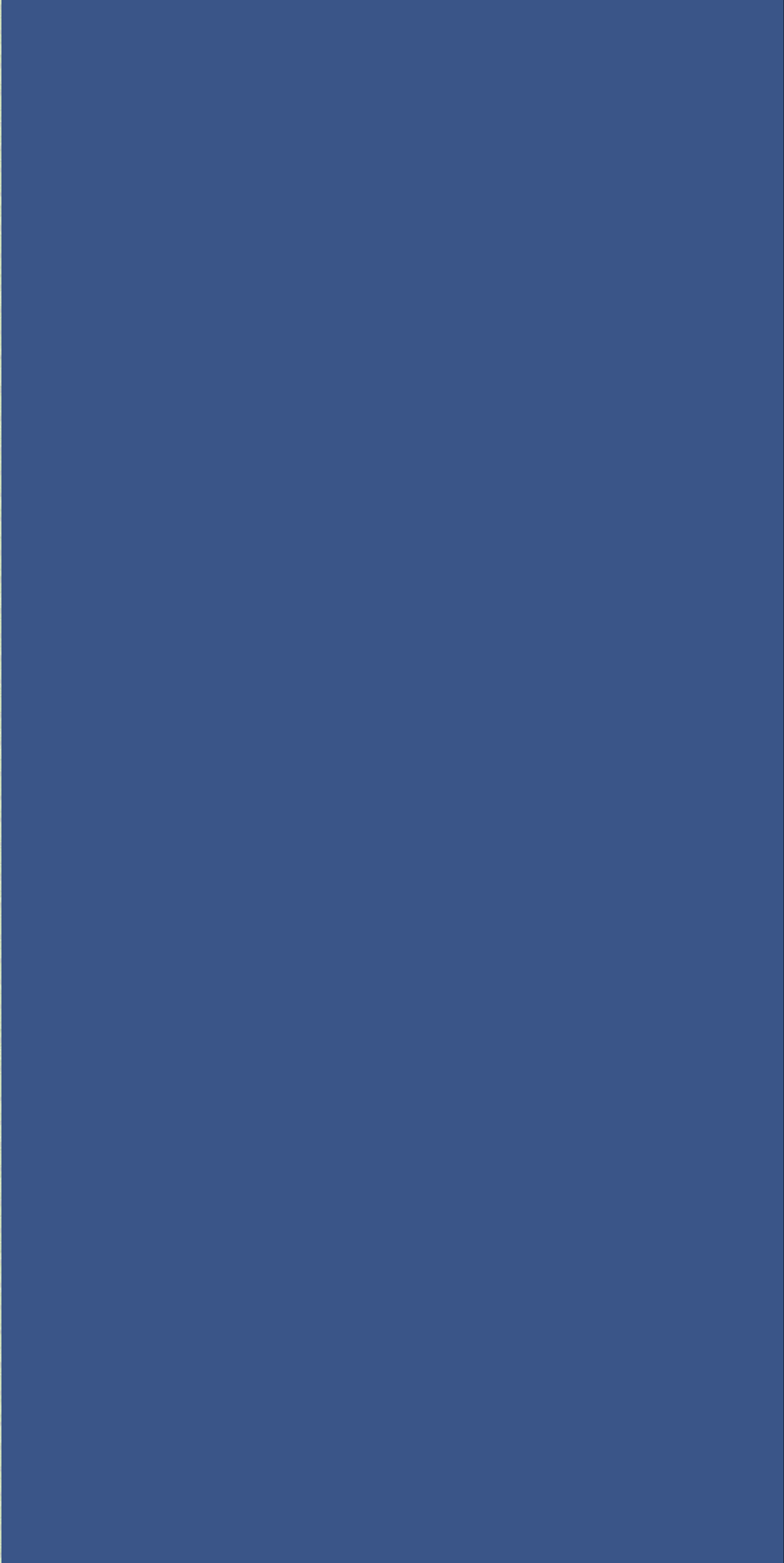
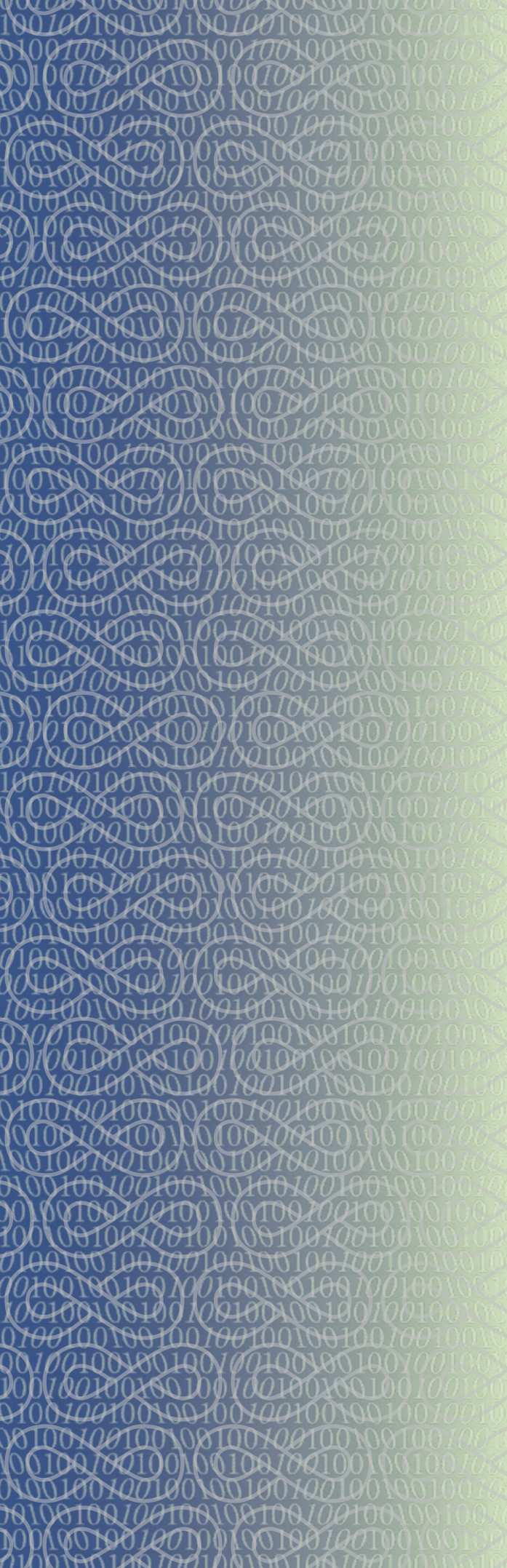




WERNER SIEMENS-STIFTUNG

100 Jahre **WSS**



WSS

WERNER SIEMENS-STIFTUNG

Report 2023

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

Die Werner Siemens-Stiftung (WSS) hat ein ereignisreiches, aufregendes Jahr hinter sich. Es stand ganz im Zeichen des 100-jährigen Bestehens der Stiftung. 1923 gründeten Charlotte von Buxhoeveden und Marie von Graevenitz geb. Siemens in Schaffhausen die Werner-Stiftung, wie sie damals noch hiess. Die beiden waren Töchter von Carl von Siemens, der mit seinem Bruder Werner von Siemens den späteren Siemens-Konzern aufgebaut hatte. Einige Jahre später beteiligten sich drei weitere Frauen aus der Siemens-Familie als Zustifterinnen. Im Mai 2023 durften wir diese fünf weitsichtigen Frauen im Kreis der Nachkommen von Werner und Carl von Siemens an einem unvergesslichen Jubiläumsfest in Baden-Baden feiern.

Zum 100-jährigen Bestehen haben wir aber auch im philanthropischen Teil der Stiftung ein Ausrufezeichen gesetzt: Wir lancierten einen Ideenwettbewerb für das «WSS-Jahrhundertprojekt» – ein Zentrum zur Erforschung von Technologien für eine nachhaltige Ressourcennutzung, das die Stiftung für einen Förderzeitraum von zehn Jahren mit insgesamt 100 Millionen Schweizer Franken ausstattet.

Die Resonanz aus der Wissenschaft war gewaltig: Hochkarätige Forschende aus Deutschland, Österreich und der Schweiz bewarben sich mit insgesamt 123 Ideenskizzen um dieses Grossprojekt. Es war eine schwierige Aufgabe, aus diesen Vorschlägen sechs Finalisten auszuwählen, die mit einem WSS-Forschungspreis von je



1 Million Schweizer Franken ausgezeichnet wurden. Und es war noch schwieriger, aus diesen sechs innovativen Finalprojekten einen Gewinner zu bestimmen.

Die Wahl fiel schliesslich auf das Projekt «catalaix» der RWTH Aachen. Ein Team um Regina Palkovits und Jürgen Klankermayer wird katalytisch getriebene Produktionsverfahren entwickeln, die eine mehrdimensionale Kreislaufwirtschaft in der chemischen Industrie ermöglichen – mit einem ersten Fokus auf dem effizienten Recycling von Kunststoffgemischen. Ich bin überzeugt, dass das WSS-Forschungszentrum in Aachen ein grosser Erfolg wird. Und dass unsere Stiftung mit diesem ganz besonderen Projekt einen wichtigen Beitrag zu einem nachhaltigen Umgang mit

den Ressourcen unseres Planeten leisten kann.

Im vorliegenden «Report» erhalten Sie einen Einblick in das Projekt «catalaix» – und Sie lesen, welche Fortschritte die laufenden, von der Werner Siemens-Stiftung unterstützten Forschungsprojekte im vergangenen Jahr gemacht haben.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

Hubert Keiber,
Obmann des Stiftungsrats der
Werner Siemens-Stiftung

Inhalt

Report 2023

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

Die Werner Siemens-Stiftung

- 136 Gremien
- 137 Vergabeprozess
- 138 Impressum

WSS100: Das WSS-Jahrhundertprojekt

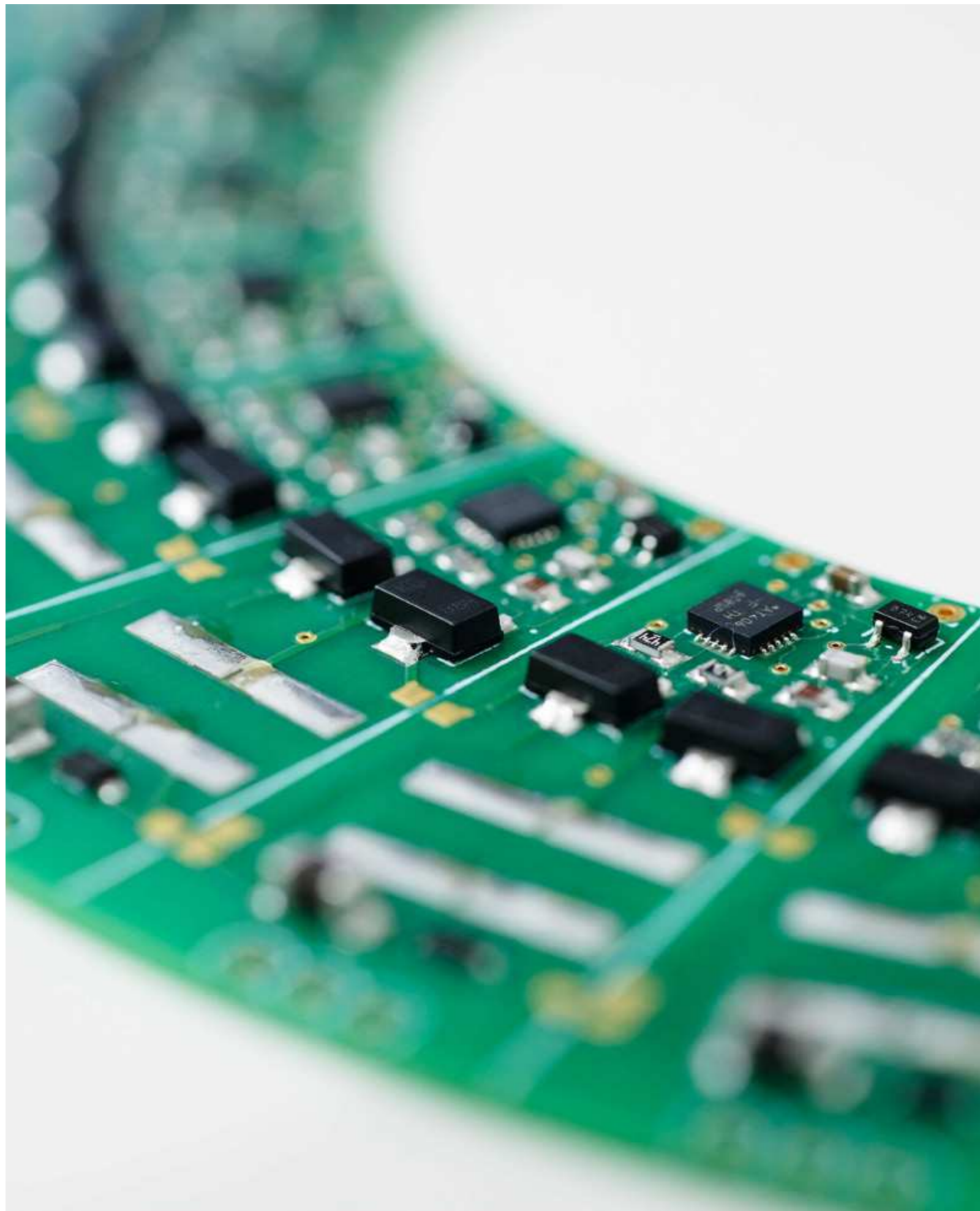
- 31 **«Das Projekt ist einzigartig»**
Alles über den WSS-Jahrhundertwettbewerb:
Projektmanager Matthias Kleiner im Interview.
- 35 **Das WSS-Forschungszentrum wird ein Gewinn für die Chemie**
Das WSS100-Siegerprojekt «catalaix» macht die Chemie nachhaltig. Ein Laborrundgang in Aachen.
- 44 **«Es passt in unsere Strategie»**
Ulrich Rüdiger, Rektor der RWTH Aachen, freut sich über den Zuschlag für das WSS-Forschungszentrum.
- 47 **Die weiteren fünf Finalisten**
Neben «catalaix» wurden fünf weitere Projekte mit einem WSS-Forschungspreis ausgezeichnet.
- 48 **Neue Chlor-Technologie**
Eine Erfindung aus Berlin sorgt für Nachhaltigkeit bei diversen chemischen Prozessen.
- 50 **Weizen-Revolution**
Mit radikalem Vertical Farming produziert ein Münchner Projekt nachhaltig und platzsparend Nahrungsmittel.
- 52 **Goldener Weg zum Wasserstoff**
Zürcher Forschende machen Wasserstoff aus Wasser und Sonnenlicht – in einem Schritt.
- 54 **Solarenergie der Zukunft**
Ein Team aus Freiburg (D) stellt die effizientesten Solarzellen der Welt her.
- 56 **Nachhaltige Katalysen**
Forschende aus Göttingen arbeiten an besseren, schnelleren und «grüneren» Synthesen.

Fokus: Nachhaltige Zukunft

- 60 **Die Energie der Zukunft**
Damit die Welt loskommt von Erdöl, Gas und Kohle, braucht es neue Techniken – und politische Instrumente.
- 68 **Stahlbeton, der nicht bricht**
Ein neu unterstütztes Projekt an der ETH Zürich macht Stahlbeton-Bauten sicher und klimafreundlich.
- 82 **Kippen die Meere?**
Die Weltmeere sind Klimapuffer. Wie lange noch? Zwei Klimaforscher ordnen ein.
- 88 **Globale CO₂-Steuer, austarierte Stromnetze**
Begabte Studierende entwickeln Klimaschutz-Ideen: Ein Besuch an der WSS-Sommerakademie im Tessin.
- 94 **Die Liste**
Zwölf überraschende Fakten zur Energie.
- 98 **Clevere Energiekonzepte**
Auch im Kleinen lässt sich viel Energie einsparen. Beispiele aus der Mikro- und Nanowelt.
- 106 **«Es wird ein Marathon, den wir laufen müssen»**
Um die Zukunft zu sichern, müssten wir jetzt handeln, warnt Sandrine Dixson-Declève vom Club of Rome.

Laufende Projekte

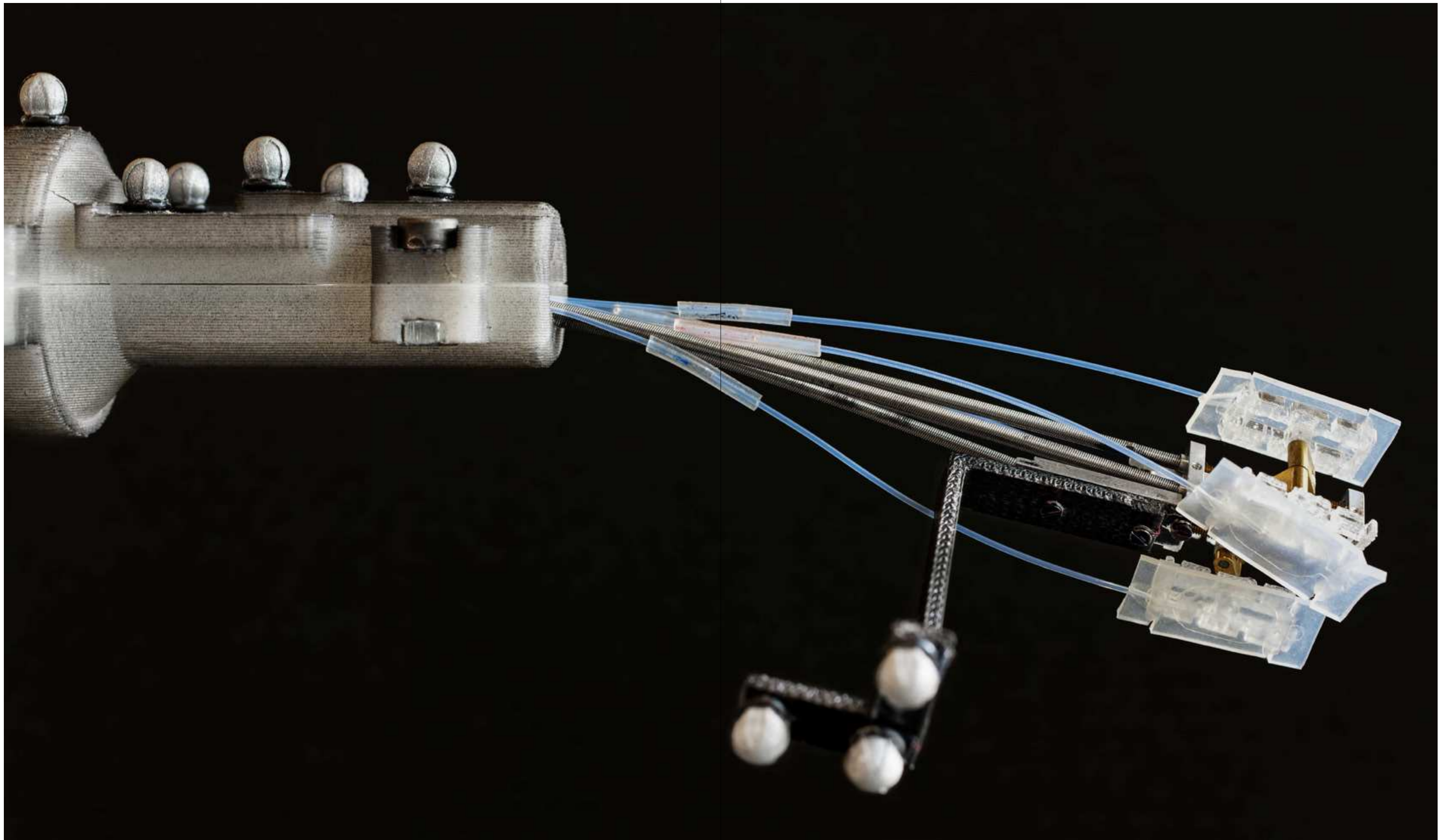
- 114 **Stabile Spins**
Das Carbo-Quant-Team macht Fortschritte beim Bau winzigster quantenelektronischer Bauteile.
- 116 **Schwachstelle ausgemerzt**
Dem Zentrum für digitales Vertrauen gelingt ein Durchbruch für den sicheren Datenaustausch.
- 118 **Das Muskel-Portfolio wächst**
Künstliche Muskeln für Menschen mit Herzkrankheiten, Inkontinenz und Gesichtslähmungen.
- 120 **Hinweise in Hirnströmen**
Eine junge Mediziningenieurin will Kindern mit Epilepsie helfen.
- 122 **Die Rädchen greifen ineinander**
Der knochenschneidende Laserroboter des Projekts MIRACLE II nimmt Form an.
- 124 **Wirkstoffe aus der Steinzeit**
Das Paläobiotech-Team gewinnt erstmals mikrobielle Stoffe aus dem Zahnschmelz von Frühmenschen.
- 126 **Neuland bei Knochenbrüchen**
Bruchsimulationen und Ganganalysen bringen das Projekt Smarte Implantate Schritt für Schritt weiter.
- 128 **Die Bio-Tinte nimmt Form an**
Auf seinem Weg, Knorpel zum Nachwachsen zu bringen, nimmt das Projekt TriggerINK weitere Hürden.
- 130 **Inhalieren gegen Viren**
Das Antiviren-Team hat seinen Breitband-Wirkstoff zu einem inhalierbaren Pulver weiterentwickelt.
- 132 **Intelligente Bildauswertung**
Künstliche Intelligenz verschafft dem Werner Siemens Imaging Center neue Einblicke in Tumorgewebe.



Elektronikteile steuern die künstlichen Muskeln, die am Zentrum für künstliche Muskeln in Neuenburg entstehen.



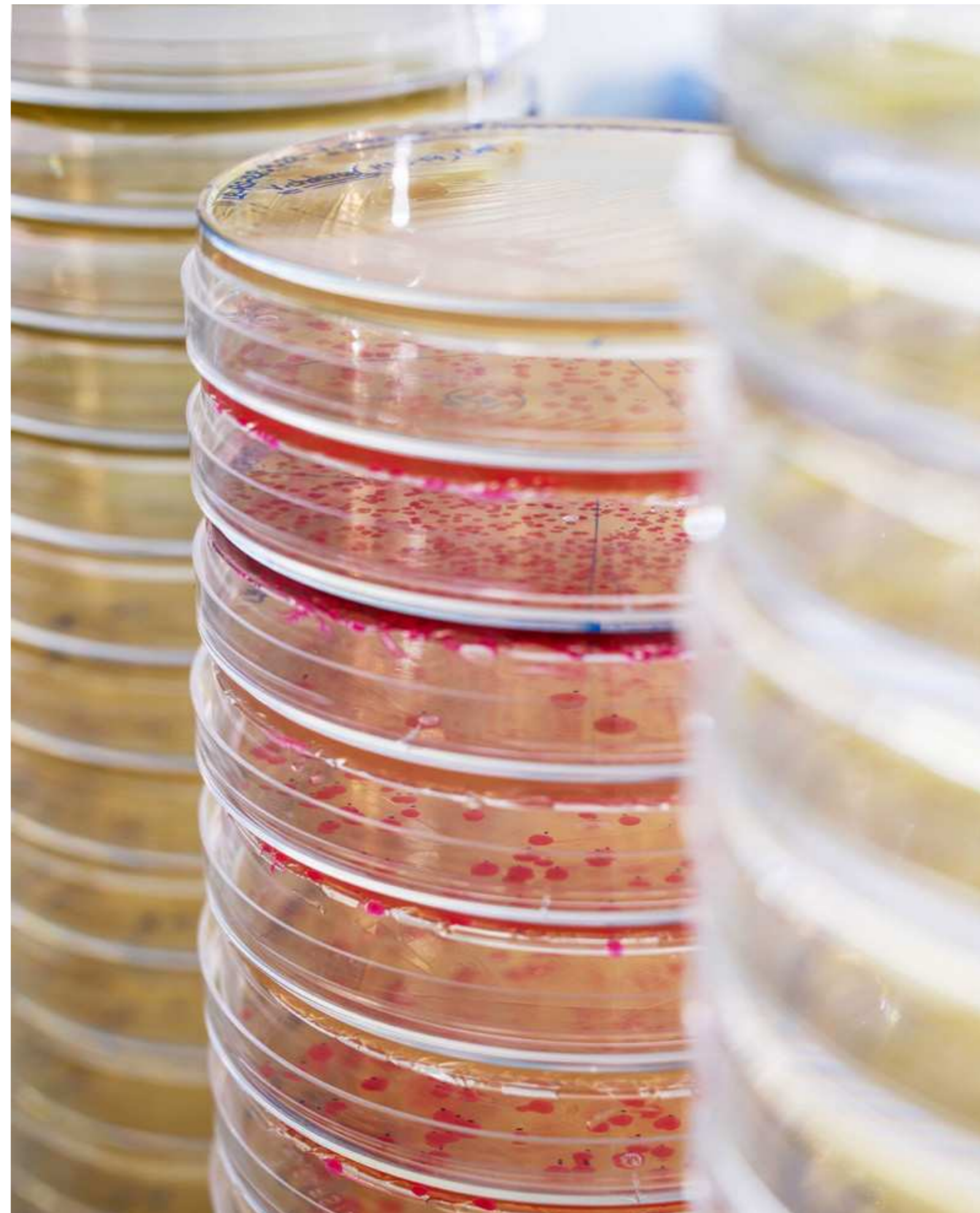
Am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg (D) forscht ein Team um Frank Dimroth (links) an hocheffizienten Solarzellen.



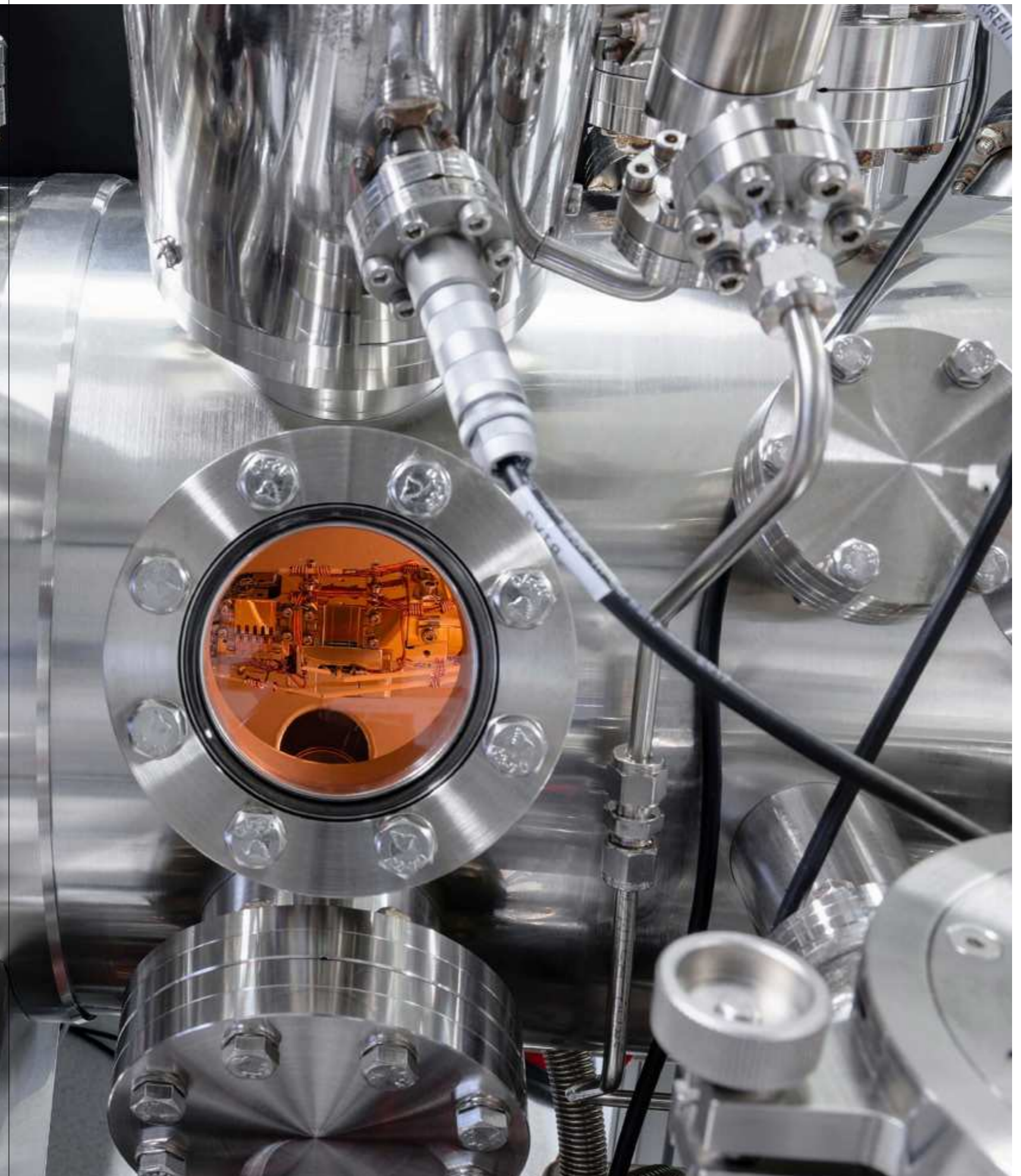
Die chirurgischen Instrumente des Chirurgieroboters im Projekt MIRACLE II in Basel müssen auf engstem Raum Platz finden.



Die Arbeitsgruppe Halogenchemie von Sebastian Hasenstab-Riedel an der FU Berlin untersucht gasförmige Reaktionen unter sicheren Bedingungen.



Steinzeit in der Petrischale: Das Projekt Paläobiotechnologie in Jena pflanzt uralte Wirkstoffe in lebende Bakterien ein.



