschenden einen Überblick über das aktuelle Kunststoffrecycling-System. Sie haben dazu beispielsweise Materialfluss-Analysen im Bundesland Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Anhand statistischer Daten aus dem Industrie-, dem Automobil-, dem Bau- oder dem

Verpackungssektor untersuchten sie, wie viele Kunststoffe in diese Verarbeitungszweige fließen – und wie viele davon an ihrem Lebensende verbrannt oder recycelt werden. «Wir sehen, dass momentan noch sehr wenige Kunststoffe im Kreislauf geführt werden», fasst Grit Walther zusammen.

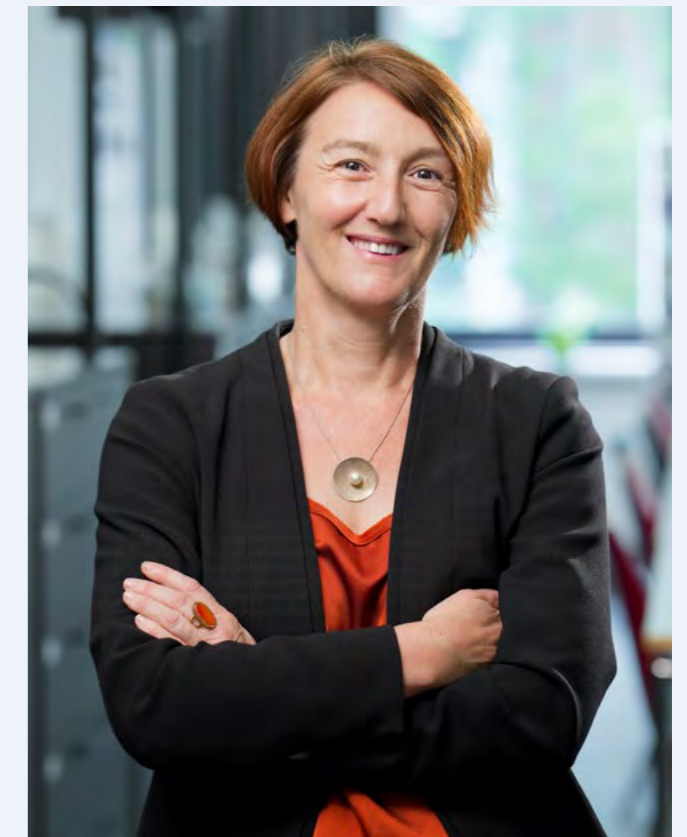
Modelle und Bewertungen

Bereits solche Materialfluss-Analysen sind äusserst komplex, zumal Kunststoffe global gehandelt werden. Doch sie reichen nicht. Darauf aufbauend führt das Team Technologie- und Nachhaltigkeitsbewertungen durch. Welche Recycling-Techniken sind für welche Kunststoffe erfolgversprechend? Wie kann die Wertschöpfungskette für einen neu entwickelten Katalyseprozess aussehen? Wie viel Energie und Ressourcen sind notwendig, um ihn industriell einzusetzen? Sind neue Vorgaben der Politik zu erwarten? Das sind Fragen, welche die Chemikerinnen und Chemiker im Forschungszentrum interessieren.

Solche Bewertungen seien enorm anspruchsvoll, sagt Grit Walther. «Wir müssen uns dafür auf verschiedenen Ebenen bewegen – von global bis molekular.» So spielt der weltweite Rohölpreis eine entscheidende Rolle für die wirtschaftliche Attraktivität von Kunststoffrecycling. Gleichzeitig hängt die Machbarkeit eines geplanten Katalyseprozesses nicht nur vom Kunststofftyp ab, sondern auch von der Qualität des Abfallstroms – ob das



Expandiertes Polystyrol ist ein wichtiges Dämmmaterial. Ein Recycling-Netzwerk für diesen Stoffstrom aufzubauen, beinhaltet diverse Herausforderungen.



Grit Walther vom Lehrstuhl für Operations Management an der RWTH Aachen leitet im Forschungszentrum catalaix den Arbeitsbereich der Systembewertung.

Ausgangsmaterial beispielsweise stark verunreinigt ist oder ob es störende Zusatzstoffe enthält.

Eine konkrete Modellierung hat Grit Walthers Team am Beispiel von Expandiertem Polystyrol (EPS) durchgeführt. Dieser Schaumstoff, bekannt unter dem Markennamen «Styropor», ist ein guter Isolator. EPS wurde Mitte des letzten Jahrhunderts entwickelt und wird in vielen Wohnhäusern zur Dämmung von Böden, Dächern, Wänden und Fassaden eingesetzt. «Es hat eine entsprechend lange Lebensdauer», sagt Grit Walther. «Deshalb werden wir erst jetzt, wegen der Sanierung oder dem Abriss von Häusern, mit der Entsorgung dieses Materials konfrontiert.»

Ein komplexer Materialstrom

Heute wird altes EPS aus Wärmedämmverbundsystemen in der Regel verbrannt. «Die Kapazitäten deutscher Müllverbrennungsanlagen für dieses Material sind aber begrenzt; es hat einen derart hohen Heizwert, dass die Anlagen grössere Mengen nicht zeitgerecht verarbeiten können», sagt Walther. Engpässe sind deshalb programmiert. Eine Studie, die von Walthers Doktorandin Julia Schleier geleitet wurde, kommt zum Schluss, dass im Jahr 2040 deutschlandweit ungefähr 300'000 Tonnen EPS-Altmaterial aus Wärmedämmverbundsystemen anfallen könnten – rund zehn Mal mehr als 2020. Ein klarer Fall also für eine Kreislauflösung? So einfach ist es nicht:

Denn EPS aus Wärmedämmverbundsystemen ist ein «komplexer Stoffstrom», wie Grit Walther es ausdrückt. Ältere Dämmplatten enthalten – heute verbotene – bromierte Flammschutzmittel, die entfernt werden müssen. Auch sonst sind es keine reinen Stoffe: Beim Abschälen von der Fassade bleibt beispielsweise Putz am EPS kleben, was auch ein mechanisches Recycling dieses Stoffstroms erschwert.

Zudem ist der Schaumstoff sehr leicht, hat grosse Volumina und fällt unregelmässig verteilt auf Baustellen in ganz Deutschland an. «Das ist logistisch herausfordernd, man will nicht viel Luft und wenig Gewicht auf Lastkraftwagen Hunderte Kilometer weit herumtransportieren», sagt Grit Walther. Deshalb, und um die nötige Reinheit des Inputstroms zu gewährleisten, braucht es eine Vorbehandlung, bevor die Dämmplatten zu einer Recyclinganlage gebracht werden: Putzreste müssen entfernt, das EPS aufgereinigt und zusammengepresst werden.

Zwei Verfahren verglichen

Walther und Schleier modellierten nun, wie ein funktionierendes Recycling-Netzwerk mitsamt Vorbehandlungsanlagen aufgebaut sein müsste. Dabei zogen sie zwei neue Verfahren in Betracht, die in Pilotanlagen und technischen Untersuchungen ein Potenzial für die Verwertung von EPS zeigen. Das erste ist eine Pyrolyse, bei der EPS unter Sauerstoffausschluss erhitzt wird, um es in

seine Bestandteile zu zerlegen. Das zweite ist ein Verfahren, bei dem der Kunststoff mithilfe von Lösungsmitteln aufgelöst und anschliessend gereinigt wird.

Die derzeit in der Industrie diskutierten Pyrolyseverfahren liefern nur eine vergleichsweise geringe Materialausbeute. Beim lösungsmittelbasierten Recycling kann ein deutlich höherer Anteil zurückgewonnen werden. Zudem lassen sich auch Bestandteile der bromhaltigen Flammschutzmittel entfernen.

Allerdings ist die Pyrolyse das weniger spezifische Verfahren, man könnte solche Anlagen vielleicht auch für andere Stoffströme verwenden. Das macht den Aufbau eines Pyrolyse-basierten Netzwerks günstiger. Tatsächlich fanden die Forschenden, dass sich die Investition in lösungsmittelbasierte Verfahren nur dann lohnt, wenn in Zukunft mehr als 50 Prozent des anfallenden EPS aus Verbund-Wärmedämmsystemen diesem Recycling zugeführt werden.

Die Forschenden erstellten ein Standortmodell für ein deutschlandweites Recycling-Netzwerk, das aus Systemsicht in der Lage wäre, mit den erwarteten EPS-Stoffströmen aus Wärmedämmverbundsystemen der Zukunft umzugehen. Für die Abschätzung des Behandlungsbedarfs berücksichtigten sie beispielsweise das Alter und die voraussichtliche Lebensdauer von Gebäuden in bestimmten Regionen. Auch die Kosten für unterschiedliche Transportstrecken flossen in die Analyse ein. So entstand ein Modell, das bis zum Jahr 2040 ein Netzwerk von Recyclinganlagen an mehreren Standorten sowie zahlreiche Vorbereitungsanlagen vorsieht. Den dafür nötigen Investitionsbedarf schätzten die Forschenden als hoch ein – ohne politische Anreize sei das Recycling wirtschaftlich schwierig.

Je weiter ein Modell in die Zukunft reicht, desto grösser die Unwägbarkeiten. Deshalb haben die Forschenden in einem nächsten Schritt auch analysiert, wo die grössten Unsicherheiten im System liegen. Einige, so das Resultat, liegen in der Politik: Wird das Recycling von EPS aus Wärmedämmverbundsystemen obligatorisch? Gibt es neue Dämmvorschriften für Gebäude? Wird die Pyrolyse als materielles Recycling anerkannt? Die Antworten auf solche Fragen sind entscheidend dafür, ob und wie ein Recycling-Netzwerk funktionsfähig und rentabel wird.

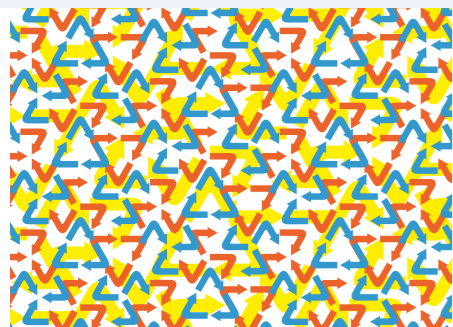
Die besten Anwendungsfelder suchen

Unsicher sind aber auch die Märkte – und die Technologie-Entwicklung. In Letzterer liegen aber auch Chancen, bei denen die interdisziplinäre Zusammenarbeit im WSS-Forschungszentrum catalaix ins Spiel kommt: Denn vielleicht gibt es noch ganz andere, effizientere Recycling-Ideen für Dämmmaterialien wie EPS? Methoden, die ein Recycling-Netzwerk plötzlich wirtschaftlich machen?

Genau solche Ideen würden im catalaix-Verbund momentan intensiv diskutiert, sagt Grit Walther. «Ob wir am Ende zum Schluss kommen, dass gerade die Suche nach einer katalytischen Lösung für EPS besonders aussichtsreich ist, muss sich erst zeigen. Wir suchen gemeinsam in der ganzen Breite Anwendungsfelder, in denen das Team der Systemebene Materialien identifiziert hat, die bisher unbehandelt sind, aber von denen in Zukunft grosse Massen anfallen werden.»

Man könnte es so sagen: Grit Walther und ihre Kolleginnen und Kollegen des Systembewertungs-Bereichs halten den Kompass in der Hand, dank dem sich die Chemikerinnen und Chemiker im Dschungel all der verschiedenen Kunststoffe orientieren können.

Beim Diskutieren entstehen neue Ideen und Ansätze: Zusammenarbeit wird gross geschrieben am WSS-Forschungszentrum catalaix an der RWTH Aachen.



catalaix

Ein Grossteil der chemisch produzierten Produkte landet am Ende ihrer Lebenszeit im Abfall. Das Team um Regina Palkovits und Jürgen Klankermayer von der RWTH Aachen will das ändern – mithilfe von Katalysatoren, welche die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen erhöhen oder erst ermöglichen. Ihr erstes Ziel ist es, dank neuartigen Katalysen Kunststoffe und Kunststoffgemische zu vielseitig einsetzbaren Bausteinen abzubauen. Auf diese Weise entsteht ein Baukastensystem für eine mehrdimensionale Kreislaufwirtschaft in der Chemie.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

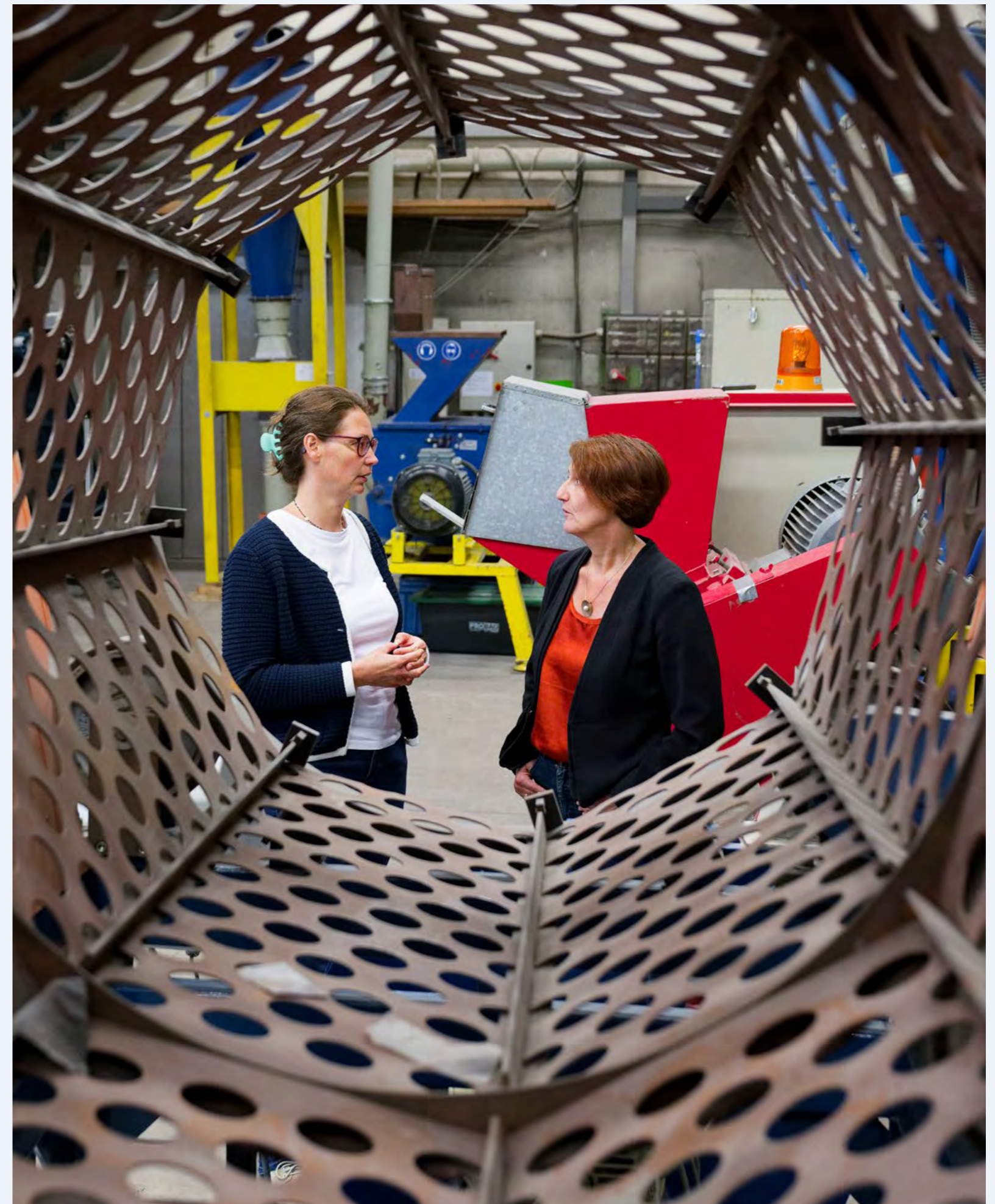
100 Mio. CHF

Projektdauer 2024–2034

Projektleitung

Prof. Dr. Jürgen Klankermayer, Lehrstuhl für Translationale Molekulare Katalyse, RWTH Aachen

Prof. Dr. Regina Palkovits, Lehrstuhl für Heterogene Katalyse und Technische Chemie, RWTH Aachen



Mikroben, die Plastik umbauen

Im WSS-Forschungszentrum catalaix übernehmen Katalysatoren die Schlüsselrolle für den chemischen Ab- und Umbau von Kunststoffen. Doch auch die Natur hat Moleküle entwickelt, die dabei helfen können. Der Forschungsbereich um Lars Blank nutzt solche mikrobiellen Enzyme, um verschiedene Kunststoffmoleküle aufs Mal ab- und umzuwandeln.

Wenn Lars Blank erklären möchte, wozu Mikroben fähig sind, verweist er auf den Wald: Ein Baum fällt um, bleibt liegen – und schon macht sich die Räumeteam der Natur über ihn her. Vor allem winzige Pilze und Bakterien ermöglichen den Holzabbau: Sie setzen Enzyme frei, die in der Lage sind, ganz unterschiedliche und selbst die härtesten Verbindungen im Holz zu spalten. «Ein Baumstamm enthält eine hochkomplexe Polymermischung mit Zellulose, Lignin, Harzen oder Aromaten – und am Ende haben Mikroben alles zerlegt und umgebaut», sagt Blank.

Lars Blank ist Leiter des Lehrstuhls für Angewandte Mikrobiologie an der RWTH Aachen und Mitglied des fünfköpfigen Kernteams im WSS-Forschungszentrum catalaix. Sein Forschungsgebiet ist der mikrobielle Stoffwechsel. Er untersucht, verbessert und entwickelt Mikroorganismen, die verschiedenste Substrate abbauen und daraus neue Moleküle herstellen können. Genau dies sollen sie im Rahmen von catalaix auch mit Kunststoffen tun.

Enzym aus dem Komposthaufen

Vom Menschen geschaffene Kunststoffe sind genauso Polymere, wie die Zellulose – also kettenförmige Moleküle aus kleineren Einheiten, den Monomeren. Mit dem Unterschied allerdings, dass sich Mikroben nicht über Jahrmillionen der Evolution auf ihren Abbau spezialisie-



Lars Blank vom Lehrstuhl für Angewandte Mikrobiologie an der RWTH Aachen untersucht, verbessert und entwickelt Mikroorganismen, die Kunststoffe zerlegen und daraus neue Stoffe produzieren können.

ren konnten. Trotzdem hat die Forschung in den letzten Jahren gezeigt, dass manche vom Menschen hergestellte Kunststoff-Polymere von Mikroben-Enzymen gespalten und verstoffwechselt werden können.

Lars Blank lässt an seinem Bildschirm als Beispiel ein kurzes Video laufen: In einem Glasbehälter macht eine transparente Schachtel einige bizarre Verrenkungen, beginnt kleiner und kleiner zu werden und verschwindet schliesslich ganz. «Das ist eine Himbeerpackung in einem Enzymreaktor», sagt Blank. Ein Stück PET, einer der meistverwendeten Kunststoffe, wird hier bei 65 Grad mittels einer enzymatischen Hydrolyse abgebaut. Das Enzym stammt aus einem Kompost und ist an solche Temperaturen angepasst.

Allerdings findet man ein solches Enzym nicht einfach mit einem Griff in den Komposthaufen. «Bis zur Abbauproduktivität, die wir hier sehen, brauchte es 20 Jahre Forschungsarbeit», erklärt Blank. Es handelt sich um ein speziell effizientes Enzym, das Forschende aus Leipzig nach jahrelanger Suche entdeckten. Das Leipziger Team isolierte die Enzyme, brachte sie in ein geeignetes Trägerbakterium und verbesserte sie. Zum Beispiel mit dem Prinzip der «gerichteten Evolution». Dabei werden in den Enzym-Genen zufällige Mutationen erzeugt und auf ihre Abbauproduktivität getestet. Die besten dienen als Basis für neue Mutationen, die wiederum getestet werden. Und so weiter.

Den Beitrag, den seine Mikroben im catalaix-Projekt leisten können, sieht Lars Blank allerdings weniger im Abbau eines einzelnen Polymers wie PET. Sondern, wie im Fall der Holzzerlegung, bei Mischungen. «Unsere Nische», sagt er bescheiden, «liegt bei Stoffgemischen, die dem Chemiker keinen Spass machen, weil sie zu komplex sind, um sie effizient und günstig zu hochreinen Molekülen abzubauen.» Und es gehe nicht bloss ums Zerlegen, sondern darum, neue, wertvolle Stoffe zu produzieren – eine Art Upcycling.

Vier Moleküle auf einen Streich

Ein Beispiel dafür hat Blank mit seinem Team kürzlich in einer Fachzeitschrift publiziert. Wiederum diente PET als Ausgangsmaterial. Die Forschenden entwickelten einen zweistufigen Prozess, um daraus mithilfe von Enzymen und gentechnisch veränderten Bakterien wertvolle neue Stoffe herzustellen. Im ersten Schritt bauten sie das PET mit einem Polyesterhydrolyse-Enzym in seine beiden Ausgangsmoleküle Ethylenglykol und Terephthalsäure ab. Für den zweiten Schritt präparierten sie Bakterien der Art *Pseudomonas putida* gentechnisch so, dass sie diese beiden Moleküle gleichzeitig aufnehmen und verwerten können.

Sie «bauten» drei Versionen des Bakteriums: Die erste produzierte Cyanophycin, ein Biopolymer, das zum Beispiel für die Medizin oder die Landwirtschaft inte-

ressant sein könnte. Das zweite Bakterium machte aus den beiden Ausgangsmolekülen eine Substanz mit der Abkürzung HAA, das dritte sogenannte Rhamnolipide. Beide Stoffe sind oberflächenaktive Substanzen, die zum Beispiel in Reinigungsmitteln zum Einsatz kommen könnten.

Damit nicht genug: In einem anderen Experiment zeigte Blanks Team, dass es sogar in der Lage ist, einem Bakterium vier Monomere gleichzeitig zu verfüttern. Dafür verwendeten die Forschenden die vier Bestandteile einer PBAT/PET-Mischung: Ethylenglykol, Terephthalsäure, 1,4-Butandiol und Adipinsäure. «Nachdem wir alle vier Stoffwechselwege in ein Bakterium eingebracht hatten, konnten wir zeigen, dass es gut wächst – und die vier Monomere mehr oder weniger gleichzeitig aufnimmt», erzählt Blank.

Als nächsten Schritt brachten die Forschenden ihre Mikroben dazu, aus diesen vier Plastikbestandteilen ein einziges neues Produkt herzustellen. «Dafür pflanzten wir dem Bakterium einen synthetischen Stoffwechselweg aus einem anderen Organismus ein», erzählt Blank. Das entstehende Molekül war – je nach verwendetem Stoffwechsel-Gen – eine Hydroxyfettsäure mit zehn oder mit 14 Kohlenstoffatomen.

«Wir können also langlebige Kunststoffe wie Polyester enzymatisch in verschiedene Monomere zerlegen, damit Mikroben ernähren und sie daraus hochwertige Stoffe produzieren lassen», sagt Blank. Mit solchen Beispielen könne die Mikrobiologie die Chemie in catalaix unterstützen. «Für Chemiker ist es eine grosse Herausforderung, komplett unterschiedliche Moleküle wie ein Aromat, ein Diol und Carbonsäuren in ein einziges neues Molekül zu verwandeln. Wir schaffen es.»

Wichtig, das ist die catalaix-Devise, ist stets eine interdisziplinäre Zusammenarbeit: Als Beispiel könnte die Chemie erste Abbauschritte vornehmen und die entstehenden Moleküle an die Mikrobiologie übergeben. Diese verfüttert sie an Mikroorganismen und stellt neue Produkte her. Diese gehen nach einer Trennung durch die Verfahrenstechniker zurück in die Chemie-Labors, wo sie als Ausgangsmaterialien für neue Kunststoffe dienen.

Wie genau die Zusammenarbeit und die einzelnen Schritte aussehen, hängt von den jeweiligen Kunststoffen ab. «Es braucht unterschiedliche Verarbeitungskaskaden für unterschiedliche Kunststoffe», sagt Lars Blank. «Aber letztlich ist unser Ziel, dass wir durch eine Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Disziplinen den Kohlenstoff aus den Kunststoffen im Kreis halten.»

Ran an die realen Ströme!

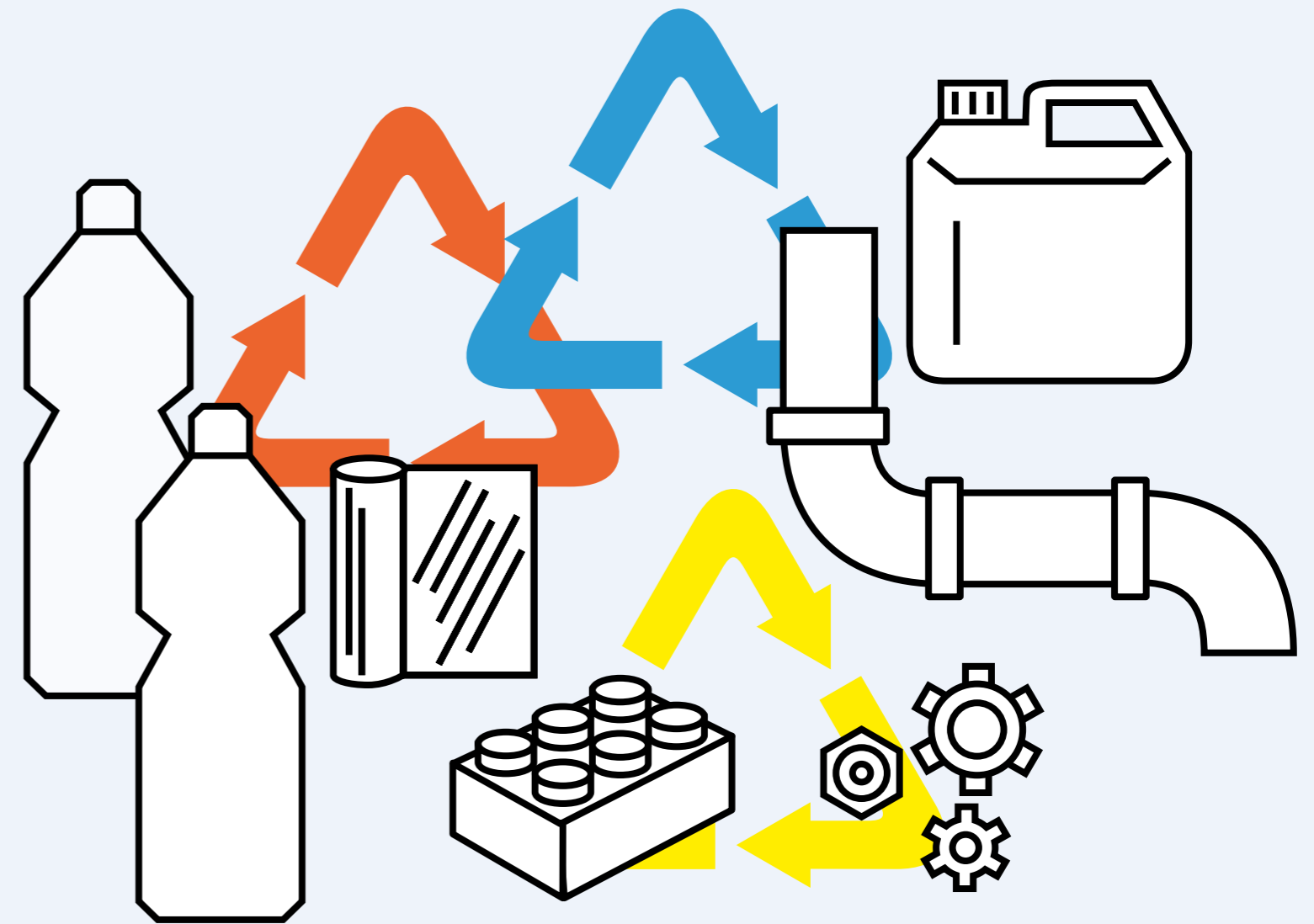
Der Weg zu diesem Ziel ist lang und steinig. «Momentan», sagt Blank, «kaufen wir die Monomere für unsere Experimente im Chemie-Katalog oder nehmen Produkte unserer Chemie-Kolleginnen und -kollegen, die aber ebenfalls reine Ausgangsmaterialien benutzt haben.» Reale Stoffströme hingegen sind selten rein: Viele Kunststoffabfälle werden wild durcheinandergemischt, an Verpackungen kleben Essensreste, Plastikspielzeug trägt einen Farbüberzug. «Wir müssen näher an solche realen Bedingungen kommen», sagt Blank.

So untersucht seine Arbeitsgruppe momentan, wie Mikroben mit sogenannten Additiven umgehen könnten. Diese Zusätze verleihen vielen Kunststoffen wertvolle Eigenschaften: Verstärkungstoffe erhöhen die Festigkeit eines Plastiks, Gleitmittel verbessern seine Verarbeitbarkeit, Flammschutzmittel verringern die Brennbarkeit, Stabilisatoren schützen vor Wärme oder Licht.

Bei vielen Plastikprodukten allerdings wissen nur die Hersteller selbst, welche Additive in welchen Mengen enthalten sind. Das macht Untersuchungen langwierig und schwierig. Blank hofft, dass ein Industriepartner für einige seiner Produkte bald Licht ins Dunkel bringt und den Forschenden eine Liste von Additiven zur Verfügung stellt. Das Beispiel zeigt: Um die Kunststoffindustrie nachhaltiger zu machen, muss an vielen Schraubchen gedreht werden. Doch das Forschungszentrum catalaix verfügt zweifellos über die Werkzeuge, um diese Arbeit in Angriff zu nehmen.

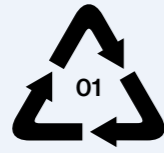
Weitere biologische Ansätze

Mit mikrobiellen Enzymen und biologischen Molekülen befassen sich auch weitere Forschungsteams in catalaix: Die Gruppe von Lars Lauterbach etwa arbeitet unter anderem an mikrobiellen Methoden, um direkt aus CO₂ und Grünem Wasserstoff wertvolle Chemikalien herzustellen. Die Forschungsgruppe von Jörgen Magnus ist auf die Bioverfahrenstechnik spezialisiert. Sie untersucht, wie sich mikrobiologische Verfahren hochskalieren lassen. Wie sie also im grösseren Massstab, bis hin zu Fermentern, möglich werden. Die Gruppe von Ulrich Schwaneberg schliesslich entwickelt sogenannte Bindepeptide. Dabei handelt es sich um Proteine, die auf Oberflächen haften bleiben. Solche Moleküle sind ein äusserst interessanter Ansatz für neuartige Trenntechniken: Mit verschiedenen bindungsspezifischen Peptiden könnten sich dereinst die unterschiedlichen Kunststoffsorten in einem Abfallgemisch (siehe Text Seite 92) markieren und einfacher trennen lassen.