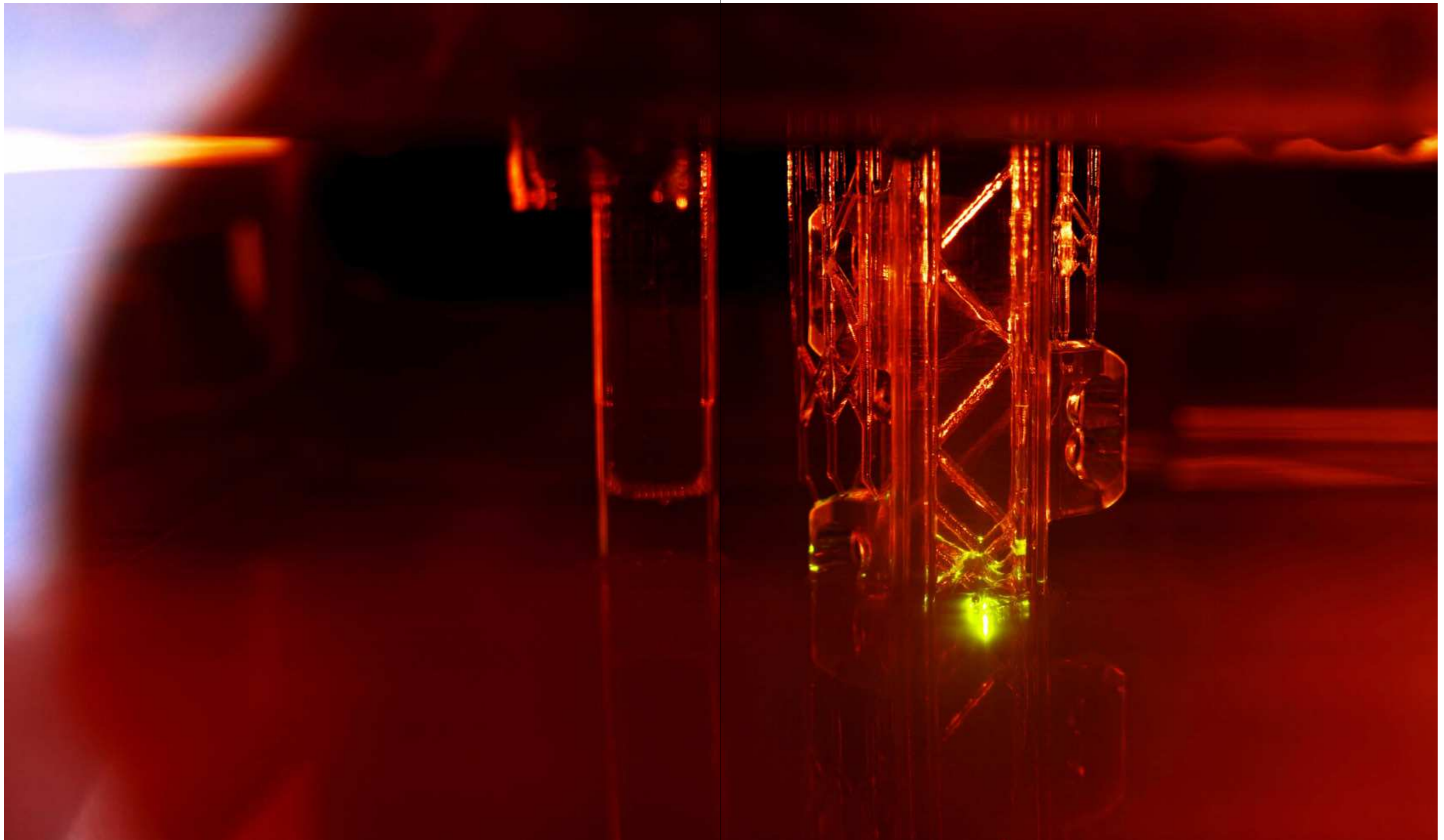
Im Rastertunnelmikroskop untersucht das Projekt CarboQuant in Dübendorf mögliche quantenelektronische Bauteile.



An der TU München tüfteln Forschende um Senthoid Asseng am Weizen der Zukunft.



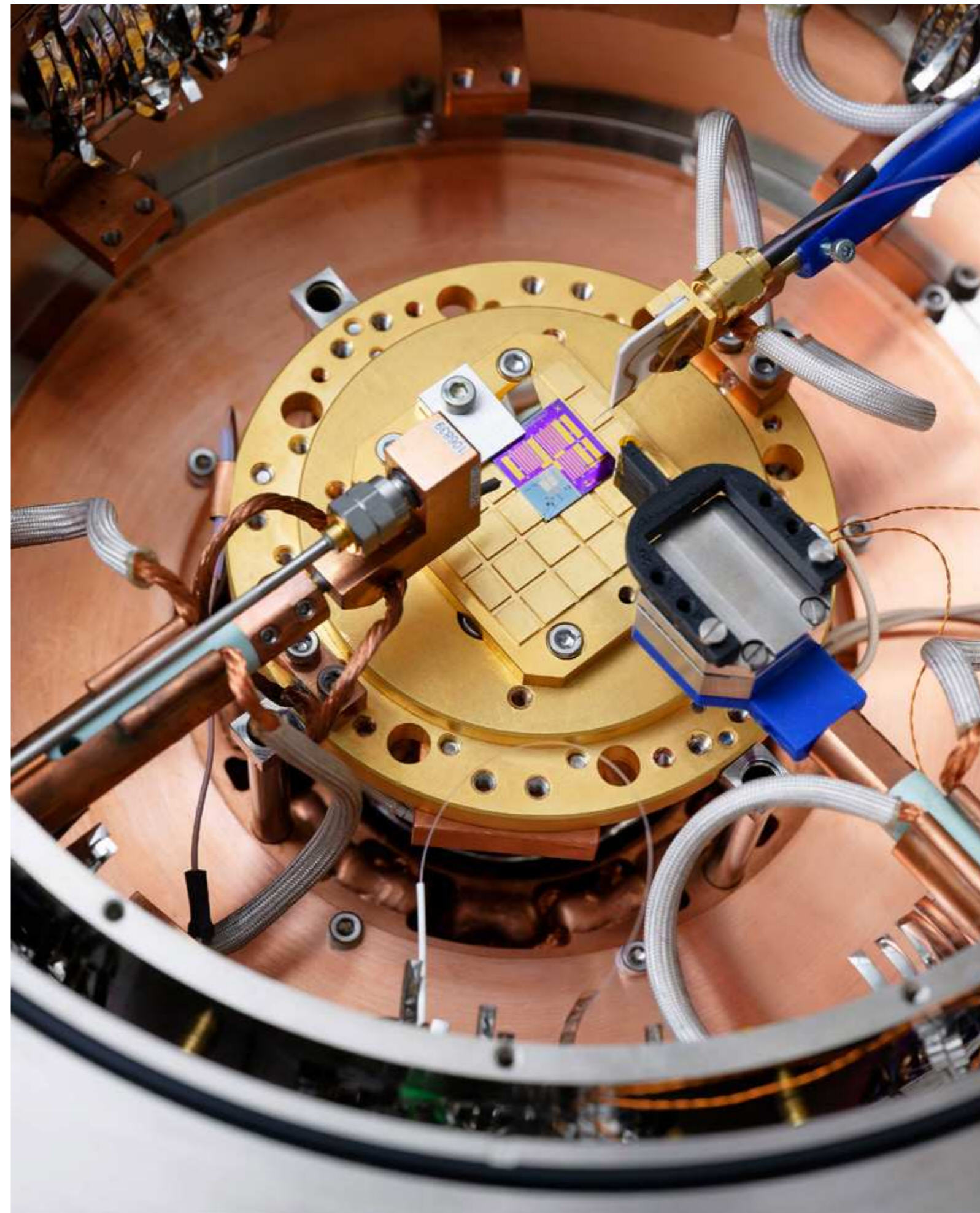
Pulverisierter, tiefgekühlter Kunststoff in den Katalyse-Labors von Regina Palkovits und Jürgen Klankermayer an der RWTH Aachen.



In einem 3D-Drucker des Projektes Smarte Implantate an der Universität des Saarlandes entsteht ein Implantate-Prototyp.



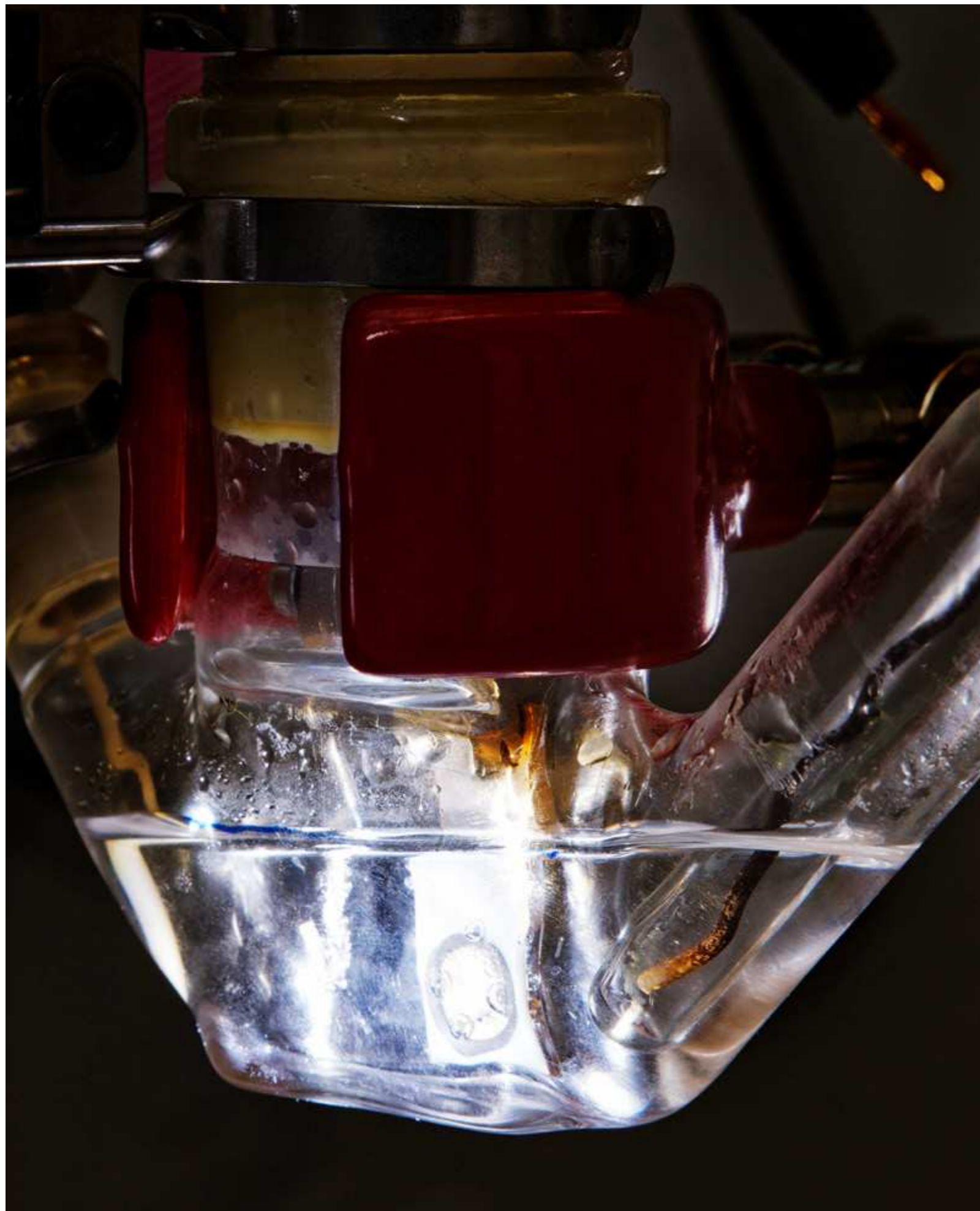
An kleinen Mörtelproben kommt die Forschungsgruppe von Ueli Angst an der ETH Zürich Korrosionsprozessen von Stahlbeton auf die Spur.



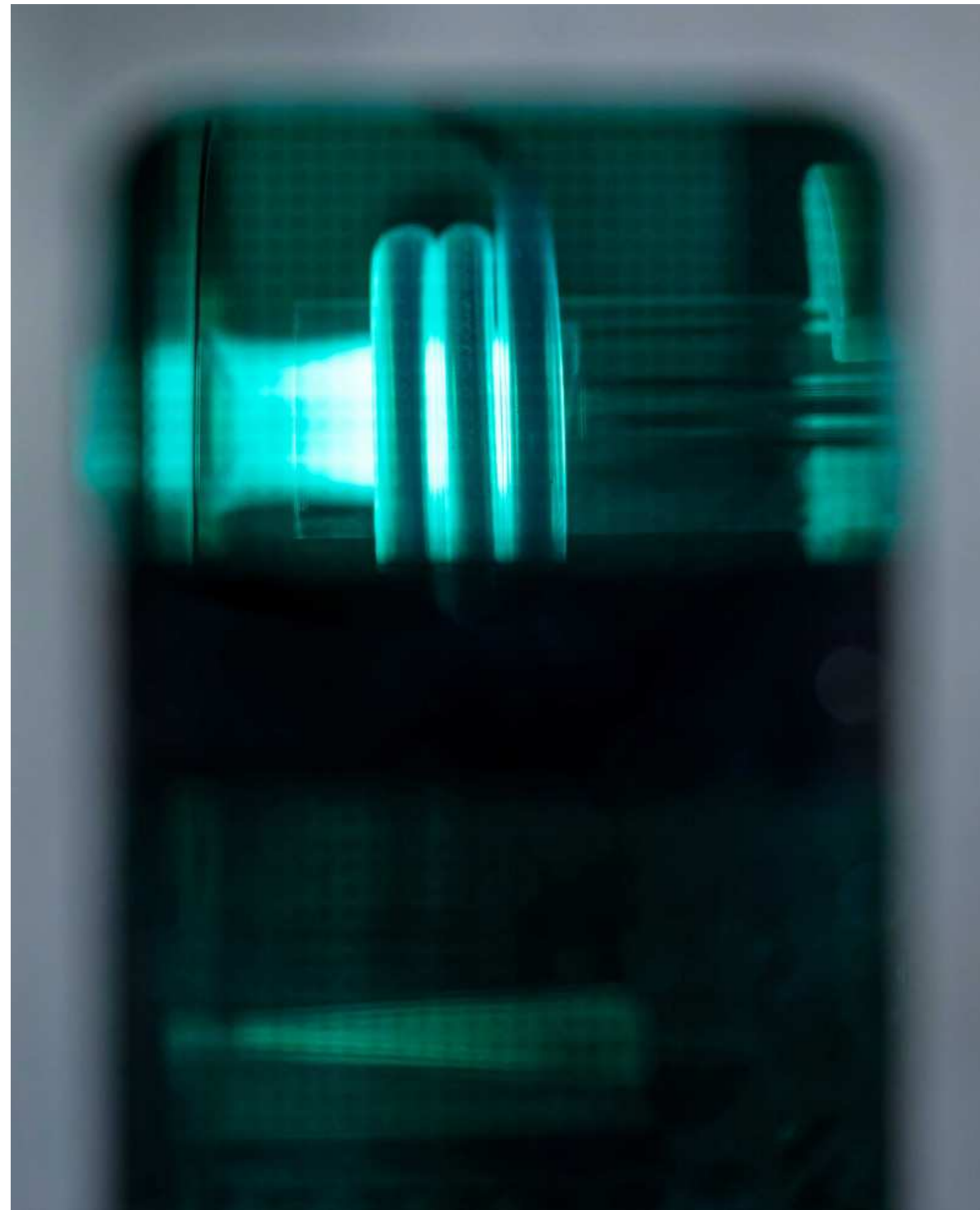
Im Projekt Atomschalter an der ETH Zürich entstehen Mikrochips, die weltrekordverdächtig wenig Energie verbrauchen.



Gruppenarbeit am Luganersee: Sommercamp der Schweizerischen Studienstiftung in Magliaso.



In den Labors von Greta Patzke und David Tilley an der Universität Zürich finden Experimente zur Wasserspaltung statt.



Mit einem Massenspektrometer sucht das Team von Lutz Ackermann an der Universität Göttingen nach Metallverunreinigungen in Katalysatoren.



Nachhaltige Zukunft

Der nachhaltige Umgang mit den Ressourcen unseres Planeten ist die wahrscheinlich grösste Herausforderung für die Menschheit. Energie, Luft, Wasser, Nahrung, Rohstoffe oder Lebensräume sind begrenzte Güter. Unser Fokus zeigt, wie von der Werner Siemens-Stiftung unterstützte Projekte dazu beitragen, diese Güter besser zu schützen und dank innovativer Entwicklungen sorgsam zu nutzen.

Die Werner Siemens-Stiftung feierte ihr 100-jähriges Bestehen im Jahr 2023 mit einem besonderen Wettbewerb: Sie schrieb ein Forschungszentrum aus, das sie für zehn Jahre mit 100 Mio. CHF unterstützen wird. 123 Ideenskizzen gingen ein. Sechs Ideen schafften es in die Endrunde. Das Rennen machte das Projekt «catalaix» an der RWTH Aachen. Es wird katalytische Verfahren entwickeln, die eine Kreislaufwirtschaft in der Chemie ermöglichen – mit einem ersten Schwerpunkt auf dem Kunststoffsektor.



Professor Matthias Kleiner erarbeitete das Konzept für das Jahrhundertprojekt der Werner Siemens-Stiftung und fungierte als Projektmanager. Für ihn ist es ein einzigartiges Vorhaben, das in dieser Form nur von einer privaten Stiftung ausgeschrieben und vergeben werden konnte.

«Ich war begeistert»

Zum 100. Geburtstag eine mit 100 Millionen Schweizer Franken dotierte Ausschreibung: Projektmanager Matthias Kleiner erklärt, wie es zum «Jahrhundertprojekt» der Werner Siemens-Stiftung (WSS) kam, wie der Wettbewerb ablief – und weshalb er das Projekt für einzigartig hält.

Matthias Kleiner, wie entstand die Idee eines WSS-Jahrhundertprojekts?

Der hundertste Geburtstag einer Stiftung ist etwas Besonderes, gerade im Wissenschaftsbereich haben nur wenige Stiftungen ein solches Alter. Im Wissenschaftlichen Beirat diskutierten wir, wie die WSS ihr Jubiläum angemessen feiern könnte. Es entstand der Gedanke, dass es ein Jahrhundertprojekt geben müsste und dies eigentlich mit 100 Millionen Schweizer Franken auszustatten sei. Wir waren so mutig, weil die WSS ohnehin in jeder Hinsicht besondere und grossskalige Projekte fördert, typischerweise mit zehn Millionen Franken über zehn Jahre. Wir beschlossen also, dies dem Stiftungsrat vorzuschlagen.

Wie reagierte der Stiftungsrat?

Die Mitglieder des Stiftungsrates waren sofort begeistert. Das war im Frühjahr 2022. Da meine Amtszeit bei der Leibniz-Gemeinschaft im Sommer endete, bot ich an, mich um das Jahrhundertprojekt zu kümmern – und erarbeitete dann ein Konzept für das Jahrhundertprojekt.

Wie sah dies aus?

Ich schlug ein zweigeteiltes Vorgehen vor: zuerst einen Ideenwettbewerb, der abgeschlossen wird mit einer Vergabe von bis zu fünf WSS-Forschungs-

preisen – jeweils mit einer Million Franken dotiert; danach den Wettbewerb zwischen diesen Preisträgern um die Förderung eines WSS-Forschungszentrums mit 100 Millionen Franken. Ich regte auch den Themenbereich an: «Technologien für eine nachhaltige Ressourcennutzung». Wir haben nur diese eine Welt zur Verfügung – Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft müssen dem übermässigen Ressourcenverbrauch gemeinsam begegnen. Wir haben die Konzeptidee in den Stiftungsgremien besprochen und uns relativ schnell auf dieses Vorgehen geeinigt. An den Nachfragen und Äusserungen merkte ich, wie sehr der Themenbereich inhaltlich getragen wurde – auch aus dem Familienbeirat.

Was war Ihnen bei der Ausschreibung des Ideenwettbewerbs wichtig?

Zu vermitteln, dass die Stiftung bereit ist, Risiken einzugehen – riskante, unkonventionelle Projekte zu fördern. Ideen, die man vielleicht woanders nicht vorzutragen wagt. Wir machten neben dem Themenbereich relativ wenige Vorgaben. Es brauchte eine Trägerinstitution, welche die grundlegende Infrastruktur und die räumliche Unterbringung garantiert. Denn die WSS will nicht in Beton und Wasserrohre investieren, möglichst viel soll in die wissenschaftliche Forschung fliessen. Auch gab es beispielsweise

keine Bedingungen zur interdisziplinären Kooperation, wie das häufig vorgegeben wird. Alles sollte sich an den Notwendigkeiten der Forschung orientieren. Ich habe viele Resonanzen bekommen, die es als ganz besondere Ausschreibung bezeichneten – nicht nur aufgrund des Volumens, sondern auch aufgrund der Offenheit und der Risikobereitschaft.

Insgesamt wurden 123 Ideenskizzen eingereicht. Hätten Sie mehr erwartet?

Nein, ich war überwältigt von den 123 Einreichungen – von der Quantität und von der Qualität. Anfangs rechnete ich mit ungefähr 50 Vorschlägen. Und als die Ausschreibung einige Tage lief, dachte ich: Vielleicht werden es ja auch nur 30. Aber in den letzten zwei, drei Tagen vor dem Eingabetermin sass ich fast Tag und Nacht am Rechner, bestätigte den Eingang von Vorschlägen oder beantwortete letzte Fragen.

Was für Fragen?

Vielfach hinsichtlich formaler Dinge. Wir hatten den Umfang der Einreichungen auf zehn Seiten beschränkt – manche versuchten zu feilschen oder wollten wissen, welche Schriftgrösse sie noch benutzen dürften oder ob es wirklich beide Sprachversionen, Englisch und Deutsch, bräuchte. Aber letztlich war ich doch begeistert, dass so viele Einreichungen kamen und



An einem feierlichen Festakt in Luzern wurde die Siegerurkunde für das Jahrhundertprojekt der WSS an die Forschenden aus Aachen überreicht.

der Anteil derer, die von vornherein nicht in Frage kamen, relativ klein war. Ungefähr zwei Drittel kamen von wirklich herausragenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus der Schweiz, aus Deutschland und Österreich.

Es ging immerhin um 100 Millionen Franken. Eine solche Summe könnte den einen oder die andere auch dazu verleiten, das Blaue vom Himmel zu versprechen. Gab es derartige Eingaben? Klar. So etwas gibt es immer. Bis zu dem Punkt, dass jemand verspricht, er habe das Perpetuum mobile erfunden. Viele Ideen aber waren zwar kühn, hatten aber Hand und Fuss. Ein herausragender Wissenschaftler sagte mir, er trage eine Idee schon seit seiner Jugend mit sich herum – aber erst hier würde sich die Möglichkeit bieten, sie zu verfolgen. Genau das ist ja das Grundprinzip der WSS. Wir fragen: Wenn ihr die Gelegenheit hättet, ganz frei arbeiten zu können: Was wäre die Idee, die ihr verfolgen würdet?

Wie lief die Begutachtung ab? Ich stellte ein kleines, externes Team zusammen aus Expertinnen und Experten für die Evaluierung von Wissenschaft und Forschung, das «Team Hannover». Es arbeitete alle 123 Skizzen durch und nahm eine Vorsortierung vor. Dank dieser grossen Vorarbeit konnte sich der wissenschaftliche Beirat in seiner intensiven Diskussion auf die besten Skizzen konzentrieren. Trotzdem: Durchgesehen haben auch die Beiräte alle Skizzen.

Sechs Ideen erhielten in dieser ersten Ausschreibungsrunde einen WSS-Forschungspreis, der jeweils mit einer Million Schweizer Franken dotiert war. Was zeichnete diese Vorschläge aus? Dass die Ideen weitreichend waren und auf hervorragender Wissenschaft basierten. Dass sie riskant waren, aber trotzdem den Eindruck vermittelten, sie seien langfristig realisierbar. Wenn eine solche Idee funktioniert, kann sie ein wissenschaftliches, technisches

oder wirtschaftliches Feld grundlegend verändern und einen wirklichen Durchbruch erzielen.

Die sechs Finalisten stammten aus der Chemie, der Solartechnologie und dem Agrarbereich. Sie bekamen noch einmal ein halbes Jahr Zeit, um ihre Ideen zu schärfen und ihre Vorschläge zu konkretisieren. Wo gab es die grössten Änderungen oder Verbesserungen? Die Ideenskizzen waren zehn Seiten lang gewesen, die Konzepte für ein WSS-Forschungszentrum durften nun 50 Seiten umfassen. Die Teams konnten also detaillierter werden; sie verfeinerten, veränderten, spitzten zu. Einige befassten sich noch einmal sehr intensiv mit dem Kern ihres Konzeptes oder stiessen mit dem Forschungspreis sogar das eine oder andere Experiment an. Ich besuchte jedes Finalistenteam zwei Mal – zu einem frühen Zeitpunkt und kurz vor der Deadline. Wir wollten, dass es ein möglichst harter Wettbewerb wird. Darum habe ich wettbewerbsneutral

durch Beratung und Feedback versucht zu helfen, die Konzepte bestmöglich zu machen.

Am Ende setzte sich das Projekt «catalaix» der RWTH Aachen durch. Was gab den Ausschlag?

Es bringt eine grosse Idee mit, die zu einem Gamechanger werden kann – insbesondere beim Recycling von Kunststoffgemischen, wie sie etwa in grosser Menge schwimmende Inseln in den Weltmeeren bilden. Das Projekt hat bereits reale Ansätze, birgt aber dennoch ein gehöriges Risiko. Es ist von höchster Relevanz, für Gesellschaft, Wissenschaft und vor allem auch für unsere Wirtschaft. Die Voraussetzungen vor Ort an der RWTH Aachen sind hervorragend. Und es ist ein Themenfeld, mit dem sich die Stiftung gut identifizieren kann. Das ist aus meiner Sicht auch sehr wichtig.

Was erwarten Sie für wissenschaftliche und gesellschaftliche Fortschritte vom WSS-Forschungszentrum?

Ich will das nicht detaillieren, das würde zu sehr ein Erwartungsraster über die Forschung legen. Aber meine Hoffnung ist, dass es dank diesen Arbeiten sinnvoll und wirtschaftlich wird, Kunststoffgemische auf einem hohen Produktionsniveau zu rezyklieren – und zwar unter Erhaltung eines grösstmöglichen Wertes für eine wirkliche Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffchemie. Am Ende sollte es ein Geschäft werden, die Plastikabfälle aus Müllhalden an Land und Müllstrudeln in den Ozeanen einzusammeln und zurückzubringen in die Kunststoffproduktion.

Sie haben aus Ihrer Zeit als Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und als Präsident der Leibniz-Gemeinschaft grosse Erfahrung mit Förderverfahren für wissenschaftliche Forschung. Wie komplex oder wie aufwändig war der WSS-Wettbewerb verglichen mit anderen Ausschreibungen?

Gerade wegen dieser Erfahrungen haben wir vieles vereinfacht und auf

den Punkt gebracht, um die Komplexität zu reduzieren, ohne die Entscheidungsqualität zu mindern. Ich glaube aber, ein solches Förderverfahren kann nur eine private Stiftung leisten, die nicht kleinteilige Haushaltsvorschriften beachten und sich nicht immer wieder vor Rechenschaftshöfen rechtfertigen muss. Es war ein aufwändiger, fairer und transparenter Prozess, aber bei weitem nicht so aufwändig wie andere bei gleichen oder geringeren Fördersummen.

Und wie steht das WSS-Jahrhundertprojekt in der Landschaft von wissenschaftlichen Grossprojekten?

Ich finde das WSS-Jahrhundertprojekt einzigartig – in der Freiheit, die damit verbunden ist, in der Risikobereitschaft, aber auch in der Reduzierung des Verwaltungsaufwandes. Denn es soll ja heissen: möglichst wenig Bürokratie und möglichst viel Wissenschaft.



Matthias Kleiner bei seiner Ansprache am Dinner im Bürgenstock Resort, das zum Rahmenprogramm der Feierlichkeiten in Luzern gehörte.



Die Chemie wird nachhaltig

In Aachen startet das «Jahrhundertprojekt» der Werner Siemens-Stiftung: Das multidisziplinäre Team des WSS-Forschungszentrums «catalaix» entwickelt katalytisch getriebene Verfahren, die eine mehrdimensionale Kreislaufwirtschaft in der chemischen Industrie ermöglichen – insbesondere für Kunststoffgemische. Ein Laborbesuch zeigt: Für verschiedene Kunststoffe können die Forschenden bereits erste Erfolge vorweisen.

Die beiden Katalyse-Experten Jürgen Klankermayer und Regina Palkovits leiten das neue WSS-Forschungszentrum «catalaix» an der RWTH Aachen.



Der Campus Melaten, «catalaix»-Standort. Hier sind die spezialisierten Labore der Teams in mehreren Gebäuden untergebracht. Auf der Wiese links im Bild soll ein neues Forschungszentrum entstehen.

Hüllen können täuschen: Von aussen macht das Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (ITMC) der RWTH Aachen keinen allzu frischen Eindruck. Der Bau stammt aus den 1970er-Jahren. Die Labors allerdings, die sich darin befinden, sind hochmodern – und in ihnen wird gerade an der Chemie der Zukunft gearbeitet.

Das ITMC ist der Dreh- und Angelpunkt des «Jahrhundertprojekts» der Werner Siemens-Stiftung (WSS). Regina Palkovits vom Lehrstuhl für Heterogene Katalyse und Technische Chemie und Jürgen Klankermayer vom Lehrstuhl für Translationale Molekulare Katalyse leiten das Projekt «catalaix: Katalyse für eine Kreislaufwirtschaft»; es hat sich in einem hochkarätigen Ideenwettbewerb zum 100-Jahr-Jubiläum der Stiftung durchgesetzt und wird für die kommenden zehn Jahre von der WSS mit insgesamt 100 Millionen Schweizer Franken unterstützt. Das Forschungszentrum, welches das Aachener Team nun aufbaut, soll nichts weniger als den Weg zu einer kreislauffähigen Chemie ebnen.

Heute fokussiert sich die chemische Industrie vereinfacht gesagt darauf, dass fossile, erdölbasierte Rohstoffe mit ausgeklügelten, cleveren Verfahren in die unterschiedlichsten Produkte umgewandelt werden. «Es sind Produkte von maximaler Funktionalität und hoher Wirtschaftlichkeit», sagt Regina Palkovits. «Aber bislang hat man sich weniger Gedanken dazu gemacht, was mit diesen Produkten passiert, wenn ihre Lebensdauer abgelau-

fen ist.» Die Folge: Noch immer landet ein Grossteil der chemisch produzierten Produkte am Ende ihrer Lebenszeit im Abfall. «Das können wir uns nicht mehr leisten», sagt Palkovits. «Wir müssen wegkommen von einer linearen Wirtschaft, hin zu einer Kreislaufwirtschaft.»

Müllberge aus Plastik

Der erste Fokus von «catalaix» liegt auf dem Kunststoffsektor. Dieser ist ein Paradebeispiel für den Nutzen, aber auch für die Probleme, welche die heutige chemische Industrie mit sich bringt. Ohne Kunststoffe wäre unser Leben nicht mehr denkbar: Sie stecken beispielsweise in Verpackungen, Leitungsrohren, Bodenbelägen, Isolierungen, Reifen, Polsterungen, Armaturenbrettern, Kosmetika, Medizinprodukten oder Textilfasern. Es gibt kaum einen Industriebereich, in dem kein Plastik eingesetzt wird. 400 Millionen Tonnen produziert die Industrie etwa pro Jahr an neuen Kunststoffen – bis zur Mitte des Jahrhunderts dürften so in Summe seit 1950 etwa 16 Gigatonnen zusammenkommen; so viel wiegen alle Tiere und Pilze auf der Erde gemeinsam.

Die Plastikschwemme verursacht vor allem zwei Probleme: Die Herstellung verbraucht enorm viel Energie und am Ende bleiben gigantische Müllberge. «Umgerechnet werden so weltweit pro Kopf und Jahr etwa 50 Kilogramm Plastik produziert und in Industrieländern wie Deutschland sogar 1,2 Tonnen Erdöl pro Bürger verbraucht – das

sind enorme Zahlen», sagt Jürgen Klankermayer. Die Emissionen des Kunststoffsektors, so schätzt man, entsprechen 2050 dem Ausstoss von 800 Kohlekraftwerken. Gleichzeitig könnte bis dann der Müllteppich in den Weltmeeren auf eine Fläche angewachsen sein, die der Grösse Frankreichs entspricht.

Heute werden nur neun Prozent aller Kunststoffe recycelt – etwa PET-Flaschen, die zerkleinert und wieder zu neuen PET-Flaschen geformt werden. Für einen ganzheitlichen Ansatz sind solche eindimensionalen Kreisläufe allerdings nicht geeignet. Denn Kunststoffe sind eine komplexe, vielfältige Stoffklasse mit ganz unterschiedlichen chemischen Strukturen. Über 200 unterschiedliche Kunststoffklassen sind auf dem Markt. Sie werden in verschiedenen Mengen produziert, enthalten Hunderte Zusatzstoffe und ihre Lebensdauer ist unterschiedlich: Eine Verpackung hat ihre Dienste vielleicht schon nach wenigen Wochen geleistet, eine Gebäudeisolation hingegen wird erst nach 30 Jahren ersetzt.

Recycling mit Baukastensystem

Die Idee von «catalaix» ist es nun, eine Art Baukastenprinzip für das Recycling von solch vielfältigen Stoffen zu entwickeln. Die verschiedenen Kunststoff-Abfälle werden zu molekularen Bausteinen abgebaut, die derartig vielseitig einsetzbar sind, dass sich aus ihnen – je nach Nachfrage – die unterschiedlichsten neuen Materialien herstellen lassen. «So wird es möglich, bislang isolierte

Stoffkreisläufe zu verknüpfen und eine flexible Kreislaufwirtschaft zu entwickeln», sagt Jürgen Klankermayer.

Es sei wichtig, Abfall als wertvolle Ressource zu verstehen, ergänzt Regina Palkovits. «In Kunststoffprodukten stecken viel Energie und wertvolle Syntheseleistungen – es ist nicht sinnvoll, sie zu entsorgen oder zu verbrennen.» Deshalb gelte es, beim Recycling molekulare Bausteine herzustellen, die den grösstmöglichen chemischen Wert behalten. Gleichzeitig sollen die künftigen Bausteine nachhaltiger werden, am besten biologisch abbaubar, insbesondere wenn die Transportwege lang sind oder eine Sammlung einen zu grossen CO₂-Fussabdruck verursachen würde.

Der Kernpunkt von «catalaix» ist die Katalyse – jene Technologie, welche die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen erhöht oder sie erst ermöglicht. «Bislang haben Chemikerinnen und Chemiker meist neue Katalysatoren gesucht, die Bindungen knüpfen», sagt Jürgen Klankermayer. «Wir suchen nun auch Katalysatoren, die selektiv Bindungen brechen.»

Mehr als ein Plastikprojekt

Das ist auch wichtig für neue chemische Produkte, welche die Forschenden entwickeln wollen. Diese sollen nachhaltig sein und sich besser als heutige Kunststoffe recyclieren lassen. «Bei solchen Neuentwicklungen muss der Recyclinggedanke von Anfang an mitgedacht werden», sagt Palkovits. Eine Idee ist es, eine Art Sollbruchstellen in neu



In den Laboren von Regina Palkovits (Mitte) dreht sich alles um sogenannte heterogene Katalysen – Katalysator und reagierende Stoffe liegen in unterschiedlichen Phasen vor.

entwickelte Moleküle einzufügen, an denen ein Katalysator einfach angreifen kann. «Solche Methoden sind nicht nur auf Kunststoffe anwendbar», sagt Palkovits. «Deshalb ist «catalaix» nicht einfach ein Plastikprojekt, sondern wird viel breitere Impulse geben für die Transformation zu einer nachhaltigen chemischen Industrie.»

Überhaupt geht der Anspruch von «catalaix» über das Chemielabor hinaus. Die Ideen und Entwicklungen sollen möglichst rasch auf ihre Anwendbarkeit getestet werden. «Für diese Translation bis zum Prototyp bietet die RWTH Aachen hervorragende Voraussetzungen», sagt Klankermayer. «Wir haben hier eine starke Verfahrenstechnik und technische Infrastruktur, die es erlaubt, Versuche in grösseren Massstäben als im Labor durchführen.» Um einen möglichst grossen Effekt zu erzielen, gehören zum «catalaix»-Team zudem Forschende der Nachhaltigkeits- und Systembewertung. Sie schätzen ab, welche neu geschaffenen Moleküle nachhaltig sind, wie Stoffflüsse aussehen könnten und wo auf dem Markt überhaupt eine Nachfrage besteht.

Spaltung an Platin-Elektroden

Ein Rundgang durch die Aachener Labore zeigt, wie die Forschenden diese vielschichtige Idee in den nächsten zehn Jahren umsetzen wollen. Die Teams haben bereits vielfältige Vorarbeiten geleistet – für mehrere Kunststofftypen haben sie zum Beispiel nachgewiesen, dass eine katalytische Spaltung möglich ist. So vielfältig wie die

Kunststoffe sind auch die Methoden, mit denen sie chemisch zerlegt werden. In den Laboren der Arbeitsgruppe von Regina Palkovits etwa dreht sich alles um heterogene Katalysen. Das bedeutet: Der Katalysator und die reagierenden Stoffe der Reaktion liegen in unterschiedlichen Phasen vor – oft ist der Katalysator ein Feststoff, die Reaktionsstoffe hingegen flüssige Lösungen.

So wird in der Gruppe an der Idee gearbeitet, Kunststoffe durch elektrochemische Katalyse abzubauen. Der grosse Vorteil dieser bisher eher selten benutzten Methode ist ihre Nachhaltigkeit: Die Reaktionen lassen sich statt mit fossiler Energie mit grüner, etwa aus Windkraft gewonnener, elektrischer Energie betreiben. Im Labor laufen die Experimente in kleinen Glasbehältern ab, in deren Deckel zwei Metallstifte stecken, die weit ins Glas hinunterreichen. Das Glas wird gefüllt mit dem Reaktionsmedium – also einem bestimmten Kunststoff. Wird an den beiden Elektroden eine Spannung angelegt, läuft an ihnen die Reaktion ab.

Erst kürzlich haben die Forschenden nachgewiesen, dass sich mit dieser Methode der Kunststoff Polymilchsäure (PLA) spalten lässt. PLA ist eine kettenartige Verbindung aus Milchsäure, einem bioabbaubaren Molekül. Aus PLA lassen sich Verpackungen, Dosen oder Flaschen herstellen. Die Forschenden nutzen für ihre Studie einen kommerziell erhältlichen Bio-Plastikbecher, den sie mechanisch zerkleinerten und in ein Lösungsmittel brachten. In den Experimenten erreichten sie mit Pla-



In der Laborkugel- oder Kryomühle werden Kunststoffe von zwei Kugeln zu einem Pulver zerstoßen. Um ein Schmelzen zu vermeiden, geschieht dies bei tiefen Temperaturen.



Beim Umgang mit den Kunststoffen und den Chemikalien sind höchste Präzision und Vorsicht gefragt, um Verunreinigungen zu vermeiden.

tin-Elektroden eine maximale Milchsäure-Ausbeute von 87 Prozent. Aber auch an günstigerem Titan gelingt die Umwandlung. In einem nächsten Schritt wollen sie nun untersuchen, ob diese Art der Spaltung auch für andere Kunststoffe möglich ist.

Reaktionen bei 100 bar

In den Laboren der Arbeitsgruppe von Jürgen Klankermayer wird mit sogenannten homogenen Katalysatoren gearbeitet – Katalysator und reagierende Stoffe liegen jeweils in derselben Phase vor. Mit dieser Methode bauen die Forschenden insbesondere Kunststoffe aus der Klasse der Polyoxymethylene, kurz POM, ab. POM werden verwendet, um Reissverschlüsse oder Rucksackschnallen herzustellen, sind aber auch in der Automobilindustrie wichtig – aus ihnen bestehen Türgriffe, Rückspiegel oder die Druckschnallen am Gurtschloss. Solche Produkte nehmen die Forschenden als Ausgangsmaterialien für ihre Versuche und zerkleinern sie in einem ersten Schritt in der laboreigenen Kryomühle. Dieses Instrument besteht aus zwei Kugeln, die ein Material zu einem Pulver zerstoßen. Dies geschieht bei tiefen Temperaturen, damit sich keine Hitze entwickelt, welche das Material verändern könnte.

Das Kunststoffpulver wird anschliessend in einen sogenannten Autoklav gefüllt, einen gasdicht verschliessbaren Druckbehälter aus Metall. Für die ersten Experi-

mente mit einem neu entwickelten Katalysator sind diese Reaktorwerke klein – ihr Fassungsvermögen beträgt nur wenige Milliliter. Ein Magnetrührstab vermischt Kunststoffpulver und Katalysator, die Reaktion startet – typischerweise bei einem Druck von 100 bar oder mehr, das entspricht über 100 Kilogramm Druck pro Quadratzentimeter. Mit solchen Experimenten konnten Jürgen Klankermayer und sein Forschungsteam zeigen, dass sich POM unter Beifügung von erneuerbaren Diolen – aus Biomasse gewonnenen organischen Verbindungen – in sogenannte zyklische Acetale umwandeln lassen. Diese Chemikalien wiederum können flexibel als Lösungsmittel, Polymerbausteine oder pharmazeutische Zwischenprodukte fungieren.

Ein zweites Erfolgsbeispiel aus Klankermayers Gruppe ist der Abbau von Polyethylen (PE), mit einem Marktanteil von rund 30 Prozent der weltweit meistverwendete Kunststoff. PE kommt vorwiegend für Verpackungen und Folien zum Einsatz. Den Forschenden gelang es, gemeinsam mit einem Kooperationspartner ein Verfahren zu entwickeln, das aus Polyethylenabfällen unter Beifügung von Biomasse Milchsäure erzeugt, den Baustein der Polymilchsäure (PLA). Damit gelang also die Umwandlung eines konventionellen, nicht abbaubaren Kunststoffs zu einem biologisch abbaubaren Produkt, das sich für eine nachhaltige, kreislauffähige Chemie der Zukunft eignet.



In Kernspinresonanzspektrometern lassen sich Moleküle genauestens untersuchen – oder gar chemische Reaktionen in Echtzeit «anschauen».

Ob, wie gut und wie effizient solche Abbauverfahren funktionieren, hängt massgeblich vom Katalysator ab, den die Chemikerinnen und Chemiker entwickelt oder ausgewählt haben. Oft handelt es sich dabei um komplexe Metall-Verbindungen. Selbst winzige Veränderungen ihrer chemischen Struktur können eine Reaktion stark beschleunigen oder verlangsamen. Auch die Form, in der ein Katalysator vorliegt, ist wichtig: Vielfach eignen sich poröse Materialien als feste Katalysatoren, weil so das Material im Verhältnis zum Volumen eine besonders grosse Oberfläche aufweist. Der Grund: Katalysen laufen meist an der Oberfläche des Katalysators ab.

Deshalb ist es für die Forschenden wichtig zu wissen, wie genau ihre Katalysatoren aussehen und wie sie funktionieren. In einem Kellerraum des ITMC-Gebäudes stehen Apparaturen, die dafür unerlässlich sind. Es sind sieben Kessel unterschiedlicher Grösse, sogenannte Kernspinresonanzspektrometer. In ihnen werden Atomkerne durch ein starkes und homogenes Magnetfeld dazu angeregt, ihren Zustand zu ändern. «Dadurch lassen sich Moleküle quasi anschauen», erklärt Jürgen Klankermayer. In den modernsten Spektrometern können sogar direkt Reaktionen durchgeführt werden. Auf diese Weise sehen die Forschenden, was genau mit ihrem Katalysator passiert, wenn sie ihn mit dem Reagens zusammenbringen, welche Bindungen zwischen einzelnen chemischen Elementen sich bilden oder lösen.

Katalysen lassen sich nicht nur mit chemisch entwickelten Stoffen durchführen. Viele Vorgänge im menschlichen Körper würden ohne biologische Katalysatoren, unsere Mikroben, nicht funktionieren. Wirtschaftlich genutzt werden solche Biokatalysen schon seit Jahrhunderten, zum Beispiel beim Bierbrauen oder bei der Weingärung. Lars Blank, Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Mikrobiologie an der RWTH Aachen und Mitglied des Kernteams von «catalaix», setzt Enzyme zum Plastikabbau ein. Zudem fügt seine Forschungsgruppe mithilfe gentechnischer Mittel Enzyme in Mikroorganismen ein, die damit bestimmte Plastikverbindungen spalten oder zu grösseren Molekülen zusammensetzen können.

Mikroben bauen Kunststoffmoleküle

«Der Vorteil unseres Ansatzes liegt primär auf Kunststoffgemischen», sagt Blank. Mischfraktionen oder Mikroplastik aus der Umwelt etwa lassen sich von mehreren unterschiedlichen Enzymen, die eine Reihe weiterer wissenschaftlicher Partner beisteuern, zu verschiedenen Monomeren abbauen. In sogenannten Fermentationsapparaturen im Labor testet Blanks Forschungsgruppe solche Systeme bereits: Plastikstücke werden dort innerhalb weniger Stunden in wässrige Lösungen umgewandelt. Das Zusammenspiel zwischen chemischem Katalysator und Biokatalyse liefert in «catalaix» weitere

Möglichkeiten, das Plastik chemisch in seine Monomere zu zerkleinern. In einem zweiten Schritt, so Blanks Idee, können Mikroben diese Monomere aufnehmen und zu Biomolekülen zusammensetzen. «Wir stellen also dort neue Bausteine und Polymere her, wo es für Chemiker kompliziert wird, weil sie verschiedene Reaktionen nacheinander oder bei verschiedenen Bedingungen ablaufen lassen müssten – oder weil die Substrate unrein sind oder ihre Zusammensetzung schwankt», sagt Blank.

Alles anders im Reaktor

Im Labor nachzuweisen, dass sich mittels einer Katalyse oder eines bestimmten Enzyms eine Kunststoffverbindung abbauen lässt, ist bloss ein erster Schritt. Mindestens ebenso aufwendig ist es, daraus ein Verfahren zu entwickeln, das Unternehmen zum Recycling von Reststoffen nutzen können, die im täglichen Gebrauch anfallen. Für das «catalaix»-Team ist es deshalb wichtig, mit seinen Entwicklungen möglichst rasch hinaus aus dem Labor auf den Weg zur Anwendung zu kommen.

Ein Beispiel dafür ist Polyethylen. Im sogenannten Technikum, gleich angrenzend an das Aachener ITMC-Gebäude, finden die Forschenden ideale Möglichkeiten vor, um chemische Versuche in grösserem Massstab durchzuführen. Entlang eines schmalen Ganges finden sich diverse Hochdruckkammern. In einer hat ein Doktorand einen komplexen, rund zwei Meter breiten Reaktoraufbau installiert, in dem Polyethylen unter Zuga-

be von Ethylen mit einer katalytischen Reaktion in den Grundbaustein Propen verkleinert wird. Es ist die Weiterführung eines Plastikabbauversuchs, den die Forschenden kürzlich im Labor erfolgreich abgeschlossen haben. Statt nur wenige Milliliter wie im Labor haben die Autoklaven hier ein Fassungsvermögen von einem Liter.

Zwischen dem Laborexperiment und jenem im Technikum liegt aber mehr als nur ein Grössenunterschied. Denn mit der Grösse der Autoklaven verändern sich diverse Parameter. Das Rührwerk ist ein anderes, die Strömungsverhältnisse verschieben sich, die Durchmischung kann schwieriger werden. Es geht darum zu testen, ob unter vergrösserten Massstäben neue Probleme auftauchen. Doch nicht nur das: Im Hinblick auf eine industrielle Anwendung nehmen die Forschenden hier bereits erste Messungen vor, welche die Frage beantworten helfen, ob sich ein Verfahren wirtschaftlich bewähren wird: Wie viel Substrat kann umgesetzt werden? Welche Temperaturen und welcher Druck liefern die besten Resultate? Wie genau sehen die Reaktionsbedingungen aus?

Prozesse konstant halten

Solche Daten braucht es für die nächste Stufe: den Bau einer Pilotanlage, die von Verfahrenstechnikerinnen und Verfahrenstechnikern betrieben wird und die den Übergang zum technischen Massstab in einem industriellen Produktionsprozess markiert. Auch dieser Schritt ist bei «catalaix» mitgedacht, die Verfahrenstechnik ist ein wichti-



In diesem Versuchsreaktor in einer Hochdruckkammer wird Polyethylen unter Zugabe von Ethylen mit einer katalytischen Reaktion in den Grundbaustein Propen verkleinert.



Im Technikum des ITMC werden in Autoklaven chemische Versuche bei hohem Druck durchgeführt und Reaktorsysteme für katalytische Reaktionen im grösseren Massstab betrieben. Jürgen Klankermayer (Mitte) im Gespräch mit Mitarbeiterinnen.

ger Bestandteil des Projekts. Vom ITMC sind es nur wenige Schritte bis zum Gebäude der Aachener Verfahrenstechnik. Hier werden Anlagen gebaut, in denen Mengen von 50 bis 100 Litern oder mehr umgesetzt werden. Wichtig sind dabei nicht mehr nur die Abläufe unter optimalen Bedingungen. «Wir untersuchen beispielsweise auch die Regelung in den Anlagen – also, wie man Prozesse so betreiben kann, dass die Produktqualität eingehalten wird, auch wenn sich bestimmte Grössen oder die Qualität des Eingangsprodukts verändern», sagt Alexander Mitsos. Mitsos leitet den Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik an der RWTH Aachen und ist Mitglied des Kernteams von «catalaix».

Seine Forschungsgruppe konzentriert sich auf die Entwicklung von Methoden und Algorithmen zur Optimierung von chemischen und elektrochemischen Prozessen. Damit lassen sich insbesondere Vorhersagen treffen, welche den Chemikerinnen und Chemikern im Labor die Arbeit enorm erleichtern. So gelang es Mitsos' Team in der Vergangenheit bereits, mithilfe von maschinellem Lernen die Brennstoffeigenschaften von Molekülen aufgrund ihrer Atombindungen vorherzusagen.

Welche Herausforderungen auf dem Weg zur Marktreife eines chemisch-katalytischen Konzepts auftauchen können, zeigt sich auch in der Bioraffinerie, welche die Aachener Verfahrenstechnik betreibt. Hier stehen mehrere Demonstrationsanlagen, in denen Verfahren auf der Basis nachwachsender Rohstoffe im technischen Massstab ablaufen und geprüft werden. In einem der Demonstratoren wird etwa gerade Lignin zersetzt, einer der zentralen Bausteine von Holz. Hier können scheinbare Kleinigkeiten, die im Chemielabor nebensächlich sind, zu Stolpersteinen werden. Mal setzt eine Reaktion, die unter Zugabe eines korrosiven Reagenz abläuft, einem Stahlbehälter zu. Mal entpuppen sich Lösungsmittel, in denen Feststoffe verarbeitet werden, in den hier verwendeten Mengen als zu kostspielig.

Lebenszyklen und Wertschöpfungsketten

Die Anlagen in der Verfahrenstechnik liefern zudem weitere Daten für den nächsten Schritt auf dem Weg zur erfolgreichen Markteinführung eines neuen Produkts. Wie wird ein neuer Kunststoff oder ein Molekül hergestellt? Wie viel Energie und Ressourcen sind für die Produktion notwendig? Wie kann die dazugehörige Wertschöpfungskette aussehen? Das sind Fragen, deren Antwort Grit Walther und ihr Team kennen müssen, um ihre Arbeit zu machen. Walther leitet den Lehrstuhl für Operations Management der RWTH Aachen und gehört ebenfalls zum Kernteam von «catalaix». Ihre Spezialität ist es, Produktions- und Wertschöpfungsketten zu modellieren und zu bewerten.

Oft handelt es sich um aufwendige, komplexe Analysen. Zum Beispiel, wenn es darum geht, anhand des Lebenszyklus' eines Produkts dessen Auswirkungen auf und in der Umwelt abzuschätzen. Dafür werden Kriterien herangezogen wie CO₂-Emissionen, Versauerung, Eutrophierung, Landnutzung oder Wasserverbrauch. «Zum Teil», sagt Grit Walther, «arbeiten wir auch mit sozialen Kriterien.» Wenn ein Unternehmen beispielsweise in

Asien Plastikmüll einsammelt, stellt sich die Frage: Wie wirkt es sich auf die dortigen Arbeitsplätze oder die Akzeptanz aus, wenn die Aufreinigung nicht vor Ort, sondern in Europa erfolgt?

Für Walther ist es wichtig, dass die Laufzeit von «catalaix» mit zehn Jahren an die Herausforderung angepasst ist – und dass die Chemikerinnen und Chemiker um Jürgen Klankermayer und Regina Palkovits einige Produkte im Köcher haben, die bereits in grösseren Massstäben getestet werden. «Je skalierter die Ergebnisse, desto besser unsere Vorhersagen», sagt Grit Walther. «Wenn wir nur Laboraten haben, sind die Unsicherheiten unserer Berechnungen sehr gross.» Der Weg vom Labor bis zur Modellierung und Bewertung ist aber keine Einbahnstrasse, sondern ein iterativer Prozess, wie Grit Walther erklärt. «Wir erhalten aus dem Labor und aus der Verfahrenstechnik Daten, erstellen damit Modelle – und spielen diese zurück an die Chemikerinnen und Chemiker, die ihrerseits Anpassungen vornehmen, um Umweltauswirkungen zu verringern oder die Marktfähigkeit zu verbessern.»

Dieses Zusammenspiel ist so etwas wie die Essenz von «catalaix»: Innovative Forschung ist Teamarbeit – um die Wissenschaft und die Gesellschaft entscheidend voranzubringen, braucht es Expertinnen und Experten verschiedener Disziplinen, die einander kennen, vertrauen und gegenseitig unterstützen. Das WSS-Forschungszentrum in Aachen wird in den nächsten zehn Jahren ein Beispiel dafür geben, wie eine solche moderne Zusammenarbeit funktioniert.

WSS¹⁰⁰

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

«Wir wollen relevantes Wissen generieren»

Für Ulrich Rüdiger, den Rektor der RWTH Aachen, ist der Zuschlag für das Projekt «catalaix» ein grossartiger Erfolg. Laut ihm passt das WSS-Forschungszentrum perfekt in die Strukturen und die langfristige Strategie der Hochschule.



Prof. Dr. Ulrich Rüdiger,
Rektor der RWTH Aachen

Ulrich Rüdiger, was bedeutet die Förderzusage der WSS für die RWTH Aachen?

Sie ist ein grossartiger Erfolg – auf verschiedenen Ebenen. Die Transformation linearer Wertschöpfungsketten hin zu einer ganzheitlichen, mehrdimensionalen Kreislaufwirtschaft stellt eine Jahrhundertaufgabe dar. Ich bin überzeugt, dass das WSS-Forschungszentrum «catalaix» einen wichtigen Beitrag dazu leisten wird. Zudem zeigt diese Förderung, dass wir an der RWTH das notwendige Umfeld für solche Spitzenforschung liefern können. Und «catalaix» passt hervorragend in unsere Strukturen.

Inwiefern?

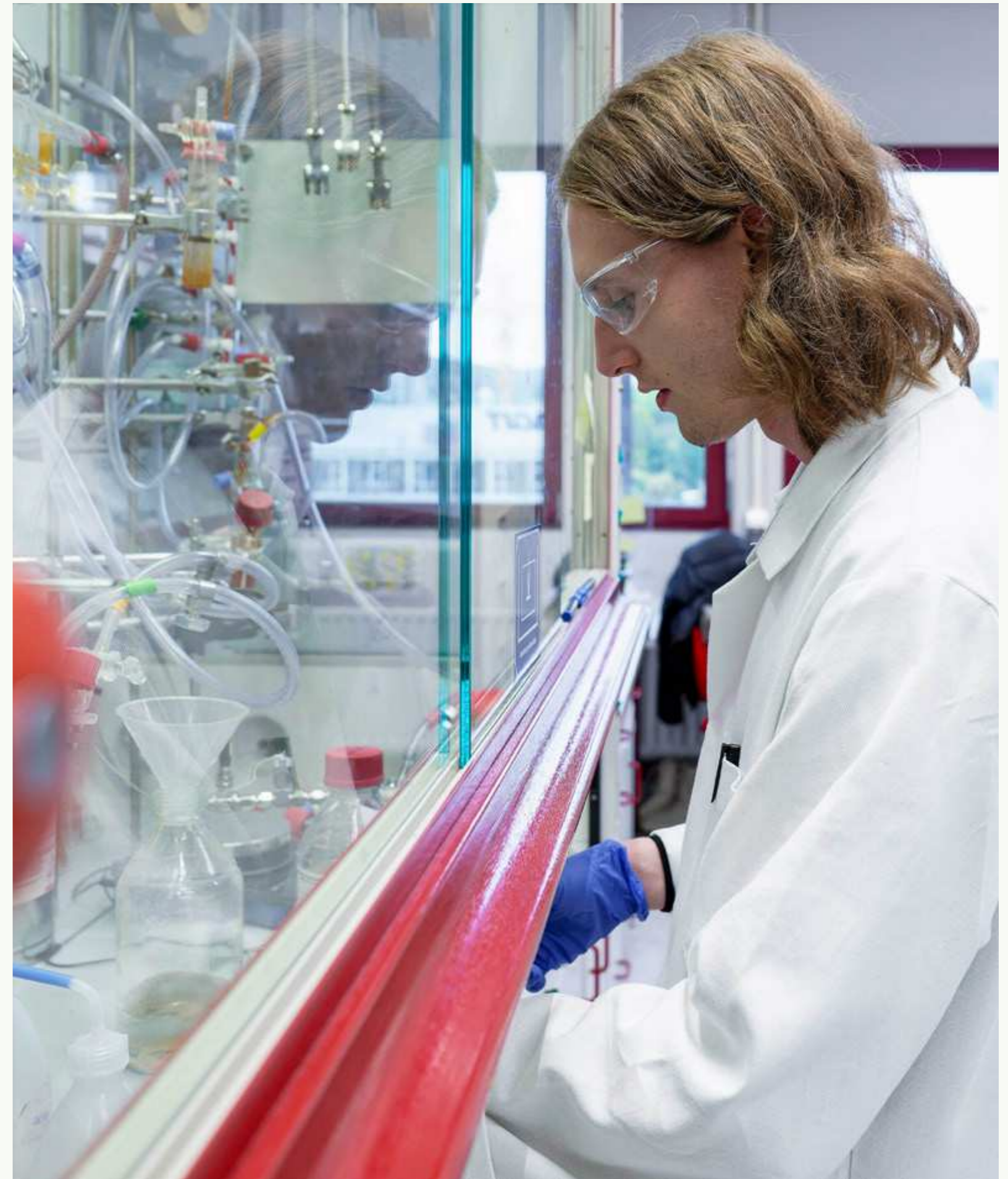
Wir haben mit unseren Profildbereichen mächtige Instrumente aufgebaut, in denen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen und Fakultäten zusammenarbeiten, um mit Ergebnissen aus exzellenter Grundlagen- und angewandter Forschung die Basis für gesellschaftlich relevante Innovationen zu schaffen. Sie koordinieren ihre Forschungstätigkeiten, nutzen modernste Infrastrukturen und bilden mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie grosse Forschungsnetzwerke. Wir wollen relevantes Wissen generieren und damit einen gesellschaftlichen Impact leisten. Wir wissen, dass wir dies nicht alleine tun können, sondern vertrauen immer auf unser starkes Netz von Partnern – wie in diesem Fall der WSS. Folgerichtig hatten wir unseren Exzellenzantrag mit den drei Begriffen Knowledge, Impact und Networks überschrieben.

Wie fügt sich das Forschungszentrum «catalaix» in die langfristige Strategie der RWTH Aachen ein?

Einerseits passt «catalaix» als Forschungszentrum hervorragend in die Art und Weise, wie wir interdisziplinäre Forschung verstehen. Andererseits hat sich die RWTH eine Nachhaltigkeitsstrategie mit zugehöriger Roadmap gegeben, die wir nun mit aller Konsequenz verfolgen – auch hier ist «catalaix» ein wichtiger Baustein, der unsere Ambitionen untermauert. Unser Ziel ist es, bis 2030 klimaneutral zu sein. Die Nachhaltigkeitsroadmap legt konkrete Massnahmen und Ziele fest, die auf die Strategie einzahlen und auf operativer Ebene umgesetzt werden. Diese gelten für sämtliche Wirkungsbereiche der Hochschule, also Governance, Studium und Lehre, Forschung und Betrieb. «catalaix» wird hier Vieles vereinen.

Was erwarten Sie persönlich für Resultate aus dem Zentrum?

Meine persönlichen Erwartungen an «catalaix» umfassen exzellente wissenschaftliche Ergebnisse, aber auch einen wertvollen Beitrag zur Strukturbildung an unserer RWTH. Das Jahrhundertprojekt fokussiert ein Jahrhundertthema in unserer Gesellschaft. Die RWTH hat sich den grossen globalen Herausforderungen verschrieben; eine kreislauffähige chemische Industrie ist dabei ein wesentlicher Faktor, wenn wir das Thema Klimawandel in den Griff bekommen wollen. Wir dürfen auf die Impulse aus «catalaix» sehr gespannt sein. Die hier gelebte Forschung, Innovation und auch Inspiration der beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler können massgeblich zur Bewahrung einer lebenswerten Welt für unsere Gesellschaft beitragen.



Im WSS-Forschungszentrum «catalaix» an der RWTH Aachen dreht sich alles um katalytische Reaktionen, die zum Beispiel in sogenannten Abzügen (links im Bild) durchgeführt werden.



Preisverleihung in einem festlichen Rahmen: Am 16. Juni 2023 empfingen der Stiftungsrat, der Wissenschaftliche Beirat und der Beirat der Familie der Werner Siemens-Stiftung im Hotel Astoria in Luzern die Finalisten-Teams im Wettbewerb um das «Jahrhundertprojekt». Die sechs Forschungsgruppen erhielten für ihre innovativen Ideen je einen WSS-Forschungspreis in der Höhe von 1 Million Schweizer Franken.