Die Vielfalt der Kunststoffe

Verpackungen, Spielzeuge, Autoteile, Kleider oder Brillengläser: Kunststoffe prägen unseren Alltag. Und ihre Produktion steigt exponentiell. Im Jahr 2024 wurden weltweit 430,9 Millionen Tonnen Kunststoff hergestellt – das entspricht dem Gewicht aller Autos in Europa. Ein Überblick über die wichtigsten Kunststoffarten, ihre typischen Anwendungsbereiche – und über die Herausforderungen des Kunststoffrecyclings.

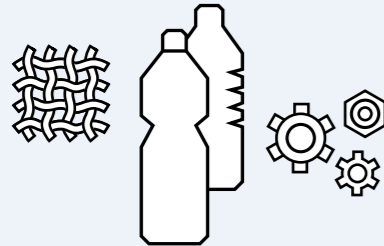


PET

Polyethylenterephthalat

Eigenschaften

Hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit, verschleissbeständig, behält Grösse und Form unter wechselnden Umweltbedingungen, elektrisch isolierend



Anwendungsbeispiele

Getränkeflaschen, Verpackungen, Textilien, Isolierteile, Elektro- und Feinwerktechnik

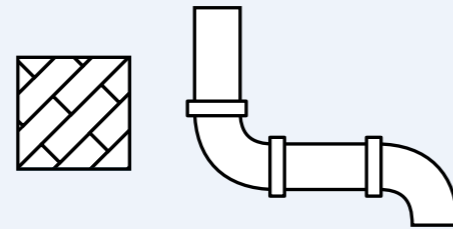


PVC

Polyvinylchlorid

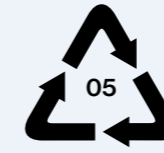
Eigenschaften

Hohe Steifigkeit und Festigkeit, witterungs- und feuchtigkeitsbeständig, schwer entflammbar



Anwendungsbeispiele

Abflussrohre, Bodenbeläge, Schläuche, Apparatebau

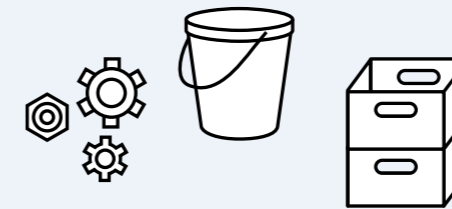


PP

Polypropylen

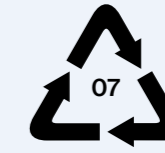
Eigenschaften

Höhere Steifigkeit und Festigkeit als PE-HD, sehr hitzebeständig, sehr hohe Chemikalienbeständigkeit, sehr gute elektrische Isoliereigenschaften



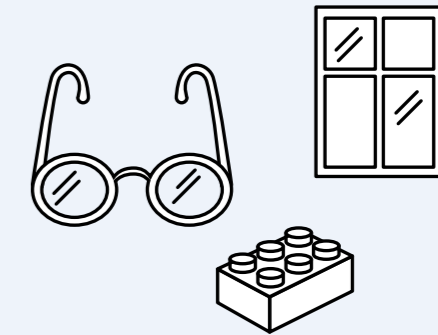
Anwendungsbeispiele

Verpackungen, Lager- und Transportbehälter, Gehäuse und Geräteteile



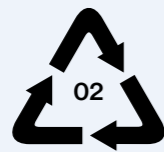
O

Other



Andere Kunststoffe wie

Polycarbonat (PC), Polyamid (PA), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polymethylmethacrylat (PMMA), Polylactide (PLA)

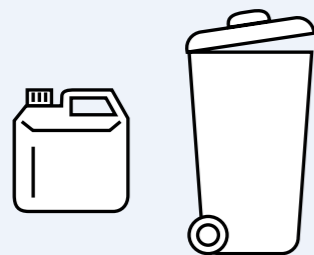


PE-HD

Polyethylen hoher Dichte

Eigenschaften

Gute elektrische Isoliereigenschaften, sehr hohe Chemikalienbeständigkeit



Anwendungsbeispiele

Haushaltswaren, Abfalltonnen und -behälter

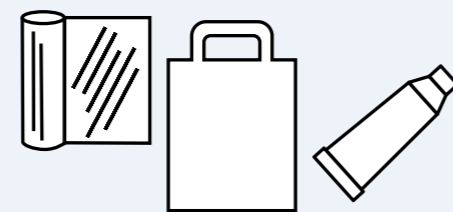


PE-LD

Polyethylen niedriger Dichte

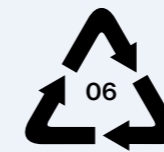
Eigenschaften

Weniger dichte Struktur als PE-HD, weicher, transparenter, flexibler und bruchfester, aber auch weniger beständig gegen Abrieb.



Anwendungsbeispiele

Folien, Verpackungen, Tragetaschen, Isolierungen und Beschichtungen, Haushaltsartikel



PS

Polystyrol

Eigenschaften

Glasklar, hart und spröde, geringe Wärmeleitfähigkeit (deshalb geeignetes Wärmedämmmaterial)



Anwendungsbeispiele

Verpackungen, Behälter, Geschirr, Schaumstoffe, Isolierungen

Mit Katalyse zur Kreislaufwirtschaft

Die Einteilung in Kunststoffarten wie PET, PP und PVC widerspiegelt die chemische Diversität der Kunststoffe nur bruchstückweise. Zusatzstoffe wie Additive, Weichmacher und Füllstoffe erhöhen die Komplexität der Materialien enorm. Zudem werden oft verschiedene Materialien in einem Produkt kombiniert.

Das alles erschwert die Wiederverwendung von Kunststoffen. Konventionelle, mechanische Recyclingverfahren stossen häufig an ihre Grenzen, da sie nur sortenreine und saubere Kunststoffabfälle verarbeiten können. Thermische Verfahren wie die Pyrolyse ermöglichen zwar eine Rückgewinnung, sind jedoch oft energieintensiv und führen zu Produkten mit begrenzter Reinheit. Weltweit wird der Recycling-Anteil an konventionellen Kunststoffen auf bloss ungefähr 10 Prozent geschätzt.

Das WSS-Forschungszentrum catalaix entwickelt innovative Ansätze auf Basis des katalytischen chemischen Recyclings, um Kunststoffabfälle effizient und nachhaltig in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen. So können Kunststoffe selektiv in ihre chemischen Ausgangsstoffe zerlegt und wiederverwendet werden. Parallel legt catalaix die Grundlagen für ein Portfolio an neuen nachhaltigen, umweltfreundlichen Kunststoffen, bei deren Entwicklung die Recyclingfähigkeit bereits mitgedacht wird.



Ausgeklügelte Sortieranlagen sind heute in der Lage, unterschiedlichste Abfälle voneinander zu trennen. Trotzdem bleiben relevante Mengen an Reststoffen übrig, wie catalaix-Untersuchungen zeigen.

Was in der Sortieranlage übrig bleibt

Das Sammeln und Sortieren gemischter Abfälle ist eine Herausforderung. Beim in Deutschland verwendeten «Gelben Sack» etwa verbleibt ein beträchtlicher Anteil an Reststoffen, die nicht recycelt werden. catalaix-Forschende um Kathrin Greiff nehmen sich diesen Reststrom vor.

Den «Gelben Sack» oder die «Gelbe Tonne» kennt in Deutschland jede und jeder: Darin dürfen die Verbraucherinnen und Verbraucher leichte Verpackungen aus Kunststoff, Aluminium, Weissblech und Verbundmaterialien entsorgen. In speziellen Anlagen werden die so gesammelten Abfälle sortiert und für ein mechanisches Recycling aufbereitet.

Bei der Sortierung werden unterschiedlichste, automatisierte Trenntechniken benutzt. Zuerst wird feinkörniges Material ausgesiebt. Danach werden Kunststofffolien entfernt. Das geschieht durch einen sogenannten Windsichter, der die leichten Folien durch Luftströme austrägt. Als Nächstes ziehen Magnet-Trenner die magnetischen Bleche vom Band. Nichtmagnetische Metalle wie Aluminium werden mit einem rotierenden Magnetfeld magnetisiert und ausgeschleudert.

Nun schlägt die Stunde der Nahinfrarot-Sensoren. Diese Geräte erkennen verschiedene Kunststoffe sowie Getränkekartons anhand des Lichtspektrums, das diese absorbieren. Durch gezielte Druckluftstöße auf dem Trennband werden die identifizierten Kunststoffteile aussortiert. Weil jeder Kunststoff sein charakteristisches Absorptionsspektrum aufweist, können dank dieser Technik beispielsweise Kunststoffsorten wie Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET) oder Polypropylen (PP) getrennt recycelt werden.

«Diese Anlagen funktionieren im Rahmen des heute technisch Möglichen sehr gut», sagt Kathrin Greiff. Sie leitet das Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe an der RWTH Aachen und ist eine der verantwortlichen Forschungsprojekt-Leiterinnen im WSS-Forschungszentrum catalaix. «Trotzdem gibt es einen beträchtlichen Reststoff-Strom, der übrig bleibt und grossenteils thermisch verwertet wird.» Je nach Zusammensetzung der entsorgten Abfälle kann der nicht recycelte Teil bis zu 50 Prozent des Sack-Inhalts betragen.

Reststrom aus der Sortieranlage

Ein grosser Teil dieser Restströme ist schlicht darauf zurückzuführen, dass im Gelben Sack auch Abfälle landen, die sich nicht recyceln lassen: Essensreste, Windeln, Textilien oder blinkende Schuhe, die aufgrund des eingebauten Akkus in den Elektromüll gehören. Der andere Teil bleibt übrig, weil die Trenntechniken nicht perfekt sind. Einzelteile können auf dem Trennband von anderen verdeckt sein. Mit Russ behandelte Kunststoffe sind für die Lichtsensoren schwierig zuzuordnen.

Kathrin Greiff und ihr Team haben untersucht, was genau in diesem «Abfall des Abfalls» enthalten ist. Dazu holten sie sich aus einer Sortieranlage drei Dutzend 90-Liter-Proben voller Reststoffe. In einem ersten Schritt untersuchten sie den Inhalt noch einmal mit einem Infrarotsensor. Danach nahmen sie den Müll von Hand auseinander, um ihn zu sortieren und die unterschiedlichen Kunststoffe darin zu bestimmen.

Zuständig für diese aufwändige Arbeit war Alena Maria Spies, die Leiterin der Forschungsgruppe Aufbereitung und Prozessketten am Institut für Anthropogene Stoff-

kreisläufe. Sie hat die Resultate im Herbst auch auf einer Fachkonferenz in Sardinien (Italien) präsentiert. «Wir fanden einen sehr hohen Anteil an Biomasse, oft in einem Gemisch mit Kunststoffen», erzählt Spies. Das heisst: beispielsweise halb leergegessene Joghurtbecher oder Steaks, die noch in ihrer Verpackung liegen.

Um abzuschätzen, wie gross der Anteil an Restmaterial ist, der allenfalls doch noch recycelt werden könnte, bestimmten die Forschenden das effektive Trockengewicht ihrer Müll-Stichproben. «Fraktionen mit viel Biomasse wiesen einen Wassergehalt von zum Teil über 30 Prozent auf», sagt Alena Maria Spies. «Das Wasser macht also viel Gewicht des Reststromes aus, ist aber natürlich kein verwertbares Realmaterial.»

Trotzdem blieb noch einiges an unterschiedlichsten Kunststoffen übrig. Neben relevanten Mengen an Standard-Verpackungskunststoffen wie PE, PET oder PP fanden die Forschenden auch andere Kunststoffsorten wie PVC, PA oder ABS in relevanten Mengen. Das bedeutet: Theoretisch gibt es durchaus Verbesserungspotenzial für die bisherigen Prozesse und für eine Erhöhung der Recycling-Quoten. Nun gilt es zu klären, wie dies ökologisch, ökonomisch und technisch optimiert gelingen kann.

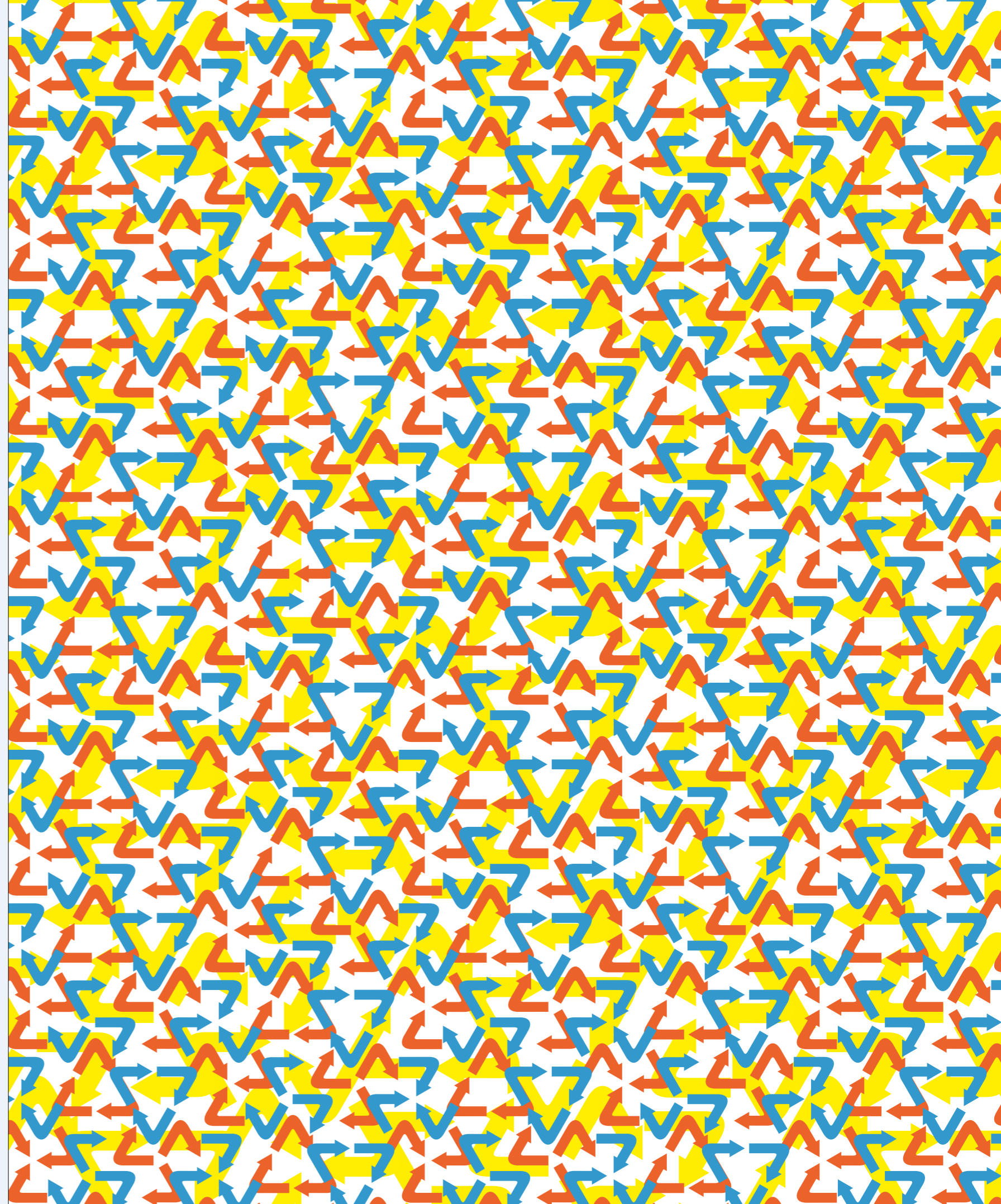
Von den Daten zum Modell

Genau solche Bewertungen sind die Spezialität der Forschenden um Kathrin Greiff. Ihre Gruppe entwickelt Modelle, mit denen sich Stoffströme bewerten und steuern lassen – und in denen man Optimierungen durchspielen kann. Verbesserungen können dabei auf ganz unterschiedlichen Ebenen ansetzen: Was passiert, wenn man das Design einer Verpackung ändert? Wie verbessert sich die Sortier-Quote, wenn weniger Essensreste entsorgt werden? Und natürlich: Gibt es Stoffströme, für welche die Entwicklung chemischer, katalytischer Recyclingmethoden möglich und lohnenswert ist?

Diese Art der Zusammenarbeit laufe nun in catalaix, sagt Greiff. «Wir identifizieren mögliche Stoffströme – und die Kolleginnen und Kollegen der Katalyse suchen Wege, um sie abzubauen und im Kreislauf zu führen.» Genau das, sagt sie, sei der riesige Vorteil des WSS-Forschungszentrums: «Früher arbeiteten die Forschungsgebiete eher für sich – nun haben wir die Möglichkeit, die Lücken zu schliessen und Perspektiven zusammenzubringen, die für ein Gelingen einer Kreislaufwirtschaft wesentlich sind.»



Hier zeigt sich, wie gut sich ein Kunststoff in seine Einzelteile abbauen lässt: Reaktoraufbau zur katalytischen Reaktion von Kunststoffabfall mit gasförmigen Komponenten an der RWTH Aachen.





Projekte

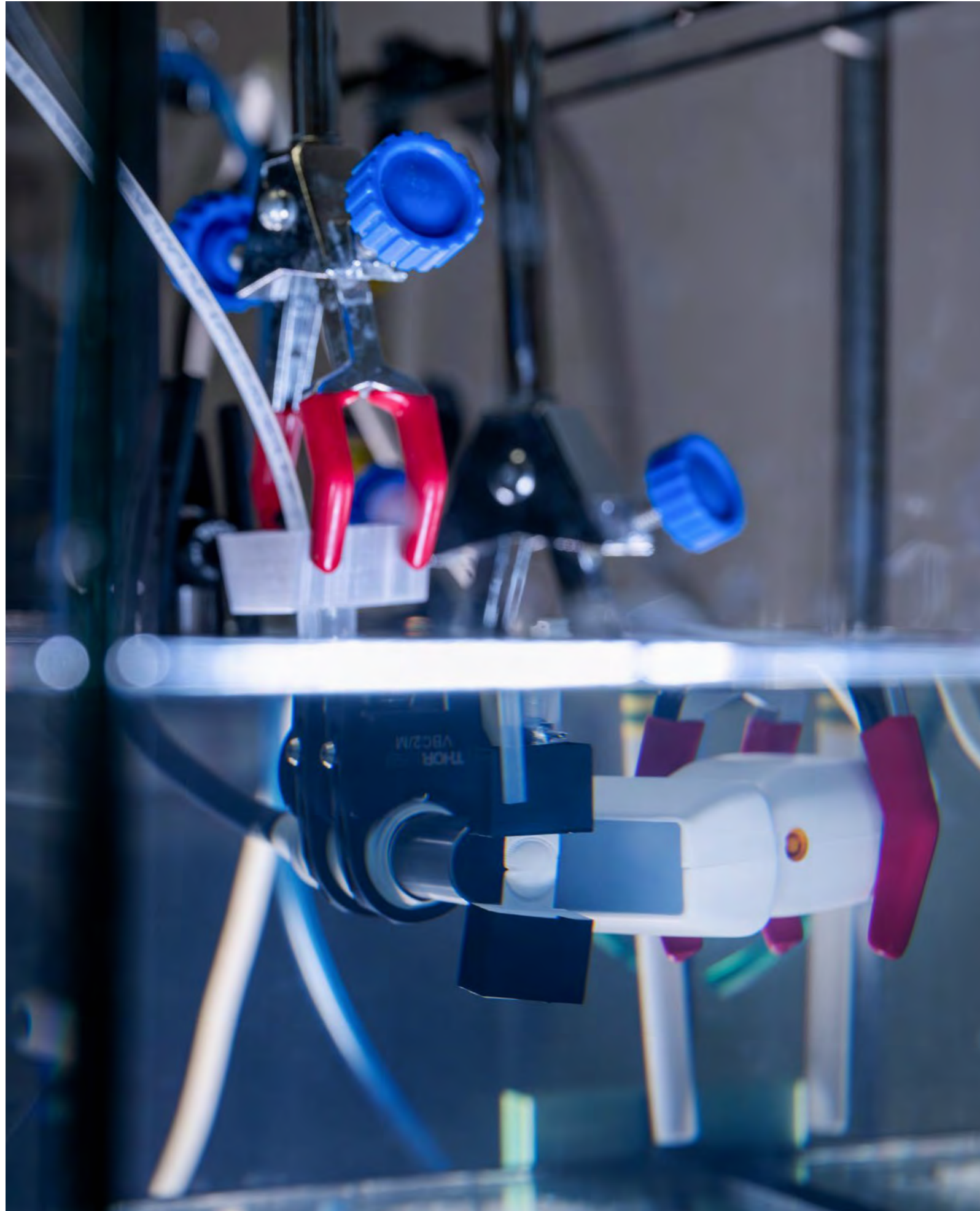
Die Breite der von der Werner Siemens-Stiftung geförderten, pionierhaften Forschungsprojekte ist gross. Auf den folgenden Seiten finden sich die Fortschritte jener Vorhaben, die nicht im Fokusteil des Reports vorgestellt wurden. Zudem präsentieren sich zwei neu unterstützte Projekte: Das eine revolutioniert die Früherkennung von Komplikationen nach Operationen, das andere entwickelt einen Hautersatz für Verbrennungsoffer.



Warnsystem im Körper

Neu unterstütztes Projekt «SonoGuard»

Wachposten an der Operationsstelle



Die Forschenden testen den neuartigen SonoGuard-Sensor im Wasser. So simulieren sie die Verhältnisse im Körper.

Nach vielen Operationen treten Komplikationen auf – und oft werden sie erst spät erkannt. An der Universitätsklinik Balgrist in Zürich entwickelt Professorin Inge Herrmann mit ihrem Team im neu unterstützten Projekt «SonoGuard» eine neuartige Technologie, um solche unerwünschten Verläufe im Körper frühzeitig zu erkennen und gezielt zu behandeln.

Fachübergreifende Forschung verbindet Wissen und öffnet den Weg für kreative Lösungen. Genau diese Idee steht im Zentrum des vor zehn Jahren eröffneten Balgrist Campus in Zürich. Unmittelbar neben der Universitätsklinik Balgrist gelegen, ist er als eine Art kollaboratives Zentrum konzipiert, das auf enge Zusammenarbeit und Austausch zwischen verschiedenen Disziplinen setzt, um Patienten direkt zu helfen.

Das macht sich selbst in der Architektur bemerkbar: Der Campus ist ein helles Gebäude mit offenen Räumen, das ohne viele Trennwände auskommt. Wer im Eingangsbereich steht, hat auch einen Blick ins obere oder ins untere Stockwerk. Loungesessel und Stehtische laden die Forschenden ein, das Gespräch miteinander zu suchen. Schreibtische sind so angeordnet, dass sich jeder zu jedem setzen kann – das fördert den Kontakt zwischen Forschungsgruppen.

Breite Palette an Erfindungen

Im unteren Geschoss erstreckt sich hinter einer Glasfront ein grosszügiger Raum mit Arbeitsplätzen und Labortischen. Hier arbeitet das Team des Ingenuity Labs, das auf innovative Entwicklungen in den Bereichen medizinische Materialien und Technologien spezialisiert ist. Gründerin und Leiterin des Labs ist Inge Herrmann, Professorin an der Universität Zürich, akkreditiert an der ETH Zürich, und als Forschungsgruppenleiterin

auch am Materialforschungsinstitut Empa tätig. Inge Herrmann verkörpert den interdisziplinären Ansatz des Balgrist geradezu perfekt. Die Chemieingenieurin arbeitet mit ihrem Team an der Schnittstelle zwischen Chemie, Materialwissenschaften, Ingenieurwesen und Medizin. Entsprechend vielfältig ist die Palette ihrer Erfindungen und Entwicklungen: Sie hat eine Lasertechnik entwickelt, die offene Wunden verschliesst. Ein Implantat für eine schonende Verhütung und für die Prävention von Endometriose. Oder einen Teststreifen, der im Menstruationsblut Hinweise auf Krankheitsbilder entdeckt.

Von Medien wird Inge Herrmann bisweilen als «Daniel Düsentrieb unter den Schweizer Forscherinnen» bezeichnet. Sie selber nimmt dieses Kompliment bescheiden auf. Sie sei halt vielseitig interessiert und habe das Gefühl, dass sie in einem einzigen Forschungsfeld zu wenige Ideen hätte, sagt sie. Aber sie hebt auch die Zielstrebigkeit ihrer interdisziplinär zusammengestellten Forschungsgruppe hervor: «Wenn wir ein Problem erkennen und einen Lösungsansatz sehen, sind wir unglaublich motiviert, diese Idee zu verfolgen.»

Mit einem solchen lösungsorientierten Ansatz geht die Gruppe auch ihr neuestes Vorhaben an: ein gross angelegtes Forschungsprojekt namens «SonoGuard», das die Werner Siemens-Stiftung in den kommenden fünf Jahren mit 8 Millionen Schweizer Franken unterstützt. Die Herausforderung, mit der sich SonoGuard beschäftigt, sind Komplika-



Das Ingenuity Lab vereint Forschende vieler Disziplinen – etwa der Chemie.



Die Idee für die Hauptkomponente von SonoGuard stammt vom Physiker und Doktoranden Benjamin Suter.

kationen, die nach Operationen im Körperinneren auftreten. Sei es, weil eine Wunde schlecht verheilt; sei es, weil sich die Operationsstelle durch eine Infektion entzündet.

Neuartiges Kontrastmittel

Solche unerwünschten Verläufe sind häufig und tückisch. Denn sie rechtzeitig zu erkennen, ist schwierig, gerade im Körperinneren. «Für tief im Körper auftretende Komplikationen und Infektionen gibt es heute kaum zuverlässige Früherkennungsmethoden», sagt Inge Herrmann. «Sie werden deshalb oft erst bemerkt, wenn sie sich bereits stark ausgebreitet haben.» Entsprechend schwierig und aufwändig kann die Behandlung sein.

Die Idee von SonoGuard ist es, ein einfaches, zuverlässiges Warnsystem zu entwickeln, das tief im Körper liegende Komplikationen frühzeitig ohne Eingriff erkennt – und sogar behandelt. Die Idee für die Hauptkomponente dieser Plattform stammt von Benjamin Suter, Physiker und Doktorand im Ingenuity Lab. Die Details sind noch geheim, bis die Patentierung der wichtigsten Erfindungen und Entwicklungen abgeschlossen ist. Im Grunde gehe es aber um ein neuartiges Kontrastmittel, erzählt Suter. «Wenn eine Komplikation auftritt und wir das Kontrastmittel mit Ultraschall anregen, gibt es ein unverwechselbares Signal ab.»

Das Forschungsteam konzentriert sich in seinem Projekt auf zwei konkrete Anwendungen dieses Frühwarnsys-

tems: Komplikationen nach Eingriffen am Magen-Darm-Trakt und Infektionen nach dem Einsetzen von künstlichen Gelenken, zum Beispiel am Knie oder an der Hüfte.

Bei Operationen am Magen-Darm-Trakt – etwa Darmkrebsoperationen oder Magenbypass-Eingriffen – muss die Chirurgin oder der Chirurg oft frei werdende Darmenden miteinander verbinden. Nicht immer aber bleibt die Naht dicht und verheilt sauber. «An undichten Nahtstellen treten Verdauungssäfte in die Bauchhöhle aus und es können sich schwere Infektionen entwickeln», erzählt Inge Herrmann.

Anfällige Implantate und Prothesen

Letzteres gilt auch für Operationen am Bewegungsapparat: Implantate und Prothesen sind anfällig auf Infektionen, weil sie als Fremdkörper keine Immunabwehr besitzen. Bakterien können auf den künstlichen Oberflächen anhaften und eine dünne Schleimschicht – einen sogenannten Biofilm – bilden, der sie vor Angriffen des Immunsystems und sogar vor Antibiotika schützt. Werden Implantat-assoziierte Infektionen zu spät bemerkt, haben sie sich womöglich bereits im ganzen Körper ausgebreitet und schwere gesundheitliche Schäden angerichtet.

Wie aber soll das SonoGuard-System solche Komplikationen frühzeitig entdecken? Um das zu erklären, steigen Herrmann und Suter nun in den Lift und führen ihren



Inge Herrmann leitet das Ingenuity Lab. Sie ist eine Expertin für innovative Medizintechnik-Entwicklungen.

Besucher noch einen Stock tiefer in die unterirdischen Räumlichkeiten des Balgrist Campus. Hier gibt es einige hochmoderne Forschungsinfrastrukturen, beispielsweise ein hochmoderner MRI-Scanner mit 7 Tesla Feldstärke. In einem anderen Raum betreibt das Ingenuity Lab ein Laser-Labor.

Lasertechniken sind zwar nicht Teil des SonoGuard-Projekts, doch Benjamin Suter betritt das Labor trotzdem. Denn bis die SonoGuard-Labors hergerichtet sind, hat er hier Platz gefunden für seine Versuchsanlage. Auf einem Tisch steht eine mit Wasser gefüllte, aquarienähnliche Apparatur. In einer Halterung hängt ein Gläschen mit einer kaum erkennbaren Probe. «Es handelt sich um einen Klebstoff mit unserem Kontrastmittel», erläutert Suter. Er deutet unter den Tisch, wo ein Gerät in der Grösse eines PC-Gehäuses steht, von dem aus zwei Anschlüsse zu der im Wasser versenkten Probe führen. «Das ist unser Ultraschall, mit dem wir die Probe beschallen – und danach die Signale empfangen, welche sie abgibt.»

Dass die Kontrastmittel-Probe im Wasser hängt, ist kein Zufall. «Unser Körper besteht zum grössten Teil aus Wasser», sagt Suter. Der Plan ist es nämlich, das SonoGuard-Kontrastmittel direkt bei einer Operation in den Körper zu geben. Weil sich Komplikationen zuweilen erst nach Tagen oder Wochen entwickeln, muss es dort stabil an Ort und Stelle bleiben. «Um dies bei einer Magen-Darm-Operation zu gewährleisten, könnten wir das Kon-

trastmittel zum Beispiel an einem Klebstoff anbringen», erklärt Inge Herrmann. In einem früheren Projekt entwickelte ihr Team ein Hydrogel-Pflaster mit enormer Haftfähigkeit, das sich dazu eignet, genau solche Operationswunden stabil abzudichten.

Clevere Aktivierungsstrategie

Gleichzeitig müssen die Forschenden sicherstellen, dass ihr Kontrastmittel nur dann «Alarm schlägt», wenn auch wirklich eine Komplikation auftritt. In seinem Grundzustand liegt es deshalb in einer inaktiven Form vor. «Dazu versehen wir es mit Substanzen, die verhindern, dass es sein Signal abgibt», erklärt Benjamin Suter. Diese Substanzen sind so gewählt oder zusammengesetzt, dass sie nur mit spezifisch gewählten Komplikationen interagieren können – und das Kontrastmittel dadurch aktiviert wird.

Beim Darm-Leck etwa könnten auslaufende Verdauungssäfte als Auslöser dienen. «Verdauungssäfte interagieren chemisch mit sehr vielem», sagt Benjamin Suter. Das ist in diesem Fall ein Vorteil, weil es bedeutet, dass den Forschenden eine grosse Auswahl an Inaktivierungssubstanzen zur Verfügung steht.

Überwachen und eine Komplikation anzeigen, ist wichtig. Ebenso wichtig ist es allerdings, das entdeckte Problem zu lösen. Das SonoGuard-System soll künftig beides übernehmen. Dazu werden die Forschenden Methoden entwickeln, um Antibiotika oder entzündungs-

hemmende Medikamente in das Kontrastmittel zu integrieren. «Durch eine Verstärkung oder eine Veränderung des Ultraschallsignals können wir solche Heilmittel bei Bedarf freisetzen – direkt am Ort der Infektion», sagt Benjamin Suter. Solche nichtinvasive Behandlungen in einem frühen Stadium einer Komplikation könnten erneute Operationen vermeiden, ergänzt Inge Herrmann.

Wichtig ist den beiden, dass ihr System einfach und unkompliziert funktioniert. «Wir wollen keine Elektronik in den Körper bringen, sondern biokompatible Materialien», sagt Herrmann. Zudem sollen sich die Signale zuverlässig ablesen lassen. Typischerweise würden heute Strukturen und Vorgänge im Körper mit bildbasierten Methoden dargestellt. «Doch Bilder zu interpretieren ist aufwändig und komplex.»

Das Signal hingegen, das die Kontrastmittel von SonoGuard aussenden, ist einfach: Es ist entweder an oder aus. Das Gerät, um diese Daten auszulesen, werden die Forschenden ebenfalls im Rahmen des WSS-Projekts bauen. Auch hier mit dem Ziel, das ganze System möglichst einfach zu halten. «Alle Spezifikationen und elektronischen Komponenten, die wir benötigen, existieren bereits», sagt Benjamin Suter. «Aber im Handel erhältliche Geräte sind für uns zu gross. Unser Gerät soll so handlich sein, dass man es direkt am Patientenbett einsetzen kann.»

Einen ersten kompakten Prototyp eines solchen Auslesegeräts haben die Forschenden bereits entwickelt. Und auch sonst können sie auf diversen Vorarbeiten aufbauen. «In einem Gewebemodell funktioniert unser Sensor bereits sehr schön», erzählt Benjamin Suter. «Und wir konnten zeigen, dass er sich durch biologische Auslöser wie pH-Wert, Bakterien oder Verdauungsenzyme aktivieren lässt.»

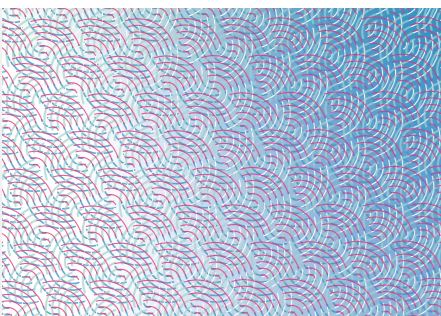
Stabilität und Sicherheit

Trotzdem bleiben Herausforderungen. Viele hätten mit dem Verhalten des Sensors im lebenden Körper zu tun, sagt Inge Herrmann. Eine ist die Langzeitstabilität, eine andere die Sicherheit. Komplikationen treten in ungefähr fünf bis zehn Prozent der Operationen auf. «Bei den restlichen 90 Prozent der Patientinnen und Patienten darf das Kontrastmittel natürlich keinesfalls Probleme hervorrufen», sagt Herrmann.

Das Forschungsteam hat die Substanzen für das SonoGuard-System chemisch so konzipiert, dass die Risiken minimiert werden. Trotzdem braucht es letztlich Langzeitstudien in lebenden Organismen, um die Sicherheit zu gewährleisten. Sobald das System aufgebaut ist, im Labor funktioniert und sich in Gewebemodellen als sicher erweist, planen die Forschenden deshalb In-vivo-Versuche.



3D-Drucker gehören heute zur Standardausrüstung in vielen wissenschaftlichen Laboren.



SonoGuard

Trotz medizinischer Fortschritte sind Komplikationen nach Operationen nach wie vor häufig. Werden sie nicht frühzeitig erkannt, können sie lebensbedrohlich sein. Das Projekt SonoGuard an der Universitätsklinik Balgrist in Zürich entwickelt eine neuartige Technologie, die es ermöglicht, tief im Körper liegende Komplikationen frühzeitig und ohne Eingriff zu erkennen – und sogar zu behandeln. Dazu werden neuartige Kontrastmittel an der Operationsstelle platziert und aktiviert, falls eine Komplikation auftritt. Unter einer speziellen Form des Ultraschalls gibt es ein unverwechselbares Signal ab und entlässt bei Bedarf ein Medikament.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
8 Mio. Schweizer Franken
Projektdauer 2025–2030
Projektleitung Prof. Dr. Inge Herrmann,
Universitätsklinik Balgrist, The Ingenuity
Lab, Zürich

Um die Arbeiten möglichst rasch voranzutreiben, setzt die Forschungsgruppe auf die Essenz des Ingenuity Labs: die interdisziplinäre Zusammenarbeit und den unbedingten Willen, clevere Lösungen zielstrebig umzusetzen. Das zeigt sich exemplarisch im ersten Stock des Balgrist Campus, in dem Inge Herrmann und Benjamin Suter ihre Führung nun beenden. Hier richtet das Team gerade Laborräume neu ein, die frei wurden, weil das Kinderspital Zürich kürzlich in ein neues Gebäude gleich nebenan umzog. «Es werden interdisziplinäre Bildungs- und Materialherstellungslaboratorien, die wir uns mit Medizinern teilen», sagt Herrmann.

Ohne Umwege zur Anwendung

Der Vorteil: Die Forschenden können hier ihre Materialien auf eine Art und Weise herstellen, dass sie bereits für den Einsatz in klinischen Studien optimiert sind. «Wird eine Substanz zuerst in einem normalen Chemielabor entwickelt, benötigt man oft eine Zusatzschleife, bevor man mit ihr in lebende Organismen gehen kann – etwa weil ein Prozessschritt noch nicht unter sterilen Bedingungen abläuft», sagt Herrmann. Diese Zeit wolle sie sich sparen, um rascher zu einer Anwendung zu kommen.

Überhaupt ist die Zusammenarbeit mit Chirurginnen und Chirurgen der Universitätsklinik Balgrist für das Projekt SonoGuard essenziell. Denn letztlich müssten sich all die neu entwickelten Materialien und Geräte im Operationssaal bewähren, sagt Benjamin Suter. Und das tun sie nicht immer im ersten Anlauf. «Es ist schon mehrmals passiert, dass eine Chirurgin oder ein Chirurg einen unserer Sensoren in die Hand nahm und gleich kaputt machte», erzählt Suter. «Wir wissen dann, dass wir noch robuster bauen müssen.»

Hautersatz mit vielen Vorteilen

Forschende am Universitäts-Kinderspital Zürich haben einen Hautersatz entwickelt, der erstmals die vier wichtigsten Hautkomponenten enthält. In einem neu von der Werner Siemens-Stiftung unterstützten Projekt testen sie die Entwicklung nun an Patientinnen und Patienten.



Biessam, weich und doch stabil: Die PV-Skin am Universitäts-Kinderspital Zürich kommt natürlicher Haut sehr nahe.

Der im November 2024 eröffnete Neubau des Universitäts-Kinderspitals Zürich ist eine Wucht. Viel Holz, geschwungene Linien und bepflanzte Innenhöfe machen das neue «Kispi» zu einem der wohl schönsten Krankenhäuser Europas. Die Anordnung der Stationen, Kliniken und Operationssäle ist so konzipiert, dass die Wege möglichst kurz sind. Und die modernen, hellen Patientenzimmer tragen dazu bei, dass sich Kinder – und Eltern – geborgen und gut aufgehoben fühlen.

Das Zentrum Kinderhaut befindet sich im zweiten Stock des Gebäudes. Mehrere hundert Kinder werden hier jedes Jahr wegen Verbrennungen oder Verbrühungen ambulant behandelt. Bei rund 150 weiteren Kindern sind die Verletzungen derart schwer, dass sie mehrere Tage bis mehrere Monate in der Klinik verbringen müssen. Viele von ihnen werden nach der Abheilung in einer Spezialsprechstunde nachbetreut, oft bis sie erwachsen sind.

Dünne Haut und dicke Narben

Die Behandlung von schweren Verbrennungen habe grosse Fortschritte gemacht, sagt Privatdozentin Sophie Böttcher, die stellvertretende Leiterin der Abteilung für Plastisch-Rekonstruktive Chirurgie mit dem Zentrum für brandverletzte Kinder. Doch noch immer bestünden Einschränkungen und Herausforderungen. Bei schweren Brandverletzungen ist heute die Verpflanzung von körpereigener Haut die Standardbehandlung. Dabei wird an einer unversehrten Körperstelle der Patientin oder des Patienten eine dünne Hautschicht, die Spalthaut, entnommen und auf die gesäuberte Wunde transplantiert.

Diese Methode hat Nachteile. Zum einen bleibt bei sehr schweren Verbrennungen kaum mehr unversehrte Haut für eine Entnahme übrig. Zum anderen ist Spalthaut dünn und im Verlauf der Heilung entstehen oft dicke Narben, die Gelenke und Bewegungen blockieren und das Äussere entstellen. «Kinder mit schweren Verbrennungen leiden oft ein Leben lang unter den Folgen», sagt Böttcher.

Schon vormehrs 25 Jahren begann das Universitäts-Kinderspital Zürich deshalb – auf Initiative und unter der

Leitung der damaligen Professoren Martin Meuli, Ernst Reichmann und Clemens Schiestl – an einem Hautersatz aus patienteneigenen Zellen zu forschen. Die Idee ist es, der Patientin oder dem Patienten ein briefmarkengrosses Stück Haut zu entnehmen, daraus einzelne Hautzelltypen zu isolieren und im Labor zu vermehren. Danach bringt man die einzelnen Komponenten wieder zusammen und lässt sie zu einem Hautersatz reifen.

Ein erstes solches Hauttransplantat, das am Zürcher Kinderspital entwickelt wurde, enthält zwei wichtige Haut-Zelltypen: die hornbildenden Zellen der obersten Hautschicht, der Epidermis (sogenannte Keratinozyten), und die Bindegewebszellen der darunterliegenden Lederhaut, der Dermis (sogenannte Fibroblasten). Im Vergleich zur Spalthaut-Behandlung sei dieser Hautersatz ein enormer Fortschritt, sagt Sophie Böttcher. «Aber an die Qualität echter Haut kommt er nicht heran.»

Basierend auf den Entwicklungen ihrer Vorgänger, ist es Böttcher und ihrem Team der Forschungsgruppe SSTaRC (Skin and Soft Tissue Research Center) nun gelungen, den Ansatz deutlich zu verbessern. Neben den Keratinozyten und den Fibroblasten enthält ihr neuer Hautersatz namens PV-Skin zwei weitere essentielle Zelltypen der Haut: Pigmentzellen (sogenannte Melanozyten) und Endothelzellen, aus denen Blutgefässe entstehen.

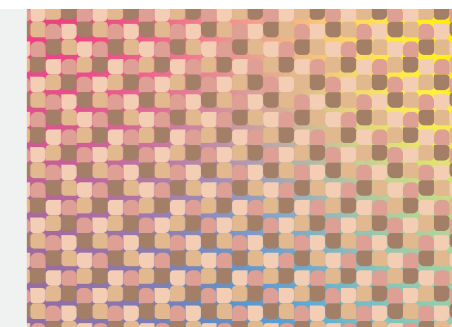
Erste Studie mit Menschen

Die Untersuchungen im «Reagenzglas» und an Versuchstieren seien vielversprechend, sagt Sophie Böttcher. Die PV-Skin kommt der natürlichen Haut extrem nahe. Sie ist stabil und die Pigmentzellen sorgen dafür, dass die natürliche Hautfarbe erhalten bleibt. Die Endothelzellen lassen rasch Blutgefäss-Kapillaren wachsen. Das führt dazu, dass sich der Hautersatz innerhalb von nur vier Tagen mit dem darunterliegenden Wundbett verbindet. «Das fördert die Sauerstoffversorgung, das Einwandern von Zellen und somit eine raschere Heilung», sagt Sophie Böttcher.

Nun steht der nächste Schritt an, die ersten Tests von PV-Skin an Patientinnen und Patienten. In den nächsten drei Jahren will das klinische Forschungs-

team für ungefähr zehn Patientinnen und Patienten mit schweren Brandverletzungen jeweils ein sieben Mal sieben Zentimeter grosses Transplantat herstellen und verpflanzen. Diese sogenannte Phase-I-Studie, bei der die Sicherheit und die Qualität des neuen Hautersatzes im Zentrum stehen, fördert die Werner Siemens-Stiftung (WSS) mit 1,5 Millionen Schweizer Franken. Die Patientenbetreuung übernimmt neben Sophie Böttcher auch Privatdozentin und Klinische Dozentin Dr. med. Kathrin Neuhaus, Chefärztin und Leiterin der Abteilung für Plastisch-Rekonstruktive Chirurgie mit dem Zentrum für brandverletzte Kinder.

Erfüllen sich die Erwartungen der Forschenden, eröffnen sich neue Perspektiven für brandverletzte Kinder: Der neue, moderne Hautersatz könnte die Heilung deutlich beschleunigen, die Zahl der Nachfolge-Operationen vermindern, die Haut natürlicher aussehen lassen – und so die Lebensqualität der jungen Patientinnen und Patienten entscheidend verbessern.



Körpereigener Hautersatz

Schwere Verbrennungen und Verbrühungen sind bei Kindern häufig – und bis heute schwierig zu behandeln. Ein Forschungsteam am Universitäts-Kinderspital Zürich hat einen körpereigenen Hautersatz entwickelt, der natürlicher Haut extrem nahekommt. Nun wird er erstmals bei Patientinnen und Patienten getestet.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

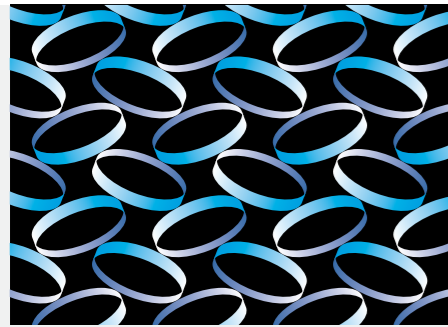
1,5 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2025–2028

Projektleitung PD Dr. med. Sophie Böttcher, Zentrum Kinderhaut, Abteilung für Plastisch-Rekonstruktive Chirurgie mit dem Zentrum für brandverletzte Kinder, Universitäts-Kinderspital Zürich

Krebsforschung an der Weltspitze

Weiterer Grosserfolg für das Werner Siemens Imaging Center (WSIC): Der Exzellenz-Cluster «iFIT», an dem das WSIC federführend beteiligt ist, wird für weitere sieben Jahre gefördert. Damit wird die bildgebende Forschung für Tumortherapien am Standort Tübingen weiter gestärkt.



Werner Siemens Imaging Center

Das Werner Siemens Imaging Center in Tübingen spielt international in der ersten Liga der Forschung zu bildgebenden Verfahren. Sein Forschungsschwerpunkt «individuelle Tumortherapien» ist Teil der deutschen «Exzellenzstrategie». Neue, kombinierte bildgebende Verfahren erlauben es, Gewebe und Moleküle genauer zu untersuchen. Und sie helfen herauszufinden, welche Therapie bei welchen Patientinnen und Patienten am besten wirken.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

12,3 Mio. Euro (2007–2016)

15,6 Mio. Euro (2016–2023)

18,4 Mio. Euro (2024–2033)

Projektdauer 2007–2033

Projektleitung Prof. Dr. Bernd Pichler, Werner Siemens-Stiftungsprofessor und Direktor Werner Siemens Imaging Center an der Universität Tübingen, Deutschland

145 eng bedruckte Seiten umfasst der Projektantrag, den der Exzellenz-Cluster iFIT in Tübingen im August 2024 der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderperiode 2026–2032 eingereicht hatte. iFIT steht für «Image-Guided and Functionally Instructed Tumor Therapies» – und einer der drei Sprecher dieses Grossverbunds ist Bernd Pichler, der Leiter des Werner Siemens Imaging Centers (WSIC). Die Vorbereitungen und das Verfassen des Antrags seien ein grosser Aufwand gewesen, sagt Pichler.

Doch einer, der sich gelohnt hat. Am 22. Mai 2025 erhielt das Tübinger Team positiven Bescheid. Damit ist klar: iFIT, der einzige Exzellenz-Cluster im Bereich Onkologie in ganz Deutschland, hat sich für eine zweite Förderperiode qualifiziert. Der Förderumfang beträgt ungefähr 54 Millionen Euro, verteilt auf sieben Jahre. Und für Bernd Pichler ist klar: «Ohne die Werner Siemens-Stiftung würde es diesen Exzellenz-Cluster nicht geben. Denn im WSIC konnten wir überhaupt erst die Kompetenzen aufbauen, dank deren

wir den erfolgreichen Antrag für iFIT stellen konnten.»

Tatsächlich sind die bildgebenden Verfahren des WSIC das Kernstück von iFIT. Der Exzellenz-Cluster fokussiert auf die Erforschung und Behandlung solider Tumore, also all jener Krebsarten, die sich im festen Gewebe bilden – und nicht im Blut oder im lymphatischen System. Die meisten dieser Krebserkrankungen gelten nach wie vor als unheilbar. Ungefähr ein Drittel wird in einem fortgeschrittenen Stadium diagnostiziert, oft wenn sie bereits Ableger gestreut haben.

Tumorsignale sichtbar machen

Der Forschungs- und Therapieentwicklungsansatz von iFIT beruht auf drei Hauptsäulen: In der ersten geht es darum, Zielstrukturen zur Tumorbekämpfung zu finden und molekulare Tumortherapien zu entwickeln. Die zweite befasst sich mit der Frage, wie Immuntherapien dazu beitragen können, das körpereigene Abwehrsystem gegen Tumorzellen zu aktivieren. Und die dritte, sozusagen der WSIC-Teil,



Das von Bernd Pichler (links) geleitete Werner Siemens Imaging Center verbucht einen weiteren Grosserfolg.

entwickelt modernste Bildgebungsmethoden, um Tumorsignale zu entdecken und sichtbar zu machen.

Zudem sei die Bildgebung auch das verbindende Element aller drei Forschungsbereiche, erklärt Bernd Pichler. «Wir charakterisieren mit unseren Methoden wichtige tumorbiologische Prozesse. Wir detektieren, welche Therapieform die geeignete ist. Und wir überwachen, ob diese Therapie auch wirklich effizient ist – oder ob man eine andere in Betracht ziehen sollte.»

Mit Tempo in die Klinik

Diese Strategie hat sich während der ersten Förderperiode von iFIT bereits als äusserst erfolgreich erwiesen. Besonders beeindruckt gezeigt hätten sich die Begutachter des Antrags vom Tempo, mit dem iFIT den Transfer vom Forschungslabor zur klinischen Anwendung schaffe, erzählt Pichler. Herausgehoben wurde etwa die Entwicklung einer neuen Klasse von PET-Tracern unter seiner Leitung.

Tracer sind sehr schwach radioaktiv markierte Substanzen, die in den

Körper eingebracht werden und dort an Stoffwechselprozessen teilnehmen oder sich an Strukturen auf der Zelloberfläche binden. Dank der Markierung lassen sie sich nachweisen, zum Beispiel durch sogenannte Positronenemissionstomografen (PET).

Die von Bernd Pichlers Gruppe entwickelten Tracer spüren Tumorzellen auf, die sich in einem sogenannten seneszenten Zustand befinden. Sie haben aufgehört, sich zu teilen, leben aber weiter – und können aus diesem «Schlaf» heraus das Wachstum anderer Tumorzellen ankurbeln. Insgesamt zehn verschiedene solcher Tracer hat das Team in den letzten sieben Jahren entwickelt. Einer hat sich in der klinischen Phase I bereits als sicher erwiesen und befindet sich nun in einer Phase-II-Studie.

Immuntherapien überwachen

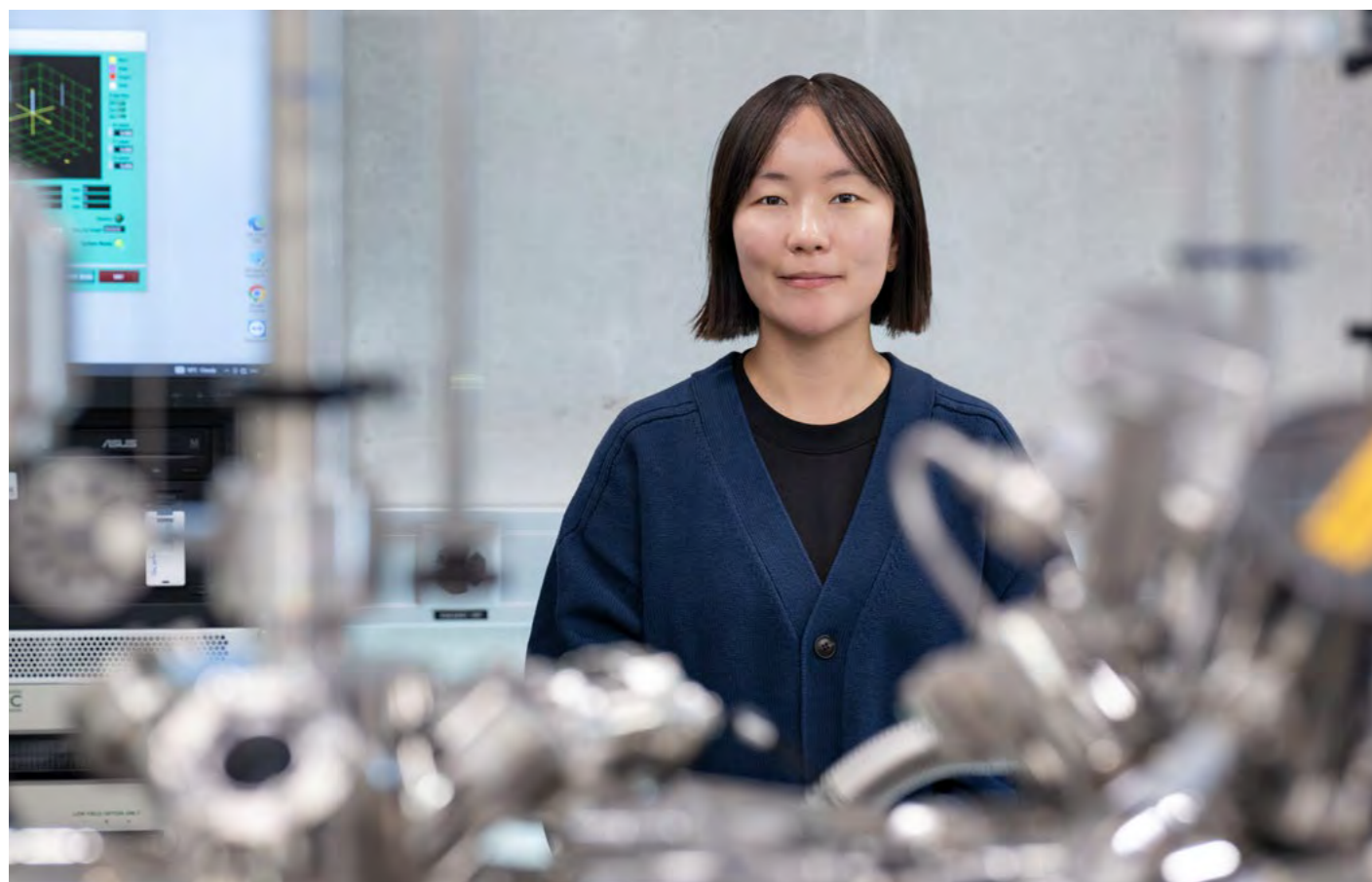
Ein weiteres Beispiel: Das WSIC-Team hat eine einzigartige Bildgebungsplattform aufgebaut, um mit sogenannten Nanobodies bestimmte Immunzellen sichtbar zu machen. Radioaktiv-mar-

kierte Nanobodies sind PET-Tracer auf der Basis von Antikörperfragmenten. Sie sind derart klein, dass sie sehr schnell und selbst in kleinste, feinste Gewebe und Gefässvordringen und dort für die Bildgebung benutzt werden können. Insgesamt haben die Forschenden bereits Nanobodies für sechs verschiedene Immunzell-Ziele entwickelt. Mit ihnen lassen sich Resistenzen gegen Immuntherapien nachweisen, damit rechtzeitig ein alternativer Therapieweg eingeschlagen werden kann.

Weitere Erfolge der ersten iFIT-Förderperiode sind zwei niedermolekulare Inhibitoren, drei Antikörper und sechs Peptid-Impfstoff-Therapeutika, die allesamt bereits ein erstes Mal erfolgreich beim Menschen eingesetzt wurden. Auch 50 angemeldete Patente und vier Spin-offs zeugen von der Qualität des Exzellenz-Clusters. Die Begutachter attestieren dem Forschungsprogramm gar, dass es zur Weltspitze zählt – nicht zuletzt dank der Arbeit des Werner Siemens Imaging Centers.

Spins unter der Quanten-Lupe

Die CarboQuant-Physikerin Yujeong Bae konnte dank der Finanzierung durch die WSS zwei neue Rastertunnelmikroskope zu «Quanten-Lupen» umbauen. Damit lassen sich die quantenphysikalischen Eigenschaften von CarboQuants Graphen-Nanobändern untersuchen und manipulieren.



Yujeong Bae trug entscheidend dazu bei, dass die neuen Rastertunnelmikroskope von CarboQuant bereits im Einsatz sind.

Im Juni 2024 konnte das CarboQuant-Team in die neuen Laborräume an der Empa in Dübendorf (Schweiz) einziehen – gerade rechtzeitig, um die beiden neuen, von der Werner Siemens-Stiftung (WSS) mitfinanzierten Rastertunnelmikroskope (RTM) dort aufzubauen. Damit die Forschenden die neue Top-Infrastruktur optimal für ihre Quantenexperimente nutzen konnten, mussten die RTM erst für ihre spezifischen Aufgaben aufgerüstet werden. Die südkoreanische Physikerin Yujeong Bae, seit Januar 2024 bei CarboQuant, nahm sich der äusserst anspruchsvollen Aufgabe an.

Yujeong Bae leitet die Gruppe für Quantenmagnetismus am nanotech@surfaces-Labor der Empa, dem der CarboQuant-Co-Leiter Roman Fasel vorsteht. Bae ist eine der weltweit wenigen RTM-Spezialistinnen, die sowohl die «Maschine» bis ins letzte Detail kennen, als auch komplexe Experimente mit einzelnen Spins auf Oberflächen damit durchzuführen wissen.

Dank dieser «Doppelbegabung» schaffte es Bae, das eine der beiden neuen Rastertunnelmikroskope in nur gerade vier Monaten zu einem veritablen «Rolls-Royce» umzubauen, der höchst präzise und leistungsstark Nanomaterialien in atomarer Auflösung abtasten kann. Eine spezielle Verkabelung erlaubt es, im RTM-«Rolls-Royce» elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von mehreren Gigahertz einzuspeisen. «Solch extrem hochfrequenten Mikrowellen schaffen normale Rastertunnelmikroskope nicht», kommentiert Roman Fasel.

Via Mikrowellen in die Quantenwelt

Das Sensationelle daran ist jedoch, dass die Mikrowellen zu einer kleinen Antenne geleitet werden, die ein Mikrowellenfeld zwischen der Scanner-Spitze des RTM und der Probe erzeugt. «Nur so können wir mittels Elektronenspinresonanz mit einzelnen Spins in Wechselwirkung treten und diese manipulieren», erklärt Bae. «Mit normaler Rastertunnelmikroskopie sind solche Quantenexperimente nicht möglich.»

«Das ist ein grosser Meilenstein für CarboQuant», sagt Oliver Gröning, Co-Leiter des Forschungsprojekts,

«Yujeong hat es in Rekordzeit geschafft, den enorm komplizierten Aufbau des Rastertunnelmikroskops zu realisieren und den Machbarkeitsnachweis der Quantenexperimente an einer unserer wichtigsten Molekülstrukturen zu erbringen.»

Das zweite der beiden neuen RTM ist kompakter und etwas weniger leistungsstark. Dafür ist es einfacher zu bedienen. Bae trainiert verschiedene CarboQuant-Gruppen darin, ihre Elektronenspinresonanz-Experimente selbstständig durchzuführen.

Kontrolle einzelner Spins

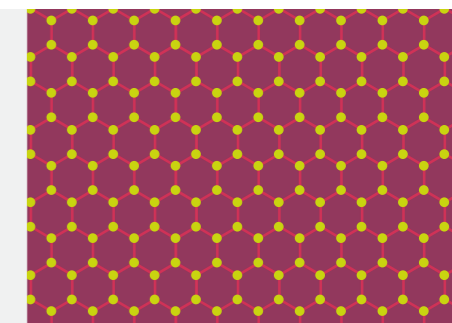
Seit Sommer 2025 untersucht das Team nun die Graphen-Nanobänder, die es in den letzten zehn Jahren synthetisiert hat, auf deren quantenmechanische Eigenschaften hin. Mit dem hochgerüsteten RTM kann jeder einzelne Elektronenspin analysiert und gesteuert werden. «Das dabei gewonnene Verständnis ist die unabdingbare Voraussetzung für eine technologische Umsetzung», betont Gröning.

Nun können die verschiedenen CarboQuant-«Entwicklungsstränge» nach und nach zusammengeführt werden. Die Gruppen Materialentwicklung, elektronische Charakterisierung, atomistische Simulation und RTM-Quantenoptik suchen gemeinsam nach der optimalen Messstrategie, mit der sich unterschiedlichste Nanostrukturen ohne langwierige Anpassungen mit den neuen RTM-Systemen untersuchen lassen. Bae schätzt den Austausch über die fachlichen Grenzen hinweg sehr. «Wir können sehr kreativ vorgehen beim Verfolgen der Ziele von CarboQuant», lobt sie.

Im Mai 2025 konnte die Forschungsgruppe einen weiteren grossen Erfolg vermelden. Als weltweit Erste gelang es ihr, das sogenannte eindimensionale homogene Heisenberg-Modell herzustellen und seine Eigenschaften präzise zu vermessen. Die Autoren eines «News&Views»-Artikels im renommierten Fachmagazin «Nature Materials» kommentierten begeistert: Damit eröffne sich «ein grenzenloses Spielfeld für das Design und die Kontrolle von Quantensystemen, welche zweifellos viele Durchbrüche hervorbringen werden».

Im Sommer 2025 das nächste Glanzlicht, publiziert in «Nature Chemistry»: Die Forschenden schafften es, an eines ihrer Graphen-Nanobänder organische Porphyrin-Moleküle mit funktionellen Metallzentren zu binden (Chlorophyll oder Hämoglobin sind Beispiele für Porphyrine). Das entstandene Hybrid-Nanomaterial ist vielversprechend. «Es weist sowohl den besonderen, delokalisierten Magnetismus unserer Kohlenstoff-Nanobänder auf als auch den konventionelleren, lokalisierten Magnetismus von Metallatomen», führt Oliver Gröning aus.