Die weiteren fünf Finalisten

Berlin

Eine neue Chlor-Technologie

München

Indoor-Weizen auf 100 Stockwerken

Zürich

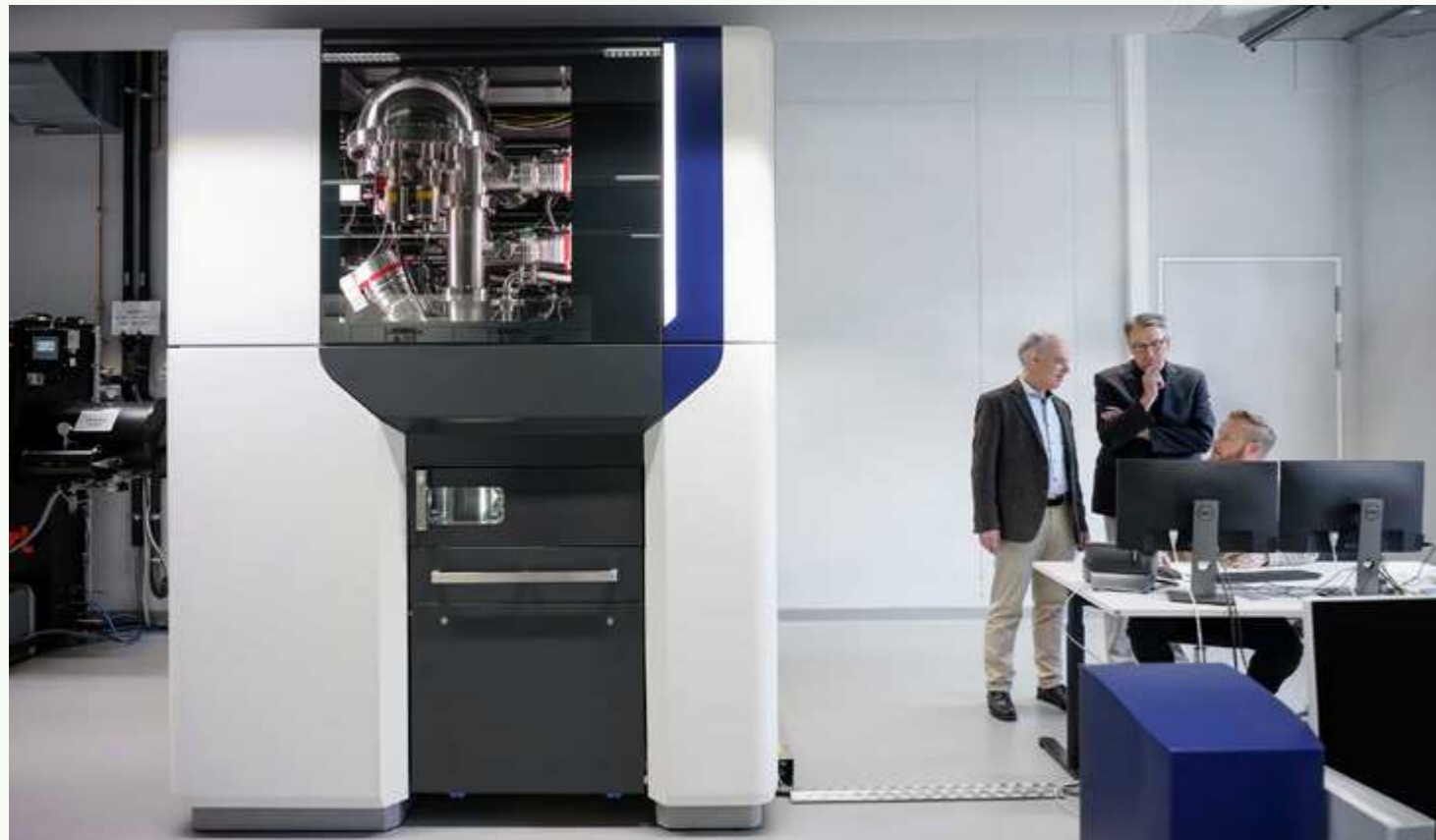
Der «goldene» Weg zum Wasserstoff

Freiburg D

Solarenergie auf höchstem Niveau

Göttingen

Techniken für eine nachhaltige Chemie



Forschende um Sebastian Hasenstab-Riedel (Mitte) von der Freien Universität Berlin haben eine neue Chlor-Technologie entwickelt. Auf ihrer Basis möchten sie diverse chemische Prozesse nachhaltiger machen.

Chlor-Technologie für Nachhaltigkeit

Eine Erfindung, viele Möglichkeiten: Das WSS100-Finalprojekt ChemSysCon schlägt vor, auf der Basis einer neuen Chlor-Technologie nicht nur die Lagerung und den Transport dieser Chemikalie sicherer zu machen, sondern auch Elektroschrott und Altlasten zu recyceln, Biomasse nutzbar zu machen und Batterien zu entwickeln.

Chlor ist viel mehr als das Desinfektionsmittel fürs Schwimmbad. Als wichtige Grundchemikalie wird das Element zur Herstellung von mehr als der Hälfte aller Produkte der chemischen Industrie gebraucht – zum Beispiel für Kunststoffe, Arzneimittel und Agrochemikalien. An die 100 Tonnen elementares Chlor (Cl_2) werden jährlich erzeugt, meist durch Elektrolyse aus Kochsalz (NaCl) und Wasser (H_2O).

Es ist ein äusserst energieaufwändiger Prozess – in Deutschland ist die Produktion von jährlich 5,5 Millionen Tonnen Chlor für ungefähr 2,3 Prozent des gesamten Stromverbrauchs verantwortlich. Zudem ist Chlorgas giftig und die heute übliche Speicherung sowie der Transport bergen trotz zahlreicher Regulierungen grosse Gefahren. Mitte 2022 etwa fiel ein Container mit Chlor beim Verladen auf ein Schiff im Hafen in Jordanien, sodass Chlorgas ausströmte. 13 Menschen starben, 250 wurden verletzt.

Forschende um Sebastian Hasenstab-Riedel von der Freien Universität Berlin haben eine Technik entwickelt, um Chlor gefahrlos zu lagern und zu transportieren. Dabei handelt es sich um eine sogenannte Ionische Flüssigkeit – ein bei Raumtemperatur flüssiges Ammonium-Salz, das grosse Mengen an Chlorgas aufnehmen und bei Bedarf leicht wieder abgeben kann.

«Grüner» Chlor und Wasserstoff

Die viel einfachere Lager- und Transportfähigkeit mithilfe dieser Flüssigkeit biete ganz neue Möglichkeiten für die sehr wichtige Basischemikalie Chlor, sagt Hasenstab-Riedel. Chlor wird sich in Zukunft problemloser mit erneuerbarem Strom herstellen lassen – einerseits in Mitteleuropa, wo die Chemieindustrie beispielsweise überschüssigen Solarstrom zur Produktion verwenden kann und das Chlor dann lagert, bis sie es braucht.

Andererseits im globalen Süden, wo man im grossen Mass mit günstig verfügbarer Solarenergie Chlor produzieren und von dort sicher transportieren könnte. Ein weiterer Vorteil: Bei der Chlorherstellung entstehen als Nebenprodukte Wasserstoff und Natronlauge, ebenfalls wichtige Energieträger und Basischemikalien.

Das ist aber längst nicht alles. «Die Ionische Flüssigkeit ist der Dreh- und Angelpunkt, um eine neue Chlortechnologie aufzubauen», sagt Hasenstab-Riedel. Er hat, gemeinsam mit einem Team der Freien Universität Berlin, der Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung (BAM) und des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung (IAP), für seinen WSS100-Antrag «ChemSysCon» vier Themenfelder ausgearbeitet, in denen die Chlorspeicherplattform einen gewichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Chemie leisten kann.

Das erste Themenfeld ist das Urban Mining von Hightech-Metallen. In Elektromotoren, Windturbinen oder Handys stecken grosse Mengen an wertvollen Metallen, etwa Seltenerdmetalle. «Bei diesen Rohstoffen ist Europa abhängig von Ländern wie China», sagt Hasenstab-Riedel. «Wir müssen Methoden entwickeln, um sie einfach aus den Produkten herauszulösen und zu recyklieren.» Die von ihm entwickelte neue Chlor-Technologie könnte dabei äusserst hilfreich sein, weil es sich um eine sehr reaktive Flüssigkeit handelt. Erste Versuche, erzählt Hasenstab-Riedel, hätten gezeigt, dass sich damit Hightech-Metallverbindungen schon bei niedrigen Temperaturen auflösen und die einzelnen Metalle abcheiden lassen.

Das zweite Themenfeld ist das Aufschliessen von Biomasse. Bei der Herstellung von Biodiesel etwa fallen jedes Jahr vier Millionen Tonnen Glycerin als Nebenprodukt an. Und bei der Papierproduktion entstehen jährlich 100 Millionen Tonnen Lignin als Reststoff. Beide Abfallprodukte, sagt Hasenstab-Riedel, liessen sich mithilfe von Ionischen Flüssigkeiten in wertvolle, funktionale Materialien umwandeln.

Altlasten und Batterien

Das dritte Themenfeld ist die Umwandlung von nicht mehr benötigten Materialien. «Mittels elektrochemischer Verfahren können wir das Chlor aus bestehenden Verbindungen ablösen und wieder in unserer Ionischen Flüssigkeit speichern», sagt Hasenstab-Riedel. Ein Beispiel einer solchen chlorhaltigen Altlast ist das in der EU längst

nicht mehr verwendete Insektizid Lindan, von dem europaweit bis zu sieben Tonnen in Abraumhalden liegen. Auch chlorierte Kunststoffe könnten sich für ein Recycling durch solche Dechlorierungen eignen.

Schliesslich ist die Chlor-Plattform ein aussichtsreiches Ausgangsmaterial für stationäre Speicherbatterien, etwa um Solar- oder Windenergie zu speichern. Die Ionische Flüssigkeit kann zwei Elektronen von Metallen wie Kalzium oder Aluminium aufnehmen und leicht wieder abgeben. «Wir haben schon vor Jahren gezeigt, dass solche Batterien aufbauend auf Metallhalogeniden wie Bromiden im grossen Massstab möglich sind», sagt Hasenstab-Riedel. Polychloride bieten aber noch bessere Möglichkeiten und sind deutlich billiger, weil Chlor häufiger ist als Brom.

Chlor könnte also schon bald auf verschiedenste Weise eine Schlüsselrolle spielen auf dem Weg in eine nachhaltigere Zukunft.

WSS¹⁰⁰

ChemSysCon:
Neue chemische
Systeme für die
Konversion
nachhaltiger
Ressourcen

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
1 Mio. Schweizer Franken
Projektleitung
Prof. Dr. Sebastian Hasenstab-Riedel,
Institut für Chemie und Biochemie,
Freie Universität Berlin

Weizen auf 100 Stockwerken

Weizenanbau auf engstem Raum: Das WSS100-Finalprojekt «Revolution der Nahrungsmittelproduktion» schlägt vor, das Prinzip des Vertical Farmings derart konsequent weiterzuentwickeln, dass sich bis zum 6000-fachen Ertrag gegenüber dem Freiland erzielen lässt.



Ein Team um Senthold Asseng (rechts) von der Technischen Universität München will in vertikalen Farmen Weizen günstig und umweltfreundlich produzieren – und so den Landverbrauch drastisch reduzieren.

Wie lässt sich die wachsende Weltbevölkerung ernähren, ohne natürliche Ressourcen wie Wasser oder Böden zu übernutzen und Ökosysteme zu zerstören? Das ist die Frage, die ein Forschungsteam um Senthold Asseng von der Technischen Universität München lösen will. Für seinen WSS100-Antrag hat es ein Konzept ausgearbeitet, das eine Nahrungsmittelproduktion in einer umfassend kontrollierten Umgebung vorschlägt – eine radikale Weiterentwicklung des heute bereits praktizierten Vertical Farmings.

«Beim heutigen Vertical Farming fallen enorm hohe Energie- und Arbeitskosten an, wirtschaftlich betreiben lässt es sich deshalb höchstens mit hochwertigem Blattgemüse wie Salat oder Kräutern», sagt Senthold Asseng. Um auch Grundnahrungsmittel wie Weizen zu vertretbaren Kosten Indoor zu produzieren, müsste man das System ganz neu denken, automatisieren und um ein Vielfaches effizienter machen. Mit einem solchen Ansatz, so Assengs Berechnungen, lassen sich auf 100 vertikal gestapelten Anbauflächen und mit fünf bis sechs Ernten pro Jahr bis zu 6000 Mal höhere Weizen-Erträge pro Quadratmeter Grundfläche erreichen als im Freiland.

Zwergweizen mit grossem Korn

Um das zu bewerkstelligen, braucht es Optimierungen auf allen Ebenen – angefangen bei der Pflanze selbst. Weizen liefert der Menschheit ein Fünftel aller Kalorien und ist die am besten untersuchte Nutzpflanze. Bislang wurde er aber auf Freilandverhältnisse gezüchtet, kaum je auf eine hoch kontrollierte Umgebung. «Weil wir in unserem System Temperatur, Licht, Feuchtigkeit, Nährstoffangebot und alle anderen Faktoren kontrollieren, können wir neu überlegen, wie die Pflanze aussehen muss», sagt Asseng.

So soll die Weizenpflanze möglichst kurz bleiben, damit sich in einer Produktionsanlage viele Anbauschichten übereinander stapeln lassen. «Auf dem Feld ist die Höhe des Weizens wichtig, um Unkräuter in Schach zu halten», sagt Senthold Asseng. «Aber in unserer Anlage werden wir keine Unkräuter haben.» Sein Team arbeitet bereits heute mit einer Weizensorte, wel-

che die US-Raumfahrtbehörde NASA in den 1990er-Jahren in Hinblick auf all-fällige Marsmissionen züchterisch verändert hatte. Statt ungefähr 1,1 Meter Höhe wie Freilandweizen erreicht sie gerade noch einen halben Meter. «Wir möchten den Weizen aber noch kürzer haben», sagt Asseng.

Ein anderer Ansatzpunkt ist das Wurzelwerk. Freilandweizen hat Wurzeln, die bis zwei Meter in den Boden reichen, um genügend Wasser und Nährstoffe aufzunehmen. Bei einem Indoor-Weizen, der alles bekommt, was er braucht, reichen wohl Wurzeln von zehn Zentimetern oder weniger, sagt Asseng. Die eingesparte Energie könnte die züchterisch optimierte Pflanze ins Korn stecken.

Ebenso wichtig wie die Zucht der geeigneten Sorte ist es, jene Bedingungen zu finden, bei denen die Pflanze unter geringstem Energieaufwand gedeiht. Auch diesbezüglich haben die Forschenden eine ganze Reihe von Ideen. Viele betreffen die Beleuchtung, die beim Vertical Farming fast die gesamten Energiekosten ausmacht. So könnte man den Pflanzen nur jenes Lichtspektrum anbieten, das sie für die Photosynthese benötigen. Ein vollautomatisches Fördersystem wiederum könnte die Lichtquellen auf und ab bewegen, dass sie immer nahe an den Pflanzen bleiben. «Denn die Lichtstärke und damit der Energieverbrauch nimmt quadratisch mit dem Abstand ab», sagt Senthold Asseng. Sein Ziel ist es, den Energiebedarf insgesamt um 93 Prozent zu senken.

In Scheunen und in der Wüste

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Zirkularität. Hocheffiziente Kreislaufsysteme sollen dafür sorgen, dass 95 Prozent weniger Wasser und 60 Prozent weniger Düngemittel verbraucht werden. Dazu beitragen könnten zum Beispiel spezielle Wandbeschichtungen zur Entfeuchtung. Oder die Zersetzung von nicht verwendeter Biomasse in Mineralien, die wieder als Dünger eingesetzt werden.

Um keine Energie zu verschwenden und eine automatisierte Produktion zu gewährleisten, ist ein optimiertes Gebäude ein Muss. Das Münchner Team schlägt vor, modulare Farmanla-

gen aus Holz zu bauen, die auch ökologisch nachhaltig sind. «Die kleinste Einheit wird zehn auf zehn Meter gross und fünf Schichten hoch», sagt Asseng. Solch kleine Einheiten könnten sogar in der Scheune eines Landwirts Platz finden und von einer Solaranlage auf dem Dach mit Energie versorgt werden. Grosse Anlagen mit bis zu 100 übereinander liegenden Anbauflächen wiederum werden eine Massenproduktion von Nahrungsmitteln sogar dort ermöglichen, wo wegen Wassermangel oder Schwermetallen in Böden bisher nicht an eine Landwirtschaft zu denken war.

Gelingt es, Weizen – und vielleicht später weitere Nahrungsmittel – auf kleinster Fläche und in bester Qualität zu produzieren, ist das ein Quantensprung für die weltweite Ernährungssicherheit. Und es senkt den Druck, hochindustrielle feld-basierte Landwirtschaft zu betreiben, was auch der Natur zugutekommt

WSS¹⁰⁰

Revolution der Nahrungsmittelproduktion

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
1 Mio. Schweizer Franken
Projektleitung
Prof. Dr. Senthold Asseng, Direktor Hans-Eisenmann-Forum für Agrarwissenschaften,
Technische Universität München



Ein Team um David Tilley und Greta Patzke von der Universität Zürich möchte in neuartigen Reaktoren Wasser direkt in Wasserstoff und Sauerstoff spalten – nur mit der Energie der Sonne.

Wasser spalten leicht gemacht

Aus Wasser und Sonnenlicht wird Wasserstoff – in einem Schritt: Das WSS100-Finalprojekt «Solare Wertstoffe» schlägt vor, mittels neuartiger Reaktoren nachhaltige Energieträger und Wertstoffe zu produzieren.

Wasserstoff gilt als Energieträger der Zukunft. Allerdings nur unter der Voraussetzung, dass er sich ohne den Einsatz von fossiler Energie herstellen lässt. Am elegantesten wäre es, Wasser direkt, nur mit der Energie des Sonnenlichts, in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Genau dieses Prinzip steht im Zentrum des WSS100-Antrags eines Teams um Greta Patzke und David Tilley von der Universität Zürich. Die Forschenden haben ein Konzept ausgearbeitet, um die solare Erzeugung von Wasserstoff und anderen Wertstoffen zur Marktreife zu bringen.

Das Team konzentriert sich in seiner Forschung auf die Herstellung von sogenannten Solar-Particulate-Panel-Reaktoren (SPP-Reaktoren). Das sind, vereinfacht gesagt, neuartige, kostengünstige «Solar-Panels», in denen Katalysatoren durch direkte Nutzung von Sonnenlicht Wasserstoff erzeugen. Dieser photokatalytische Ansatz wird auch als «goldener» Weg zur Herstellung von Solarbrennstoffen bezeichnet, der den «grünen» Weg der Verwendung weiterführt.

«Obwohl dieses Konzept bereits seit 100 Jahren weltweit Forschende fasziniert, steht der kommerzielle Durchbruch noch aus», sagt Greta Patzke. Studien zeigten jedoch, dass die solare Wasserstofferzeugung mittels solcher Katalysatoren heute wirtschaftlich konkurrenzfähig mit Wasserstoff sein kann, der unter Einsatz von fossiler Energie produziert wird. Das Team hat bereits verschiedene Katalysatoren entwickelt, welche die Wasserspaltung enorm beschleunigen und effizienter machen. Und sie sind überzeugt, dass weitere, deutliche Steigerungen möglich sind.

Demonstration im Reaktor

Dazu erforschen sie neue Photokatalysatoren, die aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut sind: solche aus Hightech-Halbleitern und solche aus Graphen-ähnlichen Kohlenstoffnitriden. Letztere sind insbesondere auch deshalb attraktiv, weil sie aus Kohlenstoff und Stickstoff bestehen – zwei der häufigsten chemischen Elemente. Denn wichtig ist nicht nur die Umwandlungseffizienz. Die Panels sollen lange einsetzbar bleiben und

die Katalysatoren aus möglichst breit verfügbaren, kostengünstigen und umweltfreundlichen Grundstoffen bestehen – ganz nach dem Konzept «Benign by Design».

Die Forschenden möchten mit Demonstrationsreaktoren von jeweils mindestens 100 Quadratmetern Grösse aufzeigen, dass die «goldene» Wasserstoffproduktion technologisch funktioniert. Darauf aufbauend sollen die SPP-Reaktoren aber weiterentwickelt werden. «Wir können mit demselben Prinzip, aber anderen Reaktoren, den erzeugten Wasserstoff, CO₂, Biomasse und andere Ausgangsstoffe in weitere wertvolle solare Basischemikalien umwandeln», sagt David Tilley. Beispiele sind Düngemittel oder erneuerbare Bausteine für die Kunststoffindustrie.

Herausforderungen auf dem Weg dorthin gibt es viele. Eine davon ist die Abtrennung und Reinigung des Wasserstoffs. Dazu plant das Forschungsteam die Weiterentwicklung einer neuen Technik, die auf Hydridkompressoren beruht: Wasserstoff wird bei niedriger Temperatur und tiefem Druck an modifizierte Metallhydride angelagert. Hat dieses System seine Sättigung erreicht, werden die Hydride erhitzt und setzen bei hohen Drücken reinen Wasserstoff frei.

Die KI hilft mit

Die Entwicklung neuartiger Technologien geht stets einher mit wirtschaftlichen, sozialen und Umweltrisiken. Und gerade solche Fragen sind oft dafür verantwortlich, dass aussichtsreiche Forschungsprojekte in der Umsetzung scheitern. Das Zürcher Team will deshalb ein allumfassendes, zukunftsweisendes Konzept zur Entwicklung neuer Technologien etablieren. Das reicht von der Wirtschaftlichkeit über internationale Verflechtungen und Auswirkungen auf Ökosysteme bis zur Akzeptanz durch Bürgerinnen und Bürger.

Um diese komplexen Beurteilungsfragen kümmern sich eigene Forschungsteams. Sie untersuchen unter anderem, ob die für die SPP-Reaktoren entwickelten Hightech-Materialien auf ihrem Weg langfristig doch Risiken für Mensch und Umwelt darstellen kön-

nen. Auch die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, die Ökobilanzen, Abhängigkeiten von Lieferländern für kritische Rohstoffe und die öffentliche Wahrnehmung werden von Anfang an unter die Lupe genommen.

Zum Einsatz kommt dabei unter anderem auch ein neues, durch künstliche Intelligenz gesteuertes Werkzeug. «Damit können wir alle Faktoren berechnen und gewichten», sagt Greta Patzke. Das hilft auch dabei, von Anfang an auf die richtigen Ausgangsmaterialien zu setzen. Schneidet zum Beispiel ein Katalysator-Material A in allen Bewertungsbereichen besser ab als Material B, werden die Forschenden es bevorzugen.

So soll es künftig gelingen, Wasserstoff und andere Wertstoffe unkompliziert und umweltfreundlich zu erzeugen – sie buchstäblich aus der Luft zu greifen.

WSS¹⁰⁰

Solare Wertstoffe: aus der Luft gegriffen

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
1 Mio. Schweizer Franken
Projektleitung
Prof. Dr. Greta R. Patzke, Departement für Chemie, Universität Zürich
Prof. Dr. David Tilley, Departement für Chemie, Universität Zürich
Prof. Dr. Stefan Seeger, Departement für Chemie, Universität Zürich
Prof. Dr. Kathrin Fenner, Departement für Chemie, Universität Zürich und Eawag

Höchste Effizienz für die Energiewende

Hocheffiziente Solarzellen, nahezu verlustfreier Stromtransport, innovative Energiespeicher: Das WSS100-Finalprojekt «Solarenergie» schlägt vor, diverse neue Technologien zu entwickeln, um die Energiewende zu beschleunigen.



Frank Dimroth (links) und Andreas Bett vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme und von der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg forschen an hocheffizienten Solarzellen.

Die Solarenergie boomt. Sie gilt als wichtigster Pfeiler eines zukünftigen CO₂-neutralen Energiesystems. Um den Energiehunger der Welt zu stillen, werden in Zukunft riesige Photovoltaik-Flächen benötigt. «Ab 2037 rechnen wir mit einem jährlichen Zubau von 3,4 Terawatt an neuen Solarmodulen. Das entspräche bei heutiger Technologie einer Modulfläche, die grösser ist als ein Drittel der Landesfläche der Schweiz», sagt Frank Dimroth vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg (D).

Das bedeutet nicht nur einen riesigen Flächen-, sondern auch einen enormen Material- und Energieverbrauch. Zumal es mit der Umwandlung von Sonnenlicht in Strom nicht getan ist, wie Andreas Bett vom ISE Freiburg und von der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg ergänzt. «Es braucht Systeme, um den Strom zu transportieren – oder um mit seiner Hilfe Energieträger wie Wasserstoff oder Synthesegase herzustellen.»

Ein Team um Dimroth und Bett hat für seinen WSS100-Antrag ein Konzept ausgearbeitet, um für eine nachhaltige Energiewende effizientere und ressourcenschonendere Technologien zu entwickeln. Ein erster Schwerpunkt liegt auf der Photovoltaik. Heutige Solarzellen bestehen meist aus kristallinem Silizium. Ihr Wirkungsgrad ist aus physikalischen Gründen auf unter 30 Prozent beschränkt und die Aufreinigung des Siliziums ist ein energieintensiver Prozess.

Ultradünne Solarzellen

Das Freiburger Team schlägt eine effizientere und ressourcenschonendere Alternative vor: die sogenannte III-V-Tandem-Photovoltaik. Bei ihr bestehen die Solarzellen aus mehreren Halbleiterschichten, die sich aus Elementen der dritten und fünften Gruppe des Periodensystems zusammensetzen; zum Beispiel Gallium, Indium, Arsen oder Phosphor. Weil jede der Schichten einen anderen Anteil des Sonnenlicht-Spektrums aufnimmt, erreichen solche Tandemsolarzellen sehr hohe Wirkungsgrade. «Man kann mit ihnen ungefähr ein Drittel mehr Leistung pro Fläche herausholen», sagt Frank Dimroth.

Gleichzeitig sollen diese Solarzellen ultradünn werden, um mit extrem geringen Materialmengen auszukommen. Eine heutige Silizium-Solarzelle ist etwa 150 Mikrometer dick; künftige III-V-Halbleiter sollen noch 1,5 Mikrometer messen. Hierfür haben die Forschenden eine Methode entwickelt, mit der sich die dünnen Halbleiterschichten von ihrem Wachstumssubstrat ablösen lassen. So kann dieses mehrfach wiederverwendet werden, was wertvolle Ressourcen einspart.

Besonders vielversprechend ist die Kombination der III-V-Halbleiter-Tandemsolarzellen mit einer weiteren Technik, der hochkonzentrierenden Photovoltaik (CPV). Dabei verstärken kostengünstige Linsen das Sonnenlicht tausendfach, bevor es durch eine winzige Solarzelle in Strom umgewandelt wird. «Wir brauchen dafür zwar etwas Silikon auf Glas, um die Linsen zu bauen, aber dafür 1000 Mal weniger Halbleitermaterial», sagt Andreas Bett. Das Freiburger Team hat kürzlich eine solche CPV-Solarzelle hergestellt, die unter 665-fach konzentriertem Sonnenlicht einen Wirkungsgrad von 47,6 Prozent erreicht – ein Weltrekord. Insgesamt, schätzen die Forschenden, lässt sich der Energieverbrauch für die Solarzellen-Produktion mit den neuen Techniken um 75 Prozent verringern.

Wasserstoff und Synthesegase

Wer Solarstrom produziert, muss diesen auch ins Verteilnetz einspeisen können. Dieser Stromtransport ist ein zweiter Schwerpunkt des Teams. Eine Idee ist es, auf die Transformation von Gleichstrom in Wechselstrom zu verzichten und erhöhte Spannungen in Solarzellen, Modulen und Leitungen zu realisieren. «Das vermindert die Widerstandsverluste, man kann dünnere Kabel verwenden», erklärt Andreas Bett. So lassen sich grosse Mengen von Kupfer und Aluminium einsparen, insbesondere wenn die Nutzung der Energie wiederum Gleichstrom benötigt, so wie es zum Beispiel bei der Elektrolyse der Fall ist.

Gerade die hochkonzentrierende Photovoltaik funktioniert dort sehr gut, wo die Sonneneinstrahlung intensiv ist – also etwa im südlichen Afrika oder in Australien. Solche Länder eig-

nen sich auch bestens, um die günstige Sonnenenergie in Wasserstoff oder andere Energieträger umzuwandeln, die gut transportier- und speicherbar sind.

Hier setzen die Forschenden aus Freiburg weitere Schwerpunkte. Ihr Ziel ist es einerseits, neue Systeme für die Wasserstoffherzeugung zu erforschen, allen voran Elektrolyseure mit einer ionenleitenden Membran, welche die Wasserstoffseite von der Sauerstoffseite trennt. «Wir werden neue Polymere für stabile, umweltfreundlichere Membranen entwickeln und verbinden diese mit Katalysatoren aus unkritischen Metallen wie Nickel und Eisen», sagt Frank Dimroth.

Nachgelagert sollen nachhaltige und energiesparende Syntheseprozesse entwickelt werden, die Moleküle wie Ammoniak, Methanol oder Dimethylether erzeugen. Mit solchen Molekülen lässt sich Wasserstoff – und damit Energie – speichern und über weite Strecken transportieren.

Höchste Effizienz, Hochspannung und innovative Technologien: Das sind die Komponenten, mit denen die Freiburger Forschenden die Energiewende beschleunigen wollen.

WSS¹⁰⁰

Höchsteffiziente Erzeugung von Strom und Wasserstoff aus Solarenergie

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
1 Mio. Schweizer Franken

Projektleitung

Dr. Frank Dimroth, Leiter Abteilung III-V-Photovoltaik und Konzentratortechnologie, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Freiburg
Prof. Dr. Andreas Bett, Institut für Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Leiter Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Freiburg



Ein Team um Lutz Ackermann (Mitte) an der Georg-August-Universität Göttingen will Katalysen – die Reaktionsbeschleuniger der Chemie – besser, schneller und «grüner» machen. Das könnte die gesamte Industrie revolutionieren.

Nachhaltige Katalysen

Direkte Synthesewege, Katalysatoren aus häufigen Metallen, Strom und Licht statt Gas und Öl: Das WSS100-Finalprojekt RenewSusCat schlägt vor, die chemische Industrie mithilfe diverser innovativer Techniken nachhaltig zu machen.

Rund 30 Prozent des industriellen deutschen Energieverbrauchs entfallen auf die chemische und die pharmazeutische Industrie – ein grosser Teil ist fossile Energie. Ein Team um Lutz Ackermann von der Georg-August-Universität in Göttingen hat für seinen WSS100-Antrag ein Konzept ausgearbeitet, um diese beiden Wirtschaftszweige nachhaltiger zu machen. Im Zentrum stehen Katalysen – Techniken, welche die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen erhöhen und sogar komplett neue Reaktionen ermöglichen. An nahezu neun von zehn industriellen chemischen Prozessen sind Katalysen beteiligt.

Ackermanns Projekt «RenewSusCat» schlägt zwei komplementäre Forschungsstränge für die Dekarbonisierung der chemischen Industrie vor: Zum einen die Entwicklung neuer, innovativer Katalysen, die weniger Energie und Rohstoffe verbrauchen und bei denen weniger Abfallprodukte entstehen. Zum anderen den Einsatz von erneuerbarer Energie statt fossiler Energie für solche Reaktionen.

Um chemische Synthesen effizienter zu machen, verfolgen die Forschenden beispielsweise den Ansatz, die Anzahl der Zwischenschritte zu verringern. «Um einen typischen Arzneiwirkstoff herzustellen, benötigt man heute häufig mehr als zehn Syntheseschritte», sagt Lutz Ackermann. Anhand mehrerer Beispiele haben er und seine Forschungsgruppe nachgewiesen, dass sich solch langwierige Herstellungsprozesse vermeiden lassen, wodurch gleichzeitig der Einsatz chemischer Reagenzien aus fossilen Quellen minimiert wird.

Weniger Lösungsmittel

Eine Schlüsselstelle nimmt dabei eine Reaktions-Technik namens C-H-Aktivierung ein. Bindungen zwischen Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) bilden das Rückgrat organischer Moleküle. Allerdings ist die Bindung zwischen diesen beiden sehr häufigen Atomen stark, es ist deshalb schwierig, sie selektiv aufzubrechen. Gelingt es aber, ermöglicht es das direkte Andocken von funktionalen Gruppen, welche die Eigenschaften des Moleküls entscheidend verändern.

Es handelt sich um ein enorm breit anwendbares Werkzeug, weil Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen derart allgegenwärtig sind. So haben Ackermann und sein Team gezeigt, dass sich aus einer Vorläuferstruktur in jeweils nur einem Umwandlungsschritt mehrere mögliche Wirkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften herstellen lassen. «Indem wir die Anzahl der Syntheseschritte drastisch verringern, sparen wir nicht nur Zeit, sondern auch grosse Mengen an Lösungsmitteln und chemischen Abfallprodukten», sagt Ackermann.

Um chemische Prozesse möglichst klimaneutral zu machen, wird es aber zusätzlich unabdingbar sein, die dafür benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen zu gewinnen. «Heute werden die meisten Reaktionen thermisch, unter Erhitzung durchgeführt, also mit Gas und Öl», sagt Lutz Ackermann. Als Alternative setzt er auf zwei Methoden: die Elektrokatalyse und die Photokatalyse.

Wasserstoff als Nebenprodukt

Bei der Elektrokatalyse wird Strom als Treiber für chemische Aktivierungsprozesse benutzt. «Normalerweise lassen sich solche Reaktionen bei Raumtemperatur durchführen», sagt Lutz Ackermann. Chemische Reagenzien werden durch Protonen und Elektronen ersetzt. Und die Synthese von Molekülen für die Medizin oder den Pflanzenschutz wird gekoppelt mit der gleichzeitigen Produktion von Wasserstoff als einzigem Nebenprodukt. Der Wasserstoff kann als nachhaltiger Energieträger weiterverwendet werden.

«Diese Koppelung macht solche Synthesen auch wirtschaftlich höchst attraktiv», sagt Ackermann. Eine seiner langfristigen Ideen ist es, mittels Elektrokatalysen den weltweiten Bergen von Plastikmüll zu Leibe zu rücken – also Kunststoffe wie Polyethylen oder Polystyrol unter Abscheidung von Wasserstoff zu wiederverwendbaren Polymeren abzubauen.

Die Photokatalyse wiederum nutzt die Energie des Lichtes, um chemische Reaktionen mit einem Katalysator zu beschleunigen. Heute, erzählt Ackermann, werde dazu in der Forschung

oft mit besonderen LED-Quellen gearbeitet. Ziel ist es, solche Reaktionen dereinst mit Sonnenlicht antreiben zu können.

Daneben hat «RenewSusCat» eine ganze Reihe von weiteren Pfeilern im Köcher, um chemische Prozesse nachhaltiger zu machen. Ein Beispiel: das Ersetzen von kostbaren, oft toxischen Katalysator-Metallen wie Palladium, Rhodium oder Iridium durch günstigere, besser verfügbare und weniger toxische Materialien wie Nickel, Kupfer, Mangan oder sogar Eisen.

Oder der Einsatz von Softwareanwendungen, die mittels künstlicher Intelligenz chemische Reaktionen bewerten. Damit lässt sich voraussagen, welche neuen Katalysatoren und Synthesewege erfolgversprechend und nachhaltig sind. «Die molekularen Datenwissenschaften werden oft noch stiefmütterlich behandelt», sagt Lutz Ackermann. Aber er ist überzeugt: Sie werden mithelfen, dass die Chemie in Zukunft die ganze Klaviatur ihrer Möglichkeiten ausschöpfen kann, um nachhaltige Produkte herzustellen.

WSS¹⁰⁰

RenewSusCat: Erneuerbare Energie für nachhaltige Katalyse

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
1 Mio. Schweizer Franken
Projektleitung Prof. Dr. Lutz Ackermann,
Wöhler-Forschungsinstitut für Nachhaltige
Chemie, Institut für Organische und
Biomolekulare Chemie, Georg-August-
Universität Göttingen

WSS¹⁰⁰



Welche Energie hat Zukunft?

Die Welt muss wegkommen von Erdöl, Gas und Kohle. Dazu braucht es neue Ideen zur Nutzung alternativer Energien. Und es braucht Strategien, um diesen gewaltigen Umbau gesellschaftlich voranzutreiben. Drei innovative Forschungsprojekte, die von der Werner Siemens-Stiftung unterstützt werden, arbeiten an diesen Herausforderungen.

Die Fakten sind hinlänglich bekannt: Auf der Erde wird es immer wärmer. Weltweit liegen die Temperaturen heute 1,2 Grad über jenen vor 150 Jahren. In Mitteleuropa ist die Erwärmung gar noch stärker. Verantwortlich dafür ist der Mensch: Er setzt Unmengen an Treibhausgasen frei – vor allem durch das Verbrennen von Kohle, Öl und Gas, um Energie zu gewinnen.

Gelingt es nicht, diese Erwärmung zu stoppen, wird dies dramatische Folgen haben: Hitzewellen, Waldbrände und Stürme werden häufiger und intensiver, Eiskappen und Gletscher schmelzen, ganze Landstriche werden unbewohnbar wegen Überflutungen oder Trockenheit. Deshalb braucht es eine Energiewende: weg von den fossilen Energieträgern, hin zu erneuerbaren Energien wie Wasser- und Solarkraft, Windenergie, Erdwärme und Bioenergie. Die Zeit drängt: Im Pariser Klimaabkommen vereinbarte die Weltgemeinschaft das Ziel, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad und möglichst auf 1,5 Grad zu begrenzen. Um dies zu erreichen, müssen die Treibhausgasemissionen bis 2030 halbiert und bis 2050 auf Netto-Null gesenkt werden.

Eine solche Transformation sei unglaublich anspruchsvoll, sagt Ottmar Edenhofer, Co-Direktor und Chefökonom am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und Leiter des FutureLabs CERES, das von der Werner Siemens-Stiftung seit 2022 gefördert wird. «Es bedarf eines Portfolios an erneuerbaren Energieformen, Strategien und Technologien.» Edenhofer unterteilt die Herausforderungen der Energiewende in drei grosse Schritte: Der erste ist die Dekarbonisierung des Stromsektors. Der Strom muss künftig aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden statt aus fossilen Trägern.

Der zweite Schritt ist die Umstellung des Transport- und Wärmesektors. «Dort geht es um direkte und indirekte Formen der Elektrifizierung», sagt Edenhofer. «Direkt» bedeutet zum Beispiel der Ersatz von Ölheizungen durch strombetriebene Wärmepumpen oder von Benzin- durch Elektroautos. «Indirekt» bedeutet, weiterhin Kraftstoffe zu verwenden, diese aber nachhaltig zu produzieren – etwa «grünen» Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe. Der dritte Bereich schliesslich sind Negativ-Emissionstechnologien, also die Abscheidung und



Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre. Es werde auch in Zukunft Treibhausgasemissionen geben, die sich nicht vermeiden liessen, etwa in der Industrie oder der Landwirtschaft, sagt Edenhofer. «Diese werden wir kompensieren müssen, um die Klimaziele einzuhalten.»

Noch seien längst nicht alle für diese Transformation notwendigen Techniken vorhanden, sagt Edenhofer. «Der ab und zu geäußerten Aussage, mit ein bisschen politischem Willen gehe das schon, würde ich nicht zustimmen.» Gerade die CO₂-Speichertechniken seien mitnichten in genügendem Umfang vorhanden. Auch bei den synthetischen Kraftstoffen oder bei den Speicher- und Batterietechnologien gebe es noch viel Forschungsbedarf.

Fortschritt ist kaum prognostizierbar

Zwar gebe es in allen Bereichen Techniken mit viel Potenzial, sagt Edenhofer. Aber welche sich durchsetzen könnten, sei praktisch unmöglich zu prognostizieren. Er illustriert dies mit einem Beispiel aus dem Uno-Klimarat IPCC. Edenhofer amtierte von 2008 bis 2015 als Co-Vorsitzender der Arbeitsgruppe III des IPCC. «Wir berechneten damals viele Szenarien, welche Energietechnologien bei den Erneuerbaren die besten sein würden», erzählt Edenhofer. Aber nur ein Szenario, von Greenpeace, rechnete mit einem extremen Photovoltaik-Ausbau. Edenhofer nahm es in den Bericht auf, denn es hatte ein Peer-Review-Verfahren durchlaufen. Viele Leute hätten sich empört, weil sie es für unrealistisch hielten, erzählt Edenhofer. «Aber wenn wir heute schauen, dann kam dieses Extremszenario als einziges in die Nähe der tatsächlichen Entwicklung. Alle anderen haben die Photovoltaik masslos unterschätzt.»

Deshalb glaube er, dass Politik und Gesellschaft nicht zu stark versuchen sollten, den technischen Fortschritt zu prognostizieren. «Wir sollten vielmehr die Rahmenbedingungen schaffen, um einen Wettbewerb für die besten Technologien zu ermöglichen.» Hier tue Europa momentan zu wenig für seinen Geschmack. Ihm schwebte eine Innovationsbehörde vor, die Prioritäten setze in der Grundlagenforschung und Auktionen veranstalte, um Technologien zum Durchbruch zu verhelfen.

Auch für Domenico Giardini, Professor für Seismologie und Geodynamik an der ETH Zürich, ist längst noch nicht klar, welche Technologien sich in Zukunft durchsetzen werden. Klar sei aber, dass wir in absehbarer Zukunft viel mehr Strom benötigen als bisher. «Noch vor einigen Jahren gab es in der Politik Stimmen, die sagten, wir könnten den zunehmenden Stromverbrauch durch Stromsparen kompensieren. Heute wissen wir, das funktioniert nicht.» Diese zusätzlichen Strommengen müssten nicht nur produziert, sondern auch verteilt und gespeichert werden.

Denn gerade die Solarenergie erzeugt viel mehr Strom im Sommer als im Winter. «Doch im Winter verbrauchen wir viel mehr Strom», sagt Giardini. «Wir brauchen also Wege, um Energie zu speichern – und um mehr Energie im Winter zu produzieren.» Hier komme die Geothermie

ins Spiel. Diese Technik habe zwei Vorteile: Zum einen ist das Energiepotenzial, das in der Erde steckt, schier unerschöpflich. In fünf Kilometern Tiefe herrschen Temperaturen von 160 bis 200 Grad Celsius – egal ob Sommer oder Winter. Wer es schafft, dieses Reservoir anzuzapfen, hat einen ganzjährigen Energielieferanten gewonnen. Zum anderen können Gesteinsschichten nicht nur Wärme abgeben, sondern auch Wärme aufnehmen und speichern. «Vor zehn Jahren hatte das noch keine Priorität, aber heute ist die Wärmespeicherung in der zukünftigen Energiestrategie ein enorm wichtiges Thema», sagt Giardini. Die Speicherkapazitäten durch Batterien oder Stauseen würden langfristig nicht genügen. «Deshalb untersuchen wir, ob wir die Erde wie eine Energiebank nutzen können: Im Sommer leiten wir Energie in die Tiefe, im Winter nehmen wir sie wieder zurück.»

Domenico Giardini leitet das BedrettoLab, eine einzigartige, unterirdische Forschungsinfrastruktur tief im Gotthardmassiv im Kanton Tessin. Mit der Unterstützung der Werner Siemens-Stiftung konnte ein ehemaliger Belüftungstollen des Furka-Tunnels der Matterhorn Gotthard Bahn zu einem Untergrundlabor für die Tiefengeothermie umgebaut werden. Inzwischen dient das Labor nicht nur der ETH Zürich, sondern auch einer ganzen Reihe von Forschungs- und Industriepartnern aus aller Welt als ideale Plattform, um die Tiefengeothermie sicher und unter realen Bedingungen zu erproben.

Beben besser verstehen

Zum einen werden hier neue geothermische Technologien getestet. Zum anderen versuchen die Forschenden besser zu verstehen, wie und unter welchen Bedingungen Erdbeben entstehen. Die Erdbebensicherheit sei ein Thema, das die Geothermie ständig begleite, sagt Giardini. «Immer wenn wir unterirdisch bauen, verändern wir Spannungen in der Erdkruste – das kann sich in Erdbeben äussern.» Das BedrettoLab eignet sich hervorragend dafür, solche Veränderungen im Fels unter realen Bedingungen zu messen, befindet es sich doch bereits mehr als einen Kilometer unter der Erdoberfläche.

Für die Messungen ging das BedrettoLab-Team sogar noch tiefer: Die Forschenden bohrten mehrere Löcher bis zu 400 Meter unterhalb des Tunnellabors in die Tiefe. In diese Bohrlöcher zementierten sie Hunderte von Sensoren, die Temperatur- und Spannungsänderungen sowie Felsverformungen messen. Für ihre Experimente injizieren sie nun in ein Bohrloch Wasser – und können dank der Sensoren genau verfolgen, wie solche Stimulationen Mikrobeben auslösen. «Bisher hatten wir ein sehr unscharfes Bild davon und dachten, die Beben würden aus einer Art Wolke von kleinen Beben bestehen», sagt Giardini. «Aber mit den Daten, die wir in unmittelbarer Nähe der Mikrobeben sammeln, haben wir herausgefunden, dass es sich um grosse, 80 bis 100 Meter lange Verwerfungen handelt. Diese bewegen sich in Form von kleinen Beben – es ist ein sehr zerklüfteter Fels.» Dank dieser Erkenntnisse lasse sich nun viel besser modellieren, was passiert, wenn man Wasser in den Fels presst.

Das Wissen um solche Felsbewegungen ist auch wichtig für den neuesten Aspekt des BedrettoLabs: Gemeinsam mit dem Energieversorger des Kantons Tessin, der Azienda Elettrica Ticinese, und unterstützt vom Bundesamt für Energie, haben die Forschenden ein Projekt zur saisonalen Energiespeicherung lanciert. Die Grundidee ist es, künftig im Sommer mit nachhaltig gewonnener Energie, zum Beispiel aus der Photovoltaik, Wasser aufzuheizen und im Fels zu speichern.

«Es ist ein Demonstrationsprojekt», erklärt Giardini. «Wir werden im nächsten Sommer beginnen, bis 80 Grad warmes Wasser in den Fels einzuspeichern und die Folgen zu untersuchen.» Wichtige Fragen für ihn und sein Team sind, was bei der Wasserinjektion und -entnahme passiert. Gibt es Beben? Wenn ja, lassen sie sich mit kürzeren Speicherintervallen oder einer vorsichtigeren Einspritzung unter Kontrolle halten? Verändert das heisse Wasser längerfristig das Gestein? Im folgenden Winter wird sich dann zeigen, wie viel Energie sich aus diesem Reservoir wieder herausnehmen und zur Wärmeengewinnung nutzen lässt.

Das BedrettoLab-Team steht zudem – unterstützt vom europäischen ERC-Programm – vor der Herausfor-

derung, einen neuen Seitentunnel zu bauen. Die Baustelle startete im Herbst 2023 und wird das Team die nächsten drei Jahre beschäftigen, denn es werden innerhalb verschiedener Bauabschnitte immer wieder Sprengungen durchgeführt. Und zwischendurch muss weiterhin geforscht werden. Der neue Seitentunnel verläuft parallel zu einer grossen Verwerfung. Aus ihm werden die Forschenden nun weitere Bohrlöcher hin zu dieser tektonischen Bruchstelle bohren und darin weitere Messinstrumente installieren. «Auf diese Weise erhalten wir noch mehr Kenntnisse darüber, was in der Verwerfung passiert, wenn sich der Fels zu bewegen beginnt, und wie Beben starten und stoppen», sagt Giardini.

Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff speichern?

Das Interesse an geothermischer Energiegewinnung und an der Speicherung von Überschussenergie, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff tief unter der Erdoberfläche ist gross. Und heisses Wasser ist nur ein mögliches Energietransportmedium. Martin O. Saar, Werner Siemens-Stiftungs-Professor an der ETH Zürich, untersucht mit seiner Forschungsgruppe für Geothermale Energie und Geofluide weitere Ansätze. Eine seiner Ideen ist die Kombination von geothermischer Energiegewinnung mit der CO₂-Speicherung. Dieses Verfahren, CO₂-Plume Geothermal (CPG) genannt und von Saar miterfunden, könnte zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen.

Wird das Klimagas nämlich zweieinhalb bis fünf Kilometer unter dem Boden gelagert, erwärmt es sich auf mindestens 100 Grad Celsius. Diese Wärme will Saar mit einem Kreislauf nutzen: Das erhitzte CO₂ wird an die Oberfläche gebracht, treibt dort direkt Turbinen an, wird abgekühlt – und dann wieder im unterirdischen Lager versenkt, so dass letztlich alles anfänglich injizierte CO₂ permanent gespeichert wird. CO₂ sei viel weniger zähflüssig als Wasser und dehne sich bei der Erwärmung viel stärker aus als dieses, sagt Saar. Das führe zu einer grösseren Wärmeproduktionsrate, die meist den Nachteil der geringeren Wärmekapazität von CO₂ gegenüber Wasser mehr als ausgleiche. «Man kann deshalb damit auch Gesteinsschichten wirtschaftlich nutzen, die eine geringe Durchlässigkeit und Temperatur haben. Und es steigt praktisch von alleine im Produktionsbohrloch hoch, wenn es genügend erwärmt wurde.» Insgesamt, sagt Saar, könne CPG die Energieausbeute zur direkten Wärmenutzung und zur Stromerzeugung verdoppeln bis verdreifachen.

Der Forscher hat nach über zwölf Jahren Forschung und Entwicklung kürzlich das «CPG Konsortium» gegründet, ein gemeinschaftliches Industrie-Akademie-Konsortium mit zurzeit zwei grossen Mineralölfirmen als zahlenden Mitgliedern. Ziel ist es, die Methode in einem gross angelegten Pilotprojekt zu untersuchen und zu kommerzialisieren.

Ein anderes Zukunftsprojekt Saars ist die Injektion und Umwandlung von Wasserstoff im Untergrund. «Die Idee ist einfach, die Umsetzung nicht», sagt der Forscher. Nachhaltig produzierter, «grüner» Wasserstoff und CO₂

werden gemeinsam mit ganz bestimmten Mikroorganismen in den Untergrund gebracht. Die winzigen Lebewesen nutzen die dort vorhandene Wärme, um die beiden Moleküle in Methan umzuwandeln. Bei Bedarf wird dieses Gas an die Erdoberfläche geholt und zur Energiegewinnung genutzt. «Methan ist ein guter und recht sicherer Energiespeicher», sagt Saar. «Sein riesiger Vorteil gegenüber dem ursprünglichen Wasserstoff ist, dass es sich über die bereits bestehende Erdgas-Infrastruktur verteilen und nutzen lässt und dass dieses Methan CO₂-neutral wäre.»

Auch für Martin O. Saar ist klar, dass die Energiewende nur mit einer Kombination verschiedenster Energieformen und Verfahren gelingen kann. «Es braucht Lösungen, die sich je nach Region optimal kombinieren lassen.» Ein Energiemix, sagt Saar, sei laut Studien stets kostengünstiger, als wenn man bloss auf eine oder wenige Energieformen setze. Der Grund: Um beispielsweise eine Region zu jeder Tages- und Jahreszeit mit Solar- und Windenergie zu versorgen, sind riesige Überkapazitäten nötig.

Geothermische Reservekraftwerke?

Die Geothermie, ist Saar überzeugt, könne im Energiemix der Zukunft eine Schlüsselrolle spielen. Denn sie sei imstande, je nach Bedürfnis, Grundlast- oder Reserve-Energie zu liefern. In letztere Richtung zielt ein weiteres seiner Projekte. Unterstützt von der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung Innosuisse untersucht ein Konsortium von Forschungs- und Industriepartnern unter seiner Leitung, wie eine Methode namens «Advanced Geothermal Systems» (AGS) die Energiewende in der Schweiz und weltweit unterstützen könnte.

Dabei geht es darum, Kraftwerke zu entwickeln, die ähnlich funktionieren wie heutige Wärmepumpen für Wohnhäuser: Jeweils zwei Bohrlöcher werden in fünf bis zehn Kilometern Tiefe so verbunden, dass sie, vereinfacht gesagt, eine U-förmige Schlaufe bilden. In dem Kreislauf wird Erdwärme mithilfe von CO₂ als Zirkulationsflüssigkeit aus dem Gestein herausgeholt. Die Wärme wird entweder direkt genutzt oder in einem Kraftwerk in Elektrizität umgewandelt und ins Stromnetz eingespeist. Flächendeckend eingesetzt wäre die Methode ideal geeignet, um bisher verwendete, klimaschädliche Gaskraftwerke als Reserve-Energieanbieter abzulösen. Denn dank des geschlossenen Kreislaufs liessen sie sich sehr rasch hoch- und wieder herunterfahren.

Noch aber sind solche Kraftwerke zu teuer – laut Saar vor allem wegen der hohen Bohrkosten. Das Projekt-Konsortium will deshalb eine Bohrmethode weiterentwickeln, die unter dem Fachbegriff «Plasma Pulse Geo Drilling» (PPGD) bekannt ist. Beim PPGD wird das Gestein nicht mechanisch aufgebrochen, sondern mit einer Art Elektroschock. Das innovative Verfahren benötigt nur ungefähr ein Viertel der Energie herkömmlicher Bohrverfahren. Und die Elektroden, die für die Elektropulse benötigt werden, nützen sich deutlich langsamer ab als heute benutzte Bohrköpfe.

Noch gibt es einiges zu tun, bis solch nachhaltige Kraftwerke marktreif sind. Aber Laborversuche hätten gezeigt, dass die neue Bohrmethode auch in grossen Tiefen gut funktionieren sollte, sagt Saar. «Die im Labor getesteten höheren Temperaturen, die in der Erde vorherrschen und an die man ja herankommen will, scheinen den Bohrvorgang zwar etwas zu bremsen, doch dafür sind die hohen Gesteinsdrücke in der Tiefe förderlich», sagt Saar. «Alles in allem sieht es so aus, dass das Bohren mit PPGD in der Tiefe eher einfacher wird.»

CERES ist gut gestartet

Solch vielversprechende Ideen sind wichtig. Aber klar ist auch: Die Wege in eine nachhaltige Energiezukunft werden Kosten verursachen und der Gesellschaft Veränderungen abverlangen. Neue Techniken und Lösungen müssen deshalb auch politisch und gesellschaftlich mehrheitsfähig sein. Welche das sind und welche politischen Instrumente zur nachhaltigen Bewirtschaftung von natürlichen Ressourcen beitragen können, erforschen Ottmar Edenhofer und sein Forschungsteam im FutureLab CERES. Das Projekt hat im vergangenen Jahr so richtig Fahrt aufgenommen. So fand im Juni auf



Bedretto-Untergrundlabor

Die Werner Siemens-Stiftung hat den Bau von zwei Testumgebungen im weltweit einzigartigen Untergrundlabor im südlichen Gotthard-Massiv finanziert und unterstützt Forschungsprojekte zur Tiefengeothermie. Das Bedretto-Untergrundlabor (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 Physik von Erdbeben unter realen Bedingungen zu erforschen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

12 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2018–2024

Projektleitung Prof. Dr. Domenico Giardini, Professor für Seismologie und Geodynamik, ETH Zürich (CH)



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 Professor Martin O. 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 das Klimagas CO₂ im Boden permanent versenken und bei diesem Vorgang zur geothermischen Stromproduktion verwenden kann.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

10 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2015–2024

Projektleitung Prof. Dr. Martin O. Saar, Professor für Geothermie und Geofluide (GEG) an der ETH Zürich

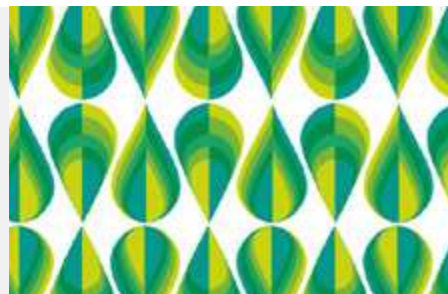
Zypern eine grosse Konferenz statt, bei der das FutureLab die ganze Breite seiner Forschungsagenda der Forschungsgemeinschaft vorstellte. «Das stiess auf sehr grosses Interesse», sagt Edenhofer.

Zudem haben die Forschenden damit begonnen, die Dynamik des Ausstiegs aus der Kohleindustrie im globalen Süden zu untersuchen. Die Frage, wie sich Länder wie Brasilien, Kolumbien, Vietnam oder Südafrika von Kohlekraftwerken lösen können oder was sie daran hindert, ist von klimapolitisch enormer Tragweite. In solchen Ländern sei der Ausstieg aus der Kohle ein Kraftakt, sagt Edenhofer. Das habe ökonomische und politische Gründe. «Es geht nicht nur um die Kraftwerke selbst, sondern auch um Turbinenhersteller, Dampfzufuhrsysteme, Stromgeneratoren und Ingenieursfirmen.» Die gesamte Zuliefer- und Ausrüstungskette existiert bereits und ist auf fossile Kraftwerke gepolt.

Forschende am PIK und am Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) in Berlin haben beispielsweise die Rolle von öffentlichen Förderbanken beim Bau neuer Kohlekraftwerke unter-

sucht. Sie stellten fest, dass grenzüberschreitende Kredite, vor allem aus China, Japan und Südkorea, ein wesentlicher Treiber für neue Kohlekraftwerke im globalen Süden sind. Und dass diese Kredite oft Mittel zum Zweck für Exportgeschäfte sind – zum Beispiel von Turbinenherstellern aus den Kreditgeberländern.

Auch in einem zweiten Forschungsblock hat CERES grosse Fortschritte gemacht – der Frage, wie sich wirksame von unwirksamen Energiepolitik- und Nachhaltigkeitsmassnahmen trennen lassen. Regierungen setzen oft auf ganze Bündel solcher Massnahmen: Verbote, Abgaben, Subventionen oder Dialoge. «Bislang hatten wir dazu Daten aus Europa», sagt Edenhofer, «nun haben wir in praktisch allen Ländern weltweit politische Massnahmen untersucht und mittels maschinellen Lernens ausgewertet.» Die Resultate sind noch nicht publiziert, aber im Kern, so Edenhofer, zeige sich: Bei allen Unterschieden gibt es grosse Gemeinsamkeiten in den Massnahmen, die funktionieren. Aus den Resultaten wollen die Forschenden nun Ideen und Vorschläge entwickeln – und so mithelfen, die Energiewende voranzutreiben.



FutureLab CERES

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

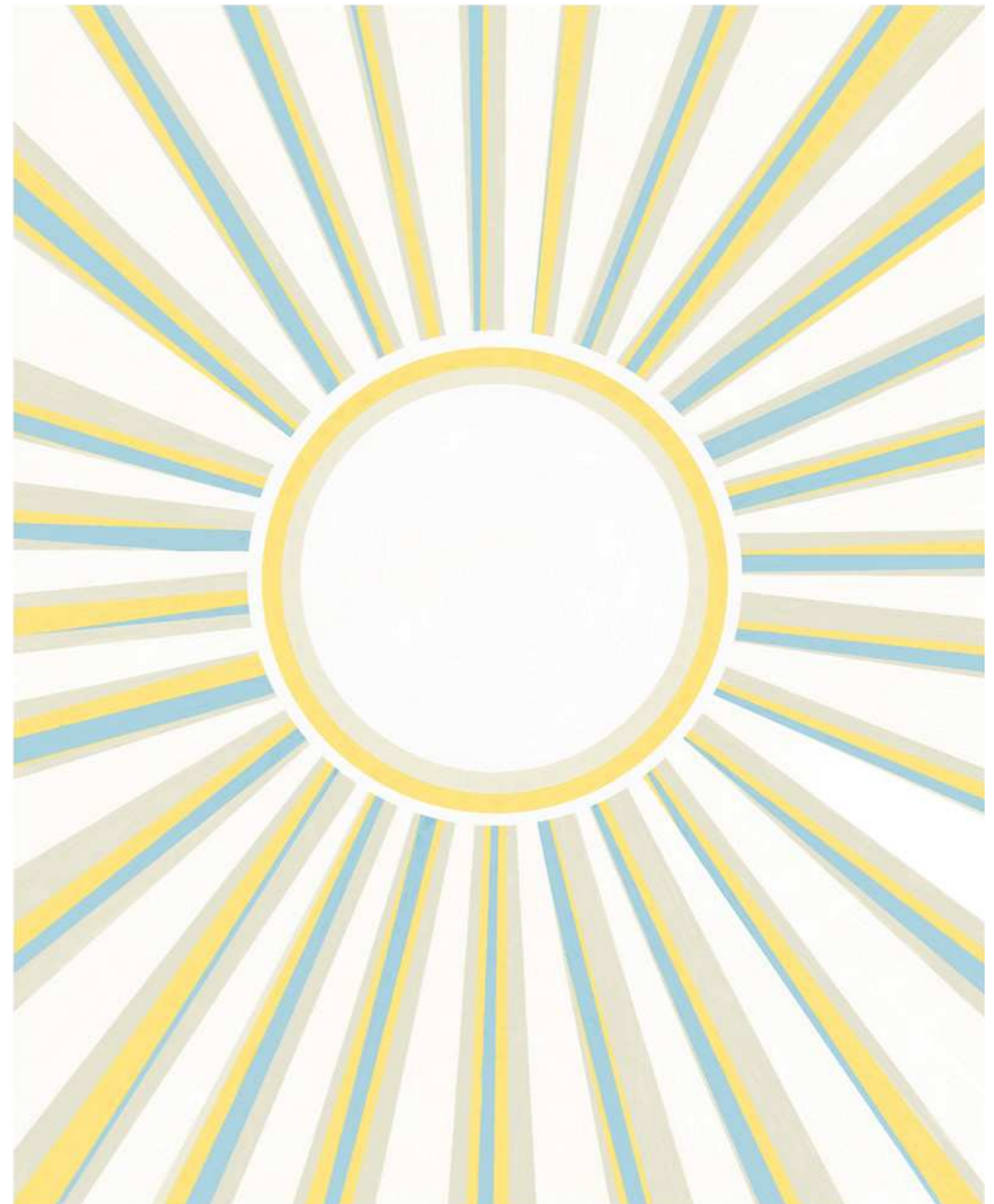
Mittel der Werner Siemens-Stiftung

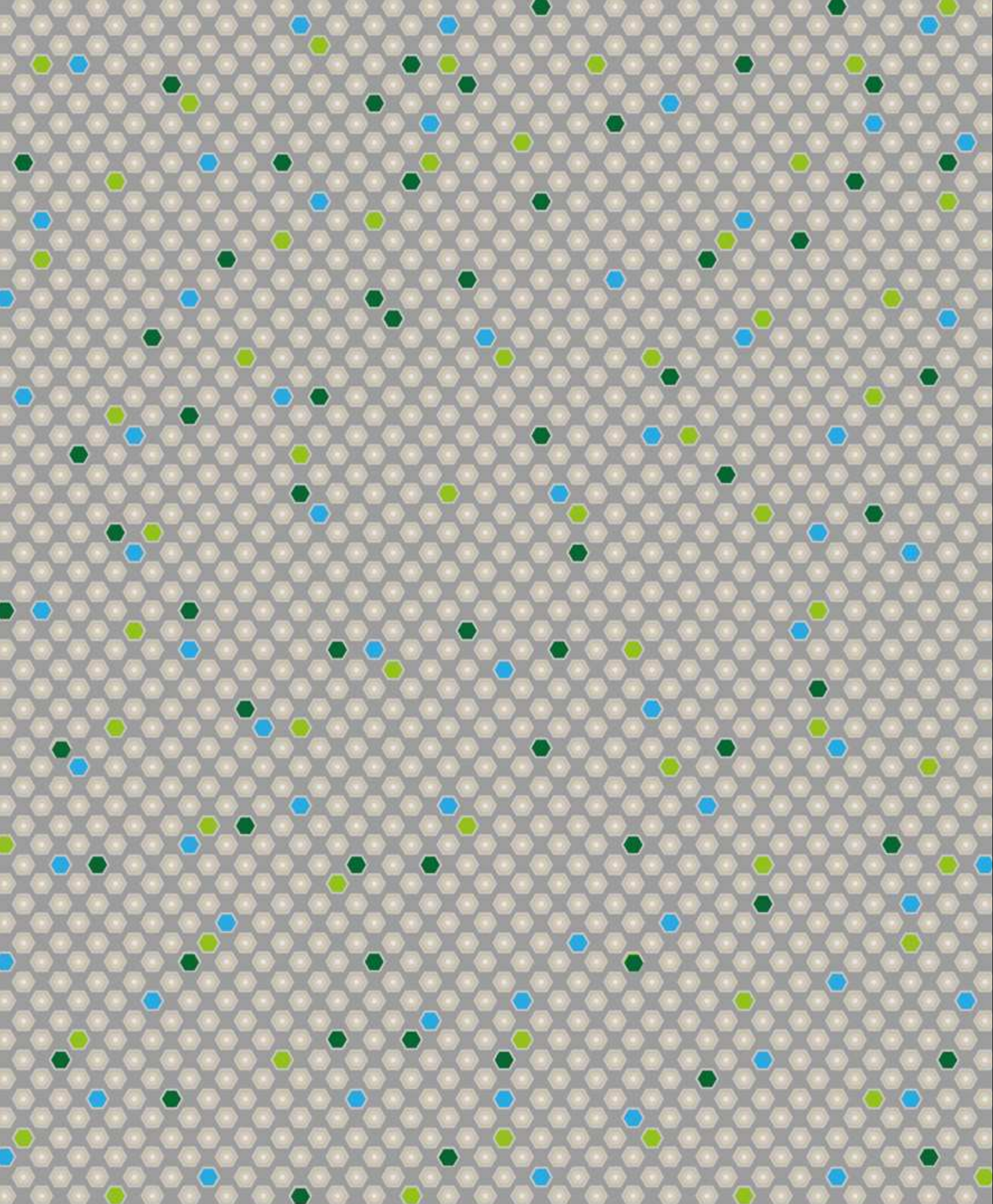
10 Mio. Euro

Projektdauer 2022–2031

Projektleitung

Prof. Dr. Ottmar Edenhofer, Co-Direktor und Chefökonom am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam bei Berlin (D)





Neue Wege beim Korrosions- schutz von Stahlbeton

Neu unterstütztes Projekt «Klimafreundlicher Stahlbeton»

Stahlbeton, Korrosion und Klimawandel

Beton ist der weltweit meistverwendete Baustoff. Bei seiner Herstellung gelangen Unmengen von CO₂ in die Atmosphäre. Der Bauingenieur Ueli Angst von der ETH Zürich will das ändern. Sein neu von der WSS unterstütztes Forschungsprojekt soll den Grundstein legen für klimafreundlichere Stahlbeton-Bauten – dank einem neuen Ansatz beim Korrosionsschutz.