Der korrelierte Magnetismus der neuen Graphen-Nanobänder gilt als vielversprechend für quantentechnologische Anwendungen, in denen der Spin als Informationsträger (Qubit) fungiert. Genau das schwebt den CarboQuant-Leitern vor: «Unser Graphen-Nanoband mit den Porphyrinen könnte als eine Reihe von miteinander vernetzten Qubits funktionieren.»



CarboQuant

Das CarboQuant-Projektteam an der Empa, dem Eidgenössischen Forschungsinstitut für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung, in Dübendorf, Schweiz, will sichere, leistungsfähige und nachhaltige Quantentechnologien auf Basis von Kohlenstoff entwickeln, die im Alltag Verwendung finden können.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

15 Mio. Schweizer Franken

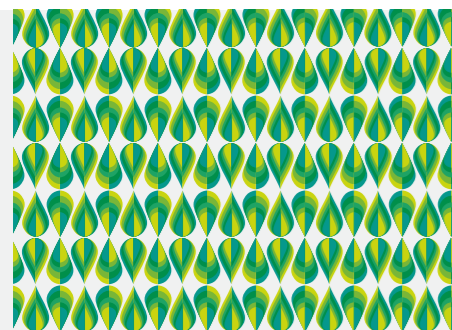
Projektdauer 2022–2032

Projektleitung Prof. Dr. Roman Fasel, Leiter des nanotech@surfaces Laboratory, Empa, Dübendorf

Dr. Oliver Gröning, stv. Leiter des nanotech@surfaces Laboratory, Empa, Dübendorf

Schub dank neuer Professur

Das Projekt CERES am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) hat die vorgesehene Professur für politische Ökonomie des Klimawandels in Zusammenarbeit mit der TU München besetzt. Im Berufungsverfahren setzte sich PIK Arbeitsgruppenleiter Jan Steckel gegen namhafte externe Kandidaturen durch.



CERES

Das Projekt CERES am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) analysiert, welche politischen Instrumente zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen beitragen können. Im Fokus stehen Staaten wie Indonesien, Südafrika, Indien, Kolumbien und Nigeria, die massiv von Klimaschäden bedroht sind, über eine hohe Biodiversität verfügen – und hohe wirtschaftliche Gewinne aus fossilen oder natürlichen Ressourcen erzielen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

10 Mio. Euro

Projektdauer 2022–2031

Projektleitung

Prof. Dr. Ottmar Edenhofer, wissenschaftlicher Direktor und Chefökonom am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam

Die Einrichtung der Professur sei ein toller Erfolg, freut sich Ottmar Edenhofer, wissenschaftlicher Direktor und Chefökonom am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und Leiter des Projekts CERES. Als Institut der Leibniz-Gemeinschaft kann das PIK nicht selbst Professorinnen und Professoren berufen, sondern ist dazu auf die Zusammenarbeit mit einer länderfinanzierten Universität oder Hochschule angewiesen.

«Mit der Technischen Universität München haben wir eine grandiose Hochschule als Partnerin gefunden, um die Professur für politische Ökonomie des Klimawandels zu besetzen», sagt Edenhofer. Es handelt sich um eine dauerhafte Professur: Von Herbst 2025 bis Ende 2031 wird sie über CERES am PIK finanziert und deckt eine Lehrverpflichtung von zwei Semester-Wochenstunden in München ab. Danach wird die Professur von der TU München unbefristet weitergeführt.

Auf die neue Professur berufen wurde Jan Steckel, der als Leiter des Arbeitspakets «Politökonomische Realitäten und Transformationsbarrieren»

schon heute im CERES-Projekt mitarbeitet. «Umso erfreulicher ist es, dass er sich gegen die starke Konkurrenz durchsetzen konnte und seine erfolgreiche Arbeit nun in diese Professur mündet», betont Edenhofer. Die neue Professur stärke die politische Ökonomie in CERES und werde dem Projekt enormen Schub verleihen.

Ein Praktikum mit Folgen

Jan Steckel hatte bisher eine Professur an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg inne, ebenfalls in Partnerschaft mit dem PIK. Er studierte an der Universität Flensburg Wirtschaftsingenieurwesen, mit einem Schwerpunkt auf Energie- und Umweltmanagement. «Ich konnte mich zunächst nicht entscheiden zwischen einem Volkswirtschafts- und einem technisch-naturwissenschaftlichen Studium», erzählt er.

Nach dem verheerenden Tsunami von 2004 machte er – noch vor Abschluss des Studiums – ein längeres Praktikum bei einer Hilfsorganisation in Indonesien. Durch Zufall rutschte er dort in so etwas wie ein kleines volkswirtschaft-



Jan Steckel übernimmt die im Projekt CERES vorgesehene Professur für politische Ökonomie des Klimawandels.

liches Forschungsprojekt. «Die Hilfsorganisation wollte wissen, ob sich die Spendengelder nutzen liessen, um eine nachhaltige Energieversorgung vor Ort aufzubauen», erzählt Steckel. «Ich untersuchte mittels Befragungen, wie die Bevölkerung Energie nutzt – und ob man sie mit geringen Mitteln, etwa kleinen, autarken Haus-Solaranlagen, unterstützen könnte.»

Steckel merkte, dass er mehr Spaß hatte an wissenschaftlichen Fragestellungen als an eigentlicher Entwicklungsarbeit. Und ihm wurde klar, dass die Energieversorgung in solchen Regionen eine völlig unterschätzte Herausforderung im Kampf gegen den Klimawandel ist. «In hochentwickelten Ländern Kohle, Öl und Gas durch nachhaltige Energieträger zu ersetzen, ist wichtig», sagt er. «Gleichzeitig aber haben Milliarden Menschen auf der anderen Seite des Globus das Recht auf wirtschaftlichen Aufschwung. Wenn sie dies auf dem fossilen Weg tun, geht die Rechnung nicht auf.»

So schrieb Steckel an der TU Berlin eine Doktorarbeit zum Klimaschutz und zur Energietransformation in

Entwicklungs- und Schwellenländern – damals schon in Zusammenarbeit mit dem PIK. Später baute er am neugegründeten Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) eine Arbeitsgruppe zu Klimaschutz und Entwicklung auf. «In einem ersten Schritt versuchten wir zu verstehen, weshalb beispielsweise noch immer viele Länder in Kohle investieren», erzählt er.

Neue Messmethoden entwickeln

Die politische Ökonomie werde dabei immer wichtiger – der Ansatz, den die neu geschaffene Professur verfolgt. Vereinfacht gesagt, geht es dabei um die Frage, welche politischen und wirtschaftlichen Interessen die Klimapolitik prägen. Also beispielsweise: Wer verliert und wer gewinnt, wenn ein Staat umsteigt von Kohle oder Öl auf nachhaltige Energien – und wie versuchen Verlierer die Politik zu beeinflussen? «Solche Zusammenhänge müssen wir verstehen, auf der Bevölkerungsebene und auf der Ebene der politischen Eliten», sagt Steckel. Geplant sei auch, die Methoden weiter-

zuentwickeln, mit denen sich solche politökonomischen Fragen messen lassen. Neben direkten Befragungen, sagt Steckel, werde man künftig auch indirekte Methoden und maschinelles Lernen einsetzen – also etwa untersuchen, was Menschen in sozialen Medien oder in Parlamentsdebatten sagen. So liesse sich nachvollziehen, wie eine bestimmte Klimamassnahme den öffentlichen und politischen Diskurs beeinflusst, oder von ihm beeinflusst wird.

Das Spannende am Projekt CERES sei die breite Herangehensweise, sagt Steckel. CERES untersucht, wie eine gerechte Bewirtschaftung von globalen Gemeingütern wie Atmosphäre, Ozeanen oder Böden aussehen könnte. Es eruiert die politischen und ökonomischen Fallstricke auf dem Weg dorthin. Und es untersucht, welche politischen Instrumente die Transformation unterstützen könnten – unter Berücksichtigung länderspezifischer Herausforderungen. Bei der Verknüpfung all dieser Forschungsrichtungen wird die neue Professur eine entscheidende Rolle spielen.



Matthew Smith (links) und sein Team in Bonn untersuchen, wie Menschen digitalen Systemen vertrauen.

Überwachung mit Augenmass

Die digitalen Überwachungsmöglichkeiten sind heute enorm. Sie erleichtern die Suche nach Straftätern, sind aber auch eine Gefahr für die Privatsphäre. Wie Menschen zwischen diesen Vor- und Nachteilen abwägen, zeigt eine Studie des Teams um Matthew Smith vom Zentrum für digitales Vertrauen.

Überwachung ist überall – analog und digital: Videokameras filmen an Flughäfen, in Innenstädten oder in Parkanlagen. Smartphones erfassen das Surfverhalten und die Kommunikation von Nutzern. Die Polizei setzt auf Überwachung, um Verbrecher aufzuspüren oder Risikoprofile zu erstellen. Gerade digitale Überwachungsmöglichkeiten werden immer breiter – und die Datennutzung der Behörden nimmt zu.

Wie nimmt die Bevölkerung diese Entwicklung wahr? Wann wird Überwachung als Eingriff in die Privatsphäre empfunden? Zu welchen Massnahmen gibt es Zustimmung? Das sind zentrale Fragen im Zentrum für digitales Vertrauen der ETH Zürich und der Universität Bonn. Denn, sagt Matthew Smith, Professor für Informatik an der Universität Bonn und am Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie in Bonn, letztlich gehe es darum, digitale Systeme so zu bauen, dass Menschen Vertrauen in sie hätten – und haben könnten.

Smith und seine Mitarbeiterinnen Lisa Geierhaas und Charlotte Mädler haben im vergangenen Jahr eine Studie durchgeführt, die solche Vertrauensfragen im Zusammenhang mit digitaler und physischer Überwachung untersuchte. Die Befragung fand Ende Mai und Anfang Juni bei rund 1000 Personen in den USA statt. Einen Fokus legten die Forschenden auf die Frage, wie gross aus Sicht der Befragten der Eingriff in die Privatsphäre durch bestimmte Überwachungsmethoden ist.

Vertrauen ist zentral

Es zeigte sich, dass die Befragten digitale und physische Überwachungsmethoden als ungefähr gleich invasiv wahrnehmen. Eine grosse Mehrheit glaubt, dass sich mit digitalen Methoden mehr Informationen beschaffen lassen. Rund 83 Prozent gehen davon aus, dass die digitale Überwachung missbraucht wird. Bei physischen Methoden beträgt der Anteil 69 Prozent.

Ein wichtiges, und erwartetes, Ergebnis war, dass Menschen Überwachungsmassnahmen vor allem dann akzeptieren, wenn diese dazu dienen, Straftaten zu verhindern oder Menschen zu schützen – zum Beispiel vor

Terrorismus oder Kindesmissbrauch. «Es handelt sich um deutliche, aber nicht um einstimmige Mehrheiten», sagt Matthew Smith. Wer ablehnt, tut dies nicht, weil er es nicht für wichtig hält, die Straftäter zu fassen. Sondern weil er die Effektivität bezweifelt und Missbräuche bei der Überwachung befürchtet.

Wer also dem System oder den Menschen dahinter misstraut, lehnt Überwachungsmethoden selbst dann ab, wenn sie einem unbestrittenen Zweck dienen. «Vertrauen ist also zentral», sagt Matthew Smith. Momentan seien aber gerade digitale Methoden undurchsichtig und wenig zielgerichtet. «Eine physische Hausdurchsuchung führt die Polizei meist sehr zielgerichtet und öffentlich durch. Die Verhältnismässigkeit der Mittel kann überprüft und moniert werden. Die Überwachung digitaler Systeme hingegen kann praktisch unbemerkt passieren. Das schürt Misstrauen.»

Verhältnismässigkeit wahren

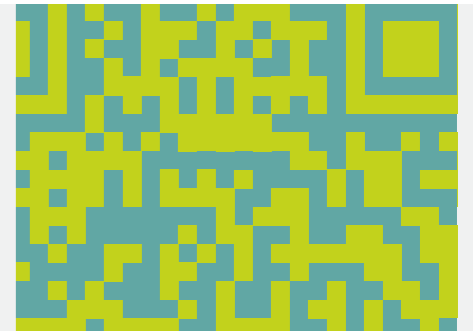
Gegen das Misstrauen helfen könnten beispielsweise digitale Überwachungsmethoden, die stufenweise vorgehen und frühzeitig erkennen, welche Daten sie erheben müssen, um eine Straftat aufzuklären – und die nachweisbar nicht mehr machen. «Wir müssen Systeme finden, welche die Verhältnismässigkeit wahren und akzeptiert werden», sagt Smith.

Letzteres ist gar nicht so einfach: Die Studie fand kontroverse und differenzierte Ansichten, aber auch Unsicherheiten und Widersprüchliches. So glauben die meisten Befragten, digitale Massnahmen seien häufig – und würden auch missbraucht. Aber nur 15 Prozent befürchten, sie selber könnten überwacht werden. Und viele wählten jeweils die erste im Fragebogen vorgeschlagene Antwort deutlich häufiger als die zweite. Solche Muster kämen auch bei Wahlen vor, sagt Smith, sie deuteten darauf hin, dass Meinungen nicht sehr gefestigt seien.

Gefiltert oder überlagert werden die Haltungen durch politische Ansichten. Die Parteizugehörigkeit hat einen enormen Einfluss. Wer die Regierung unterstützt, hält deutlich mehr Überwachungsmassnahmen für notwen-

dig, wer sie ablehnt, spricht sich viel öfter kritisch aus. «Ohne Vertrauen in der realen Welt gibt es kein Vertrauen in der digitalen Welt», sagt Smith.

Wie also lässt sich Vertrauen der realen Welt in die digitale Welt übertragen? Neue, geeignete digitale Tools seien das eine, sagt Smith. Das andere sei eine offenere Kommunikation. Oft weigern sich Behörden, Details zu Überwachungsmassnahmen preiszugeben – mit der Begründung, das gefährde deren Effizienz. «Das stimmt natürlich zum Teil», sagt Smith. «Aber Transparenz könnte das Vertrauen in diese umstrittenen Methoden stärken. Ich glaube, Behörden würden sich einen Gefallen tun, wenn sie mit etwas offeneren Karten spielen würden.»



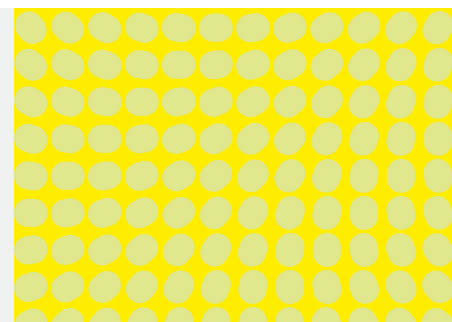
Zentrum für digitales Vertrauen

Hacker und Cyberkriminelle untergraben das Vertrauen in den digitalen Datenaustausch. Informatiker des «Zentrums für digitales Vertrauen» der ETH Zürich und der Universität Bonn entwickeln deshalb eine fundamental neue Sicherheitsarchitektur für das Internet. Sie wollen Vertrauensbeziehungen aus der physischen Welt auf die digitale Welt übertragen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
9,83 Mio. Schweizer Franken
Projektdauer 2019–2027
Projektleitung Prof. Dr. David Basin, Department of Computer Science (D-INFK), Informationssicherheit, ETH Zürich; Prof. Dr. Peter Müller, D-INFK, Programmiermethodik, ETH Zürich; Prof. Dr. Adrian Perrig, D-INFK, System- und Netzwerksicherheit, ETH Zürich; Prof. Dr. Matthew Smith, Institute of Computer Science, Usable Security and Privacy, Universität Bonn

«WSS-Geförderte ragen heraus»

Die Werner Siemens-Stiftung unterstützt die Schweizerische Studienstiftung für weitere zehn Jahre. Die Finanzierung sei nicht nur für exzellente Studierende wichtig, sondern auch für den Forschungsplatz Schweiz insgesamt, sagen Astrid Epiney und Klara Sekanina, die Stiftungsratspräsidentin und die Direktorin der Studienstiftung.



Begabtenförderung der Studienstiftung

Die Schweizerische Studienstiftung bietet begabten Studierenden Stipendien und ein breit gefächertes, interdisziplinäres Bildungsangebot. Die Werner Siemens-Stiftung unterstützt die Studienstiftung in den Bereichen Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technologie, Medizin und Pharmazie. Sie finanziert jedes Jahr zehn Exzellenzstipendien für herausragende Studentinnen und Studenten, drei Sommerakademien sowie weitere Bildungsveranstaltungen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
10 Mio. Schweizer Franken (2015–2025)
10 Mio. Schweizer Franken (2025–2035)
Projektdauer 2015–2035
Projektleitung Dr. Klara Sekanina, Direktorin Schweizerische Studienstiftung, Zürich

Astrid Epiney, Sie waren neun Jahre Rektorin der Universität Freiburg und sind seit vier Jahren Präsidentin des Stiftungsrats der Schweizerischen Studienstiftung. Wurden Sie selber als Studentin durch eine Studienstiftung gefördert?

Astrid Epiney: Ich war in Deutschland Stipendiatin der Konrad-Adenauer-Stiftung. Das war eine tolle Zeit, ich habe enorm vom Bildungsprogramm der Stiftung profitiert. Ich erinnere mich an eine Reise nach Israel Ende der 1980er-Jahre, während der Ersten Intifada. Unsere Gesprächspartner waren Palästinenser und Israeli, etwa der damalige Bürgermeister von Jerusalem. So etwas zu erleben, war eindrücklich, davon zehre ich noch heute.

Sind solche Erfahrungen der Grund, dass Ihnen die Nachwuchs- und Talentförderung am Herzen liegt?

Epiney: Das spielt sicher mit. Aber es hängt auch mit meinem «Steckenpferd» zusammen, dem Rechtsstaat. Ich finde es wichtig, bei jungen Menschen das Verständnis zu wecken für unseren demokratischen Rechtsstaat, in welchem Institutionen, Gewaltenteilung und Grundrechte beachtet

werden und rechtsstaatliche Verfahren zentral sind, Grundvoraussetzungen dafür, dass sich Individuen entfalten können. Junge Studierende und Forschende sollten sich darum nicht nur mit den Fortschritten in ihrem Fach befassen. Die Schweizerische Studienstiftung trägt zu dieser Horizont-erweiterung bei.

Klara Sekanina, Sie sind seit sechs Jahren Direktorin der Schweizerischen Studienstiftung. Was macht eine typische Geförderte, einen typischen Geförderten aus?

Klara Sekanina: Zuerst einmal wählen wir Studierende nicht einfach aufgrund ihres Talents und hoher Notendurchschnitte aus. Uns ist es auch sehr wichtig, dass sie sozial engagiert sind und eine gewisse Verantwortung übernehmen für die Entwicklung der Wissenschaften und des Allgemeinwohls.

Die Studierenden sollen also bereits Interesse mitbringen an Fragen, die über ihr Fachgebiet hinausgehen.



Sekanina: Genau. Was wir ihnen anbieten, ist ein breites Netzwerk von Gleichgesinnten. Menschen, die sich austauschen, debattieren und Neues erfahren wollen. Das ist das Spezielle unseres Förderansatzes: Bei uns sind nicht nur Themen interdisziplinär; es kommen Studierende aus der ganzen Schweiz und aus allen Disziplinen zusammen. So entsteht ein dynamischer Austausch, den die Geförderten sehr schätzen.

Wie läuft der Austausch ab?

Sekanina: Wir fördern über 930 Studierende von allen Schweizer Hochschulen. Ihnen bieten wir verschiedene Programme an, für die sie sich bewerben können. Wir stellen die Gruppen so zusammen, dass auch die gemeinsame Dynamik stimmt. Und wir bieten viele Veranstaltungen, die länger dauern als einen Tag. So können sich die Studierenden intensiver kennenlernen und austauschen.

Und das funktioniert?

Sekanina: Ja! Ich erinnere mich an eine Studienwoche, an der sich ein angehender Ökonom und ein Philosoph getroffen haben. Die beiden hatten komplett unterschiedliche Ansichten. Aber sie haben es geliebt, miteinander zu diskutieren und zu debattieren. So entstand eine Freundschaft.

Was bringt die Förderung den Studierenden sonst noch?

Sekanina: Wir vermitteln ihnen das Rüstzeug, um sich in Forschung, Gesellschaft und Wirtschaft weiterzuentwickeln. Sie bekommen Querschnitts-Kompetenzen mit, sei es Verhandlungsführung, Selbstmanagement oder Handlungsplanung. Ihr Potenzial ermöglicht es diesen jungen Menschen, ganz unterschiedliche Wege einzuschlagen.

Was sind typische Werdegänge von ehemaligen Geförderten?

Sekanina: Dazu haben wir eine Umfrage gemacht. Ungefähr ein Viertel verfolgt eine wissenschaftliche Karriere. Die anderen gehen in die Wirtschaft, zu Institutionen der öffentlichen Hand oder sie machen sich selbstständig. Viele bekleiden Führungspositionen und übernehmen Verantwortung.

Frau Epiney, merken Sie als Professorin an der Universität Freiburg, welche Ihrer Studierenden Studienstiftlerinnen oder Studienstiftler sind?

Epiney: Nein. Von den meisten weiss ich es schlicht nicht. Aber klar, die Unterschiede zwischen den Studierenden sind beachtlich: Es gibt welche, die sich «durchmogeln» und zu Minimalismus neigen, und andere, die vielseitig interessiert sind und in verschiedener Beziehung gerne über den Tellerrand schauen, mitunter gibt es auch eigentliche Überfliegerinnen und Überflieger.

«Ohne naturwissenschaftliches Grundverständnis funktioniert die Gesellschaft nicht mehr.» Klara Sekanina

Existieren auch Angebote der Hochschulen, um begabte Studierende zu unterstützen?

Epiney: Viele Fakultäten haben Masterclasses oder Angebote, die besonderes Engagement erfordern. Sie sind sehr komplementär zur Studienstiftung. In den Rechtsfakultäten gibt es zum Beispiel sogenannte Moot Courts. Das sind simulierte Gerichtsverhandlungen, bei denen die Studierenden in die Rolle insbesondere von Anwälten schlüpfen und Fälle vor einem fiktiven Gericht verhandeln. Kürzlich haben drei Studierende aus Freiburg bei einem solchen Wettbewerb auf internationaler Ebene, dem European Law Moot Court, gewonnen. Es ist beeindruckend, was solche jungen Leute leisten.

Die Werner Siemens-Stiftung hat beschlossen, die Arbeit der Studienstiftung für weitere zehn Jahre zu unterstützen. Was bedeutet das für Sie?

Sekanina: Wir sind enorm dankbar. Und wir sind überzeugt, dass es gut investiertes Geld ist. Das Werner-Siemens-Programm richtet sich an Studierende des MINT-Bereichs, also Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik sowie Medizin,

Pharmazie und Life Sciences. Es hilft uns, Geförderten die MINT-Fächer disziplinübergreifend näherzubringen. Ohne naturwissenschaftliches Grundverständnis funktioniert unsere Gesellschaft heute nicht mehr.

Was ist das Besondere am Werner-Siemens-Programm?

Sekanina: Wir verleihen jährlich zehn Werner-Siemens-Fellowships. Das sind Exzellenz-Stipendien. Die Geförderten ragen innerhalb der Studienstiftung noch einmal heraus. Sie bringen Notendurchschnitte von weit über 5,5 mit. Einige absolvieren zwei Masterstudiengänge parallel – etwa Humanmedizin und Biomedical Engineering. Es sind hoch engagierte, breit interessierte junge Menschen. Eine geförderte Medizinstudentin war von 2023 bis 2025 als erste Nicht-Ökonomin und Nicht-Juristin Teil der dreiköpfigen Schweizer Jugenddelegation bei der UNO.

Das WSS-Programm umfasst auch Bildungsveranstaltungen und Sommerakademien.

Sekanina: Die jährlich drei WSS-Sommerakademien sind intensive Arbeitswochen. Sie erlauben den Teilnehmenden eine Vertiefung fächerübergreifender Themen, etwa die Verbindung zwischen Neurowissenschaften und Musik. Die kürzeren Veranstaltungen werden vielfach von Geförderten selbst organisiert.

Gibt es Themen oder Formate, die bei den Studierenden besonders beliebt sind?

Sekanina: Die Sommerakademien sind unglaublich geschätzt. Und Anlässe, die Wissensvermittlung mit Erfahrungen kombinieren. Wir haben zum Beispiel ein Wochenend-Seminar namens «Wenn die Berge rufen ...». Die Studierenden setzen sich dort mit dem Klimawandel in den Bergen auseinander. Sie tun dies nicht nur im Klassenzimmer, sondern erwandern sich das Thema auch.

Planen Sie Veränderungen im Werner-Siemens-Programm?

Sekanina: Wir möchten den Austausch weiter fördern. Aktuelle und ehemalige WSS-Fellows treffen sich in

regelmässigen Abständen. Das basiert auf Freiwilligkeit, aber alle kommen, wann immer sie können. Sie schätzen es unglaublich, einander kennenzulernen oder den Kontakt aufrechtzuerhalten. Wir möchten diesem Dialog noch mehr Zeit einräumen – etwa durch gemeinsame Laborbesuche bei ebenfalls von der WSS geförderten Forschungsprojekten.

«Die Studienstiftung trägt zur Horizonterweiterung bei.» Astrid Epiney

Die Studienstiftung unterstützt einzelne Studentinnen und Studenten. Im grösseren Kontext ist es aber auch eine Förderung des Forschungsplatzes Schweiz. Eine erfolgreiche?

Sekanina: Davon bin ich überzeugt – aus langjähriger Erfahrung in Bildungs-, Forschungs- und Innovationspolitik. Ich arbeitete bei einer Standortförderagentur, in einem Startup und bei der damaligen Kommission für Technologie und Innovation des Bundes. Was den Erfolg ausmachte, waren letztlich überall einzelne Menschen. Darum bin ich sicher: Wenn wir einzelne Talente unterstützen, stärken wir auch die Innovationskraft des Landes.

Epiney: Wobei jeder Einzelne ein Team braucht, um erfolgreich zu sein. Deshalb sind diese Querschnitts-Kompetenzen so wichtig, welche die Studienstiftung vermittelt. Die Geförderten sollen verstehen, dass sie alleine nicht die Welt verändern können. Sie müssen auch lernen, ein Team zu führen, zu motivieren und mitzunehmen.

Erhält die Talentförderung in der Bildungspolitik jene Aufmerksamkeit und Unterstützung, die sie verdient hat?

Epiney: Da gibt es verschiedene Aspekte. Der erste ist der finanzielle: Die Studienstiftung erhält einen namhaften Betrag vom Bund. Trotzdem sind wir sehr auf private Fördermittel angewiesen, deren Akquisition nicht immer einfach ist. Der zweite Aspekt

ist die öffentliche Wahrnehmung. Zwar konnten wir diese in den letzten Jahren durch verschiedene Initiativen deutlich steigern, aber dieser Aspekt verlangt ständige Aufmerksamkeit unsererseits. Und schliesslich geht es auch allgemein darum, ein breites Verständnis für die Sinnhaftigkeit einer Elitenförderung zu schaffen.

Das ist keine einfache Diskussion.

Epiney: Die zentrale Herausforderung besteht darin, die Bedeutung der Universitäten für die gesamte Gesellschaft zu verdeutlichen: Sie sind nicht nur für die Studierenden wichtig, sondern spielen auch eine bedeutsame Rolle für die Innovationsfähigkeit und erfüllen kulturelle Aufgaben im weiteren Sinn. Kommt hinzu: Die meisten Studierenden kommen nach wie vor aus Akademikerhaushalten. Zu vermitteln, dass Teile dieser privilegierten Gruppe mit Blick auf die bedeutende Rolle von «Eliten» für die gesamte Gesellschaft noch mehr gefördert werden sollen, ist nicht immer einfach.

Gibt es bildungspolitische Entwicklungen, die das Studium oder die Arbeit der Studienstiftung verändern?

Epiney: Ich will nicht allzu politisch werden. Aber die internationale Einbindung und stabile Beziehungen zur EU sind zentral – nicht nur für die Studienstiftung, sondern für den Forschungs-, Innovations- und Ausbildungsplatz Schweiz insgesamt. Es geht um mehr als die Teilnahme an Forschungs- oder Austauschprogrammen. Wir sollten uns als Teil eines Verbundes sehen. An meiner Universität kommen in der Regel rund 50 Prozent der Doktorierenden aus dem Ausland, an den beiden ETH ist der Anteil noch grösser. Unsere Hochschulen sind gerade deswegen so gut und so attraktiv. Davon profitieren die Studierenden, die Studienstiftung – und letztlich wir alle.



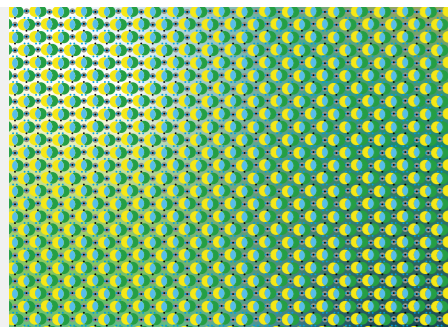
Astrid Epiney
Astrid Epiney ist Professorin für Europarecht, Völkerrecht und Öffentliches Recht an der Universität Freiburg (Schweiz) und war von 2015 bis 2024 deren Rektorin. Für ihre Forschung wurde sie unter anderem mit dem Nationalen Latsis-Preis des Schweizerischen Nationalfonds und mit dem deutschen Bundesverdienstkreuz 1. Klasse ausgezeichnet. Seit 2021 ist sie Präsidentin des Stiftungsrats der Schweizerischen Studienstiftung.



Klara Sekanina
Klara Sekanina ist seit 2019 Direktorin der Schweizerischen Studienstiftung. Sie ist promovierte Chemikerin und war Direktorin der Förderagentur für Innovation, der Kommission für Technologie und Innovation (seit 2018 Innosuisse). Ihre Karriere umfasst zahlreiche Tätigkeiten im Bildungsbereich und in der Innovationsförderung, darunter führende Positionen in der Verwaltung und in Start-ups.

Wo ist das magische Molekül?

Viele Wege führen zum Ziel, das gilt auch in der Chemie. Das Team von Benjamin List am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr untersucht deshalb unterschiedliche Ansätze, um seine Idee einer photokatalytischen CO₂-Spaltung zu verwirklichen.



Künstliche Photosynthese

Um die Klimaerwärmung zu bekämpfen, braucht es Methoden, mit denen Kohlenstoffdioxid im grossen Stil aus der Atmosphäre entfernt werden kann. Der Nobelpreisträger Benjamin List vom Max-Planck-Institut für Kohlenforschung arbeitet an einer photokatalytischen CO₂-Spaltung. Mithilfe von Katalysatoren und Sonnenlicht möchte er Kohlenstoffdioxid (CO₂) in reinen Kohlenstoff (C) und in Sauerstoff (O₂) umwandeln. Der «solare Kohlenstoff» liesse sich verwenden, um chemische Produkte herzustellen, nachhaltiges Benzin zu produzieren, Elektrizität zu gewinnen oder Häuser und Strassen zu bauen. Zudem könnte man überschüssige Kohle problemlos im Boden einlagern.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
10 Mio. Euro
Projektdauer 2025–2034
Projektleitung Prof. Dr. Benjamin List,
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung,
Mülheim an der Ruhr

Wie packt man eine revolutionäre Idee an, die bislang offenbar niemand untersucht hat? Vor dieser Frage steht Benjamin List vom Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr. Sein Anfang 2025 lanciertes Projekt hat zum Ziel, Kohlenstoffdioxid (CO₂) mit einer photokatalytischen Spaltung in reinen Kohlenstoff (C) und in Sauerstoff (O₂) umzuwandeln. Gelingt eine solche Reaktion, liesse sich damit der menschengemachte CO₂-Überschuss in der Atmosphäre rückgängig machen.

Bei einem solch neuartigen, riskanten Projekt kann es sich lohnen, nicht alles auf eine Karte zu setzen. Benjamin List stellt deshalb ein Forschungsteam zusammen, das in drei Hauptstossrichtungen ermittelt. Die ersten beiden sind klassische chemische Ansätze: die homogene und die heterogene Katalyse. Der dritte untersucht, ob biologische Organismen oder Enzyme die Spaltung übernehmen könnten.

Bei der homogenen Katalyse setzt das Forschungsteam auf Reaktionen, die durch kleine, organische Moleküle

ermöglicht werden. Katalysatoren also, wie sie Benjamin List für seine Forschung zur Organokatalyse benutzt hat, die letztlich zum Nobelpreis führte. Einen wichtigen Teil dieser Arbeit führt er deshalb gleich selbst durch, wie er erzählt: «Frühmorgens, wenn ich Ruhe habe in meinem Büro, designe ich mögliche Katalysezyklen für diese Reaktion.»

Hilfreiche Metalle?

Die Ideen reisen dann um die halbe Welt, nach Japan. Dort, an der Universität von Hokkaido, arbeitet ein kleines Team um Professor Satoshi Maeda schon seit Jahren mit Benjamin List zusammen. «Es sind begnadete Theoretiker. Sie berechnen für jeden Katalysezyklus, ob er funktionieren kann.» Ein Vorteil dafür ist, dass es sich bei CO₂ um ein kleines Molekül handelt. Bei grossen Molekülen und Katalysatoren kommt man mit solchen rechen-gestützten Methoden nicht weit.

Die Idee des zweiten Ansatzes, der heterogenen Katalyse, ist die Entwicklung metallhaltiger Katalysatoren. «Wir haben eine Publikation gefun-



Diskutieren, rechnen, testen: Das Team am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung geht diversen Möglichkeiten nach.

den, laut der sich mithilfe von Germaniumoxid der Sauerstoff des CO₂ entfernen lässt», sagt List. «Momentan versuchen wir, die Methode zu reproduzieren.» Zudem untersuchen zwei neu eingestellte Mitarbeiter weitere Metalloxide, die sich eignen könnten.

Für manche Prozessschritte, die beim heterogenen Ansatz wichtig sind, existieren bereits verwandte Verfahren. Der Chemiekonzern BASF etwa arbeite an einer Aufspaltung von Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff, erzählt List. Methangas wird durch flüssiges, heisses Zinn geleitet. Der Wasserstoff entweicht gasförmig und die Kohle lagert sich auf dem Zinn ab. Damit die Kohleschicht den Katalysator nicht deaktiviert, muss sie mit einer Art Scheibenwischer von Zeit zu Zeit entfernt werden. «Ähnlich würde es bei uns funktionieren», sagt List.

Kohle-Biologie

Beim dritten Ansatz hingegen können sich die Forschenden auf keinerlei Vorarbeiten stützen. Es handelt sich um eine neue Biologie, die Entwicklung biologischer Katalysatoren – am

besten lebende Zellen, die CO₂ aus der Luft aufnehmen und elementaren Kohlenstoff ausscheiden. Das sei weniger utopisch, als es vielleicht klinge, sagt List. Pflanzen erzeugen mit der Photosynthese seit Jahrmillionen Kohlenhydrate aus CO₂. «Eigentlich fehlt für unsere Reaktion nur der letzte Schritt: Sie müssten das Wasser vom Kohlenhydrat abspalten.»

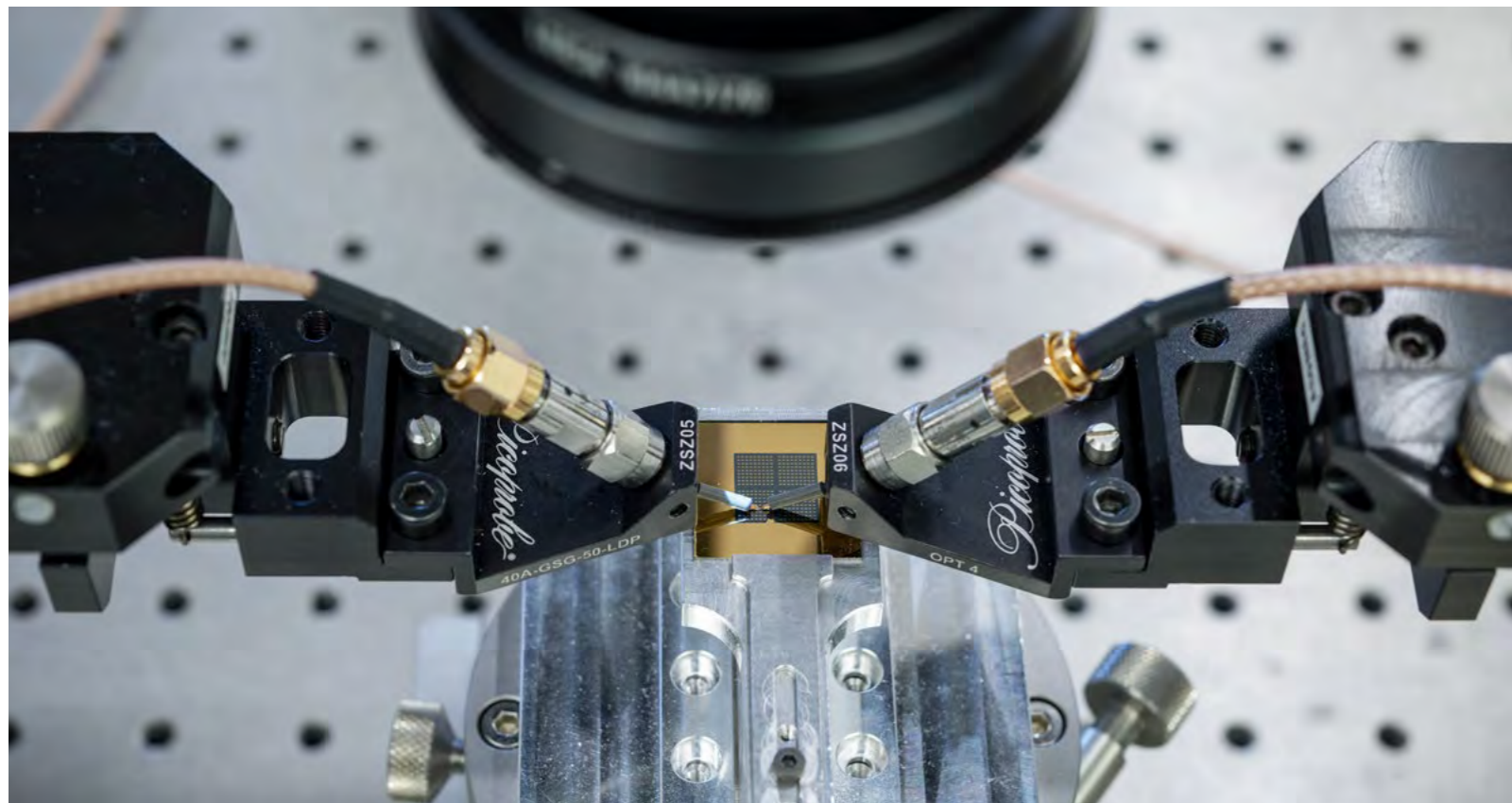
Dieser Mechanismus scheint in der Natur nicht zu existieren. «Wir haben eine einzige Publikation gefunden, in der ein Team beschrieb, einzellige Lebewesen, sogenannte Archaeen, könnten elementaren Kohlenstoff erzeugen», erzählt List. «Aber ob das wirklich stimmt, muss erst noch gezeigt werden.»

Suche in Kohlegruben?

Entmutigen lassen sich die Forschenden nicht. Sie werden Enzyme suchen und auf ihre Eignung als biologische Katalysatoren testen. Und List möchte untersuchen, ob es vielleicht doch irgendwo biologische Kohlequellen gibt. «Es wäre zum Beispiel interessant, Bakterien aus Kohlegruben zu

kultivieren und zu testen.» Denn auch bei der natürlichen Kohlebildung findet eine Abspaltung von Wasser aus Pflanzenmaterial statt. «Wie genau, weiss man nicht.»

Weil die Etablierung aller drei Ansätze Zeit brauchen wird, hat Benjamin List den Projektfokus etwas erweitert: Aus Zellulose und Lignin, den Hauptbestandteilen von Holz, lassen sich nämlich laut ihm relativ einfach sogenannte Furane herstellen. Bloss mangelt es bisher an praktikablen Methoden, um diese Stoffgruppe in chemisch wertvolle Verbindungen zu verwandeln. Einer seiner Doktoranden arbeitet mit Begeisterung an solchen Reaktionen und habe grosse Fortschritte gemacht, erzählt List. «Das möchten wir weiterverfolgen.» Es wären nicht Traumreaktionen, wie die Spaltung von CO₂. Aber sie könnten einen bedeutenden Beitrag leisten zur Umstellung auf eine biobasierte chemische Industrie.



Klein, kleiner, Atomschalter: Das Team an der ETH Zürich und am KIT Karlsruhe will ans unterste physikalische Schaltenergie-Limit.

Bis ans Limit

Mit seinem Atomschalter hat das Kompetenzzentrum für Einzelatom-Elektronik und -Photonik in den letzten acht Jahren Massstäbe gesetzt beim Energieverbrauch in der Elektronik. Nun nimmt das Team an der ETH Zürich und am KIT Karlsruhe in einem gemeinsamen Ergänzungsprojekt gar das unterste physikalisch mögliche Limit der Schaltenergie ins Visier.

Internet, künstliche Intelligenz, autonomes Fahren: Die Informationstechnologie verändert unsere Welt. Ein Bauteil steht im Mittelpunkt dieser Entwicklungen: der Transistor. Dieser zentrale Bestandteil logischer Schaltungen ermöglicht es, den elektrischen Strom zwischen zwei Elektroden durch eine unabhängige dritte Elektrode zu steuern.

Die Häufigkeit, mit der dieses Bauelement genutzt wird, lässt sich kaum ermessen: Für Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) existieren inzwischen Mikroprozessoren mit mehreren Billionen Transistoren. Zwar sind die heutigen, aus Halbleiter-Materialien wie Silizium bestehenden Transistoren im Lauf der letzten Jahrzehnte winzig klein geworden. Doch wegen des exponentiell wachsenden Bedarfs nimmt der weltweite Energiebedarf für die Datenverarbeitung stark zu.

Ein (vorläufiger) Weltrekord

«Wir benötigen deshalb dringend Transistoren, die noch viel weniger Energie verbrauchen», sagt Thomas Schimmel, Professor für Physik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). In den letzten acht Jahren hat er mit seinem Team im Kompetenzzentrum für Einzelatom-Elektronik und -Photonik in einem von der Werner Siemens-Stiftung (WSS) unterstützten Projekt ein vielversprechendes Konzept entwickelt: den atomaren Transistor, zum Beispiel in Form eines Einzelatomschalters, bei dem ein einzelnes oder wenige Atome für den Schaltprozess genutzt werden.

Statt 600 bis 700 Millivolt Spannung wie bei Halbleiter-Transistoren benötigt ein solcher atomarer Schalter nur wenige Millivolt, um eine Schaltung in Gang zu setzen. Im Rahmen des Projektes hat das Team mit einer Schaltspannung von 3 Millivolt, also 200 Mal niedriger als mit herkömmlicher Technik, gar einen Weltrekord aufgestellt. «Weil der Energieverbrauch mit dem Quadrat der Schaltspannung zunimmt, entspricht dies einem enormen Energiesparpotenzial», sagt Thomas Schimmel.

Doch das ist nicht das Ende der Fahnenstange: Professor Jürg Leuthold von der ETH Zürich als Direktor und die

Co-Direktoren des Zentrums, Professor Mathieu Luisier von der ETH Zürich und Professor Thomas Schimmel, sind überzeugt, dass das Energiesparpotenzial noch grösser ist – viel grösser. In einem Ergänzungsprojekt, das die WSS in den kommenden vier Jahren mit 4,2 Mio. Schweizer Franken unterstützt, wollen sie das physikalische Limit erreichen, unterhalb dessen keine Informationsverarbeitung mehr möglich ist.

Dieses Limit wurde im Jahr 1961 vom deutsch-amerikanischen Physiker Rolf Landauer formuliert und wird deswegen Landauer-Limit genannt. Es beschreibt die minimal benötigte Energiemenge, um 1 Bit Information in einen definierten Zustand zu bringen (0 oder 1). «Die Schaltenergien unseres atomaren Transistors liegen derzeit noch erheblich über dem Landauer-Limit», sagt Thomas Schimmel. «Wir sind schon sehr weit gekommen, aber wir sind noch nicht dort, wo wir sein könnten.»

Der Optimismus der Forscher gründet auf kürzlichen Entdeckungen. In noch nicht publizierten Experimenten haben sie die Schaltspannung ihrer atomaren Transistoren noch einmal drastisch reduziert. Möglich gemacht haben dies unter anderem Veränderungen der Geometrie und neue Herstellungsverfahren für die Nano-Elektroden.

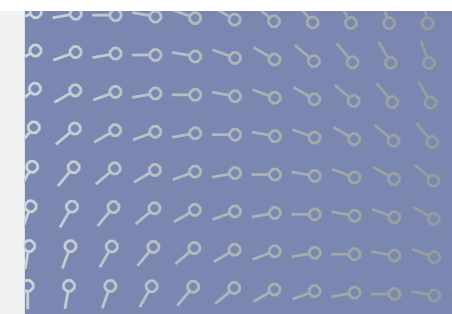
Riesiges Energiesparpotenzial

Noch erlaubten diese tieferen Spannungen keinen zuverlässigen Langzeitbetrieb eines Bauelements, räumen Thomas Schimmel und Jürg Leuthold ein. «Doch die Ergebnisse sind ein klarer Hinweis darauf, dass der Weltrekord von 3 Millivolt keineswegs die physikalische Grenze für unser Bauelement darstellt.» Sie gehen davon aus, dass noch einmal eine Reduktion der Schaltspannung um einen Faktor Hundert möglich sein wird. Das würde nicht nur den Energieverbrauch des Transistors dramatisch reduzieren, sondern auch jenen der Zuleitungen zum Bauteil. «Wir sprechen von einer Reduktion der Zuleitungsverluste um einen Faktor von 100 Millionen und mehr», sagen die beiden Wissenschaftler.

Neben der Schaltspannung nehmen die Forschenden im Ergänzungs-

projekt auch die Kapazität des Bauteils ins Visier. Die Kapazität beeinflusst die Geschwindigkeit, mit der ein Transistor ein- und ausgeschaltet werden kann. Heute sind die Schaltgeschwindigkeiten des atomaren Schalters noch nicht ausreichend hoch. Durch die Miniaturisierung der Elektrodenflächen und Zuleitungen mithilfe neuartiger Nanostrukturierungstechniken, so Leuthold, seien auch hier grosse Fortschritte möglich.

Die Expedition zu den Grenzen der Elektrotechnik hat also begonnen. Und Thomas Schimmel und Jürg Leuthold sind optimistisch. «Unser Ziel ist es, eine neue Technologie für eine nachhaltige Datenverarbeitung bereitzustellen – und wir haben die Voraussetzungen dafür.»



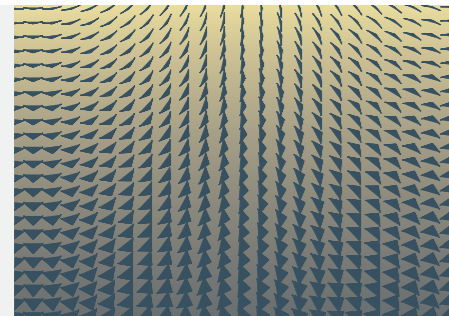
Revolutionärer Einzelatomschalter

Von der Kaffeemaschine bis zum Grossrechner – Mikrochips sind in praktisch jedem technischen Gerät zu finden. Die Chips wurden in den letzten Jahren zwar kleiner und schneller, doch mittlerweile stösst die Miniaturisierung an ihre Grenzen und ihr hoher Energieverbrauch wird zum Problem. Forschende des Zentrums für Einzelatom-Elektronik und -Photonik an der ETH Zürich und am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) tüfteln deshalb an einem völlig neuartigen Mikrochip auf atomarer Basis.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
12 Mio. Schweizer Franken (2017–2025)
4,2 Mio. Schweizer Franken (2026–2029)
Projektdauer 2017–2029
Projektleitung Prof. Dr. Jürg Leuthold,
Direktor des Instituts für Elektromagnetische Felder, ETH Zürich

Feuerprobe in der Ägäis bestanden

Das Innovationszentrum für Tiefsee-Umweltüberwachung ist auf Erfolgskurs: Tests des Monitoring-Systems SPIRULA im Mittelmeer verliefen sehr erfolgreich. Und das Team konnte in ein neues Zentrum für Tiefseeforschung umziehen.



Innovationszentrum für Tiefsee-Umweltüberwachung

Das Team um Ralf Bachmayer, Leiter Innovationszentrum für Tiefsee-Umweltüberwachung, entwickelt das Tiefsee-Monitoring-System SPIRULA seit Januar 2025 im neu gebauten Zentrum für Tiefseeforschung (ZfT) weiter. Der grosszügige Neubau der Universität Bremen verstärkt die Zusammenarbeit zwischen der Tiefseeforschung von «MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften» und der Entwicklung der dafür benötigten Technologien. Das gemeinsame Ziel: Die Prozesse der Tiefsee grundlegend und interdisziplinär zu erforschen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
4,975 Mio. Euro
Projektdauer 2018–2028
Projektleitung

Prof. Dr. Michael Schulz, ehemaliger Direktor MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen
Prof. Dr. Ralf Bachmayer, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen

Die Entwicklung von SPIRULA war im Frühling 2025 so weit gediehen, dass MARUM-Professor Ralf Bachmayer und sein Team das Unterwasser-Monitoring-System unter realen Bedingungen im Meer testen wollten. Neu mit dabei waren die Software-Ingenieurinnen Ankita Jadhav und Monja Daub, die den Bereich Sensor-Daten-Verarbeitung und -Elektronik verstärken. Das mittlerweile sechsköpfige Team Bachmayer trieb die Frage um: Würde sich SPIRULA (Akronym für «SPiraling Intelligent Robotic Underwater monitoring pLatform») auch ausserhalb des MARUM-eigenen Testbeckens bewähren? Würden die im SPIRULA-Fahrzeug eingebauten elektronischen Module funktionieren und mit der Basisstation am Meeresboden, dem Lander, kommunizieren können?

Vom Testbecken ins Meer

Als Testort wählte Bachmayers Team die griechische Insel Milos. Denn unter der Vulkaninsel im Ägäischen Inselbogen befindet sich in rund sieben Kilometern Tiefe eine Magmakammer,

deren hydrothermale Aktivitäten die MARUM-Forschenden interessieren, insbesondere die Gasaustritte.

Nach zwei Tagen Transfer von Deutschland nach Griechenland und zwei weiteren Tagen Vorbereitungsarbeiten auf Milos war es Ende April 2025 soweit. Das SPIRULA-System wurde auf einer eigens gebauten schwimmenden Plattform ins Meer hinausgezogen. Bei einer der zahlreichen küstennahen Unterwasser-Bakterienmatten wurde der Lander rund zehn Meter tief ins Wasser gelassen und verankert, dann spulte sich das mit einer Leitung verbundene und gesicherte Fahrzeug vom Lander ab und begann, sich über den Meeresgrund zu bewegen – und trotz Wellen, Kälte und Strömungen Daten aufzuzeichnen.

Das Team war sofort begeistert. Sowohl die anspruchsvolle operationelle Handhabung der beiden miteinander verbundenen System-Komponenten als auch deren Technik funktionierten sehr gut. Die Kamera erstellte hochaufgelöste Bilder der Umgebung und des Meeresbodens, das Fächersonar



Bei den letzten Vorbereitungen vor dem Absetzen von SPIRULA auf dem Meeresgrund sind das Serviceboot und die Arbeitsplattform voll besetzt.

zeichnete akustische Umgebungsprofile auf und die verschiedenen Sensoren massen Temperatur, Druck, Leitfähigkeit und Trübe des Wassers sowie Fluoreszenz.

Daten mit Zeitstempel

Das SPIRULA-System lieferte reine Daten, ohne elektrisches Rauschen oder sonstige Störungen. «Die gesammelten Daten sind von sehr guter Qualität. Damit ist das Wichtigste erreicht», bilanziert Ralf Bachmayer. Da sämtliche Daten und Bilder mit einem Zeitstempel versehen sind, lassen sie sich je nach Auswertungszweck einzeln, in Kombination oder in der Gesamtheit analysieren. Die Zeitstempel ermöglichen es, im Datenpool Erklärungen zu finden für plötzlich veränderte Messdaten, wie beispielsweise einen Anstieg der Wassertemperatur.

«Mit den erfolgreichsten Tests auf Milos ist ein Meilenstein erreicht», betont auch Co-Projektleiter Michael Schulz. «Die eingebauten Module sind autonome Systeme, denen die Kommunikation untereinander erst beige-

bracht werden musste.» Kommt erschwerend hinzu, dass im Meer alles viel störungsanfälliger ist. «Da ist nichts mit Plug and Play. Dass das Zusammenspiel der eingesetzten Technik in der Praxis funktioniert hat, ist ein grosser Erfolg», so Schulz.

Eng verzahnte Technik und Forschung

In die Tests auf Milos waren auch zwei andere MARUM-Forschende involviert: Solveig Bühring, die sich auf hydrothermale Geomikrobiologie spezialisiert hat, und der Postdoktorand Christian Meurer, der zur CO₂-Abscheidung und -Einlagerung im Meeresboden forscht und einer der massgeblichen Entwickler von SPIRULA ist. Sie und weitere MARUM-Forschende möchten SPIRULA dereinst für ihre Projekte nutzen, beispielsweise für Langzeitbeobachtungen empfindlicher Artengemeinschaften am Meeresboden. Bei der Rückkehr von Bachmayers Team nach Bremen ins neue Zentrum für Tiefseeforschung wurde SPIRULAs Potenzial für die Forschung denn auch rege diskutiert.

Um die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Technik weiter zu stärken, wurde an der Universität Bremen ein Neubau errichtet, in dem die verschiedenen Tiefsee-Arbeitsgruppen unter einem Dach versammelt sind. Im neuen Zentrum für Tiefseeforschung (ZfT) wurden neben den üblichen Arbeitsräumen auch hochspezialisierte Labore und eine Halle eingerichtet, in der seegehende Geräte wie SPIRULA weiterentwickelt und gewartet werden können. Bachmayers Team ist im April 2025 ins ZfT umgezogen.

Die enge Verzahnung zwischen Tiefseeforschung und Entwicklung der benötigten Technologien und Geräte zeichne die Marinen Umweltwissenschaften am MARUM in Bremen seit je aus, betont Schulz. «Innovative Unterwassertechnologie ermöglicht die Tiefseeforschung erst gerade», ist der frühere MARUM-Direktor überzeugt. «Was die Gruppe Bachmayer entwickelt hat, kann nun in zukünftige Forschungsdesigns ausstrahlen.»



An der Weltausstellung in Osaka präsentierte das MIRACLE II-Team seine Technik einem breiten Publikum aus aller Welt.

Vor grossem Publikum

Mit einem grossen Auftritt an der Weltausstellung in Japan hat MIRACLE II für Furore gesorgt. Derweil wird in den Labors an der Universität Basel bereits an neuen Forschungswundern getüftelt und gearbeitet.

MIRACLE II beschreitet nicht nur Forschungs-Neuland, sondern ist auch kommunikativ auf Erfolgskurs. Das Projekt, das ein robotergesteuertes Laserskalpell für minimalinvasive Knochenoperationen entwickelt, gewinnt zunehmend an Bekanntheit. Forschungsleiter Philippe Cattin, Professor für Medizinische Bildanalyse und Leiter des Department of Biomedical Engineering (DBE) an der Universität Basel, sagt: «Uns ist es wichtig, dass wir auch der Öffentlichkeit zeigen, was wir in unseren Forschungslabors entwickeln.»

Diesbezüglich brachte das vergangene Jahr dem MIRACLE II-Team ganz neue Erfahrungen. Der unbestrittene Höhepunkt war die Teilnahme an der Expo 2025, der Weltausstellung in der japanischen Stadt Osaka. Als eines von nur einer Handvoll Schweizer Forschungsprojekten durfte MIRACLE II von Mitte Juni bis Mitte August an der Ausstellung «Life» im Schweizer Pavillon seine bahnbrechende Technik einem breiten Publikum präsentieren.

Auf engstem Raum

Die Vorgabe der Ausstellungsveranstalter für die teilnehmenden Projekte war ebenso einfach wie herausfordernd: Jeder Stand musste Platz finden auf einem maximal dreiteiligen USM-Haller-Regal, also auf etwas weniger als zwei Meter Breite. Das Team von MIRACLE II schaffte es trotzdem, praktisch die gesamte Palette seiner Entwicklungen in diesen engen Raum zu packen: Virtual Reality, 3D-Druck von Implantaten, endoskopische Robotik und Lasersysteme.

Die Besucherinnen und Besucher des Schweizer Pavillons – ungefähr 8000 pro Tag – konnten somit am Stand von MIRACLE II Schädel-Implantat bestaunen, die im hauseigenen 3D-Druck-Labor des Universitätsspitals Basel von der Forschungsgruppe von Florian Thieringer hergestellt werden. Sie tauchten mithilfe des innovativen Virtual-Reality-Systems, welches das Team von Philippe Cattin entwickelt hat, in einen Schädel ein.

Und sie durften einen Prototyp des knochen- oder gewebschneidenden Laserroboters gleich selbst bedienen. Über ein äusseres, von der Gruppe von

Georg Rauter entwickeltes Antriebssystem steuerten sie ein winziges Endoskop, das in eine Kniegelenksspalte eingeführt wurde. Und per Controller setzten sie zwei Laser-Methoden – das Schneiden und das Bestimmen der Schnitttiefe – in Gang, welche die Forschungsgruppe von Ferda Canbaz im MIRACLE II-Projekt entwickelt hat.

Forschung zum Anfassen

Um den Schwung dieses Grossanlasses zu nutzen, organisierte das MIRACLE II-Team im Sommer gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie einen dreitägigen Anlass mitten in der Stadt Basel. Auf dem Theaterplatz, in unmittelbarer Nähe zum Tinguely-Brunnen, richtete es eine Art mobiles Mitmachlabor ein, um dem Basler Publikum die MIRACLE II-Technik vorzustellen und so das Verständnis für Forschung und Wissenschaft zu fördern.

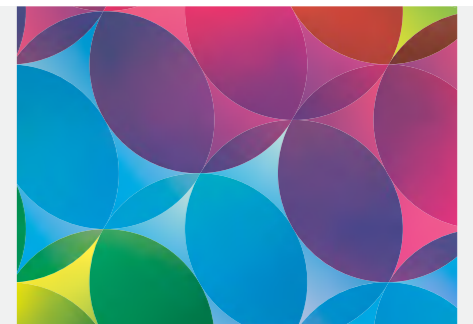
Die Forschenden bereiteten ihre komplexen Themen spielerisch und publikumswirksam auf. So durften die Besucher an einem Posten eine 3D-Brille aufsetzen, damit ins Gehirn eines Patienten mit einem Aneurysma eintauchen und diese Aussackung eines Blutgefässes virtuell an der richtigen Stelle verschliessen. An einem weiteren Stand galt es, in einem «Töggelkasten» statt des Balls einen Laserstrahl ins Tor zu befördern. Und Kinder durften sich im 3D-Drucker einen Schlüsselanhänger mit ihrem Namen ausdrucken lassen.

Philippe Cattin zieht eine äusserst positive Bilanz der beiden Öffentlichkeitsanlässe. Der Arbeitsaufwand dafür sei gross gewesen, sagt er. «Aber es hat sich gelohnt. Wir konnten unsere Entwicklungen einer unglaublichen Besucherzahl präsentieren. Und wir nutzten die Präsenz an der Weltausstellung, um unsere Kontakte mit japanischen Forschungsinstitutionen und Industriepartnern auszubauen.»

Auch auf der Forschungsseite erzielte das Team im vergangenen Jahr grosse Fortschritte. So hat die Forschungsgruppe von Florian Thieringer im März einem jungen Mann ein Kinn-Implantat aus dem hauseigenen 3D-Druck-Labor eingesetzt. Es war das erste Kinn-Implantat am Universitätsspital

Basel, das direkt am Behandlungsort hergestellt wurde. Zuvor hatten die Forschenden bereits selbst gedruckte Schädelimplantate eingesetzt. Das Ziel ist es, das Portfolio dieser patientenspezifischen, direkt im Spital hergestellten Implantate laufend zu erweitern – und langfristig solche Implantate sogar direkt in den Körper zu drucken.

Auch in der nahen Zukunft werde es bestimmt nicht langweilig, kündigt Philippe Cattin mit einem Lächeln an. «Im Laser-Labor von Ferda Canbaz etwa wird gerade an einem kleinen «Miracle» gearbeitet.» Wegen Patent- und Publikationsvorgaben brauche es allerdings noch etwas Geduld, bis das Geheimnis dieses neuen Forschungswunders aus der MIRACLE II-Küche gelüftet werden könne.