Prof. Ueli Angst von der ETH Zürich will mit seiner Forschungsarbeit dazu beitragen, dass die Bauwirtschaft klimafreundlicher wird.



In Glasbehältern werden kleine Mörtelproben ganz bestimmten klimatischen Bedingungen ausgesetzt – und unter kontrollierten Bedingungen untersucht.

Ueli Angst, Beton ist enorm erfolgreich. Zehn Matterhörner oder 600 Gigatonnen Beton wurden weltweit bis heute verbaut. Weshalb hat sich gerade dieses Baumaterial durchgesetzt?

Beton ist verhältnismässig günstig, und seine Bestandteile Kalkstein, Tonmaterialien, Sand und Kies kommen fast überall in der Erdkruste vor. Er lässt sich lokal herstellen, lange Transportwege entfallen. Man kann Beton in die verschiedensten Formen giessen. Ausserdem ist Beton in Verbindung mit Stahl unschlagbar stark und dauerhaft und eignet sich nicht nur für Wohn- und Bürogebäude, sondern auch für grosse Infrastrukturbauten wie Brücken oder Tunnels.

Weshalb konnten sich neue, weniger klimaschädliche Betone gegenüber den traditionellen Betonarten bisher nicht durchsetzen?

Bis heute herrscht die Überzeugung, dass nur hoch alkalischer Beton – wie es die traditionellen Betone sind – den eingebetteten Bewehrungsstahl sicher

vor Korrosion schützt. Diese Lehrmeinung ist bisher kaum hinterfragt worden. Mit unserer breiten Erforschung der Korrosionsvorgänge in Beton und Stahl wollen wir das Alkalinität-Dogma vom Sockel stossen und den Weg ebnen für klimaschonende, CO₂-neutrale Stahlbetonbauten. Wir sind überzeugt, es gibt bessere Optionen, wie man Korrosion verhindern und die Langlebigkeit von Beton gewährleisten kann.

Worauf gründet Ihre Überzeugung, dass der Korrosionsschutz von Stahlbeton-Bauten nicht auf hoher Alkalinität allein basiert?

Vor drei Jahren haben wir Daten aus fast vierhundert Bauwerke in der Schweiz, in Finnland und Japan genau analysiert. Es waren alles Bauwerke, die schon älter waren. Der Beton war aufgrund der natürlichen Einwirkung des CO₂ aus der Atmosphäre im Bereich des Stahls in all diesen Fällen nicht mehr alkalisch. Trotzdem gab es nur bei fünf bis zehn Prozent dieser

Bauwerke relevante Korrosionsprobleme. Das nehmen wir als klaren empirischen Beweis dafür, dass Korrosionsschutz nicht nur mit hoch alkalischem Beton gewährleistet werden kann.

«Wir sind überzeugt, dass die Alkalinität des Betons, die es nur zum Preis von hohen CO₂-Emissionen gibt, nicht der einzige Schutz vor Korrosion ist.»

Welche Parameter vermuten Sie als Korrosionsauslöser?

Einer der wichtigsten Faktoren ist die Feuchtigkeit. Schon eine hohe Luftfeuchtigkeit kann unter Umständen die Korrosion fördern. In unseren Breitengraden setzen aber vor allem der Regen oder das Spritzwasser von der Strasse den Bauwerken zu.

Sie wollen bei der Korrosionsbekämpfung in Stahlbetonbauten einen Paradigmenwechsel initiieren. Wie stehen andere Fachpersonen dazu?

In unserem WSS-Projekt wollen wir quantitative Modelle entwickeln, mit denen sich vorhersagen lässt, wie hoch die Korrosionsgefahr unter bestimmten Umständen ist und was sich als Korrosionsschutz am besten eignet. Unseren neuen Ansatz mache ich an verschiedenen Anlässen in der wissenschaftlichen Gemeinschaft bekannt. So konnte ich letzten September am weltweit grössten Fachkongress, dem International Congress on the Chemistry of Cement in Thailand, als einer der Hauptreferenten darlegen, weshalb die bisherige Betonpraxis mit dem Klimaschutz nicht kompatibel ist und wie wir das ändern können. Auch an anderen internationalen Konferenzen in Nordamerika und Europa habe ich diesen Standpunkt präsentiert. Die Resonanz war sehr positiv, insbesondere in der Zement- und Betonbranche.

Beton ist hart. Wie gelangt die Feuchtigkeit bis zur Armierung?
Betone weisen komplexe Porensysteme auf. Durch die Poren dringt die Feuchtigkeit relativ schnell ein – befördert durch kapillare Saugkräfte, wie bei einem Schwamm. Ist die Feuchtigkeit einmal in den Beton eingedrungen, dauert es Tage bis Wochen, bis sie wieder verdunstet ist.

Wenn der Stahl im feuchten Beton zu rosten beginnt: Wie wirkt sich das auf den Beton aus?

Zu Beginn sind die Eisenionen des Stahls einfach im Wasser gelöst und richten keinen Schaden an. Aber mit der Zeit kommen verschiedene chemische und elektrochemische Reaktionen in Gang: Die Eisenionen können sich mit Hydroxidionen oder mit anderen Ionen in der Porenlösung verbinden; dabei können Ausfällungsprodukte entstehen, die sich im Porensystem im Beton ablagern. Das muss nicht unbedingt am Stahl direkt passieren, die gelösten Ionen können

auch millimeter- oder zentimeterweit weg vom Stahl in den Beton diffundieren und dort erst ausfällen. Zu einer Schädigung des Bauwerks kommt es, wenn diese Prozesse Risse im Beton bilden oder wenn der Stahl so stark korrodiert ist, dass er seine Funktion nicht mehr erfüllen kann. Vieles ist noch unklar, wir wollen die Prozesse im Detail erforschen.

«Wir untersuchen von Grund auf, wie der Korrosionsprozess in Stahlbeton abläuft.»

Welche Aspekte der Korrosion müsste man unbedingt kennen?

Wie weit die Eisenionen «wandern». Wenn sie weit in den Beton gelangen, verteilen sich die Ausfällungsprodukte



Klimaschädlicher Beton

Die Unmengen Beton, die weltweit hergestellt werden, verursachen enorme CO₂-Emissionen. Grund dafür ist der chemische Vorgang der Kalzinierung, der bei der Produktion von traditionellem hochalkalischem Beton abläuft: Um Beton herzustellen, mischt man das Bindemittel Zement mit Gesteinskörnungen wie Sand und Kies und fügt Wasser hinzu. In dieser Mischung ist der Zement der hauptsächliche «Klimasünder». Zement wird aus Kalkstein und Rohstoffen wie Ton hergestellt, die im Ofen gebrannt werden. Durch die hohen Temperaturen wird der Kalkstein in Calciumoxid und das Treibhausgas CO₂ aufgespalten. Dieser chemische Vorgang wird Kalzinierung genannt, er ist für 60 Prozent der CO₂-Emissionen der Betonproduktion verantwortlich. Die restlichen 40 Prozent entstehen beim Heizen des Brennofens, beim Transport der Rohstoffe oder beim Mahlen der Mineralien und des Zementklinkers.



Im Korrosionslabor an der ETH Zürich führen Ueli Angst (Mitte) und seine Mitarbeitenden elektrochemische Messungen durch.

besser und es baut sich weniger Druck im Beton auf, als wenn die Reaktionen nah beim Stahl ablaufen – dann kommt es rasch und lokal zu Spannungen, was dazu führen kann, dass der Beton reisst.

Gibt es weitere Korrosionsaspekte, die Sie und Ihr Team erforschen?

Wir wollen herausfinden, wie sich die verschiedenen Porensysteme der verschiedenen Betonarten verhalten: Wie gut sie Wasser durchlassen; wie viel Feuchtigkeit unter welchen Bedingungen wie schnell zum Stahl gelangt; wie lange das Wasser dort verweilt, wie rasch die Korrosion einsetzt und mit welcher Geschwindigkeit sie abläuft. Wann der Wechsel von Nasswerden und Trocknen und wieder Nasswerden und Trocknen zu Korrosionsschäden führt. Denn eines ist klar: Wenn wir neue Betonarten mit tiefer Alkalinität verwenden wollen, müssen wir das Wasser und die damit verknüpfte Korrosionskinetik «im Griff haben».

Was ist besonders anspruchsvoll zu erforschen?

Die Korrosion eines Metalls innerhalb eines porösen Werkstoffs ist äusserst komplex. Bis heute stehen nur beschränkte experimentelle Methoden zur Verfügung, um den Korrosionsprozess in situ zu beobachten, und sie sind nicht sehr repräsentativ für die Realität. Im WSS-Projekt entwickeln wir deshalb auch innovative experimentelle Methoden für das In-situ-Studium der Korrosion. Anspruchsvoll ist auch die grosse Spanne der Grössenskalen. Die Prozesse laufen sowohl im Nanometerbereich als auch im Zentimeter- oder sogar Meterbereich ab. Es ist sehr herausfordernd, ein digitales Modell der Porenstruktur zu erschaffen, welches alle Grössenskalen berücksichtigt und alles zusammenbringt. Doch unsere Idee ist genau das: alle Skalen miteinander zu verbinden.

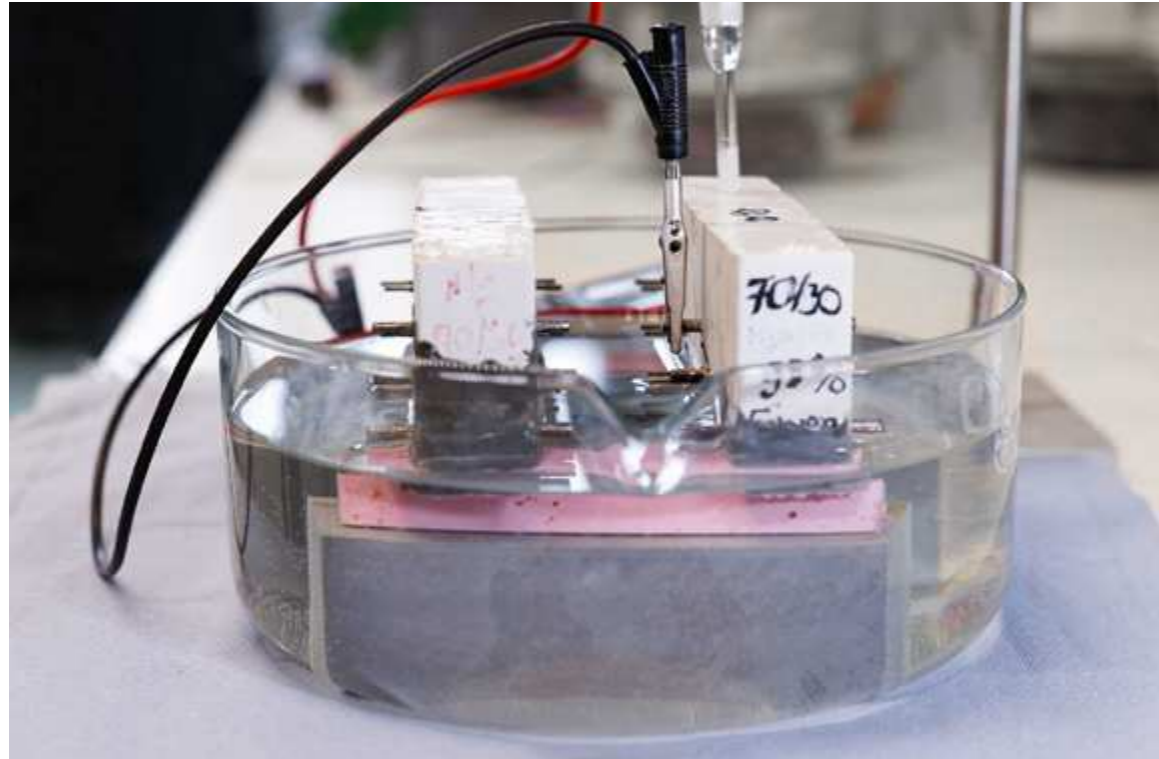
Wie wollen Sie das tun?

Da Korrosionsprozesse sehr dynamisch und vielfältig ablaufen, eig-

nen sich Computersimulationen am besten, um sie systematisch zu analysieren. Das ist rechenintensiv und aufwändig – deshalb ist für uns die Unterstützung der Werner Siemens-Stiftung sehr wichtig.

Was bringen Computersimulationen in der Praxis?

Unser Ziel sind Computersimulationen, die auf x-beliebige Betonmischungen anwendbar sind – denn in Zukunft werden Hunderte von Betonarten entwickelt und verbaut werden. Die Stahl-Korrosionsprozesse in diesen unterschiedlichen Betonen sollen auf allen Skalen simuliert werden können. Auch meteorologische Daten wie die maximale Niederschlagsdauer in einem Land sollen einfließen. Unsere Vision ist es, Prognosen für das Langzeitverhalten von Stahlbeton in unterschiedlichen klimatischen Umgebungen so zuverlässig zu erstellen, dass sie bei der Planung und Instandhaltung der Infrastruktur einen direkten Nutzen bringen.



Was geschieht im Beton-Innern, wenn Regen auf die Oberfläche fällt? Versuche zum Wassertransport, gekoppelt mit elektrochemischen Messungen, geben Einblicke.



Beton mischen im Labor: Um den Vorgängen im Inneren des Materials auf die Spur zu kommen, werden kleine Betonblöcke produziert und untersucht.



Um örtlich aufgelöst zu messen, wie die Korrosion auf einem Stahlstab abläuft, werden viele Kabel mit einzelnen Messelektroden verbunden.

Haben Sie bereits Ideen, wie Korrosionsschutz bei Bauten aus Beton mit tiefer Alkalinität aussehen könnte?

Indem man danach strebt, nicht wie bisher die Alkalinität des Betons für hundert Jahre im Griff zu haben, sondern die Feuchtigkeit des Betons. Die bisherigen Testmethoden basieren auf der Analyse, wie schnell die Alkalinität des Betons verloren geht. Aus meiner Sicht analysiert man besser die Feuchtigkeitstransporteigenschaften eines neuen Betons und hält diese unter Kontrolle.

Wie stellen Sie sich die Kontrolle der Feuchtigkeit im Beton vor?

Sie hängt nicht nur vom Beton selbst ab, sondern auch massgeblich von den Expositionsbedingungen eines Bauwerks. An einem Ort mit einer tiefen durchschnittlichen Niederschlagsmenge kann bereits ein relativ poröser Beton ausreichenden Korrosionsschutz bieten; in einer regenreichen Region braucht es unter Umständen einen dichteren Beton, eine höhere Be-

wehrungsüberdeckung, allenfalls sogar zusätzlich eine Beschichtung. Um in der Planungsphase die korrekten Parameter zu wählen, müssen wir numerische Modelle sowie Laborprüfmethoden entwickeln, die auf die relevanten Grössen und Prozesse abstützen.

«Sensoren, die im Betonbau eingebaut werden, überwachen seine «Gesundheit.»»

Existieren neben einer Beschichtung weitere Ideen, wie der Beton vor Feuchtigkeit geschützt werden könnte?

Nebst Oberflächenbehandlungen und direkter Beeinflussung der Mikrostruktur der zementösen Phasen durch Betontechnologie gibt es viele alternative und interessante Ansätze. Eine Idee beispielsweise ist, dem Betongemisch Füllstoffe wie Zellulosefasern beizugeben. In der Holzindustrie fällt dieses Material in gros-

sen Mengen an und wurde bisher als Abfall entsorgt. In Beton beigemischt, könnte es dessen Feuchtigkeitsgehalt ausgleichen helfen. Auch das Einbringen von lebenden Organismen wie Bakterien, pilzähnlichen Lebewesen, die zum Beispiel die Kalkausfällung beschleunigen und dadurch das Porensystem verschliessen, oder von Enzymen könnte vielversprechend sein.

Mikroorganismen als Korrosionshemmer – das klingt futuristisch!

Es existieren viele Mikroorganismen, die die CO₂-Speicherung grundsätzlich beschleunigen – das könnte auch bei Beton genutzt werden. In unserem Team erforscht eine Doktorandin gerade diesen Aspekt.

Und wenn ein Stahlbeton-Bauwerk einmal steht, wie könnte man es dann vor Korrosion schützen?

Mithilfe von Sensoren, die in verschiedenen Tiefen im Beton eingebaut werden und die «Gesundheit» des Bauwerks überwachen. Sie bilden ein

Frühwarnsystem, das zum Beispiel meldet, wenn Wasser in kritischem Ausmass in den Beton eintritt. So kann man rechtzeitig Massnahmen gegen die einsetzende Korrosion ergreifen. Solche Sensoren werden bereits vom ETH-Spin-off DuraMon hergestellt, den ich vor drei Jahren mitgegründet habe.

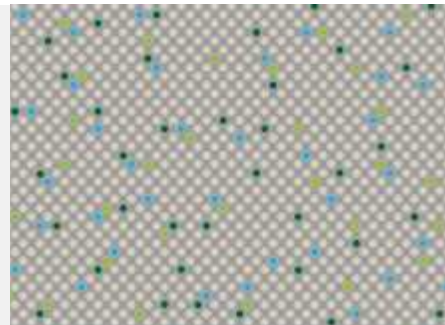
Sie sagen, Beton könne in Zukunft gar zu einer CO₂-Senke werden. Wie soll das möglich werden?

Es ist ein Naturgesetz, dass alle chemischen Verbindungen dazu tendieren, den Zustand anzunehmen, der thermodynamisch am stabilsten ist. Deshalb tendiert auch Beton dazu, dass sich das CO₂, das wir bei der traditionellen Zementherstellung bei über 1400 Grad Celsius energiereich abspal-

ten, wieder mit dem Calciumhydroxid verbinden will, sodass das Ausgangsmaterial Kalkstein entsteht.

Was bedeutet das für die Speicherung von CO₂ in Beton?

Schon heute diffundieren fortwährend geringe Mengen an CO₂ aus der Luft in bestehende Betonbauten und reagieren dort chemisch. Allerdings läuft dieser Prozess extrem langsam ab, und es würde Jahrtausende dauern, bis der Beton wieder zu einem ähnlichen Material würde, wie er ursprünglich war. Sobald wir die Korrosion im Griff haben, können wir uns diesen natürlichen Prozess zunutze machen und CO₂ mithilfe innovativer Verfahren auch in traditionellem Beton speichern.



Klimafreundlicher Stahlbeton

Das Dogma der Alkalinität des Betons zum Schutz des eingebetteten Bewehrungsstahls muss einem neuen klimaschonenden Korrosionsschutz-Ansatz weichen, ist Projektleiter Ueli Angst überzeugt. Dank der Unterstützung der Werner Siemens-Stiftung kann der Bauingenieur zusammen mit seinem interdisziplinären Team an der ETH Zürich die komplexen Korrosionsprozesse in verschiedenen Betonarten und unter verschiedenen klimatischen Bedingungen umfassend erforschen. Aus diesem fundierten Verständnis von Korrosion soll eine Analyseplattform für die Praxis entwickelt werden, die einen auf die Umstände abgestimmten Korrosionsschutz erlaubt. Das ist ein Paradigmenwechsel, welcher der Ära des klimaschädlichen Bauens mit Beton ein Ende setzen und ökologischen Betonarten den Weg ebnet wird.

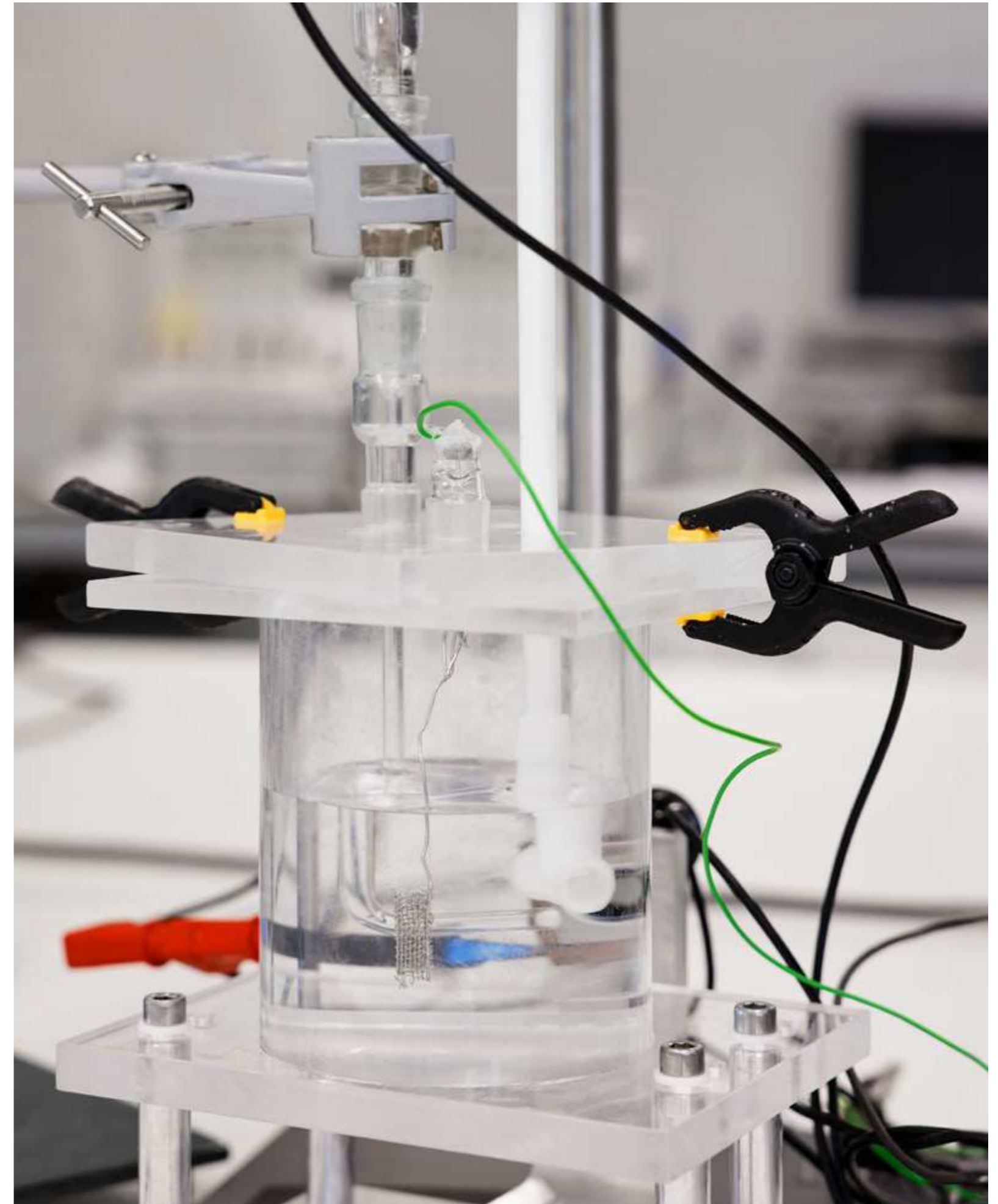
Mittel der Werner Siemens-Stiftung

10 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2024–2034

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

Elektrochemische Untersuchungen, hier ein klassischer Drei-Elektroden-Messaufbau in einer elektrochemischen Zelle, geben Aufschluss über einzelne Reaktionsschritte.





Beton und Stahl sind ein unschlagbar starkes Gespann: Auch Grossbauten wie Brücken und Tunnels können damit stabil und dauerhaft gebaut werden.

Was Ueli Angst an der Korrosion im Beton fasziniert

Auf die Frage, was ihn auszeichne, antwortet Bauingenieur und ETH-Professor Ueli Angst: «Ich bin nicht ein klassischer Forscher, der sich immer in der Akademie bewegt hat.»

Ueli Angst hat nach seinem Bauingenieur-Studium mehr als fünf Jahre in der Industrie gearbeitet, unter anderem bei der Beratungsfirma Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz; inzwischen ist er deren ehrenamtlicher Präsident. Die Beratungstätigkeit verschaffte ihm einen tiefen Einblick in die realen Probleme von Betonbauten und verbindet ihn bis heute mit der Praxis. Gleichzeitig kennt er die wissenschaftlichen Überlegungen, wie Beton nachhaltiger hergestellt werden könnte – denn er wurde 2017 an der ETH Zürich zum Assistenzprofessor ernannt. «Diese beiden Bereiche, Praxis und Theorie, möchte ich zusammenbringen», sagt Angst.

Dabei motiviert ihn die Tatsache, dass Beton ein grosser Hebel ist, um den Klimawandel zu bekämpfen und Ressourcen zu schützen. «Infrastrukturbauten sind ja im wahrsten Sinne des Wortes die Pfeiler unseres Wohlstands», ist er überzeugt. «Ohne sie könnte die Wirtschaft weder Menschen noch Güter im gleichen Ausmass transportieren. Die grossen Themen Nachhaltigkeit und Wohlstand sind in der Infrastruktur eines Staates quasi eingebettet.»

Veränderte Sicht auf den Beton

Das Wissen über den Beton habe sich in den letzten fünfzig Jahren stark verändert, erzählt Angst. Bis zirka Mitte des letzten Jahrhunderts dachte man, Stahlbeton-Bauten seien für die Ewigkeit gemacht. Dann merkte man, dass auch sie korrodieren können – dass aber hochalkalischer Beton das verhindern kann. In der Folge wurde ab den 1980er-Jahren das Ingenieurswesen auf die Alkalinität von Beton eingeschworen; die Normen und Lehrbücher wurden entsprechend angepasst. «Zu jener Zeit

war das sicher der richtige Ansatz gegen Korrosion», sagt Angst, «er bewirkte unter anderem, dass man heute deutlich dauerhafter baut als früher.»

Auch für Angst stand zu Beginn seiner Beschäftigung mit Korrosion vor rund fünfzehn Jahren die Nachhaltigkeit noch nicht im Vordergrund. «Damals habe auch ich Korrosion und Klimawandel nicht miteinander in Verbindung gebracht», erzählt er. Erst mit der Zeit wurde ihm klar, dass das Dogma der Alkalinität von Beton zu einem Problem für das Klima geworden war.