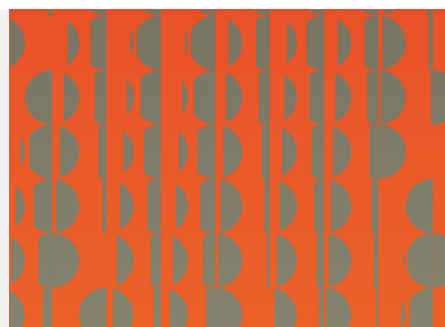
MIRACLE II

Schonende, minimalinvasive, robotergesteuerte und hochpräzise Knochenoperationen – daran arbeiten die Forschenden des MIRACLE II-Projekts an der Universität Basel. Sie entwickeln einen endoskopischen Laser-Roboter, der Knochen präzise schneidet. Winzige Sensoren und eine 3D-Software sorgen während der Operation für die Sicherheit der Patienten. Im spitaleigenen 3D-Druck-Labor werden Implantate hergestellt, die genau in den vorgeschrittenen Knochen passen. Das alles führt dazu, dass die operierten Knochen schneller zusammenwachsen als bisher.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
12 Mio. Schweizer Franken
Projektdauer 2022 – 2027
Projektleitung Prof. Dr. Philippe Cattin, Department of Biomedical Engineering (DBE), Universität Basel
Prof. Dr. Dr. Florian M. Thieringer, DBE, Universität Basel und Universitätsspital Basel
Prof. Dr. Georg Rauter, DBE, Universität Basel

Die Alpen als Wärmespeicher

Im BedrettoLab ist ein weltweit einzigartiges Pilotprojekt zur saisonalen Wärmespeicherung in Granit gestartet. Ein neu gebauter Seitentunnel in der Nähe zu einer Verwerfungszone im Gotthardmassiv erlaubt es ausserdem zu ergründen, wie Erdbeben ablaufen. Auch Forschungsgruppen aus Geobiologie und Teilchenphysik nutzen das Untergrundlabor.



Bedretto-Untergrundlabor

Die Werner Siemens-Stiftung hat den Bau des weltweit einzigartigen Untergrundlabors im Gotthardmassiv in der Südschweiz finanziert und unterstützt dort innovative Forschungsprojekte. Das BedrettoLab erlaubt es Forschenden der ETH Zürich, zusammen mit Partnern aus dem In- und Ausland die sichere Nutzung und Speicherung von geothermischer Energie und die Erdbebenphysik unter realen Bedingungen zu erforschen sowie Instrumente für Geotechnik zu entwickeln und Grundlagenforschung im Bereich der Geobiologie und Hochenergiephysik zu betreiben.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
12 Mio. Schweizer Franken
Projektdauer 2018–2027
Projektleitung Prof. Dr. Domenico Giardini,
Professor für Seismologie und Geodynamik,
ETH Zürich

Im Sommer 2025 hatte das BedrettoLab hohen Besuch. Kaderleute des Bundesamts für Energie schauten vorbei, um sich über die Fortschritte des Forschungsprojekts «Bedretto Energy Storage and Circulation of Geothermal Energy» (BEACH) von ETH-Professor Martin Saar zu informieren. Beim Projekt BEACH geht es um die Speicherung von Energie im Untergrund. Die Idee: Einen Energiespeicher im kristallinen Gestein (Granit) für den Ausgleich der saisonalen Schwankungen des Energiebedarfs zu nutzen. Alle nötigen Daten dazu wurden in den letzten fünf Jahren im BedrettoLab gewonnen. «Wärme macht einen grossen Teil der Schweizer Energiebilanz aus», gibt der Direktor des BedrettoLab, Domenico Giardini, zu bedenken. «Die Wärmespeicherung im kristallinen Gestein könnte dazu beitragen, dass die Energiewende in der Schweiz gelingt.»

Das Interesse am weltweit einmaligen Pilotversuch BEACH ist gross. Neben dem Bund und kantonalen und ausländischen Elektrizitätsproduzenten interessiert sich auch die Azienda

Elettrica Ticinese (AET) mit einem konkreten Vorhaben dafür: einem Pilotprojekt für ein robustes autarkes Insel-Energiesystem für das Bedretto-Tal, das den Energie-Output der regionalen Flusskraft, der Windkraft, der Photovoltaik und der Wärmespeicherung im Granit zusammenbringt. Der resultierende Mix aus Strom und Wärme soll vor Ort genutzt werden. «Dezentrale kombinierte Energiesysteme sind die Zukunft», ist Giardini überzeugt.

Enormes geothermisches Reservoir

Mittlerweile verfügt das BedrettoLab über ein vollständig kontrolliertes geothermisches Reservoir von mehr als 200 000 Kubikmetern: das riesige Felsvolumen aus Granit unter dem Bedretto-Tunnel. Es ist voller feiner Risse, in denen Wasser zirkuliert, und wurde durch Wasserinjektionen in ein durchlässiges Reservoir verwandelt. Die Forschenden injizieren kontrolliert just so viel zusätzliches Wasser, dass nur kleine Beben entstehen und dass die Wassermenge sich gut im Berginnern erwärmen kann. «Wir brechen den



Im Tessiner Bedretto-Tal ist ein Pilotprojekt für ein autarkes Energiesystem geplant; eine wichtige Rolle übernimmt das BedrettoLab.

Felsen nicht auf», betont Giardini. Das injizierte Wasser sucht sich seinen Weg durch die vorhandenen Risse, kontrolliert von 2000 Sensoren, die sämtliche Reaktionen des Felsvolumens messen. Will man die Energie des erwärmten Wassers nutzen, lassen die Forschenden es durch ein zweites Bohrloch wieder an die Tunneloberfläche hochsteigen.

Das geothermische Reservoir wird nun während vier Jahren in einem saisonalen Zyklus betrieben: Im Sommer wird warmes Wasser eingebracht und im Fels gespeichert. Im energiearmen Winter wird die Wärmeenergie bezogen. «Im Modell funktioniert es», sagt Giardini, «nun testen wir unter realen Bedingungen, wie viel Wärme wir im Winter aus dem Reservoir beziehen können.» Verschiedene Zirkulationsverfahren und ihre Energiebilanz und Speichereffizienz werden getestet und die Überwachungs- und Modellierungssysteme weiter verbessert. Auch die wirtschaftlichen Aspekte eines unterirdischen Energiespeichers werden analysiert.

Seit Frühling 2025 ist der neue, 120 Meter lange Seitentunnel zum Haupttunnel des BedrettoLab fertig. Er verläuft parallel zu einer tektonischen Verwerfungszone im Granit und eignet sich zur Erforschung von Erdbebenprozessen – deshalb der Projektname FEAR für «Fault Activation and Earthquake Rupture».

Dank der Bohrlöcher im Seitentunnel gelangt man nahe an die Verwerfungszone heran, mehrere Bohrlöcher durchdringen die Verwerfung sogar. So können die Forschenden des internationalen FEAR-Konsortiums die vielen offenen Fragen zum Ablauf von Erdbeben angehen. «Wir erhalten komplett neue Erkenntnisse», freut sich Giardini.

Geobiologie und Teilchenphysik

Seit 2023 forscht auch Cara Magnabosco, Professorin für Geobiologie und Mitglied des «Centre for Origin and Prevalence of Life» der ETH Zürich, im BedrettoLab. Sie möchte herausfinden, welche Elemente unabdingbar sind, damit Leben entstehen kann. Das Bedretto-

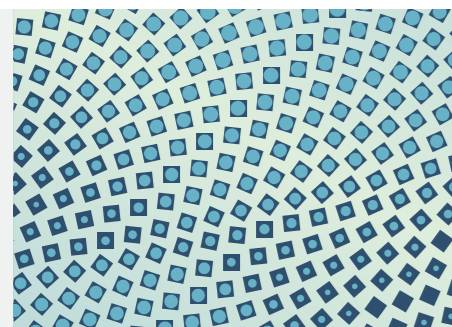
Lab eignet sich für die Beantwortung dieser Frage, weil in den tiefen Gesteinsschichten Bereiche existieren, die über Jahrmillionen vollkommen abgeschottet waren.

2026 soll ausserdem eine Kaverne im BedrettoLab für Teilchenphysik-Experimente umgebaut werden. Die Forschungsgruppe von Professor Björn Penning von der Universität Zürich ist hier federführend. Die Physiker wollen Elementarteilchen aus dem Weltall aufspüren und so die dunkle Materie erforschen, die den grössten Teil des Universums ausmacht. «Nur Partikel wie Neutrinos oder Myonen gelangen durch die kilometerdicke Granitschicht bis ins BedrettoLab», erklärt Giardini.

Und nicht zuletzt wurde im vergangenen Jahr die Verstärkung des BedrettoLab angegangen. Der ETH-Rat hat das einzigartige Felslabor im Tessin auf seine Liste der grossen Forschungsinfrastrukturprojekte von nationaler Bedeutung gesetzt und dem Bund zur weiteren Finanzierung vorgeschlagen.

«Ich bleibe dran»

Die Neurowissenschaftlerin Yanan Zhang entwickelt eine Diagnostikplattform, mit der sich Tumore im Blut nachweisen lassen. Nun will sie die Erfindung zur Marktreife bringen. Ein UZH MedTech Entrepreneur Fellowship unterstützt sie bei der Gründung ihrer Firma.



Von der Forschung zur Firmengründung

Die Universität Zürich unterstützt mit den UZH Entrepreneur Fellowships talentierte Nachwuchsforschende, die ein Unternehmen gründen wollen, das auf Forschungserkenntnissen basiert. Dank der Unterstützung der Werner Siemens-Stiftung werden seit 2018 auch Projekte in der Medizintechnik gefördert. Seit Beginn des Programms haben insgesamt 28 Nachwuchsforschende ein MedTech Entrepreneur Fellowship der UZH erhalten. Bereits sind 10 Jungunternehmen daraus entstanden.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
10,67 Mio. Schweizer Franken
Projektdauer 2018–2027
Projektleitung Prof. Dr. Elisabeth Stark,
Prorektorin Forschung, Universität Zürich

Nur gerade vier Jahre brauchte Yanan Zhang für ihre bahnbrechende Entwicklung im Bereich Tumordiagnostik. Sie fing ihre Doktorarbeit an der Capital Medical University in Peking an und wechselte dank eines Kooperationsabkommens für das letzte Jahr an das Institut für Neurologie am Universitätsspital Zürich. Im Forschungsteam von Tobias Weiss beendete sie ihr Projekt zu extrazellulären Vesikeln (EVs), die von Tumorzellen freigesetzt werden.

EVs kann man sich als umhüllte Partikel vorstellen, die von Zellen jeglicher Art abgesondert werden und jeweils Proteine, RNA und DNA der Ursprungszelle enthalten. Mithilfe dieser spezifischen EVs geben Zellen verschiedene Informationen an andere Zellen weiter.

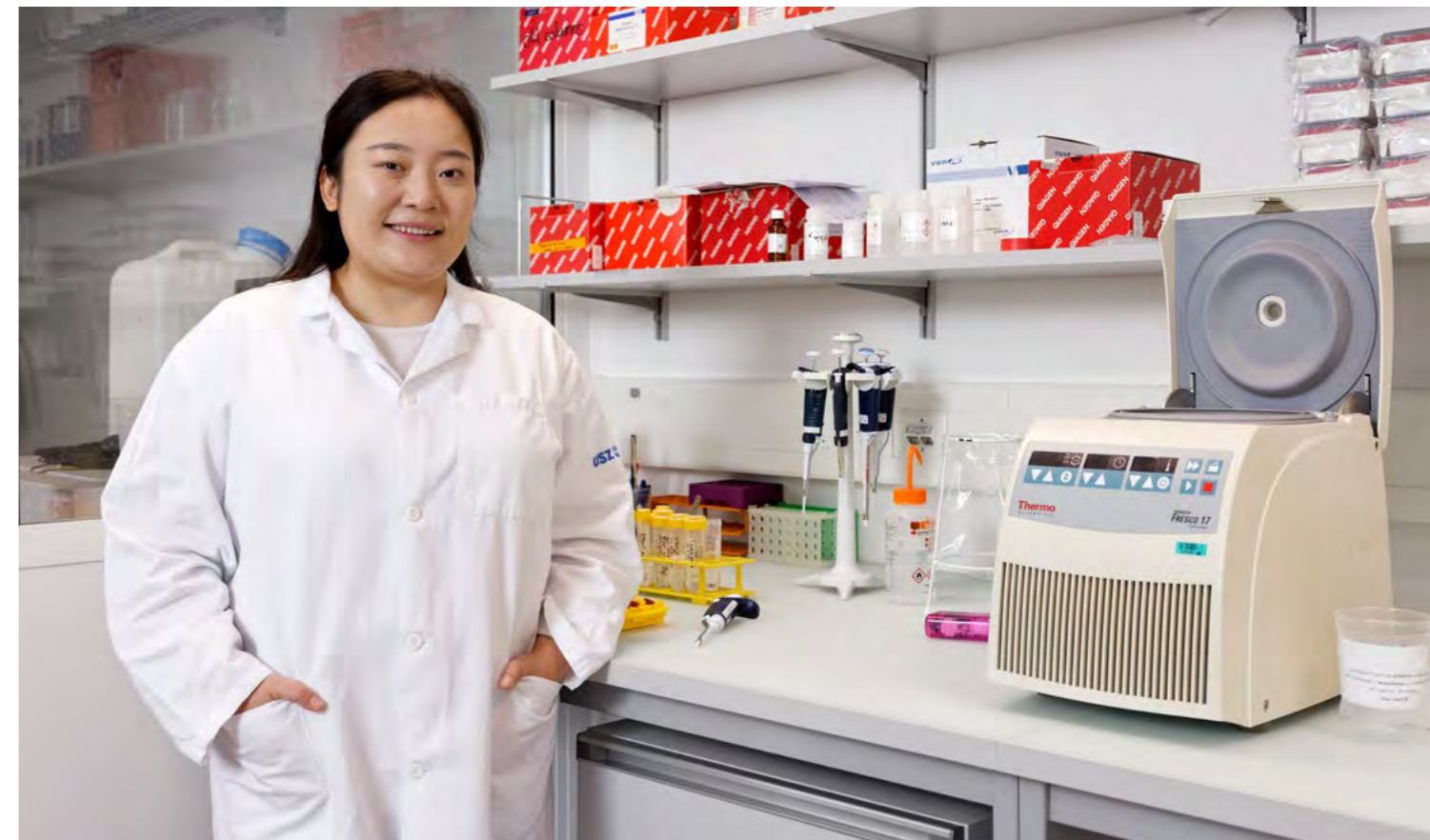
Hohe Treffsicherheit

Auch Krebszellen sondern bereits in einem frühen Stadium zahlreiche EVs ab. Die Flüssigbiopsie-Plattform, an der Yanan Zhang arbeitet, erlaubt es, schon geringste Spuren von Tumor-

Vesikeln im Blut von Patientinnen und Patienten aufzuspüren. Das ist ein Durchbruch bei der Diagnose des häufigsten direkt im Hirn entstehenden Tumors bei Erwachsenen, des Glioblastoms. Denn dieses konnte man bisher nicht zuverlässig im Blut detektieren. Die Flüssigbiopsie-Plattform macht das nun möglich, was grosses Potenzial für eine frühzeitige Diagnosestellung und bessere Verlaufskontrolle unter Therapien hat.

Als Postdoktorandin etablierte Zhang Biomarker, die EVs von Glioblastom-Zellen mit einer Treffsicherheit von 98 Prozent anzeigen. «Das war der Anfang der Plattform», sagt die Forscherin. Mittlerweile kann die Flüssigbiopsie-Plattform auch die EVs von Lungen- und Brustkrebs sowie Pankreas- und Hautkrebs aufspüren. Vier Milliliter Blut reichen für den Test aus. Selbst wenn unspezifisch ganz generell nach Krebszellen gesucht wird, liegt die Erfolgsquote bei 91 Prozent.

Nun möchte Zhang ihre innovative Plattform für die Diagnostik und das Monitoring von Krebs auf den Markt



Mit dem Diagnostik-Tool von Yanan Zhang lassen sich Tumorzellen schon sehr früh aufspüren.

bringen. Der Schritt von der Forscherin zur Firmengründerin ist kein einfacher. Doch bis die Firma gegründet ist – voraussichtlich in den nächsten Monaten –, übernimmt Zhang, im Team mit Tobias Weiss, voller Energie alle anfallenden Aufgaben. Und das sind nicht wenige: den Prototyp der Diagnostikplattform verbessern, den wissenschaftlichen Artikel dazu publizieren, die Businesskurse besuchen, mit potenziellen Investoren sprechen – einer hat ihr bereits ein Kaufangebot unterbreitet. «Wir haben es ausgeschlagen», sagt Zhang, «wir wollen einen Investor, der unseren Exzellenzanspruch teilt.»

Ihr grösster Mentor ist Tobias Weiss, Leitender Oberarzt an der Klinik für Neurologie. «Er ist ein fantastischer Chef», lobt Zhang. Und er ist von der Diagnostikplattform seiner Postdoktorandin mit mittlerweile eigener Forschungsgruppe überzeugt. Tobias Weiss unterstützt das Vorhaben sehr und gestaltet es aktiv mit. Er war es auch, der Zhang vor einem Jahr für ein UZH MedTech Entrepreneur

Fellowship empfohlen hat, ein von der Werner Siemens-Stiftung finanziertes Weiterbildungsangebot der Universität Zürich, das Forschende bei der Gründung einer eigenen Firma unterstützt.

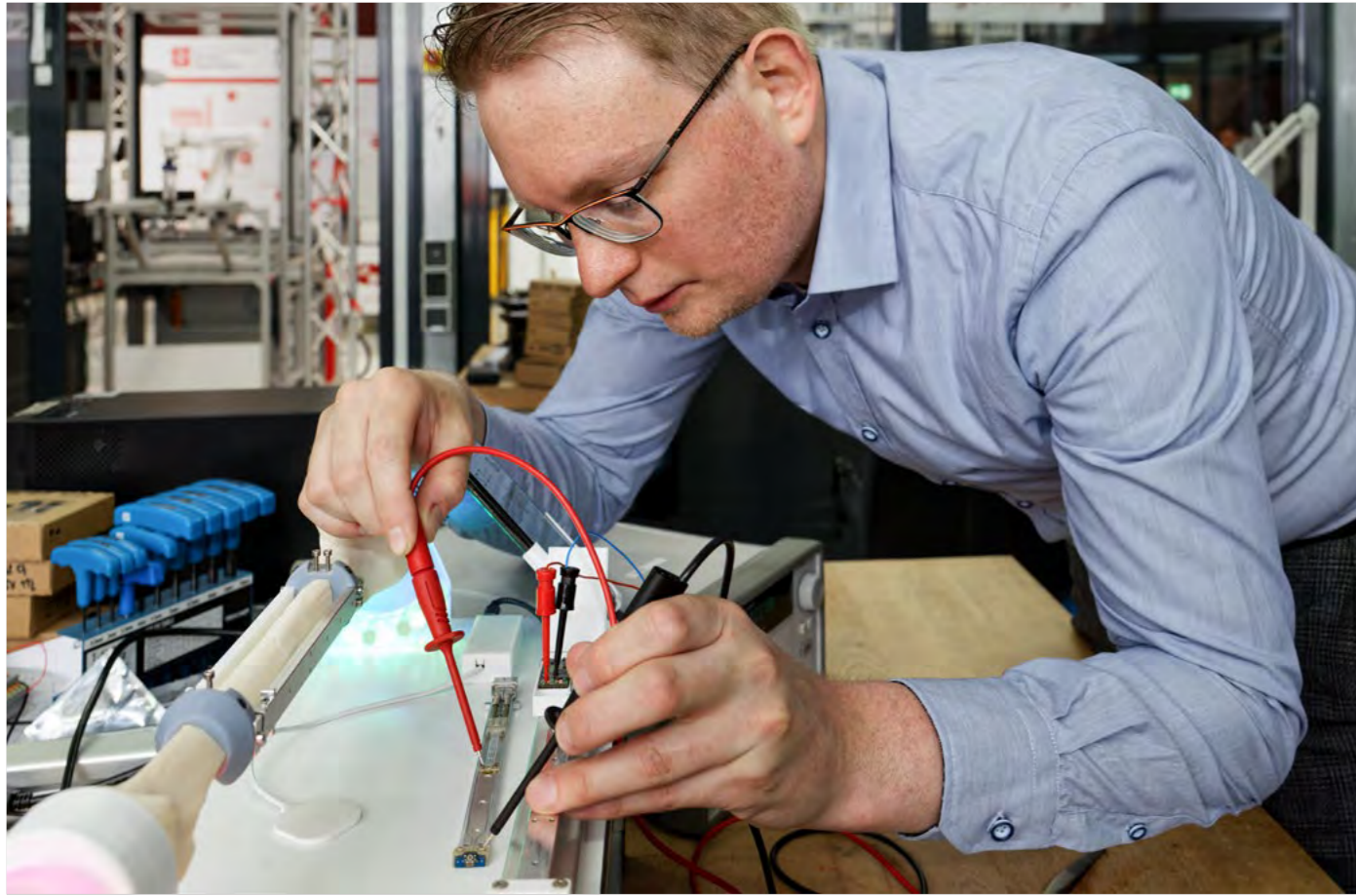
Erster Test weltweit

Zhangs Firma wird Sitz in der Schweiz nehmen und zu Beginn «nur» die Diagnose von Hirntumoren anbieten. Denn dieses Angebot ist neu. «Es ist ein neuartiger Bluttest und der erste, der eindeutige Hinweise auf vom Glioblastom stammende EV-Signale im Blut liefert», sagt Zhang. Danach wird sie den Test für die Diagnose anderer Krebsarten weiterentwickeln.

Die Kunden – Kliniken und niedergelassene Ärztinnen und Ärzte – brauchen bei Verdacht auf Hirntumor einfach eine Blutprobe des Patienten oder der Patientin einzuschicken; nach rund zwei Tagen erhalten sie das Resultat. Mit einer Treffsicherheit von über 90 Prozent bleibt die Validierung in grösseren, unabhängigen klinischen Studien ein entscheidender

nächster Schritt. Ist die Firma in der Schweiz etabliert, wird die Expansion den asiatisch-pazifischen Raum und in die USA angestrebt.

Bei einer Firmengründung gibt es enorm viel zu bedenken und zu leisten. Was belastet Zhang am meisten? «Der Markteintritt und was alles dafür getan, bedacht und abgesichert werden muss.» Schläft sie noch gut? «Nein», sagt Zhang und lacht fröhlich. Hat sie wenigstens am Wochenende frei? «Nein!» Was treibt sie so unermüdlich an? «Wenn ich mir ein Ziel setze, bleibe ich dran, bis ich es erreicht habe. Die Firma ist mein Baby. Ich will Erfolg.»



Sechs Jahre hat das Saarländer Team am smarten Implantat gearbeitet. Nun ist das System bereit für den Prüfstand.

Implantat vor dem Härtetest

In seinem letzten Förderjahr hat das Projekt «Smarte Implantate» noch einmal grosse Schritte gemacht. Das intelligente Implantat, das künftig den Heilungsprozess nach einem Knochenbruch anregen soll, ist bereit für den Prüfstand und für erste Tierversuche. Und die Saarländer Technik ist Teil eines neuen Grossprojekts mit EU-Förderung.

Von der Idee bis zum Implantat. Das war das Ziel, als das Projekt «Smarte Implantate» vor sieben Jahren seine Arbeit aufnahm. «Heute haben wir das erreicht», sagt Bergita Ganse, WSS-Stiftungsprofessorin für innovative Implantatentwicklung an der Universität des Saarlandes. Die Forschenden haben einen Demonstrator ihres Implantats gebaut, das dereinst einen gebrochenen Knochen nicht nur stabilisieren, sondern die Knochenheilung durch gezielte Mikrobewegungen aktiv stimulieren soll.

Und sie haben diesen Demonstrator in den letzten Monaten so weiterentwickelt und verfeinert, dass momentan Versuche im Prüfstand laufen und erste Experimente am Tier vorbereitet werden. Im Prüfstand werde das Implantat mitsamt Knochen eingespannt und über Tausende Belastungszyklen getestet, erklärt Bergita Ganse. «So können wir allfällige Schwachstellen des Implantats aufdecken – zum Beispiel, ob es auch nach längerer Belastung noch genau das misst, was wir wollen.»

Diese Tests laufen vor allem mit Schaf-Knochen. Denn die ersten Versuche am lebendigen Tier sind in Schafen geplant. Wann genau diese Studien starten können, ist noch nicht klar. «Tierversuche haben wegen der aufwändigen Beantragung eine lange Vorlaufzeit», sagt Ganse. «Aber es ist toll, dass wir so weit gekommen sind in dem Projekt.»

Deutliche Verbesserung erwartet

Und was kann das Implantat der Patientin oder dem Patienten bringen? Heute wird nach einem Schienbeinbruch eine Metallplatte auf den gebrochenen Knochen geschraubt, um ihn zu stabilisieren. Trotzdem wachsen die Knochen nicht immer gut zusammen, in bis zu jedem siebten Fall kommt es zu Komplikationen. Das neue, smarte Implantat liefert Informationen darüber, wie gut oder schlecht der Bruch verheilt und warnt vor Fehlbelastungen. Und falls die Heilung nicht optimal verläuft, reagiert es darauf.

Wirken beispielsweise zu starke Kräfte auf die Fraktur, versteift sich das Implantat und schont damit den Knochenbruch. Bewegt sich der Patient zu wenig, verformt es sich und wird flexi-

bler, sodass der Knochen stärker belastet wird. Ein neuer Mechanismus kann sogar eine Massage der Bruchstelle bewirken. Sie erwarte, dass sich die Knochenheilung dank dieser Mikrobewegungen um ungefähr 20 Prozent beschleunigen lasse, sagt Bergita Ganse. «Allerdings würden wir neben dieser Massage des Frakturspalts gerne weitere Möglichkeiten zur Stimulation der Knochenheilung ausprobieren.»

In einer Literaturübersichtsarbeit stellte Ganse nämlich fest, dass auch Methoden wie Ultraschall-, Stosswellen-, Stromfluss- oder Magnetstimulation die Heilungszeit verkürzen könnten. Man wisse beispielsweise, dass Magnetfelder die Zellteilung stimulieren. «Ich vermute, dass wir mit einer Kombination aus Mikromassage und Magnetfeldstimulation die Heilung um ungefähr 35 Prozent beschleunigen könnten», sagt Ganse. Weil das Smarte-Implantate-Projekt Ende 2025 ausgelaufen ist, ist es allerdings nicht mehr möglich, solche Erweiterungen des Implantats im Rahmen der WSS-Förderung zu untersuchen.

Strahlungsfreie Messmethoden

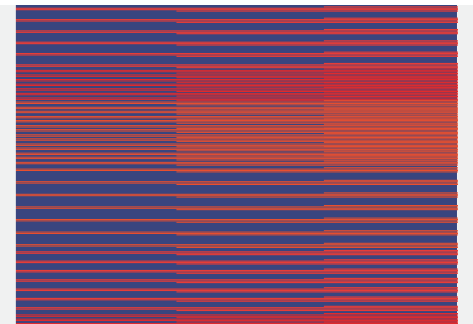
Auch bei der Messung des Heilungsvorgangs hat Ganses Team im vergangenen Jahr eine wichtige Entdeckung gemacht. Heute wird ausschliesslich mittels Röntgen- und CT-Aufnahmen überwacht, wie gut ein Knochenbruch heilt. Diese Messungen setzen Patientinnen und Patienten einer Röntgenstrahlung aus und sollten deshalb nicht allzu häufig wiederholt werden.

In zwei Publikationen zeigten die Forschenden nun, dass sich die Frakturheilung auch mit handlichen, auf dem Markt erhältlichen Geräten überwachen lässt, die den Blutfluss oder die Sauerstoffsättigung an der Bruchstelle messen. Künftig könnte die Ärztin – oder sogar der Patient selber – einmal am Tag ein solches Messgerät an der Bruchstelle auf die Haut halten. Oder man baut die Methode gar in ein smartes Implantat ein, wo es kontinuierlich Informationen zur Bruchheilung liefert.

Möglichkeiten gibt es also viele. Das hat auch die Forschungsförderung der EU entdeckt. Sie hat im Rahmen des Horizon-Europe-Programms über

20 Millionen Euro für das Projekt «SmILE» bewilligt, das diverse intelligente Ansätze gegen Krankheiten des Bewegungsapparats wie Arthrose, Osteoporose oder eben Frakturen erforscht. Teil davon sind zwei Projektpartner von «Smarte Implantate», die Universität des Saarlandes und das Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (Zema).

«Was in SmILE geplant ist, baut auf unserem WSS-Projekt auf», sagt Bergita Ganse. «Es geht darum, eine Chip-Plattform für smarte Implantate zu entwickeln – nicht nur für Frakturen, sondern auch für Hüft- oder Knieprothesen.» Zudem seien Industriepartner beteiligt, die ein konkretes Interesse daran hätten, solche Produkte auf den Markt zu bringen. Die Zeit, so scheint es, ist reif für solche intelligenten technologischen Ansätze in der Medizin.



Smarte Implantate

Intelligente Implantate sollen künftig direkt am Knochen überwachen, wie gut Knochenbrüche heilen. Sie stabilisieren den gebrochenen Knochen nicht nur. Sie liefern auch Informationen darüber, wie gut oder schlecht der Bruch verheilt, und warnen bei Fehlbelastungen. Falls die Heilung nicht optimal verläuft, reagiert das Implantat. Es regt den Heilungsprozess über gezielte Mikrobewegungen direkt an der Bruchstelle aktiv an. Am Projekt Smarte Implantate arbeitet ein Forschungsteam am Universitätsklinikum des Saarlandes.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
8 Mio. Euro
Projektdauer 2019–2025
Projektleitung Prof. Tim Pohlemann,
Prof. Bergita Ganse, Universitätsklinikum
des Saarlandes

Sonne, Mond und Wasserstoff

Die Forschungsgruppe von Martin Saar an der ETH Zürich hat einen Simulator entwickelt, der so genau wie nie zuvor berechnet, wo sich Geothermieprojekte finanziell lohnen könnten. Zudem machen sich die Forschenden einer aufregenden Hypothese auf die Spur: Könnten die Gezeitenkräfte zur Bildung von Wasserstoff in der Erde führen?



Tiefengeothermie

Die Erdwärme ist eine der grössten brachliegenden Energiereserven des Planeten. Wie man sie im grossen Stil direkt oder für die Stromerzeugung nutzen kann, erforschen Martin Saar und sein Team an der ETH Zürich. Unter anderem hat Saar gemeinsam mit Industriepartnern eine neue Bohrmethode entwickelt – und ein innovatives Verfahren, mit dem man CO₂ im Boden permanent versenken und gleichzeitig zur geothermischen Stromproduktion verwenden kann. In der zweiten Förderperiode setzt er einen Schwerpunkt auf ein weltweit wohl einzigartiges Multinuklid-MRI-Gerät, in dem Hochdruck- und Hochtemperatur-Experimente stattfinden und mit dem sich in 3D darstellen lässt, wie sich Gase, Flüssigkeiten und Gesteine gegenseitig beeinflussen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
10 Mio. Schweizer Franken (2015–2024)
15 Mio. Schweizer Franken (2024–2034)
Projektdauer 2015–2034
Projektleitung Prof. Dr. Martin Saar,
Professor für Geothermie und Geofluide
(GEG), ETH Zürich

Wer Energie aus dem Erdinneren nutzen möchte, muss nicht nur geothermische Reservoirs finden. Es gilt auch abzuschätzen, ob sich die kostspieligen Bohr- und Förderarbeiten lohnen werden. Die von Martin Saar geleitete Forschungsgruppe für Geothermische Energie und Geofluide (GEG) an der ETH Zürich ist spezialisiert auf solche Untersuchungen. Sie hat in den letzten Jahren einen Simulator entwickelt, der solche techno-ökonomische Abklärungen auf ein neues Niveau hebt.

Der neue Simulator namens TANGO (für: Techno-economic ANalysis of Ge-energy Operations) wurde im Herbst am Europäischen Geothermie-Kongress in Zürich der Forschungsgemeinschaft erstmals vorgestellt. «Wir können mit TANGO tausende Simulationen von verschiedenen Reservoirs, Bohrlöchern, Kraftwerken und Optimierungsroutinen durchführen», sagt Martin Saar. «So ermitteln wir, an welchen geologischen Standorten und unter welchen Konfigurationen welche Art von Geothermiekraftwerk künftig mit anderen Energieformen wettbewerbsfähig sein kann.»

Ein wichtiger Anwendungsfall für den Simulator ist das CPG-Konsortium. Gemeinsam mit Firmen wie Shell, Petrobras, Holcim und Ad Terra Energy untersucht Saars Team dabei, ob sich bestehende Reservoirs für eine neuartige, innovative Kombination aus CO₂-Speicherung und geothermischer Energieproduktion nutzen lassen. Wirtschaftlichkeits-Untersuchungen sind bei dem Grossvorhaben entscheidend. Die erste Phase des Projekts sei inzwischen abgeschlossen, erzählt Saar. Nun gehe es in der nächsten Phase unter anderem darum, ein geeignetes Reservoir zu bestimmen, um ein Demonstrationsprojekt durchzuführen.

Einzigartiges MRI-Gerät

Gleichzeitig nehmen jene Projekte Fahrt auf, die Saars Gruppe im Rahmen der 2024 gestarteten neuen WSS-Förderphase geplant hat. Herzstück der neuen Förderphase ist ein weltweit einzigartiger, spezialangefertigter Multinuklid-Magnetresonanztomograf (MRI). Mit diesem Gerät können die Forschenden in den kommenden Jahren in Gesteins-Modellen geologische



Mit dem Multinuklid-Magnetresonanztomografen (hier eine Visualisierung) kann Martin Saar ganz neue Forschungsfragen angehen.

und geothermische Untersuchungen durchführen, die bislang nicht möglich waren.

Adam Altenhof, ein Experte in MRI-Technik in Saars Team, hat in den letzten Monaten das Design und die Spezifikationen des neuartigen Geräts erarbeitet, das nun von einer US-Firma speziell angefertigt wird. Der Tomograf wird mit drei Tonnen zwar für ein solches Gerät relativ leichtgewichtig sein. Trotzdem bewegt es sich in einer Grössen- und Gewichtsklasse, die Anpassungen der Laborräumlichkeiten notwendig macht. «Wir haben mit Ingenieuren, Architekten, Statikern und Elektrikern ein Dreiviertel-Jahr lang daran gearbeitet, die Umbaugenehmigung der ETH Zürich zu erhalten», erzählt Saar.

Wasserstoff im Gestein

Derweil haben sich die Forschenden bereits Fördergelder für erste spannenden Projekte mit dem MRI gesichert. In einem, finanziert durch das Centre for Origin and Prevalence of Life (COPL) der ETH Zürich, werden Saar und sein Team die Entstehung von na-

türlichem Wasserstoff in der Erdkruste untersuchen. Lange Zeit ging man davon aus, dass es keine natürlichen Wasserstoffreservoirs in der Erde gibt – zu flüchtig und zu reaktiv ist das Gas. «Inzwischen weiss man, dass solche Vorkommen existieren, aber wo und unter welchen Umständen sie entstehen, ist noch unklar», sagt Martin Saar.

Radikale spalten Wasser

Es gibt unterschiedliche Theorien, und eine davon werden die Forschenden im MRI unter die Lupe nehmen: Demnach könnten Festlandgezeiten – also periodische Verformungen der festen Erdkruste, die durch die Anziehungskräfte des Mondes und der Sonne verursacht werden – oder tektonische Prozesse in der Erde und in anderen Himmelskörpern, die das Gestein brechen, für die Bildung natürlichen Wasserstoffs sorgen.

Durch das Brechen von Silikatgesteinen entstehen freie Radikale. Freie Radikale sind Moleküle mit einem ungepaarten Elektron. Treffen sie auf Wasser, können sie es in Wasserstoff und Sauerstoff spalten. «Diese beiden

Moleküle gelten als Schlüsselstoffe, damit auf einem Planeten Leben entstehen kann», sagt Saar.

Der neue Magnetresonanztomograf ist perfekt geeignet, um solche Vorgänge zu erforschen. Denn er ist nicht nur in der Lage, alle an den Reaktionen beteiligten Atome und Moleküle nachzuweisen, sondern sogar die Radikale – und das in 3D. «Im MRI setzen wir Gesteinsproben Drücken und Temperaturen aus, wie sie in der Erdkruste herrschen, und brechen sie», erklärt Saar. «Gleichzeitig durchströmen wir die dann leicht durchlässigen Gesteine mit Wasser und können sowohl die gebildeten Radikale als auch die Umwandlung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff in 3D über die Zeit visualisieren.»

Das Projekt wird nicht nur zu entschlüsseln helfen, wie natürlicher Wasserstoff in der Erdkruste entsteht und wie sich diese emissionsfreie Energiequelle am besten nutzen lässt. Es zeigt auch beispielhaft auf, welche aufregenden Fragen die GEG-Gruppe künftig mit ihrem neuen, einzigartigen Tomografen untersuchen kann.



In der Mongolei nutzen Nomaden die Milch von Trampeltieren. Christina Warinner (links) sucht darin nach ursprünglichen Mikroben.

Milchbakterien und chemische Radars

Das Projekt Paläobiotechnologie geht bei seiner Suche nach Wirkstoffen aus der Urzeit immer systematischer vor. Entsprechend viele Fortschritte und Entdeckungen sind dem Team in Jena im vergangenen Jahr gelungen.

Wer mit Christina Warinner und Pierre Stallforth spricht, merkt sofort: Das Projekt Paläobiotechnologie in Jena, das die beiden leiten, ist fast schon lawinenartig ins Rollen gekommen. Fortschritte, neu eingereichte Arbeiten, Auszeichnungen, wichtige Ereignisse: Die Neuigkeiten sprudeln aus den beiden nur so heraus.

So stehen einige Forschungsvorhaben kurz vor der Publikation, in denen Arbeit mehrerer Jahre steckt: Dem Team ist es etwa erstmals gelungen, ein Molekül aus der Urzeit wiederherzustellen, das eine antimikrobielle Wirkung hat. Viel mehr könne sie noch nicht verraten, weil sich die Publikation noch im Begutachtungsprozess befinde, sagt Christina Warinner. «Aber wir haben nachgewiesen, dass es möglich ist, antibiotische Wirkstoffe aus prähistorischen Mikroben zu gewinnen.»

Gelungen ist dies nicht durch Zufall. Die Forschenden haben Prozesse entwickelt, mit denen sie systematisch und automatisiert altes Erbgut untersuchen und die vielversprechendsten Kandidaten herausfiltern können. Und sie vergrößern den Datenpool, aus dem sie schöpfen, rasch: So steht ein neuer Katalog mikrobieller Genome aus Zahnstein kurz vor der Fertigstellung. «Wir haben eine grosse Anzahl völlig neuer Mikroben entdeckt, deren Funktion wir nun zu verstehen versuchen», sagt Pierre Stallforth.

Milchbakterien in der Mongolei

Fahrt aufgenommen hat ein weiterer Projektteil. Frühzeit-Mikroorganismen lassen sich nämlich nicht nur finden, indem man ihr Erbgut in prähistorischem Knochen oder Zahnstein entschlüsselt. Man kann sie auch in Milchprodukten suchen. Menschen konsumieren seit über 9000 Jahren Milch, Butter, Käse, Quark oder Joghurt – und für viele Mikroorganismen ist Milch ein nahrhafter Lebensraum.

Zudem spielen Mikroben eine entscheidende Rolle bei der Herstellung vieler Milchprodukte – sie erlauben eine Fermentation, die Inhaltsstoffe umwandelt und haltbar macht. «Alte, traditionelle Fermentationsbakterien finden sich jedoch nur noch an wenigen Orten auf der Welt», sagt Christina

Warinner. «An den meisten Orten wurden sie durch verbesserte, standardisierte Stämme ersetzt.»

Ein Land mit besonders reichhaltiger Milchverarbeitungstradition ist die Mongolei. Dort existiert die Milchwirtschaft seit ungefähr 5000 Jahren und ist über die Zeit nahezu unverändert geblieben. Das Paläobiotechnologie-Team forscht seit langem in der Mongolei. Im vergangenen Jahr publizierten Warinner, Stallforth und dessen Doktorandin Ina Wasmuth im Fachmagazin «Natural Product Reports» einen Übersichtsartikel zu mikrobiellen Molekülen in Milch und vor allem in mongolischen Milchprodukten.

Wettrüsten zwischen Mikroben

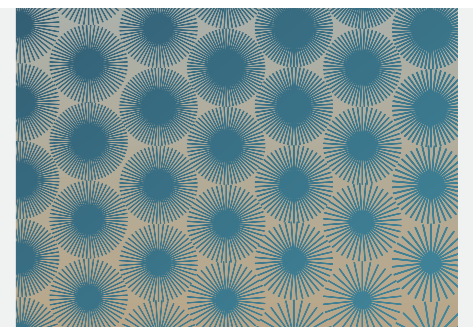
Eine weitere wichtige Studie erschien im renommierten Fachmagazin «Cell». Ein Team um Pierre Stallforth untersuchte die Wechselbeziehungen zwischen einem Bakterium, einer Amöbe und einer Pflanzenart. Das Bakterium ist ein allgegenwärtiger Pflanzenschädling, die Amöbe ein Fressfeind des Bakteriums. Allerdings kann das Bakterium den Spiess umdrehen – mithilfe einer Art chemischen Radars. «Wir fanden eine Art komplexes Wettrüsten mittels chemischer Moleküle», erzählt Pierre Stallforth.

Den ersten Schritt macht das Bakterium: Es scheidet Moleküle aus, die ihm eine schnellere Fortbewegung ermöglichen, für die Amöbe aber harmlos sind. Wenn die Amöbe mit dem Molekül in Kontakt kommt, verändert sie es chemisch. Das Bakterium besitzt ein spezielles Sensorprotein, das solche veränderten Moleküle – und damit die Anwesenheit von Amöben – erkennt. Und es wandelt sie in giftige Substanzen um, welche die Amöbe abtöten. Das verschafft dem Bakterium die Möglichkeit, die Pflanze auch in Anwesenheit seines Fressfeindes zu infizieren.

Komplexe Wechselspiele wie dieses, die auf mikrobiellen Signalmolekülen beruhen, seien noch kaum untersucht, sagt Pierre Stallforth. «Ich bin überzeugt, dass in den kommenden Jahren noch viele solche Beispiele beschrieben werden – und für ihren Nachweis sind unsere im WSS-Projekt entwickelten Techniken entscheidend.»

Solche Zusammenhänge mikrobieller Interaktionen erforscht das Exzellenzcluster «Balance of the Microverse» in Jena. Es erhielt im Frühjahr 2025 die Zusage für eine zweite, siebenjährige und mit mehreren Dutzend Millionen Euro ausgestattete Förderperiode. Die Forschungsgruppen von Pierre Stallforth und Christina Warinner spielen darin eine Schlüsselrolle.

Auch sonst erfährt die Paläobiotechnologie immer breitere wissenschaftliche Akzeptanz. So wurde Christina Warinner im Mai nach Stockholm eingeladen, um die Mikrobeforschung an einem Nobel-Symposium zur Paläoökonomik vorzustellen. Und sie erhielt den höchsten Preis in Anthropologie der US-Amerikanischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaft (AAAS).



Paläobiotechnologie

Ist eine Reise in die Vergangenheit die Zukunft der Medizin? Im Projekt Paläobiotechnologie gehen der Biotechnologe Pierre Stallforth und die Archäogenetikerin Christina Warinner das Problem der Antibiotikaresistenzen auf ungewöhnliche Weise an: Sie suchen im Zahnstein von Frühmenschen nach Stoffen, die gegen heutige resistente Bakterien wirken, und stellen sie neu her.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

10 Mio. Euro

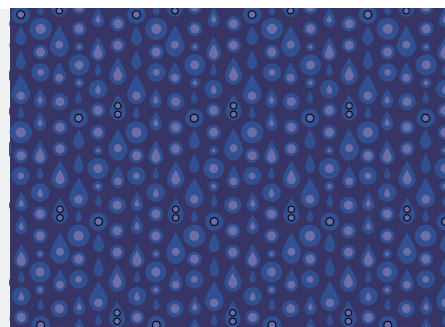
Projektdauer 2020–2029

Projektleitung

Prof. Dr. Pierre Stallforth, Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut, Jena
Prof. Dr. Christina Warinner, Max-Planck-Institut für Evolutionäre Anthropologie, Leipzig, und Harvard University, Cambridge.

Das System funktioniert

Beim TriggerINK-Projekt in Aachen fügen sich die Puzzleteile für die Knorpelregeneration der Zukunft zusammen. Die verschiedenen Arbeitsgruppen machen rasche Fortschritte – in ersten Tests konnte bereits Knorpelwachstum nachgewiesen werden.



TriggerINK

Beschädigtes Knorpelgewebe mithilfe einer Stützstruktur aus Biotinte nachwachsen zu lassen: Das ist das Ziel des Projekts TriggerINK am DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in Aachen. Die Biotinte wird mit einem 3D-Drucker in das beschädigte Knorpelgewebe gedruckt, mithilfe eines Magnetfeldes ausgerichtet, mit Licht vernetzt und dadurch stabilisiert. Danach werden die in der Tinte enthaltenen Wirkstoffe und Wachstumsfaktoren zur gewünschten Zeit von aussen durch Ultraschall aktiviert oder freigesetzt. Funktioniert das Prinzip, verspricht es ganz neue Möglichkeiten in der Knorpelregeneration-Therapie.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
10 Mio. Euro

Projektdauer 2012–2027

Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Laura De Laporte, DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien und RWTH Aachen; Prof. Dr. Stefan Hecht, Humboldt-Universität zu Berlin, assoziierter Wissenschaftler am DWI Aachen; Prof. Dr. Andreas Herrmann, DWI und RWTH Aachen; Prof. Dr.-Ing. Matthias Wessling, DWI und RWTH Aachen

Beschädigtes Knorpelgewebe wächst nicht von selbst nach. Um nachzuhelfen, arbeiten Forschende am DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in Aachen an einer neuartigen Strategie. Im Projekt TriggerINK entwickeln sie eine gelatineartige Substanz, eine spezielle Biotinte, die künftig mittels eines 3D-Druck-Roboters in beschädigtes Knorpelgewebe eingebracht werden soll. Die Tinte dient als stützendes Gerüst und Orientierung für das nachwachsende Gewebe und ist mit verschiedenen innovativen Elementen versetzt, welche die Regeneration ermöglichen.

Im vergangenen Jahr haben die Arbeitsgruppen des Projekts diverse Fortschritte gemacht. Die Gruppe um Projektleiterin Laura De Laporte führte weitere Untersuchungen mit der Biotinte durch. Im Reagenzglas erprobten die Forschenden die Wirkung der mikroskopisch kleinen, stäbchenartigen Elemente, die sie in der Tinte mithilfe eines magnetischen Feldes ausrichten können. Frühere Studien hatten bereits gezeigt, dass sich Stammzellen in Strukturen, die eine klare räumliche Ori-

entierung vorgeben, besser zu Knorpelzellen entwickeln.

Doch Knorpelzellen allein machen noch kein funktionierendes Knorpelgewebe. Sie müssen auch Komponenten wie Kollagene oder Proteoglykane produzieren. Sie sind essentielle Bestandteile der extrazellulären Knorpelmatrix, in der die Knorpelzellen verankert sind und die dem Knorpel seine Elastizität und Reissfestigkeit verleiht. Das Team hat es kürzlich geschafft, eine verstärkte Produktion dieser Matrix-Bestandteile in den ausgerichteten Hydrogel-Gerüsten nachzuweisen. «Wir zeigen erstmals, dass die räumliche Ausrichtung unseres Gerüsts zu funktionellen Verbesserungen führt», sagt Laura De Laporte.

Versuch mit Tierknorpel

In Zusammenarbeit mit Gerjo van Osch von der Universität Rotterdam führten die Forschenden zudem erste Tierversuche durch. Dazu entnahmen sie aus dem Knie eines toten Rindes eine Knorpel-Knochen-Biopsie. In diesen «Pfropf» bohrten sie ein Loch, füllten es mit dem Bio-Tinte-Gemisch und trans-



Vielversprechende Daten: Laura De Laporte (links) und das TriggerINK-Team befinden sich auf gutem Weg.

plantierten das Ganze einer Labormaus unter die Haut.

Tatsächlich: Wenn die Forschenden Wachstumsfaktoren beigaben, wuchsen aus dem Rinderknochen Stammzellen in die Biotinte hinein und es bildete sich Knorpel. Die Knorpelbildung, so erste Resultate, wird durch die ausgerichteten Mikrogel-Stäbchen gefördert. «Unser System scheint also zu funktionieren», sagt De Laporte. Allerdings braucht es eine ganze Reihe weiterer Tests. Unter anderem hat das Team dazu ein Labor aufgebaut, in dem sich Knorpel-Knochen-Pfropfen aus Rindern in einem Inkubator ex vivo untersuchen lassen.

Gezielte Freigabe

Dass Wachstumsfaktoren entscheidend für die Knorpelregeneration sind, ist für das TriggerINK-Team keine Überraschung. Um das Wachstum zu steuern, planen die Forschenden, solche Faktoren ganz gezielt freizusetzen: zuerst einen Wachstumsfaktor, der Stammzellen aus dem umliegenden Knochengewebe an die Behandlungsstelle lockt; danach einen Differenzie-

rungsfaktor, der die Stammzellen dazu anregt, Knorpelzellen zu bilden.

An der gezielten Freisetzung solcher Faktoren arbeitet die Gruppe von Andreas Herrmann. Für die Integration hat das Team inzwischen eine vielversprechende Technologie entwickelt: ultraschall-responsive Nanoblumen. Diese blütenförmigen Nanostrukturen bestehen aus Erbgutsträngen, enthalten eine Protease und werden in die Biotinte integriert. In die Nanoblumen werden die durch eine ganz spezielle Aminosäuresequenz, ein sogenanntes Intein, inaktivierten Wachstumsfaktoren eingebaut – und zwar so, dass sie sich mittels Ultraschall wieder aktivieren lassen.

Herausschneiden und verknüpfen

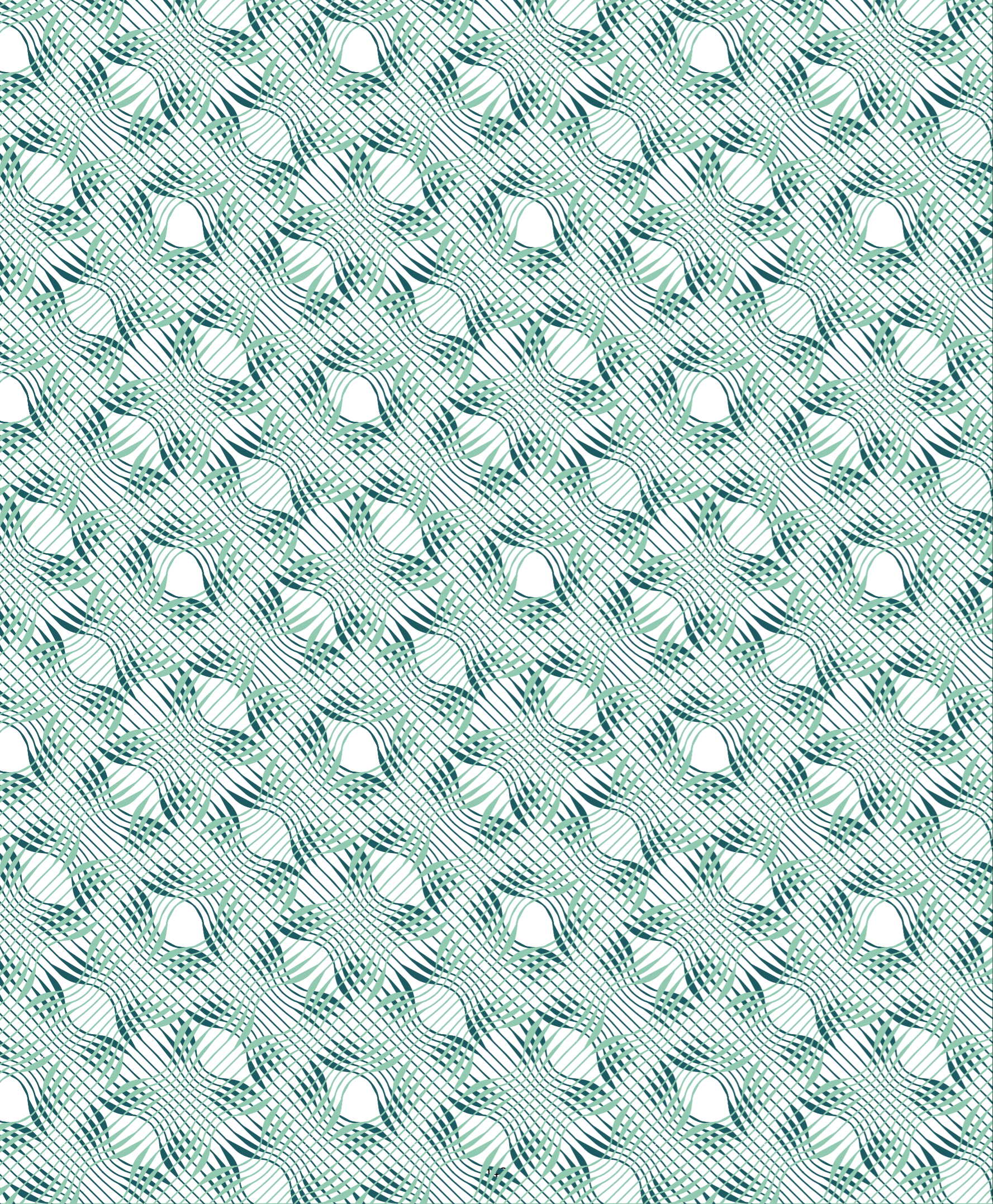
Die Aktivierung funktioniert folgendermaßen: Ein Ultraschall-Signal schaltet zunächst die Protease an, was dazu führt, dass das Intein sich aus dem Protein herauschneidet, sodass von diesem zwei Hälften verbleiben. Danach ist das Intein in der Lage, die beiden Hälften des gewünschten Proteins zu verknüpfen, wodurch das Pro-

tein, in diesem Fall der Wachstumsfaktor, funktionsfähig wird. «Bei dieser Technologie haben wir einen grossen Schritt nach vorne gemacht», erzählt Andreas Herrmann.

Fortschritte vermeldet auch die Arbeitsgruppe von Matthias Wessling. Sie hat den Prototyp eines zweiarmigen 3D-Druck-Roboters entwickelt, der dereinst die Biotinte in das beschädigte Knorpelgewebe bringen soll. Der eine Arm trägt den Druckkopf und eine Lichtquelle. Mit dem Druckkopf werden nacheinander Tinten mit verschiedenen Mikrogel-Partikeln gedruckt. Die Lichtquelle dient dazu, gewisse Moleküle der Biotinte durch Bestrahlung mit einer bestimmten Wellenlänge zu einem gitterähnlichen Stützgerüst zu verbinden. Der zweite Roboterarm enthält einen Magnetring, um die magnetischen Mikrogel-Stäbchen mithilfe eines externen Magnetfeldes räumlich auszurichten, bevor die Tinte durch Lichteinstrahlung vernetzt und stabilisiert wird.

Es wird zwar noch Zeit brauchen, doch die Knorpelregeneration der Zukunft rückt näher.

Wer wir sind





Michael Hengartner hat im Wissenschaftlichen Beirat der WSS ein Förderungssystem angetroffen, «das extrem gut funktioniert».

«Stiftungen können komplett Neues anpacken»

Vor einem Jahr hat Michael Hengartner den Vorsitz des Wissenschaftlichen Beirats der WSS übernommen. Im Interview zieht er eine erste Bilanz und spricht über das Verhältnis zwischen Wissenschaft und Gesellschaft.

mitglieder viele Kontakte haben – Leute kennen, die Leute kennen. Wir setzen sehr stark auf die Personen hinter einem Projekt. Sowohl der Beirat als auch der Stiftungsrat besuchen die Teams, um sie kennenzulernen, bevor ein Projekt unterstützt wird.

Die meisten WSS-Projekte entspringen also der Netzwerk-Arbeit des Wissenschaftlichen Beirats?

Ja. Natürlich gibt es auch andere Wege. Das WSS-Jahrhundertprojekt «catalaix» war das Resultat einer Ausschreibung – und diese Ausschreibung hat auch einige andere spannende Projektvorschläge generiert, die wir nun fördern. Und bewerben kann sich jeder, der eine gute Idee hat. Aber die Erfolgsquote bei Direkteingaben ist signifikant tiefer, als wenn der Prozess über einen Wissenschaftlichen Beirat läuft. Wir schauen nicht einfach Gesuche an und sagen Ja oder Nein. Wir diskutieren die Ideen gemeinsam mit den Geschstellenden. Im Dialog entstehen Verbesserungen, oft erhöhte Ambitionen, um noch mehr heraus-zuholen aus einer Idee.

Das höre ich oft von Projektleiterinnen und Projektleitern. Sie erzählen, dass der Wissenschaftliche Beirat massgeblich dazu beigetragen habe, das Profil ihres Projekts zu schärfen oder in neue Richtungen zu denken. Wir sollten nicht zu viele Lorbeeren für uns beanspruchen. Am Ende sind es die Ideen der Antragstellenden. Wir freuen uns, wenn wir hier oder da einen zusätzlichen Funken entfachen können.

Ist diese Art der Projektentwicklung eine WSS-Besonderheit?

Je höher die Investitionssumme, desto gebräuchlicher ist eine gemeinsame Entwicklung des Projekts. Bei zweistelligen Millionenbeträgen sind wir längst nicht die Einzigen, die so vorgehen. Wenn der Wellcome Trust viele Millionen in ein neues Impfprogramm investiert, macht er es ähnlich.

Jeder Geldgeber möchte die richtigen, möglichst guten Projekte finanzieren. Wie stellt der Wissenschaftliche Beirat dies sicher?

Die WSS investiert in langfristige Projekte, oft über zehn Jahre oder mehr. Ambitionierte Vorhaben mit einem solchen Planungshorizont haben ein beachtliches Risiko zu scheitern. Deshalb die gemeinsame Projektentwicklung und der Fokus auf das Team. Wie bei einem Start-up können im Lauf der Jahre neue Erkenntnisse einen Strategiewechsel nötig machen. Solche Neuorientierungen haben viel Potenzial – wenn man aufs richtige Team setzt. Wir lassen Projekten grossen Handlungsspielraum. Wir möchten informiert und nahe an den Projekten bleiben. Aber es gibt keine Meilensteine nach zwei Jahren, bei deren Nichterreichen die WSS die Unterstützung kappt.

Wie erleben Sie die Zusammenarbeit im Wissenschaftlichen Beirat?

Sie ist sehr stimulierend, es macht Spass.

Und mit dem Stiftungsrat?

Auch sehr gut. Es herrscht gegenseitiges Vertrauen. Und ich sehe ein grosses Verständnis für die unterschiedlichen Rollen der Stiftungsgremien.

Sehen Sie neue Möglichkeiten für die Projektsuche?

Eine Frage ist, ob wir ein grösseres Netz von «Talentscouts» aufbauen könnten. Momentan sind wir fünf Wissenschaftliche Beiräte. Wir haben ein breites Netzwerk, aber wir können nicht alles abdecken. Vielleicht könnten wir uns bei der Projektsuche unterstützen lassen von weiteren führenden Persönlichkeiten, die gut vernetzt sind in der Forschung in Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Gibt es inhaltliche Akzente, die Sie setzen möchten?

Die Inhalte kommen von unten, von den Forschenden. Wir können nicht die Entwicklung der Wissenschaft steuern mit einer Stiftung, die 20 Projekte unterstützt. Wir müssen aber die Sensoren offen halten. Immer öfter kommen Projektvorschläge, die künstliche Intelligenz benutzen, um irgendwelche Fragen anzugehen. Viel passiert auch in den Life Sciences. Dort sind wir zurückhaltend, sobald

Michael Hengartner, Sie sind seit Anfang 2025 Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats der WSS. Konnten Sie schon alle WSS-Projekte besuchen?

Noch nicht alle, das wird etwas Zeit brauchen. Jedes Projekt wird von einem Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats begleitet. Ich habe jene Projekte besucht, die ich von Gianni Operto übernommen habe. Wir tauschen uns aber im Wissenschaftlichen Beirat regelmässig aus, so dass ich auch über den Stand der anderen Projekte gut informiert bin.

Wie ist Ihr Eindruck?

Es sind alle sehr spannende Projekte mit tollen, oft überraschenden Entwicklungen, geleitet von inspirierenden und beeindruckenden Persönlichkeiten. Ich habe ein Förderungssystem angetroffen, das extrem gut funktioniert.

Es sind gross angelegte, komplexe Projekte. Davon gibt es nicht unendlich viele. Wie findet man sie?

Hauptsächlich über Netzwerke. Es ist extrem wichtig, dass unsere Beirats-

es Richtung klinische Studien geht. Aber die Medizintechnik, etwa mit Bionik oder Mikrorobotern, ist ein Bereich mit Förderpotenzial.

Die Forschung sei unter Druck geraten, konstatierte beispielsweise die Schweizerische Akademie der Wissenschaften kürzlich. Woran liegt das?

Ich würde das differenziert anschauen. Vieles auf dieser Welt verläuft in Pendelbewegungen. Die Wissenschaft geriet auch früher immer wieder unter Druck. Und für autokratische Regimes sind Fakten oft unangenehm. Aber übers Ganze sehe ich die europäische Wissenschaft nicht in der Krise.

Und doch gibt es auch bei uns Spannungen zwischen Wissenschaft und Teilen der Bevölkerung. Weshalb?

Die Wissenschaft generiert Fakten. Diese Fakten müssen interpretiert werden und können als Orientierung für Entscheide dienen. Aber jeder Mensch hat innere Werte, die seine Entscheidungen stark beeinflussen. Und manchmal stehen diese Wertevorstellungen im Widerspruch zu den Fakten. Forschende kritisieren oft Menschen, die ihre Werte höher gewichten.