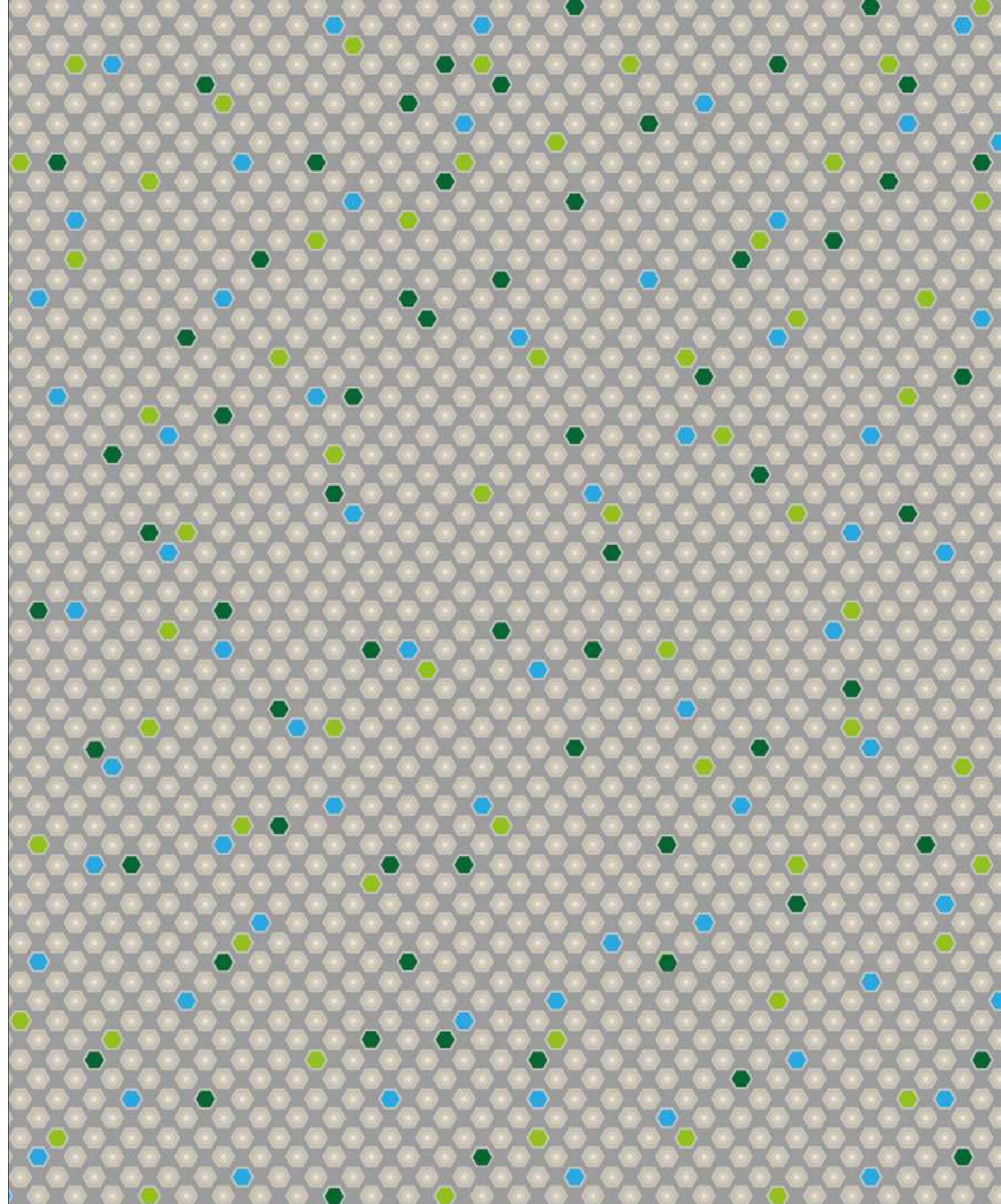
Am richtigen Ort

Heute seien europäische Länder führend bei der Förderung der nachhaltigen Betonproduktion, sagt Angst. «Bisher jedoch immer mit Fokus auf den Beton selbst und nicht auf die Korrosionsprozesse.» Ueli Angst schätzt die Schweiz als sehr guten Ort für seine Forschung ein. Denn hierzulande existiert seit langem eine starke Zementindustrie, und Nachhaltigkeit ist ein Thema. Ausserdem hat Angst für seine interdisziplinäre Forschung Zugang zu hochkarätiger Infrastruktur und komplementärer Fachexpertise an der ETH Zürich und der EPFL, am Paul Scherrer Institut und an der Empa.

Ueli Angst findet es wichtig, dass die Baubranche den Klimawandel berücksichtigt. «Ideen, wie man Beton nachhaltiger produzieren könnte, liegen viele vor», sagt er. «Ich möchte mit dem Aspekt der Korrosion einen komplementären, dringend notwendigen Beitrag leisten zur Herstellung von klimaschonenden und dauerhaften Bauwerken. Die Wissenschaft und die Baubranche stehen in der Verantwortung, dieses Problem jetzt anzugehen.»



Durch das Aufsetzen einer Messprobe an der Oberfläche können Korrosionsprozesse im Betoninnern mitverfolgt werden.



Bringt der Klimawandel die Meere zum Kippen?



Michael Schulz ist Direktor von MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen und leitet das von der WSS unterstützte «Innovationszentrum für Tiefsee-Umweltüberwachung».



Gerald Haug ist Direktor der Abteilung Klimageochemie am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz und leitet das von der WSS unterstützte Projekt der Forschungsjacht «Eugen Seibold».

Die Weltmeere nehmen gigantische Mengen an Wärme und CO₂ auf und sind dadurch der wirkungsvollste Klimapuffer auf der Erde. Kann das endlos so weitergehen? Oder gibt es ein Limit, und wenn dieses überschritten ist, kippen die Meere? Antworten von zwei Experten, deren Projekte von der Werner Siemens-Stiftung unterstützt werden: vom Meeresgeologen und Klimamodellierer Michael Schulz und vom Paläoklimatologen Gerald Haug.

Letztes Jahr jagten sich die Hitzerekorde: Der 3. Juli 2023 war der heisseste Tag seit Messbeginn, der Juli der heisseste Monat. Auf welche marinen Ökosysteme wirken sich Temperaturrekord am meisten aus?

Michael Schulz: Der Weltozean kann aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften und seines Volumens deutlich mehr Wärme speichern als die Atmosphäre. Das hat zur Folge, dass sich extreme Wetterereignisse global gesehen vorerst nur wenig auf die Ozeane auswirken. Doch so klein der globale Effekt derzeit noch ausfällt, man sollte ihn nicht unterschätzen. Schon ein kleiner Anstieg der Wassertemperatur von rund einem Grad kann spürbare Auswirkungen auf die hochkomplexen marinen Nahrungsnetze haben. Lokal gesehen ist zum Beispiel das Abwandern einer Fischart für die dortige Bevölkerung ein Drama.

2023 haben sich auch bisher kühle Regionen wie das Arktische Meer, die Antarktis und der Atlantik unerwartet rasch auf rekordhohe Temperaturen erwärmt.

Gerald Haug: Die Arktis ist stark betroffen von der Klimaerwärmung. Gemäss heutigen Berechnungen wird es in der Arktis um 2050 in den Sommermonaten gar kein Meereis mehr geben, sie wird nur noch im Winter vereist sein. Das Abschmelzen des Eises in den Polargebieten wird zu einem markanten Anstieg des Meeresspiegels führen – und dieser Anstieg wird für uns Menschen zu einem langfristigen Problem. Denn selbst wenn wir morgen die CO₂-Emissionen auf null brächten – wovon wir weit entfernt sind –, würde der Meeresspiegel weiter ansteigen, und zwar für einige hundert bis tausend Jahre. Was das für die kommenden Generationen bedeutet, können wir noch nicht ermessen. Ein Drittel der Menschen lebt in Küstennähe.

Auf das Leben in den Ozeanen wirkt sich die Klimaerwärmung aber derzeit noch gering aus?

Schulz: An den Küsten erleben wir bereits innerhalb von Dekaden so starke Stürme, wie sie früher einmal im Jahrhundert wüteten. Auch eine

Veränderung der Jahreszeiten in den Meeren können wir beobachten. Und Sauerstoffarmut macht sich vermehrt auch in tieferen Wasserschichten bemerkbar.

Haug: Im Ozean erkennen wir zunehmend auch eine Tendenz zu Hitzewellen, sie werden seit ein paar Jahren intensiver und dauern länger an. Derzeit spielen sie sich vor allem an der Wasseroberfläche ab. Das beeinflusst wesentlich die Fischbestände. In grösserer Tiefe erwärmt sich der Ozean noch sehr schwach.

Wenigstens für die Tiefsee eine gute Nachricht ...

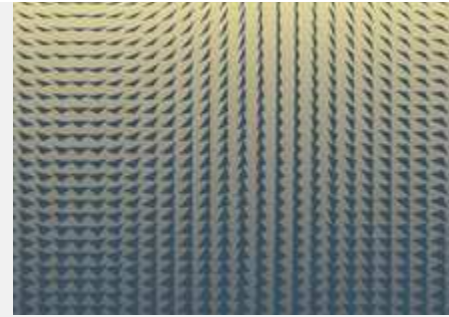
Schulz: Leider nein. Eine wärmere Oberflächenschicht der Meere wirkt sich indirekt auf zahlreiche Meeresorganismen aus. Man geht davon aus, dass das organische Material, die Nährstoffe, Mikroorganismen und das CO₂, die von oben nach unten transportiert werden, abnehmen werden und dass der Austausch zwischen wärmeren und kälteren Wasserschichten geringer wird – und dieser Austausch ist wichtig für das Werden und Vergehen von Leben im Meer. Modellrechnungen für das Jahr 2100 prognostizieren, dass die von Natur aus geringe Biomasse in der Tiefsee prozentual gesehen am stärksten abnehmen wird.

Gibt es andere Beispiele, wie sich die Klimaerwärmung in der Tiefsee auswirkt?

Schulz: Nehmen wir das Klimagas Methan. Es entsteht zum Beispiel aus Überresten von Plankton, das vor langer Zeit im Ozean gelebt hat und abgestorben auf den Meeresboden gesunken ist. Methan ist an den Kontinentalhängen der Meere in enormen Mengen auch in Form von Methanhydraten gelagert – das sind eisähnliche weissliche Festkörper aus Methan und Wasser. Wenn diese nun durch die Klimaerwärmung schmelzen und das Methan freisetzen, wird sich das auch auf die Tiefsee auswirken – wie, weiss man allerdings wie so vieles in der Tiefsee nicht genau.

Was wären mögliche Szenarien?

Schulz: Das Methan könnte in die Atmosphäre gelangen und die Kli-



Innovationszentrum für Tiefsee-Umweltüberwachung

Das Innovationszentrum am MARUM in Bremen entwickelt technische Lösungen zur Bestimmung und Überwachung schützenswerter Tiefseeregionen. Im letzten Jahr konnten Ralf Bachmayer und Software-Ingenieur Pablo Gutiérrez das ferngesteuerte Unterwasserfahrzeug MiniROV ein erstes Mal von der Forschungsjacht «Eugen Seibold» aus testen, und zwar im Atlantik bei Lanzarote. Der optische Sensor, dank dem das MiniROV Materie und Organismen in

der Tiefsee identifizieren kann, übermittelte die Bilder aus dem Atlantik direkt an die «Seibold». Ralf Bachmayer ist zufrieden: «Der Einsatz des MiniROVs von der Eugen Seibold aus sowie die anschließenden Diskussionen um den wissenschaftlichen Wert und das Potenzial solcher Entwicklungen und Einsätze hat uns gezeigt, dass unser eingeschlagener Weg, nachhaltige Beobachtungs- und Monitoring-Systeme zu entwickeln, richtig ist und an Relevanz noch zugenommen hat, zum Beispiel für die CO₂-Speicherung im Meeresboden.» Die Forschungsgruppen der beiden von der WSS unterstützten Meeresprojekte werden bei gemeinsamen Forschungsinteressen auch in Zukunft zusammenarbeiten.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

4,975 Mio. Euro

Projektdauer 2018–2028

Projektleitung

Prof. Dr. Michael Schulz, Direktor MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen (D)

Prof. Dr. Ralf Bachmayer, MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen (D)

maerwärmung antreiben. Das Methan könnte aber auch im Wasser verbleiben und mikrobielle Prozesse anfangen – denn es ist auch Nahrung für mikrobielle Organismen wie gewisse Bakterien und Methanabbauende Archaeen. Diese Tiefsee-Lebewesen schaffen es durch chemische Prozesse, Gase in organisches Material umzuwandeln und damit anderen Tiefsee-Lebewesen Nahrung zu bieten. Die Lebewesen in der Tiefsee funktionieren generell recht anders als jene an Land. Insbesondere sind sie teilweise von chemischen Prozessen abhängig und nicht von Sonnenlicht.

Welche Lebewesen im Ozean sind aktuell am stärksten von der Erwärmung betroffen?

Haug: Das sind vor allem Organismen, die nicht in kältere Gebiete wegschwimmen können – wie Korallenriffe und Mangrovenwälder. Und die Menschen, die nahe bei Küsten leben; für sie wird der Meeresspiegelanstieg dramatische Folgen haben.

Die Ozeane haben in den vergangenen 18 Jahren doppelt so viel Wärme aufgenommen wie zuvor, und sie nehmen weltweit auch am meisten CO₂ auf. Durch diese gewaltigen Pufferkapazitäten haben die Ozeane die menschengemachte Klimaerwärmung ein wenig aufgefangen. Wo ist das Limit erreicht? Können die Meere die globale Erwärmung von mehr als plus 2 Grad, wie sie für das Jahr 2100 prognostiziert wird, noch puffern?

Haug: Mehr als 2 Grad Celsius Erwärmung können wir nur vermeiden, wenn wir das Pariser Klimaabkommen einhalten – was wir derzeit aber nicht tun. Im Moment sind wir auf einer noch steileren Extrapolation, bei global plus 2,7 Grad Celsius im Mittel bis 3,4 im schlechtesten Fall. Das wird die Auswirkungen massiv verstärken.

Werden die Meere irgendwann kippen?

Schulz: Nein, wir haben gegenwärtig keinen Grund anzunehmen, dass die Meere insgesamt kippen könnten. Sie werden sich massiv

verändern, aber nicht im Sinn eines Umkippen, nach dem alles unumkehrbar anders sein wird.

Haug: Ich schliesse mich dem an. Die Ozeane verändern sich, das zeigt die Geschichte des Klimas klar. Der flache Ozean kann sich sehr schnell verändern durch die Zunahme der Energie, und das wird vermehrt Extremereignisse wie starken Regenfall und Tropenstürme auslösen. Das werden wir auch an Land spüren. Aber der grösste Teil des Ozeans befindet sich unterhalb der sogenannten Thermokline, also unterhalb der Wasserschicht, die verhindert, dass Kälte, CO₂ und nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche steigt. Dort unten ist der Einfluss der Klimaerwärmung noch gering.

Die Ozeane können nicht kippen? Man hört doch immer wieder von sogenannten Kippunkten?

Schulz: Es gibt bei einem wichtigen Teilsystem des Ozeans einen Kippunkt, nämlich bei der grossen

Umwälzzirkulation im Atlantik. Wenn sich das Wasser im Nordatlantik nicht stark genug abkühlt und dadurch weniger dicht wird, dann kommt irgendwann ein Punkt, an dem die nötige Dichte für die Umwälzung nicht mehr erreicht wird und keine vertikale Zirkulation mehr entsteht. Es gibt einzelne Forschende, die behaupten, dass das in wenigen Jahren eintreten wird. Das widerspricht aber allen Langzeitmessungen und realitätsnahen Modellierungen.

Können Sie ausführen, was falsch ist an der Vorstellung des Kippens der Meere?

Schulz: Zum einen spielen sich Veränderungen im Ozean in Zeitskalen von Hunderttausenden von Jahren ab, das ist für unsere Gesellschaft völlig irrelevant. Zum anderen ist auch die Vorstellung des Unumkehrbaren falsch. Wenn man die Ozeane aus erdgeschichtlicher Perspektive ansieht, kann man für die ferne Zukunft sagen: Die Erde wird den Menschen überleben, und solange der blaue Planet

besteht, wird es Formen von Leben darauf geben. Vor diesem Hintergrund lautet die richtige Frage: Finden die Veränderungen so schnell statt, dass wir Menschen uns nicht anpassen können?

Was müsste man Ihrer Ansicht nach nun dringend tun, damit der Mensch sich nicht selbst das Wasser abgräbt?

Haug: Es braucht schnellstmöglich einen Wechsel bei den Energiesystemen und eine drastische Reduktion der Verbrennung, vor allem von Kohle – doch das tun wir grad nicht.

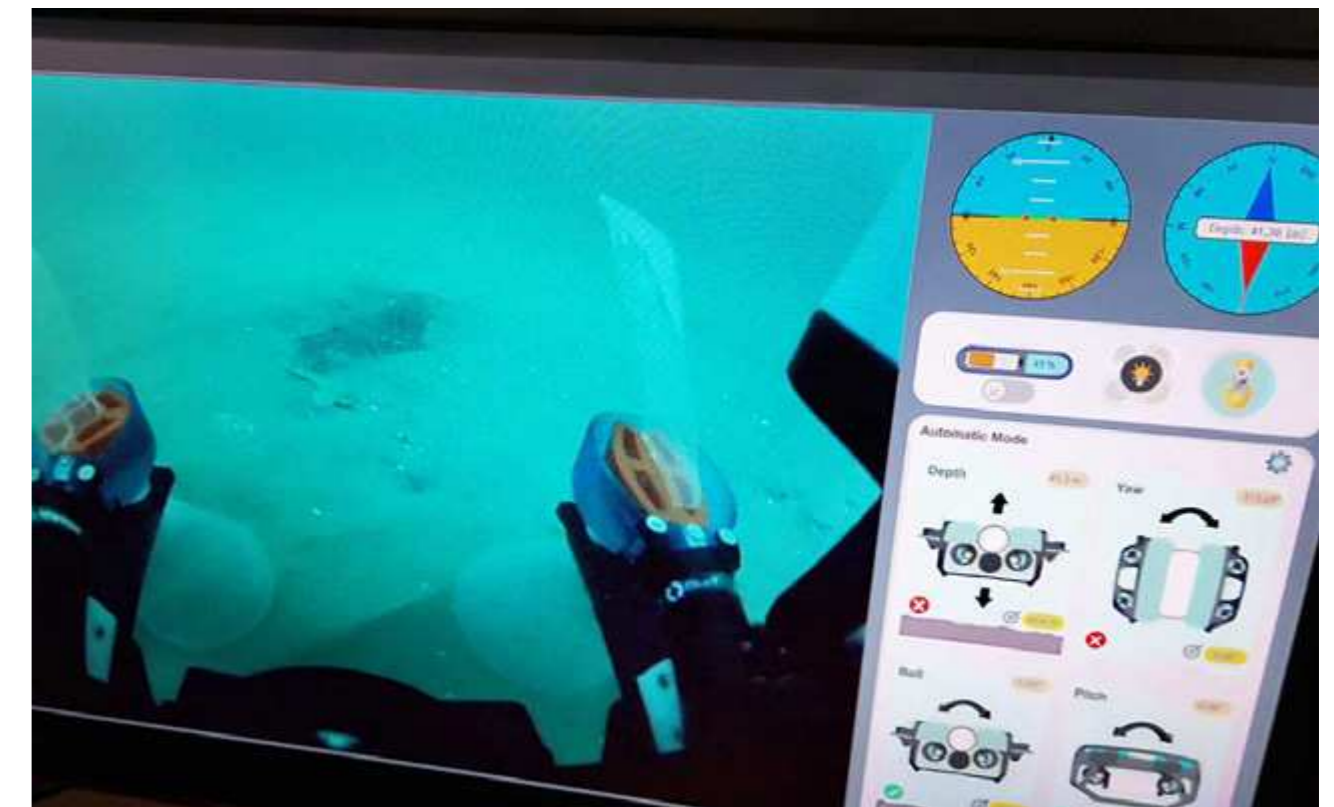
Schulz: In den westlichen Ländern versuchen wir derzeit, unseren Energiebedarf durch erneuerbare Energien zu decken. Es ist aber ein Trugschluss, zu meinen, damit sei es getan. Ohne Reduktion von zwei Dritteln unseres derzeitigen Energiebedarfs geht es nicht. Wir müssen uns einen anderen Lebensstil zulegen.

Wie stehen Sie zu technischen Ansätzen, den Klimawandel zu bremsen?

Schulz: Ralf Bachmayer von unserem Innovationszentrum für Tiefsee-Umweltüberwachung untersucht derzeit, ob man CO₂ in grösserem Umfang in basalthaltiges Gestein im Ozean einleiten könnte. Verflüssigtes CO₂ reagiert relativ schnell mit den Basalten, daraus entsteht Carbonatgestein. Wenn Sie mich fragen, ob es das braucht, ist die Antwort klar: Es gibt kein Szenario, das ohne die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre auskommt. Dabei werden die Ozeane ziemlich sicher eine grosse Rolle spielen, weil wir dort potenziell sehr viel CO₂ speichern können.

Warum tut man es nicht bereits?

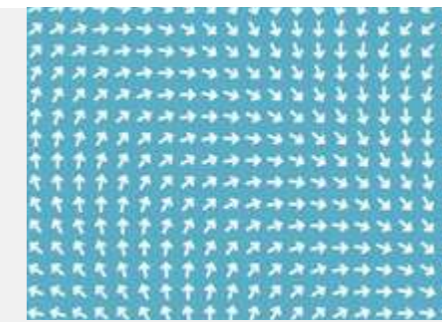
Schulz: Es kostet unglaublich viel Energie, das CO₂ in die Ozeankruste zu bringen. Zwar erlauben die hohen Temperaturen von vulkanischem Gestein im Meer die Umsetzung von flüssigem CO₂ in Carbonat in einer Zeitspanne von wenigen Jahren. Das grosse Aber: Das Ganze würde sich in der Mitte des Ozeans abspielen –



Am MARUM in Bremen entstehen ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge, mit deren Hilfe sich Tiefseeregionen untersuchen und überwachen lassen.



Auf der «Eugen Seibold» nehmen Forschende diverse Proben aus dem Atlantik und dem Pazifik. Von Panama City aus erforscht die Crew auch das Wetterphänomen El Niño.



Forschungsjacht «Eugen Seibold»

Die Crew der «Seibold» segelte nach zwei Jahren Beprobung des Atlantiks durch den Panama-Kanal in den Pazifik – «für ein Schiff mit so viel analytischer Hochtechnologie an Bord eine politische Herausforderung», erzählt Projektleiter Gerald Haug. «Es brauchte die Präsenz der deutschen Botschafterin an Bord, um den Verdacht auf Spionage zu entkräften.» In der Folge besuchte auch die deutsche Aussenministerin Annalena Baerbock die «Seibold» im Hafen von Panama City. Von der neuen Basis aus erforscht die Crew derzeit das sich anbahnende Wetterphänomen El Niño in Transekten zwischen Panama und Galapagos. «El Niño ist ein Ozean-Atmosphären-Grossereignis, das wir bio-

logisch, physikalisch und chemisch quantifizieren möchten», sagt Haug. Als weiteres Highlight des vergangenen Jahres nennt er die biochemische Beprobung der grossen Korallen-Archiipele im Zentralpazifik, welche durch die Grosszügigkeit einer Ozean-affinen Privatperson ermöglicht wurde. Die Forschenden konnten an den Korallen erstmals die Stickstoff-Isotope sowie organisches Material, Nährstoffe und Biomarker messen und den Bestand eines wichtigen Korallenarchivs verdreifachen. Die «Seibold» wird auch noch komplementäre Messungen beisteuern, um heutige und kommende ozeanische und atmosphärische Veränderungen quantitativ mit jenen der letzten Dekaden und Jahrhunderte vergleichen zu können.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
3,5 Mio. Euro (2015–2019)
Bau, Infrastruktur
3 Mio. Euro (2020–2030 Betrieb)
Projektdauer 2015–2030
Projektleitung Prof. Dr. Gerald Haug,
Direktor der Abteilung Klimageochemie,
Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz,
und Professor an der ETH Zürich
Dr. Ralf Schielbein, Gruppenleiter Mikro-
paläontologie am Max-Planck-Institut für
Chemie, Mainz

dorthin mit riesengrossen Tankern zu fahren, zu bohren und CO₂ zu verpressen, das ist keine leichte Aufgabe. Die CO₂-Bilanz dieses Verfahrens wird derzeit von verschiedenen Stellen berechnet. Und man muss prüfen, ob man nicht besser die grossen natürlichen Basaltvorkommen nutzt, auf Island, in Afrika oder Indien beispielsweise.

Gibt es andere technische Möglichkeiten?

Haug: Worüber man nachdenken sollte, ist eine Kreislaufwirtschaft im Sinne von Carbon Capture and Utilization. Bei diesem Verfahren scheidet man CO₂ am Emissionsort ab und produziert daraus mittels Katalyse-Reaktionen Energieträger wie Methanol. Ich denke, wenn wir in grösseren Energiekreisläufen denken, können wir so eine 5- bis 10-prozentige CO₂-Reduktion in den nächsten dreissig Jahren erreichen. Aber auch da ist vieles im Labor zwar möglich, aber noch nicht auf genügend grosse Mengen skalierbar.

Schulz: Technologische Ansätze fressen einfach immer Energie, und wir können die Erneuerbaren nicht schnell genug ausbauen.

Haug: Deshalb muss die Politik rasch die Energiegewinnung diversifizieren und mit der Industrie in sonnen- und windreichen Regionen der Erde wie zum Beispiel Nordafrika, der arabischen Welt, Australien oder Patagonien ins Gespräch kommen. In den Tropen und Subtropen lässt sich genügend Sonnenenergie gewinnen. Klar ist: Europa wird auch in Zukunft 70 Prozent seiner Energie importieren müssen.

Wie hoffnungsvoll sind Sie?

Schulz: Was mich optimistisch stimmt, sind sehr ernstzunehmende Studien, die zeigen, dass ein CO₂-reduzierter Lebensstil nicht bedeutet, dass man wie in der Steinzeit leben muss. Sondern dass man damit selbst eine wachsende Weltbevölkerung ernähren kann, dass deren Mobilität, Wohnraum und Energieverbrauch auf

einem vernünftigen Niveau gewährleistet werden kann. Es gibt auf der Erde genügend Ressourcen, es ist eine Frage der Verteilung.

Haug: Und wir haben auch die Techniken in der Hand. Für mich sind wir Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler immer noch eine grosse Hoffnung. Denn eigentlich können wir es, eigentlich sind wir intrinsisch motiviert, dranzubleiben und multinational zusammenzuarbeiten. Woran es derzeit vor allem mangelt, ist der politische Wille zur verbindlichen internationalen Kooperation und die Einführung von Mechanismen mit Lenkungswirkung, basierend auf marktwirtschaftlichen Ansätzen wie einer Bepreisung von CO₂.

Frische Ideen in der Klimakrise

Um die Zukunft nachhaltiger zu gestalten, braucht es die Wissenschaft, aber auch politisch und gesellschaftlich umsetzbare Rezepte. Im Rahmen einer Sommerakademie im Kanton Tessin sind Studierende in die Klimaforschung eingetaucht und haben nach effektiven Klimaschutz-Massnahmen gesucht.



In Gruppenarbeiten suchten die Teilnehmenden der Sommerakademie «Climate Change» nach Lösungswegen in ganz bestimmten Klimafragen.



Gabriela Blatter vom Bundesamt für Umwelt erklärte den Studierenden, wie bei internationalen Klimaverhandlungen gefeilscht und Allianzen geschmiedet werden.

Der Tisch steht nur wenige Dutzend Schritte vom Ufer des Luganersees mit seinem stahlblauen Wasser. Aber die fünf jungen Frauen und Männer, die hier sitzen, haben momentan keine Augen für die Schönheiten der Natur. Angeregt diskutieren sie. Sie stehen unter Zeitdruck. Bis am Abend müssen sie einen Plan erstellt haben, um die Welt zu retten.

Ganz so dramatisch, wie das klingt, ist es nicht. Es handelt sich um eine Gruppenarbeit im Rahmen der Sommerakademie «Climate Change: From Science to Solutions», welche die Schweizerische Studienstiftung – unterstützt von der Werner Siemens-Stiftung – in dieser Septemberwoche durchführt. Die Aufgabe der Fünfergruppe: ein Konzept für eine globale CO₂-Steuer ausarbeiten. Bis heute gleicht die Erhebung von CO₂-Preisen einem Flickenteppich – längst nicht alle Länder kennen eine solche Steuer und die Unterschiede zwischen den verwendeten Systemen sind beträchtlich.

Wie lässt sich die Einführung einer globalen Steuer erreichen? Wie muss sie ausgestaltet sein, damit sie funktioniert, gerecht ist und keine Schlupflöcher offen lässt? Das sind Fragen, welche die bunt gemischte Gruppe zu beantworten versucht. Sie besteht aus drei Studentinnen und zwei Studenten verschiedenster Fachrichtungen aus der Schweiz und aus Österreich. Ihre Gemeinsamkeit: Sie alle werden gefördert von der Studienstiftung ihres Landes – und haben im Rahmen der Förderung die Möglichkeit, an Weiterbildungen wie den

Sommerakademien in Magliaso im Kanton Tessin ganz im Süden der Schweiz teilzunehmen.

Diese Arbeitswochen sind stets äusserst vielfältig aufgebaut. Dass die Studierenden eigene kreative Konzepte oder Projekte entwickeln, ist ein Kernpunkt. Doch sie erweitern ihren Horizont auch im Austausch mit arrivierten Forscherinnen und Forschern und kommen in den Genuss von Referaten hochkarätiger Fachleute. Am Morgen des heutigen Tages der Klimawandel-Sommerakademie etwa hatte Gabriela Blatter, Verhandlerin und Expertin für Umweltfinanzierung beim Bundesamt für Umwelt, den Studentinnen und Studenten Einblicke gegeben in die Welt der Umweltdiplomatie. Sie erzählte von ihren Erfahrungen bei internationalen Klimaverhandlungen. Darüber, wie Allianzen geschmiedet werden, mit welchen Strategien die Verhandlungspartner ihre Ziele zu erreichen versuchen, wie Übereinkommen nach langen Nachtschichten im letzten Moment verabschiedet werden – oder scheitern. «Klimapolitik ist Interessenpolitik», sagte Blatter.

Die Lösungen zu kennen, reicht nicht

Das ist ein Grund dafür, weshalb es so schwierig ist, die wohl grösste Bedrohung für Umwelt und Mensch der heutigen Zeit in den Griff zu bekommen. «Die Wissenschaft des Klimawandels ist eigentlich einfach», sagt Sonia Seneviratne, Professorin für Land-Klima-Dynamik an der ETH Zürich, Vorstandsmitglied im Weltklimarat



Draussen, am Ufer des Luganersees, lässt es sich noch viel besser über spannende und wichtige Fragen diskutieren.



Die beiden Sommerakademie-Leitenden Sonia Seneviratne und Rolf Wüstenhagen waren begeistert von der Motivation und dem Einsatzwillen der Studierenden.

(IPCC) und Co-Leiterin der Sommerakademie. «Je mehr fossile Energie wir verbrauchen, desto grösser die Erwärmung. Die Lösungen sind da, wir müssen sie einfach umsetzen: Wärmepumpen statt Ölheizungen, Wind- und Solarenergie.» Doch die Lösungen zu kennen, sei nicht genug, ergänzt Sommerakademie-Co-Leiter Rolf Wüstenhagen, Professor für Management Erneuerbarer Energien an der Universität St. Gallen (HSG). «Wir dürfen nicht unterschätzen, wie wichtig emotionale Faktoren und Verhaltensroutinen sind. Nur wer diese einbezieht, kann die Menschen zum Handeln motivieren.»

Genau von diesen Überlegungen haben sich die beiden leiten lassen, als sie das Programm der Woche zusammenstellten. «Ein Teil sollte sich mit naturwissenschaftlichen Fragen befassen, der andere mit sozialwissenschaftlichen Ansätzen für mögliche Lösungen», sagt Sonia Seneviratne. Und weil die Klimaerwärmung unterschiedlichste Probleme verursache, gebe es auch diverse Wege, diese anzupacken, sagt Rolf Wüstenhagen. An einigen arbeiten die Studierenden in ihren Gruppenarbeiten, welche er gemeinsam mit der Denkfabrik Foraus erarbeitet hat. «Die Studierenden sollen verstehen, dass Klimapolitik auch eine aussenpolitische Dimension hat, und gemeinsame Lösungswege suchen», sagt Wüstenhagen.

Die globale CO₂-Steuer ist eine dieser Ideen – der Verursacher soll jene Kosten tragen, die er mit seinem umweltschädlichen Verhalten für die Allgemeinheit verur-

sacht. Die Fünfergruppe hat die Schweizer CO₂-Abgabe als Ausgangspunkt genommen. In der Schweiz wird auf jede Tonne CO₂ ein bestimmter Steuerbetrag erhoben, momentan 120 Franken. Die Einnahmen fliessen zum grössten Teil wieder zurück an die Bevölkerung, über eine Verrechnung mit den Krankenkassenprämien sowie über Fördergelder bei der energetischen Sanierung von Gebäuden.