Weil sie «unwissenschaftliche» Entscheide fällen?

Ja. Die inneren Werte von Forschenden stimmen meist völlig überein mit den Fakten: Ich betreibe Impfforschung, weil ich überzeugt bin, dass Impfungen wichtig sind. So ist es einfach, Fakten hoch zu gewichten. Und es kann dazu führen, dass die Wissenschaft einen blinden Fleck hat. Wir vergessen, dass die Gesellschaft vielleicht nicht unsere inneren Werte teilt. Während der Covid-Pandemie tat man impfskeptische Menschen als Schwurbler ab – aber sie haben einfach ein anderes Selbstverständnis, wenn es um ihre Gesundheit geht.

Hat die Wissenschaft also während der Covid-Pandemie oder auch beim Thema Klimaerwärmung ihre Rolle verlassen, Fakten zu präsentieren und es der Gesellschaft zu überlassen, die Schlüsse daraus zu ziehen?

Genau das ist der Punkt. Es gibt vier Rollen, die eine Wissenschaftlerin

oder ein Wissenschaftler einnehmen kann. Eine ist, sich nicht um Politik zu kümmern und einfach seine Erkenntnisse zu publizieren. Dann gibt es Experten, die Fragen der Politik mit Fakten beantworten. Die dritte Rolle nennt sich «ehrlicher Makler». Er versucht, alle Informationen auf den Tisch zu legen und die Konsequenzen aufzuzeigen. Die vierte Option ist der Aktivist, der die Bevölkerung aufgrund der Fakten von einem Entscheid zu überzeugen versucht. Forschende sollten bewusst entscheiden, in welcher dieser vier Rollen sie auftreten möchten.

Und bei dieser Rolle bleiben.

Ja, es ist schwierig, mal die eine und mal die andere Rolle einzunehmen. Wer die aktivistische Rolle einnehmen will, soll das tun. Aber er muss es offenlegen und sich im Klaren sein, dass er nicht mehr als neutraler Experte auftreten kann. Es schadet der Wissenschaft, wenn die Gesellschaft im Unklaren ist über diese Rollen und das Gefühl bekommt, alle Forscher seien Aktivisten. Und es braucht genügend neutrale Expertinnen und ehrliche Makler, die klar zum Ausdruck bringen, dass die Forschung Fakten liefert, aber die Gesellschaft entscheidet. In diesem Punkt haben wir Forschende Hausaufgaben zu machen.

Inwiefern?

Wir müssen mehr Verständnis dafür aufbringen, dass die Wissenschaft nicht ein Primat hat, sondern nur ein Element ist, das in die Entscheidungsfindung einfließt. Wir leben in einer vielfältigen Gesellschaft. Nicht jeder Mensch gewichtet Entscheidungsfaktoren gleich. Wer die Wissenschaft nicht zuoberst setzt, wertet deswegen nicht minderwertig. Hier müssen selbstkritische Diskussionen in der Wissenschaft stattfinden – davon habe ich bis jetzt zu wenig gespürt.

Nicht wegzudiskutieren ist, dass die Forschung in den USA unter Druck steht. Sie haben lange dort geforscht. Was hören Sie von Kontakten, die Sie in den USA haben?

Es herrscht eine Wagenburgmentalität. Als ich dort war, waren die USA

das Land der unendlichen Möglichkeiten. Man spürte Offenheit, Optimismus und eine Bereitschaft, Risiken einzugehen. Nun ist die Forschungsgemeinde belagert, man rückt zusammen.

Was hat das für Auswirkungen für die Forschung in Europa?

Generell profitiert die Menschheit von vielen starken Forschungsorten, die in Zusammenarbeit und im Wettbewerb Wissen generieren. Wenn in den USA Möglichkeiten wegfallen, Top-Forschung zu betreiben, schwächt dies das ganze System. Für uns in Europa hat die US-Politik positive und negative Nebenwirkungen. Jobs sind weniger attraktiv in den USA, es bewerben sich deshalb bei uns viel mehr US-Forschende. Auf der anderen Seite haben junge Forschende aus Europa weniger Möglichkeiten einige Jahre in den USA zu verbringen.

Manche Stimmen sagen, man müsste Top-Forscherinnen und -Forscher aus den USA aktiv nach Europa holen. Sollten mitteleuropäische Staaten und Förderorganisationen also massiv in die Wissenschaft investieren?

Wir probieren seit jeher, die besten zu rekrutieren. Aber woher soll ich eine Verdoppelung der Professorenschaft finanzieren? Das ist unrealistisch. Und es bringt nichts, ein Programm zu machen, das in fünf Jahren ausläuft. Wir sollten stattdessen weiterhin aufzeigen, dass wir fantastische Forschungsbedingungen haben. Eine starke, stabile Finanzierung ist viel wertvoller als ein Stop and Go.

Die WSS fördert das Forschungszentrum «catalaix» an der RWTH Aachen mit 100 Millionen Schweizer Franken, die Schwarz-Stiftung finanziert 20 Professuren an der ETH Zürich, die Jörg G. Bucherer-Stiftung ebenfalls an der ETH Zürich ein Kompetenzzentrum für Erdbeobachtung für 100 Millionen Franken. Geht der Trend zu sehr grossen Stiftungs-Förderprojekten? Ich glaube, es gibt in der Tat eine wachsende Zahl an Stiftungen, die ganz grosse Vermögen haben und dadurch beachtliches Ausschüttungspotenzial. Ob das ein langfristiger

Trend ist, weiss ich nicht. Aber ja: Die Idee, verschiedene Disziplinen in den gleichen Raum zu bringen, hat eine Hebelwirkung und ist erfolgreich. Theoretisch kann das auch eine Universität machen.

Wieso passiert es nicht öfter?

Universitäten haben Strukturen, die zur Silo-Förderung führen können. Man hat ein Chemie-Departement, die Immunologie und die Statistik. Als ich Rektor an der Universität Zürich war, gründeten wir ein Zentrum zur digitalen Transformation. Alle sieben Fakultäten waren beteiligt, bis hin zur Theologie – schliesslich gibt es Tierfriedhöfe online, Jugendliche werden online radikalisiert, soeben wurde der erste «Internet-Heilige» vom Papst gesegnet, und so weiter. Es geht also, aber Stiftungen haben den Vorteil, dass sie etwas komplett Neues anpacken können. Sie müssen nicht auf bestehende Strukturen Rücksicht nehmen, sondern können eine grüne Wiese bespielen.

Was braucht es, um die hohe Qualität der Wissenschaft in Mitteleuropa und im deutschsprachigen Raum, in dem die WSS tätig ist, zu erhalten?

Essenziell ist eine breite Investition in Bildung. Universitäten sind fantastisch. Aber in der Schweiz geht nur jeder fünfte junge Mensch an die Uni, die anderen absolvieren eine Lehre, nur ein Teil davon geht danach an eine Fachhochschule. Das heisst: Wenn wir allen etwas geben wollen fürs Leben, müssen wir es während der obligatorischen Schulzeit machen. Am besten in der Primarschule oder sogar früher – in diesen Jahren lernen Kinder am einfachsten. Zudem braucht es gute wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Wissenschaft und Wirtschaft befruchten sich gegenseitig. Die öffentliche Hand kann die Forschung nur grosszügig unterstützen, wenn die Wirtschaft läuft. Wissenschaft wiederum führt zu Innovation und Wirtschaftswachstum. Forschung findet nicht im Elfenbeinturm statt, sie ist Teil eines gesellschaftlichen Uhrwerks – von der frühkindlichen Bildung bis zur Wirtschaft.



Wissenschaftliche Grossprojekte hätten Hebelwirkung und seien erfolgreich, sagt Michael Hengartner.

«Neuorientierungen haben viel Potenzial – wenn man aufs richtige Team setzt.»



13 Jahre lang hat Matthias Kleiner den Wissenschaftlichen Beirat der WSS mitgeprägt.

«Jedes Projekt ist ein Highlight»

Matthias Kleiner sass in den Schaltzentralen von Forschungs- und Fördergemeinschaften, die zu den wichtigsten in Mitteleuropa zählen. Trotzdem waren die 13 Jahre, in denen er den Wissenschaftlichen Beirat der Werner Siemens-Stiftung mitprägte, für ihn ein besonderes Privileg. Seine Amtszeit endet nun altershalber, was ihn mit etwas Wehmut erfüllt.

Matthias Kleiner, Sie waren 13 Jahre lang Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats der Werner-Siemens-Stiftung. Was war Ihr Highlight in dieser Zeit? Eigentlich ist jedes Projekt, das die Werner-Siemens-Stiftung fördert, ein Highlight. Und die Arbeit im Wissenschaftlichen Beirat, in guter, enger Zusammenarbeit mit Stiftungsrat, Familienbeirat und nicht zu vergessen mit Erika Koller, war toll. Es ist also schwierig, einzelne Highlights zu nennen. Aber hervorzuheben ist sicherlich, dass wir das 100-Millionen-Projekt zum 100-Jahr-Jubiläum der Stiftung auf den Weg gebracht haben, dessen Projektmanagement ich übernehmen durfte. Die Ausschreibung, der zweistufige Auswahlprozess mit den millionenschweren WSS-Forschungspreisen, die grosse Resonanz aus der Wissenschaft in Österreich, Schweiz, Deutschland – das alles war schon etwas ganz Besonderes.

Wie bettet sich das Jahrhundertprojekt in die deutschsprachige Forschungslandschaft ein? Es ist sehr wahrgenommen worden – nicht nur in der Chemie oder Kunststoffchemie, die das siegreiche WSS-Forschungszentrum «catalaix» in Aachen betreibt. Dass eine private Stiftung anlässlich ihres 100. Geburtstages 100 Millionen Schweizer Franken für ein Forschungszentrum auslobt, hat für grosses Aufsehen gesorgt.

In der Schweiz wurden in den letzten Jahren mehrere andere Projekte bekannt, die von Stiftungen mit ähnlich hohen Summen gefördert werden. Geht der Fördertrend in die Richtung solcher Grossprojekte? Das weiss ich nicht. Es hat immer schon einige wenige Stiftungen gegeben, die mit viel Geld Wissenschaft gefördert haben. Das Besondere am WSS-Jahrhundertprojekt ist allerdings, dass es sich einreicht in die spezielle Förderpraxis der Werner-Siemens-Stiftung: Diese begegnet der Wissenschaft mit tiefem Vertrauen und mit grossem Respekt für ihre Autonomie. Andere Stiftungen, die mit hohen Beträgen fördern, verfolgen damit oft auch eine eigene Agenda.

Dass die Stiftung den Forschenden in ihren Projekten Freiheiten lässt, bedeutet aber nicht, dass es ihr egal ist, was die Forschenden machen oder wie gut ein Projekt aufgestellt ist. Nein, das nicht. Aber wenn man vor dem Förderentscheid sehr genau hinschaut, fällt es leicht, Forschung nicht zu kontrollieren, sondern fördernd zu begleiten – mit grossem Interesse, aber ohne Misstrauen. Und wenn man die Personen, die man fördert, sehr genau hinsichtlich ihrer Exzellenz aussucht, kann man auch hohe Risiken eingehen. Denn solche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler werden herausragende Forschung betreiben, selbst wenn sie das eigentliche, mit grossem Risiko verbundene Projektziel nicht erreichen, weil es vielleicht zu hoch gesteckt war.

Ist dieses genaue Hinschauen vor Projektbeginn, gepaart mit dem Vertrauen während des Projekts, das Besondere an der WSS-Förderung? Es gibt ja unterschiedliche Förder-Modi. In den meisten Fällen wartet ein Forschungsförderer darauf, dass Projektvorschläge eingereicht werden. Er prüft sie und entscheidet: Ja oder Nein. Die Werner-Siemens-Stiftung und insbesondere ihr Wissenschaftlicher Beirat haben auch einen anderen Modus. Wir schauen proaktiv, wo hervorragende Forschung betrieben wird, wo hervorragende Ideen gären, und gehen dann auf diese Forscherinnen und Forscher zu.

Haben Sie ein Beispiel? Zum Beispiel das Projekt von Chemie-Nobelpreisträger Benjamin List, der eine photokatalytische Reaktion erforscht – in Analogie zur natürlichen Photosynthese –, um direkt aus CO₂ Kohlenstoff zu produzieren. Wir fragen solch herausragende Forscher: Welche grosse Idee tragen Sie schon seit geraumer Zeit mit sich herum? Welche Fragen würden Sie untersuchen, wenn Sie die Möglichkeit hätten, ein hochriskantes, langfristiges und teures Projekt durchzuführen? Der Projektvorschlag wird dann gegebenenfalls iterativ entwickelt. Der Wissenschaftliche Beirat berät, hilft und ermutigt also dann auch bei der

Konkretisierung. Das findet man bei anderen Forschungsförderern so gut wie nicht.

WSS-Projekte sind darauf angelegt, ein Forschungsfeld nicht nur ein bisschen, sondern mit einem grossen Schritt voranzubringen. Förderstellen für solche riskanten Projekte sind rar. Stellen Sie bei Gesprächen manchmal fest, dass Forschende ihre grossen Ideen gar nicht ernsthaft verfolgen, weil sie wissen, dass die Fördertöpfe dafür fehlen? Man stösst oft auf Erstaunen, dass eine Stiftung in dieser Art und Weise fördert. Und unser Angebot, zu ermuntern, zu ermutigen und Projekte auch ein Stück mit weiterzuentwickeln, wird meist ganz begierig aufgenommen. Neu ist für viele auch, dass eine Stiftung mit derart geringem Verwaltungsaufwand funktionieren kann. Andere Stiftungen haben teilweise einen Stab von vielleicht 50 Personen und vergeben am Ende ein ähnliches Fördervolumen wie die Werner-Siemens-Stiftung.

Was müssen Forscherinnen und Forscher mitbringen für ein WSS-Projekt? Es muss eine herausragende Forschungspersönlichkeit sein. Mit einer atemberaubenden Idee, die ein Feld sprunghaft weiterentwickelt oder gar ein neues Feld eröffnet. Vielfach geht es in den Projekten auch darum, Methoden oder Fächer miteinander zu verbinden. Zum Beispiel einen neuen Prozess zu entwickeln, der gleichzeitig extrem ressourcensparend und nachhaltig ist. Wie etwa im kürzlich gestarteten Projekt «2nd Life Metal Components» an der TU Dresden, das neuartige Blechbearbeitungsverfahren mit einer hohen Nachhaltigkeit verbindet.

Gibt es WSS-Projekte, die Sie besonders überrascht haben? Es ist schwierig, einzelne zu benennen. Denn es gibt eigentlich in jedem Projekt eine Überraschung oder spannende neue Erkenntnisse. Aber die Idee eines Einzelatomswitchers von Jürg Leuthold an der ETH Zürich ist wirklich etwas Besonderes. Oder denken Sie an die Absicht im Projekt TriggerINK am DWI in Aachen, direkt



Die Arbeit im Wissenschaftlichen Beirat war für Matthias Kleiner stets inspirierend, hier mit Peter Seitz (links) und Gianni Operto.

in eine Wunde zu drucken, um Erkrankungen wie Arthrose zu behandeln. Und wer käme schon darauf, in mehreren 10 000 Jahre alten paläogenetischen Proben die Bausteine für neue Antibiotika zu suchen, wie dies ein Team am HKI in Jena tut?

Wie erlebten Sie die Zusammenarbeit in den WSS-Gremien in all den Jahren? Sehr inspirierend und vertrauensvoll. Ich glaube, eine wichtige Voraussetzung dafür ist folgende: Hier arbeitet ein Kreis von Persönlichkeiten zusammen, die einander nichts mehr zu beweisen haben. Jede einzelne dieser Persönlichkeiten strahlt Souveränität aus. Und bei allen Unterschieden haben wir eine ähnliche Denkweise und spielen einander Bälle zu. Das ist schon etwas Tolles. Und deshalb ist mir diese Stiftung sehr ans Herz gewachsen.

Sie waren Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und Präsident der Leibniz-Gemeinschaft.

Wie hat sich die Situation der Wissenschaft in den deutschsprachigen Ländern, in denen die WSS tätig ist, in den letzten Jahren und Jahrzehnten verändert?

Es gibt aktuell eine ganze Reihe von Themen, die auch auf die Wissenschaft ihre Schatten werfen: von der Corona-Pandemie über den Krieg in der Ukraine bis zur politischen Situation in den USA. Die Wissenschaftsfreiheit wird bedroht, internationale Kooperationen werden bedroht. Der Optimismus für eine bessere Zukunft, den wir in der Wissenschaft noch vor zehn, fünfzehn Jahren hatten, ist momentan ziemlich gebremst. Ich war im Jahr 2012 Mitgründer des Global Research Councils, in dem Forschungsorganisationen zusammenarbeiten. Das war ein Aufbruch, weltweit sind über 60 Organisationen Mitglied. Aber heute merkt man, dass die vorbehaltlose Kooperation schwieriger geworden ist. In Moskau feierten wir einst grosse Sommerfeste der DFG. 2022, ein Jahrzehnt später, wurde das dortige Büro

der DFG auf Veranlassung der russischen Behörden geschlossen. Man muss schauen, dass man einen gewissen Optimismus und eine positive Grundhaltung bewahrt, aber das ist im Moment nicht so einfach.

Was waren die schönsten Seiten Ihrer Ämter?

Es waren grosse Privilegien, insbesondere als Präsident die Deutsche Forschungsgemeinschaft oder die Leibniz-Gemeinschaft führen zu dürfen. Man weitet seinen eigenen, insbesondere fachlichen Blick enorm. Man beschäftigt sich mit allen Wissenschaften, von der Archäologie bis zur Zoologie, von Geisteswissenschaften bis zu Ingenieurwissenschaften. Man hat mit den tollsten Projekten und mit den faszinierendsten Personen zu tun. Das Wirken in der Werner-Siemens-Stiftung ist ein mindestens genauso grosses Privileg. Wenn man aber mit öffentlichen Geldern umgeht, gibt es viele Regeln und Bürokratie, die vielleicht auch notwendig

sind. Bei der Werner Siemens-Stiftung befreit man sich von dieser Bürokratie und kann sagen: Es geht einzig um die Sache, um die Personen, um die Wissenschaft. Das ist ein Privileg.

Ich nehme an, Sie konnten sich bei der WSS auch mehr Zeit nehmen, um einzelne Themen oder Projekte zu bearbeiten?

Es gibt natürlich auch in der DFG oder in der Leibniz-Gemeinschaft eine tiefe Auseinandersetzung mit einzelnen Themen oder grossen Projekten. Aber klar, alleine von der Quantität her befindet man sich da in anderen Verhältnissen: Die DFG hat derzeit um die 31 000 laufende Projekte. Die Leibniz-Gemeinschaft zählt 96 Institute mit 21 400, die dort tätig sind.

Ende Jahr endet altershalber Ihr Amt im Wissenschaftlichen Beirat. Mit welchen Gefühlen scheiden Sie aus?

Mit Wehmut und Dankbarkeit. Aber die Wehmut wird dadurch abgemildert, dass ich für die Werner Siemens-Stiftung weiterhin das WSS-Forschungszentrum «catalaix» in Aachen betreuen werde. Als Gast werde ich dem Wissenschaftlichen Beirat darüber Bericht erstatten. Insofern wird die Zäsur nicht ganz so harsch sein. Und ich bleibe der Stiftung sehr verbunden – ich habe dem Stiftungsrat gesagt, dass er jederzeit auf mich zukommen möge, wenn ich irgendetwas für die Stiftung tun kann.

Wie werden Sie die freie Zeit füllen, die Ihnen nun bleibt?

Einfach die Beine hochzulegen, ist nicht mein Ding. Ich bin weiterhin vielfältig in Wissenschaft und Wissenschaftsmanagement aktiv. Und es gibt da eine tolle, riskante Projektidee in meinem eigenen Forschungsfeld, über die ich momentan als Senior Scientist mit zwei jüngeren, exzellenten Kollegen nachdenke.



Nobelpreisträger verstärkt die WSS

Benjamin List nimmt neu Einsitz im Wissenschaftlichen Beirat der WSS. Der 57-jährige Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr erhielt im Jahr 2021 den Nobelpreis für Chemie. List ersetzt Matthias Kleiner, der 13 Jahre lang Mitglied des Gremiums war.

Exzellente Forschungsprojekte finden, beurteilen und allenfalls durch Ratschläge zu verbessern: Das ist die Aufgabe des Wissenschaftlichen Beirates der Werner Siemens-Stiftung (WSS). Dazu braucht es hervorragende Kenner des Wissenschaftsbetriebs, die selbst exzellente Wissenschaftler sind. So gesehen, ist es für die WSS ein Glücksfall, dass sie Professor Benjamin List als neues Mitglied für ihren Wissenschaftlichen Beirat gewinnen konnte. List tritt die Nachfolge von Professor Matthias Kleiner an, der sein Amt auf Ende 2025 altershalber abgegeben hat, wie es die Statuten der WSS vorschreiben.

Als Nobelpreisträger für Chemie des Jahres 2021 und Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr ist Benjamin List ein Ausnahme-Forscher und bestens vernetzt. Zudem weiss er aus eigener Erfahrung, was es für ein erfolgreiches Gesuch bei der WSS braucht: Anfang 2025 startete sein Projekt zu einer photokatalytischen Spaltung von CO₂ in Kohlenstoff und Sau-

erstoff. Eine «etwas verrückte Idee», wie er selbst zu sagen pflegt. Aber eine, welche im Erfolgsfall die Welt verändern könnte, weil sich damit riesige Mengen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen liessen.

Er freue sich darauf, sich künftig im Auftrag der Werner Siemens-Stiftung auf die Suche nach solch bahnbrechenden Projektideen zu machen, sagt Benjamin List. «Es sollen eine Art Rohdiamanten sein – revolutionäre Ideen, die eine reelle Erfolgchance haben.» Im Lauf seiner Forscherkarriere sei er zur festen Überzeugung gekommen, dass solche vielleicht etwas verrückt anmutenden Ideen eine notwendige Bedingung sind, um wissenschaftliche Durchbrüche zu erzielen.

Aus einer Forscherfamilie

Benjamin List trägt das Forscher-Gen in sich: Sein Urgrossvater Jacob Volhard war ein bekannter Chemiker, sein Urgrossvater Franz Volhard machte sich als Nephrologe einen Namen. Und seine Tante Christiane Nüsslein-Volhard

erhielt 1995 für ihre Arbeiten zur genetischen Kontrolle der frühen Embryonalentwicklung den Nobelpreis für Physiologie und Medizin.

Aufgewachsen in Frankfurt am Main, entschied sich List für ein Chemie-Studium an der Freien Universität Berlin. Nach einer Dissertation zur Synthese des Vitamin-B12-Moleküls zog es ihn in die USA. Am Scripps Research Institute in La Jolla in Kalifornien arbeitete er zuerst an katalytischen Antikörpern und machte dann – kurz nach seiner Berufung zum Assistenzprofessor – jene Entdeckung, die zum Nobelpreis führen sollte: Er wies nach, dass sich ein kleines, organisches Molekül, die Aminosäure Prolin, als Katalysator eignete. Damit begründete er das Feld der organischen Katalyse, welche ohne die traditionell genutzten, teilweise teuren und umweltschädlichen Metallverbindungen auskommt.

Heute sind organische Katalysatoren aus der chemischen Industrie nicht mehr wegzudenken. Besonders wichtig sind sie in der Medikamenten-

entwicklung. Mit ihnen lassen sich Reaktionen präzise steuern, was unerwünschte Nebenprodukte vermeidet. Insbesondere erlauben organische Katalysatoren Synthesen, bei denen nur ein bestimmtes Enantiomer eines Moleküls erzeugt wird. Solche spiegelbildlichen Molekül-Varianten, vergleichbar mit einer linken und einer rechten Hand, weisen oft unterschiedliche chemische Eigenschaften auf.

Unsicherheit zulassen

Sein Experiment mit der Aminosäure Prolin habe damals ziemlich schnell funktioniert, erzählt Benjamin List. Trotzdem war es ein Schritt in völliges Neuland. Deshalb kenne er das Gefühl der Unsicherheit, wenn ein Forscher etwas Neues, vielleicht Abwegiges wage. Seit er den Nobelpreis erhalten habe, kommuniziere er auch öffentlich, dass er dieses Unsicherheitsgefühl suche und gerne Ideen verfolge, bei denen es sich zuweilen etwas anfühle, als könnten sie verrückt sein. Er ermutige auch gerne andere Wissenschaftle-

rinnen und Wissenschaftler, bei ihrer Forschung Risiken einzugehen. Nur so seien Pionierleistungen möglich, sagt List. «Die meisten Menschen fühlen sich wohl in der Sicherheit ihrer Gemeinschaft: Sie sitzen gemeinsam am Lagerfeuer und singen «Hotel California». Aber letztlich bringt derjenige die Menschheit mit einer Entdeckung weiter, der sich alleine in den dunklen Wald traut.»

Genau diese Risikofreudigkeit schätze er an der Werner Siemens-Stiftung, sagt List. Bei vielen anderen Förderorganisationen müsse die Forscherin oder der Forscher schon im Antrag sehr klar aufzeigen, dass das Forschungsziel erreicht werde – zum Beispiel durch bereits vorliegende Publikationen. «Bei der WSS ist die Risikobereitschaft deutlich höher. Dies, gepaart mit der grosszügigen Förderung und der schlanken Administration, finde ich toll.»



Professor Benjamin List folgt im Wissenschaftlichen Beirat der Werner Siemens-Stiftung auf Matthias Kleiner.

Gremien

Beirat der Familie

Der Beirat der Familie besteht aus Nachfahren von Werner von Siemens und dessen Bruder Carl von Siemens. Er unterstützt den Stiftungsrat bei seiner Arbeit und verfügt über wichtige Vetorechte.

Oliver von Seidel
Vorsitzender
Düsseldorf, Deutschland

Dr. Christina Ezrahi-von Siemens
Mitglied
Berlin, Deutschland

Alexander von Brandenstein
Mitglied
Hamburg, Deutschland

Stiftungsrat

Der Stiftungsrat führt die laufenden Geschäfte der Werner Siemens-Stiftung.

Dr. Hubert Keiber
Obmann
Luzern, Schweiz

Prof. Dr. Peter Athanas
Mitglied
Baden, Schweiz

Beat Voegeli
Mitglied
Rotkreuz, Schweiz

Wissenschaftlicher Beirat

Der Wissenschaftliche Beirat der Werner Siemens-Stiftung ist ein unabhängiges Gremium, welches den Stiftungsrat in der Projektfindung unterstützt. Die Wissenschaftlichen Beiräte sichten und evaluieren Projekte, die im Wirkungsfeld der Werner Siemens-Stiftung liegen.

Prof. Dr. Michael Hengartner,
Vorsitzender, Präsident ETH-Rat,
Zürich/Bern, Schweiz

Prof. Dr. Gerald Haug, Mitglied,
Max-Planck-Institut für Chemie
Mainz, Deutschland,
und ETH Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Benjamin List, Mitglied,
Max-Planck-Institut für Kohlen-
forschung, Mülheim an der Ruhr,
Deutschland

Prof. Dr. Bernd Pichler, Mitglied,
Universität Tübingen, Deutschland

Prof. Dr. Peter Seitz, Mitglied,
EPFL, Schweiz

Vergabeprozess

Auswahlkriterien

Die Werner Siemens-Stiftung fördert jährlich ein bis drei pionierhafte technische und naturwissenschaftliche Projekte an Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, die höchsten Ansprüchen genügen und zur Lösung relevanter Probleme unserer Zeit beitragen.

Pro Projekt wird in der Regel ein Betrag von 5 bis 15 Millionen Euro bzw. Schweizer Franken bewilligt. Die Auswahl der unterstützten Projekte erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren durch den Wissenschaftlichen Beirat, den Stiftungsrat und den Beirat der Familie der Werner Siemens-Stiftung. Auch besondere Ausbildungsinitiativen und Nachwuchsförderung im MINT-Bereich werden finanziell unterstützt.

Nicht unterstützt werden Aktivitäten aus Kunst, Kultur, Sport, Freizeit, Politik, Katastrophenhilfe, zeitlich nicht begrenzte Verpflichtungen, kommerziell ausgerichtete Projekte, Mitfinanzierung von Projekten anderer Stiftungen, Einzelstipendien, Studienkosten oder Doktorarbeiten.

Projektantrag

Ein Antrag auf finanzielle Unterstützung eines Projekts muss schriftlich an die Werner Siemens-Stiftung gestellt werden. Der Vergabeprozess sieht wie folgt aus:

- 1 Vorprüfung, ob das Projekt die Förderkriterien erfüllt
- 2 Prüfung des Antrags durch den Wissenschaftlichen Beirat
- 3 Empfehlung des Wissenschaftlichen Beirats an den Stiftungsrat und den Beirat der Familie
- 4 Beurteilung des Antrags durch den Stiftungsrat und den Beirat der Familie
- 5 Entscheid
- 6 Vertrag

Die Dauer des Vergabeprozesses beträgt etwa ein halbes Jahr.

Kontakt

Werner Siemens-Stiftung
Guthirhof 6
6300 Zug
Schweiz

0041 41 720 21 10

info@wernersiemens-stiftung.ch
www.wernersiemens-stiftung.ch

Impressum

Herausgeberin

Werner Siemens-Stiftung
Guthirhof 6
6300 Zug
Schweiz
www.wernersiemens-stiftung.ch

Projektleitung

bigfish AG, Aarau
Koechlin Kommunikation, Brittnau

Gestaltung

bigfish AG, Aarau

Redaktion

Koechlin Kommunikation, Brittnau

Texte

Simon Koechlin, Brittnau
S. 28–49, 54–111, 114–125, 128–129, 134–155
Brigitt Blöchliger, Zürich
S. 112–113, 126–127, 130–133
Mathias Plüss, Vordemwald
S. 50–53

Korrektorat

Niklaus Waber, Stregelbach

Fotografien

Felix Wey, Fotostudio, Baden
S. 8, 10, 20, 22, 29–32, 58, 61, 72, 75, 76, 81, 83, 85, 87, 94,
100, 102–105, 112, 123, 124, 131, 141, 148, 151, 152, 155
Oliver Lang, Fotografie, Lenzburg
S. 12, 14, 16, 18, 38, 40–42, 45, 46, 48, 54, 65, 67, 68, 70,
108, 111, 115, 119, 121, 127, 133, 134, 144, 147
Keystone/imageBROKER/Robert Poorten, S. 82
Keystone/DPA/Bernd Thissen, S. 92
Hannes Woidich, Fotografie, Dortmund, S. 116
Digital Content Team, Universitätsspital Basel:
Kai-Marie Schimanski, Carl-Victor Krüger, Aidan Alberola, S. 128
Prof. Dr. Martin Saar, ETH Zürich, S. 137
zVg/Warinner Group, S. 138

Illustrationen

bigfish AG, Aarau

Druckerei

Kasimir Meyer AG, Wohlen

© Werner Siemens-Stiftung, 2025