Unterschiede und Gemeinsamkeiten

In vielen Ländern der Welt sind 120 Franken pro Tonne CO₂ ein Betrag, der über die finanziellen Möglichkeiten grosser Bevölkerungsschichten hinausgeht. Deshalb sei ein wichtiger Aspekt, bei einer globalen CO₂-Steuer die Kaufkraft der verschiedenen Länder zu berücksichtigen, sagt Sophie Halper, die an der Universität Innsbruck Rechtswissenschaften studiert. Auch die Rückverteilung sei eine Knacknuss: Wie erreicht man Menschen, die über kein Sparkonto verfügen, geschweige denn über eine Krankenversicherung? Und wie verhindert man, dass das Geld in autoritären Staaten in die falschen Hände gerät? Über solchen Fragen brüten die fünf – und es ist ihnen natürlich klar, dass sie innert solch kurzer Zeit nicht das Ei des Kolumbus finden werden.

Er finde es aber sehr spannend, während der Studienwoche nach solchen Lösungsansätzen zu suchen, sagt Raphael Knecht, der an der Universität Zürich Geographie studiert. «Es ist schon eindrücklich, dass wir als Ge-



Die Lage ist ernst, das Thema teilweise bedrückend. Aber neben der vielen Kopf- und Konzeptarbeit darf auch der Spass nicht zu kurz kommen.

Die Deadline naht, bis am Abend müssen die Konzepte stehen: Der Feinschliff wird direkt am Laptop vorgenommen und mit dem Team geteilt.



sellschaft noch nicht weiter sind, obwohl die meisten Lösungen eigentlich auf dem Tisch liegen.» Für Leoni Rast, Studentin der Agrarwissenschaften an der ETH Zürich, ist es alleine schon aus beruflicher Sicht wichtig, über Lösungsansätze zu diskutieren. «Die Klimaerwärmung wird die Landwirtschaft verändern, auch deshalb ist sie ein grosses Thema für mich.»

Auch Maya Krell, die an der ETH Zürich Pharmazie studiert, beschäftigt der Klimawandel. Sie habe immer wieder Diskussionen mit Menschen, die ihre Position und ihre Besorgnis nicht verstünden, erzählt sie. «Da ist es schön, hier mit Leuten zusammen zu sein und zu diskutieren, die eine ähnliche Meinung haben wie ich.»

Zumal man einiges voneinander lernt: Marcel Simma, Wirtschaftsinformatik-Student an der WU Wien, findet es spannend, auch Unterschiede zwischen Ländern zu diskutieren. In Österreich, erzählt er, sei die Rückerstattung aus der CO₂-Steuer im Gegensatz zur Schweiz vom Wohnort abhängig. «Wer in der Grossstadt Wien wohnt, erhält einen kleineren Betrag als jemand im ländlichen Montafon, weil dort die Erschliessung mit dem öffentlichen Verkehr weniger gut ist.»

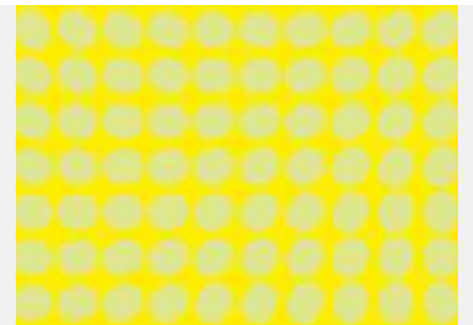
Frische Perspektiven

Die globale CO₂-Steuer ist nicht das einzige Thema, das Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Sommerakademie bearbeiten. Eine andere Gruppe befasst sich beispielsweise mit der Frage, wie sich die Beteiligung an klimafreundlichen Projekten durch bessere Kommunikation erhöhen lässt. Und eine dritte Gruppe schreibt einen Bericht dazu, wie die europäischen Länder die Planung ihrer Stromnetze aufeinander abstimmen könnten. Die Schweiz, findet die Vierergruppe, würde sich hervorragend als treibende Kraft einer solchen Idee eignen. Mit ihrer geographischen Lage im Herzen Europas könnte sie dank ihrer Wasserkraftwerke und Speicherseen die notwendige Flexibilität liefern, um das grosse Wachstum von Solar- und Windenergie in den Nachbarländern zu bewältigen. Damit die Schweiz eine solche konstruktive Rolle im Energiemarkt spielen kann und ihre europäischen Nachbarn nicht ohne sie planen, braucht es jedoch Lösungen für die institutionellen Fragen der Zusammenarbeit mit der Europäischen Union.

Wer den Studierenden zuhört, merkt rasch, wie viel Fachwissen, Kreativität und Motivation sie mitbringen. Etwas, was auch den beiden Leitern aufgefallen ist. «Ich erlebe die Studierenden sehr motiviert», sagt Sonia Seneviratne. «Sie haben viele Fragen und scheuen sich auch nicht, sie zu stellen.» Spannend sei zudem, dass viele aus den Geisteswissenschaften stammten, nur wenige aus der Physik oder den Klimawissenschaften. «Das ergibt frische Perspektiven und fördert ein interdisziplinäres Denken.»

Auch Rolf Wüstenhagen schätzt die Zusammenarbeit mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern sehr. Für die Studienwoche ist ihm zweierlei wichtig: «Zum einen sollen die Studierenden in dem Kurs lernen, sich eine fundierte Meinung zu bilden.» Zum anderen hoffe er, dass

sie angesichts der schier unlösbar scheinenden Probleme nicht resignieren. «Ich würde mir wünschen», sagt er, «dass sie trotz des Ernsts der Lage mit einer gewissen Zuversicht heimkehren.» Wenn man zusieht, mit wie viel Lust, Elan und Leidenschaft in den Gruppen diskutiert wird, zweifelt man nicht daran, dass sich seine beiden Hoffnungen erfüllen werden.



Begabtenförderung der Studienstiftung

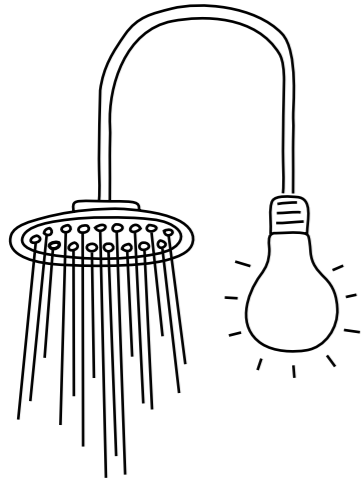
Studienalltag bedeutet büffeln, Prüfungen ablegen, Punkte sammeln – und viele Studentinnen und Studenten müssen nebenbei für ihren Lebensunterhalt sorgen. Für Reflexion bleibt wenig Zeit. In diese Lücke springt die Schweizerische Studienstiftung mit Stipendien und einem ergänzenden interdisziplinären Bildungsangebot. Die Werner Siemens-Stiftung unterstützt sie, indem sie jedes Jahr zehn Exzellenzstipendien finanziert, die Werner Siemens-Fellowships. Sie gehen an herausragende Studentinnen und Studenten aus den Bereichen Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technologie, Medizin und Pharmazie. Zudem unterstützt die WSS jedes Jahr drei Sommerakademien, in denen sich Studierende in interdisziplinär zusammengesetzten Arbeitsgruppen eine Woche lang mit Themen beschäftigen, die sie interessieren, für die im Studienalltag aber keine Zeit bleibt.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
19 800 Schweizer Franken pro Werner Siemens Fellowship pro Jahr und Person
360 000 Schweizer Franken jährlich für die Sommerakademien
Projektdauer 2015–2025
Projektleitung Dr. Klara Sekanina, Direktorin Schweizerische Studienstiftung, Zürich
Dr. Sarah Beyeler, Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Schweizerische Studienstiftung, Zürich

Zwölf überraschende Energie-Fakten

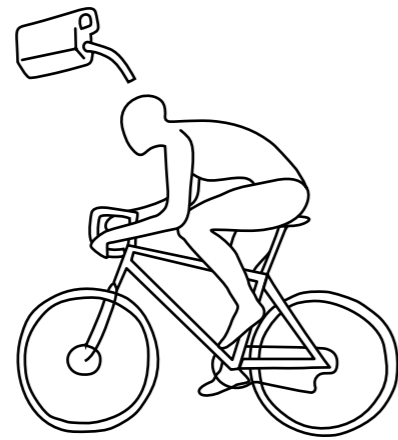
Wir brauchen sie zum Heizen, zum Kühlen und um von A nach B zu gelangen: Energie ist allgegenwärtig in unserem Leben. Auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft müssen wir lernen, sie umweltfreundlicher herzustellen und bewusster zu verbrauchen. Doch wo wird wie viel Energie erzeugt, verbraucht oder verschwendet? Einige kaum bekannte Energie-Fakten aus Haushalt, Verkehr und Natur.





Aufwändiges Duschen

Knapp ein Drittel des Energieverbrauchs der Haushalte geht auf das Konto des Warmwassers. Eine Minute Duschen frisst gleich viel Energie, wie ein Haushalt an einem ganzen Tag für das Licht verbraucht. Eine Fünf-Minuten-Dusche verbrennt drei Deziliter Erdöl.



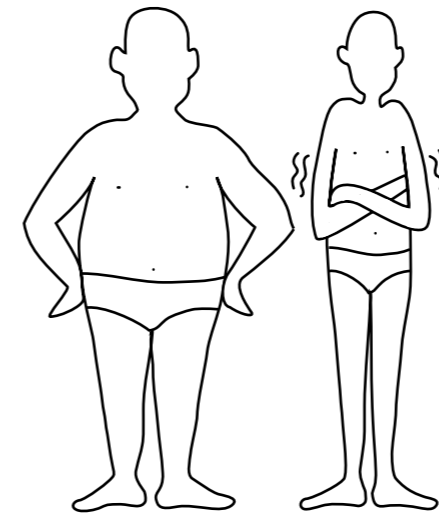
Effizienter Mensch

Unser Körper ist auf Sparsamkeit getrimmt. Das menschliche Gehirn läuft mit ungefähr 15 Watt – es verbraucht nicht mehr Energie als eine Külschrank-Glühbirne. Und Profi-Veinfahrer haben einen Benzinverbrauch von bloss 0,7 Liter auf 100 Kilometer, wenn man die aufgenommene Nahrung in Treibstoff umrechnet.



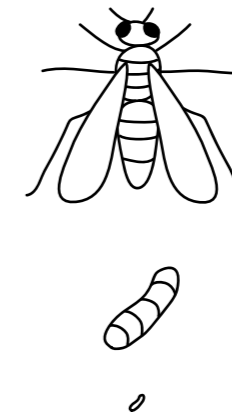
Wirksame Wandfarben

Rot wirkt warm, Blau fühlt sich kalt an: Die Empfindung trügt nicht. Studien haben gezeigt, dass Menschen in blaugrün gestrichenen Räumen schon bei etwa 14 Grad zu frösteln beginnen, in orangeroten hingegen erst bei 11 Grad.



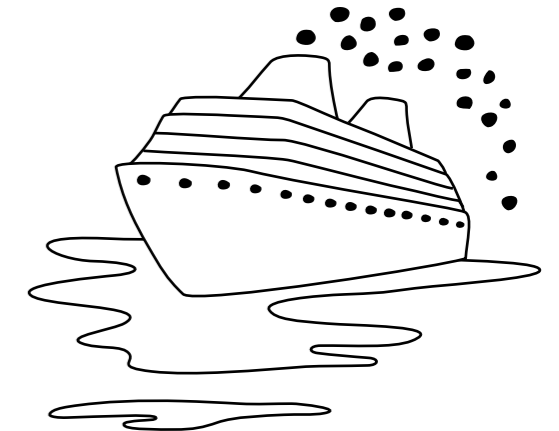
Schützende Fettschicht

Beleibte Menschen sind gut isoliert. Setzt man sie der Kälte aus, so müssen sie ihre körpereigene Wärmeenergieproduktion um einen Faktor drei weniger ankurbeln als schlanke. Und während die Beleibten ihre Heizung nach der Rückkehr in die Wärme rasch wieder zurückfahren, läuft sie bei den Schlanke auch eine Stunde später noch im Hochbetrieb.



Schnelle Brüter

Bienen füttern ihren Nachwuchs mit Gelée royale, einem besonders energiereichen Saft. So gemästet, verstaufen sich die Larven ihr Gewicht in nur fünf Tagen. Auf den Menschen umgerechnet würde das bedeuten, dass ein Neugeborenes nach fünf Tagen so schwer wäre wie ein Nashorn.



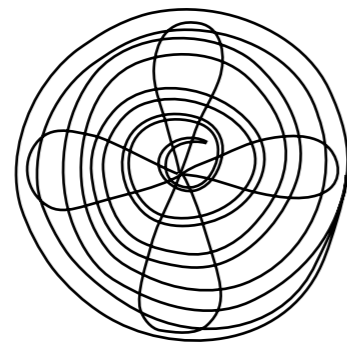
Wie Kreuzfahrten wirken

Jede Antarktis-Kreuzfahrt bringt etwa 83 Tonnen Schnee pro Tourist zum Schmelzen. Ursache dafür ist der Russ aus den Schiffskaminen, der sich auf dem Schnee ablagert und diesen verdunkelt. So wird weniger Sonnenlicht reflektiert, mehr Wärme bleibt am Boden und bringt den Schnee zum Schmelzen.



Antike Wellness

Die Caracalla-Thermen im alten Rom waren eine gigantische Badeanlage. Modellrechnungen zeigen, dass täglich vierzig bis fünfzig Tonnen Holz verfeuert werden mussten, um das nötige Warmwasser und die Heissluft für die Räume zu erzeugen. Energieverschwendung ist also keine neuzeitliche Erfindung.



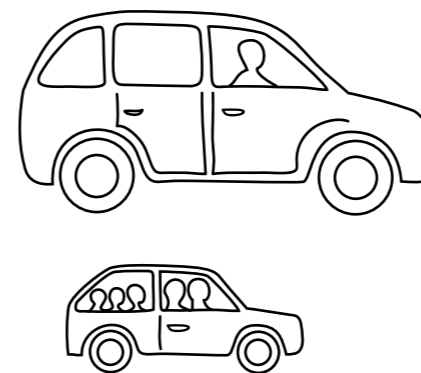
Kühlen statt heizen

Schon 2030 dürfte weltweit mehr Energie zum Kühlen als zum Heizen benötigt werden. In den letzten dreissig Jahren hat sich der Energieverbrauch für die Raumkühlung mehr als verdreifacht, und in den nächsten dreissig Jahren dürfte er sich abermals verdreifachen. In den USA besitzen bereits heute mehr als neunzig Prozent der Haushalte eine Klimaanlage, in Europa sind es weniger als zehn Prozent.



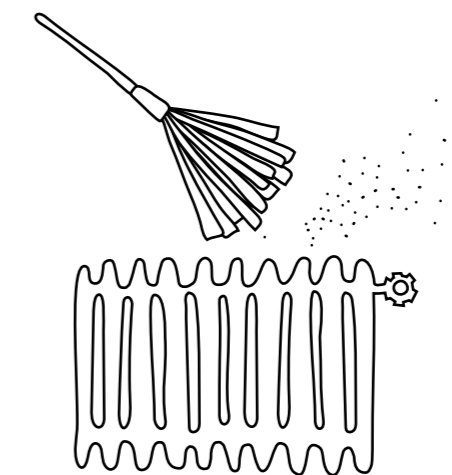
Kühlende Bäume

Bäume schützen vor Hitze, insbesondere Laubbäume mit ihrem dichten Blätterwerk. Die sommerlichen Höchsttemperaturen sind im Laubwald um bis zu fünf Grad tiefer als ausserhalb. Eine einzelne grosse Linde hat die gleiche Wirkung wie zweihundert Kühlschränke.



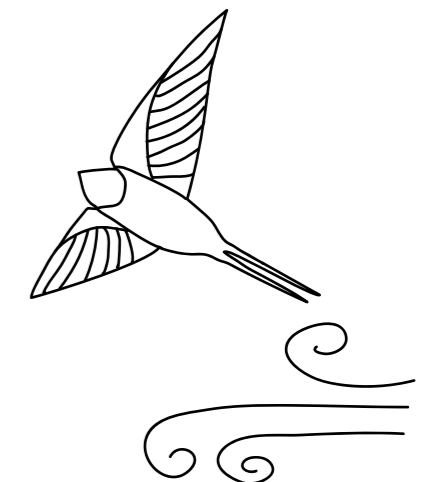
Technik alleine reicht nicht

Dank findiger Ingenieure sind Verbrennungsmotoren über die Jahrzehnte immer effizienter geworden. Aber: 1960 waren Autos im Schnitt halb so schwer und doppelt so dicht besetzt wie heute. Das heisst, pro transportierte Person fährt heute viermal so viel Automasse mit wie damals. Das frisst alle Effizienzgewinne weg.



Die Heizung pflegen

Vielleicht das einfachste Mittel zum Energiesparen, das aber oft vergessen geht: Die Radiatoren entlüften, freistellen – und richtig putzen. Eine Staubschicht von ein bis zwei Millimetern kann die Wärmeabstrahlung um bis zu sechs Prozent verringern.



Sparsame Natur

Rauchschwalben können mit zwei Gramm Fett von München nach Barcelona fliegen, indem sie geschickt die Winde nutzen. Krokodile haben einen Grundbedarf von bloss sechzig Kilokalorien am Tag, dreissigmal weniger als Menschen. Wie alle wechselwarmen Tiere müssen sich Reptilien nicht selber heizen – sie lassen sich von der Sonne wärmen.



Cleverere Energiekonzepte

Nicht nur Sonnen-, Wind- und Wasserenergie sind wichtig für eine nachhaltige Zukunft. In ihrem Schatten gibt es diverse weitere Ideen, die dazu beitragen werden, Energie zu gewinnen oder einzusparen. Das zeigen zwei innovative Forschungsprojekte, die von der Werner Siemens-Stiftung unterstützt werden und im Mikro- und Nanobereich tätig sind.



In den Labors des IST Austria entstehen neuartige Nanomaterialien, aus deren Temperaturgradienten sich Strom erzeugen lässt.

In Laborflächen mit sogenannten Handschuhboxen lassen sich empfindliche Substanzen schonend bearbeiten und analysieren.



Energie durchdringt unser ganzes Leben, es gibt keine natürlichen Vorgänge, die ohne sie funktionieren. Sie ist nötig, um etwas in Bewegung zu setzen, zu beschleunigen, hochzuheben, zu erwärmen oder zu beleuchten. Und überall, wo Energie verwendet wird, gibt es auch Möglichkeiten, sie einzufangen, zu gewinnen oder sie einzusparen. Es existieren Dutzende, vielleicht Hunderte Ansätze – auch abseits der wohlbekannteren Solarpanels, Stauseen oder Windräder.

An Küsten beispielsweise versucht man zuweilen, den Meereselementen einen Teil ihrer Energie abzuzapfen. In der Bretagne im Westen Frankreichs steht seit über einem halben Jahrhundert eines der größten Gezeitenkraftwerke der Welt. Es wandelt die Energiedifferenz zwischen Ebbe und Flut in Strom um. Wellenkraftwerke wiederum nutzen die Bewegungsenergie einzelner Wellen. Allerdings ist diese Technik, abgesehen von wenigen Ausnahmen, bislang nicht über das Forschungsstadium hinausgekommen.

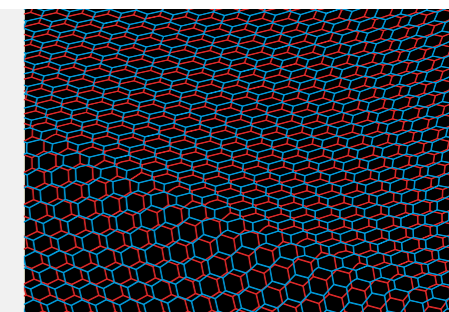
Auch der Mensch kann als Energielieferant dienen. Die britische Pop- und Rock-Band Coldplay verwendet für ihre Welttournee eine sogenannte kinetische Tanzfläche. Sie besteht aus Modulen, die sich etwas absenken, wenn die begeisterten Fans darauf herumtanzen. Die Platten speichern einen Teil dieser Bewegungsenergie – und geben sie beispielsweise zur Beleuchtung weiter. Forschende arbeiten zudem an ganz speziellen Fasern für Pullover oder T-Shirts. Bewegt sich der Träger des Kleidungsstücks, wird Energie erzeugt.

Schnelle Reaktionen und smarte Fenster

Diese Umwandlung von Bewegungsenergie in elektrische Energie beruht auf dem Prinzip der Piezoelektrizität. Dabei nutzt man den Umstand, dass mechanischer Druck bei ganz bestimmten Materialien die Ladungsschwerpunkte so verschiebt, dass eine elektrische Spannung entsteht. Und die Piezoelektrizität ist nur ein Beispiel dafür, wie sich auch im Kleinen Energie erzeugen lässt oder Prozesse energieeffizienter werden können.

Der Schlüssel zum Erfolg solcher Entwicklungen sind oft minimale Veränderungen an einem Material, um seine Eigenschaften stark zu verändern. Die Physikerin Maria Ibáñez vom Institute of Science and Technology Austria (IST Austria) in Klosterneuburg bei Wien hat sich darauf spezialisiert, neuartige Nanomaterialien zu entwickeln und ihre Eigenschaften zu untersuchen. Sie sagt: «Wenn wir auf die Nanoskala gehen, dann beobachten wir ganz neue Phänomene, die in vielerlei Hinsicht revolutionär sein können.»

Nanomaterialien werden heutzutage beinahe überall eingesetzt. Sie stecken in Lebensmitteln, in Zahnpasta, in Kosmetika, in Verpackungen. Und sie helfen auf verschiedenste Weise, um unsere Zukunft nachhaltiger und energieeffizienter zu gestalten. Ein sehr wichtiges Einsatzgebiet seien Katalysatoren, sagt Ibáñez. Katalysatoren beschleunigen und verbessern chemische Reaktionen, die sogenannten Katalysen. Forschende auf der ganzen Welt arbeiten zum Beispiel daran, CO₂ in Treib-



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-Zentrum zur Erforschung thermoelektrischer Materialien» am Institute of Science and Technology Austria (IST Austria) ändern. Sie sucht nach neuen Materialien, die dank genau definierter Nanostrukturen die gewünschten Eigenschaften aufweisen.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
8 Mio. Euro
Projektdauer 2020–2038
Projektleitung
Prof. Dr. Maria Ibáñez, Institute of Science and Technology Austria (IST Austria)

stoffe umzuwandeln – damit es wiederverwendet wird, statt in die Atmosphäre zu entweichen. Als Katalysatoren eignen sich oft sogenannte Nanopulver eines Materials, die eine besonders grosse Oberfläche aufweisen im Verhältnis zu ihrem Volumen. Der Grund: Bei Katalysen lösen Licht oder Elektrizität eine Reaktion aus, die an der Oberfläche des Katalysators abläuft.

Nanomaterialien könnten auch helfen, Solarzellen effizienter zu machen, Batterien zu verbessern oder in Gebäudeisolationen Energie zu sparen. Und sie sind mögliche Bestandteile zukünftiger smarter Fenster, in denen sie jenes Lichtspektrum herausfiltern, das Wärme liefert. Nicht zuletzt stecken Nanopartikel auch in TV-Geräten. Sie vergrössern die Lichtausbeute und helfen bei der Einstellung der gewünschten Farbtöne.

Nanopartikel im Hochdurchsatz

In ihrer eigenen Forschung ist Maria Ibáñez einem weiteren Einsatzgebiet von Nanopartikeln auf der Spur. Am Werner Siemens-Zentrum zur Erforschung thermoelektrischer Materialien untersucht sie, wie sich mittels Materialien aus neuartigen Nanopartikeln aus dem Temperaturgradienten eines Materials Strom erzeugen lässt. Dieser thermoelektrische Effekt ist schon lange bekannt, gilt aber bislang als ineffizient: Mit heutigen Materialien lässt sich auf diese Weise nur sehr wenig Strom gewinnen. Ein wichtiger Teil des Projekts von Ibáñez ist es, die Suche nach geeigneteren Materialien zu beschleunigen. Dazu baut sie eine Hochdurchsatz-Infrastruktur, in der Hunderte Proben aufs Mal analysiert und weiterentwickelt werden können.

Die Hochdurchsatz-Infrastruktur ist ein komplexes Gebilde, das aus drei Teilen besteht: dem Syntheseteil, dem Materialvorbereitungsteil und dem Messteil. In den Syntheseteil geben die Forschenden ein pulverförmiges Material, das sie für thermoelektrisch aussichtsreich halten. Daraus entstehen nun Dutzende oder Hunderte von Varianten, die sich bloss in Details auf der Nanoebene unterscheiden, aber unterschiedliche Eigenschaften aufweisen können.

Im Materialvorbereitungsteil werden die Pulver in eine Art Tinten umgewandelt und auf Folien gesprayed. Die Folien durchlaufen eine Wärmebehandlung und werden – im Messteil – untersucht. Die Resultate der Messungen werden in einen Rechner eingespeist und dort mittels eines maschinellen Lernsystems ausgewertet. «Die künstliche Intelligenz hilft uns, in den Unmengen von Daten jene Veränderungen zu finden, die besonders aussichtsreich sind», sagt Maria Ibáñez. Momentan arbeiten die Forscherin und ihr Team vor allem am Materialvorbereitungsteil des Geräts. Ein Prototyp steht, bald wird er einsatzfähig sein. «Das vergangene Jahr war das Jahr, in dem unsere Hochdurchsatz-Infrastruktur abzuheben begann», sagt Ibáñez.

Als Forscherin finde sie es faszinierend, effizientere Materialien zu suchen und Energie in einer neuen, nachhaltigeren Art zu nutzen, sagt die Forscherin. Aber sie finde es wichtig, sich nicht nur auf den technischen Fort-

schritt zu verlassen. Der grösste Hebel, den wir bei der Nachhaltigkeit hätten, seien Verhaltensänderungen. «Es ist sehr schwierig, 20 Prozent Energie mit Technologie zu sparen. Aber es ist sehr einfach, 20 Prozent Energie zu sparen durch unser Verhalten.»

Das gilt auch im Labor. Früher, erzählt Ibáñez, habe man Experimente stets unter den dafür optimalen Bedingungen durchgeführt – egal wie energieintensiv diese waren. «Heute testen wir, ob ein Experiment oder ein Material mit weniger Energieaufwand und Verbrauch immer noch funktioniert.» Ihr Team habe im vergangenen Jahr einen Schwerpunkt auf das Recycling von Lösungsmitteln gelegt. «Wir stellen unsere Pulver in speziellen Lösungsmitteln her und separieren sie dann davon», erzählt die Forscherin. «Bislang haben wir die Lösungsmittel weggeworfen. Nun versuchen wir, sie mehrmals zu verwenden.» Tatsächlich habe sich gezeigt, dass mit einem Lösungsmittel vier bis fünf Mal qualitativ hochwertige Materialien produziert werden können. Das bedeutet eine Abfallreduktion von mindestens 75 Prozent.

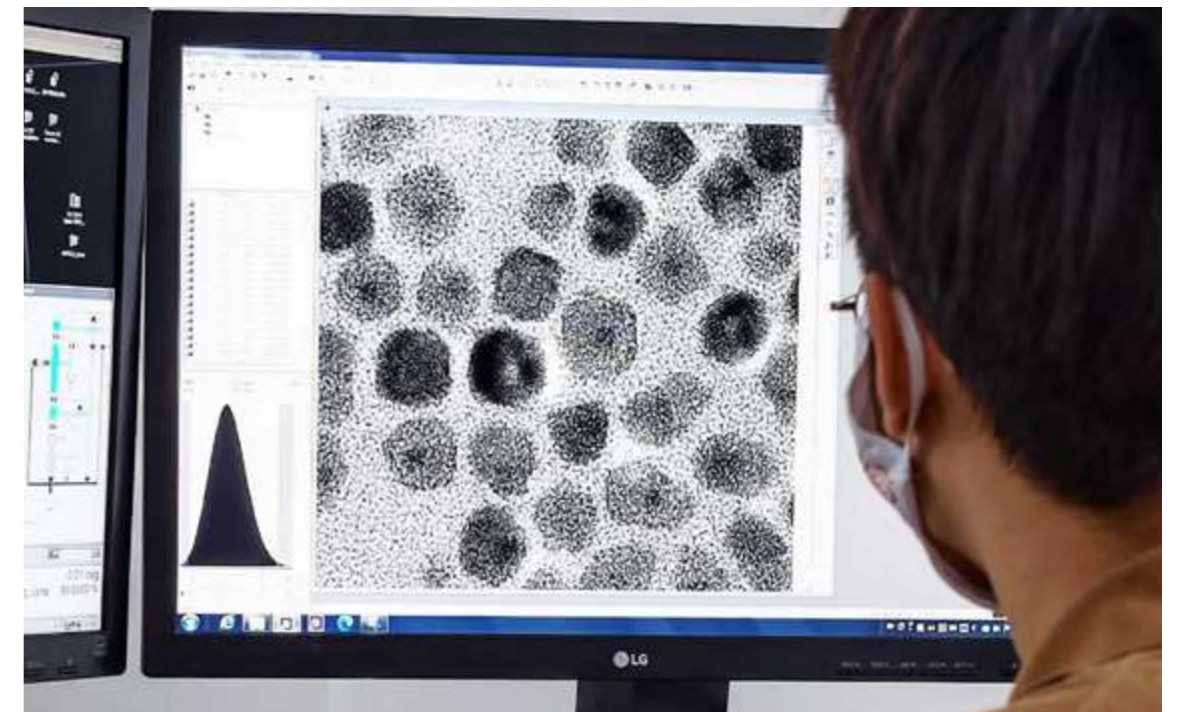
Bei der Thermoelektrik geht es laut Ibáñez zwar nicht um die ganz grossen Energieeinsparungen auf einen Schlag. Aber wenn es gelingt, die Technik mittels günstigerer und effizienterer Materialien konkurrenzfähig zu machen, kann sie trotzdem grosse Effekte haben. Mit ihrer Hilfe könnte man intelligente Sensoren mit Energie versorgen, die dereinst im Haushalt oder Büro Temperatur, Helligkeit, Luftdruck oder Feuchtigkeit überwachen. Auch kleine elektronische Geräte lassen sich dereinst vielleicht auf diese Weise aufladen. Oder, da die Thermoelektrik reversibel ist, gar abkühlen. «Die Transistoren elektronischer Geräte müssen ständig gekühlt werden», sagt Ibáñez. Die heutige Kühltechnik beruht auf Ventilatoren. «Aber auf kleinster Ebene funktioniert das nicht gut, vielleicht eröffnet die Thermoelektrik da neue Horizonte.»

Äusserst «genügsame» Mikrochips

Um neue Horizonte für elektronische Bauelemente geht es auch in der Arbeit von Jürg Leuthold am Zentrum für Einzelatom-Elektronik und -Photonik an der ETH Zürich, das von der Werner Siemens-Stiftung unterstützt wird. Er tüfelt an einem völlig neuartigen Mikrochip, auf dem die Schaltung statt wie bisher durch Elektronen auf der Basis einzelner Atome oder Ionen erfolgt.

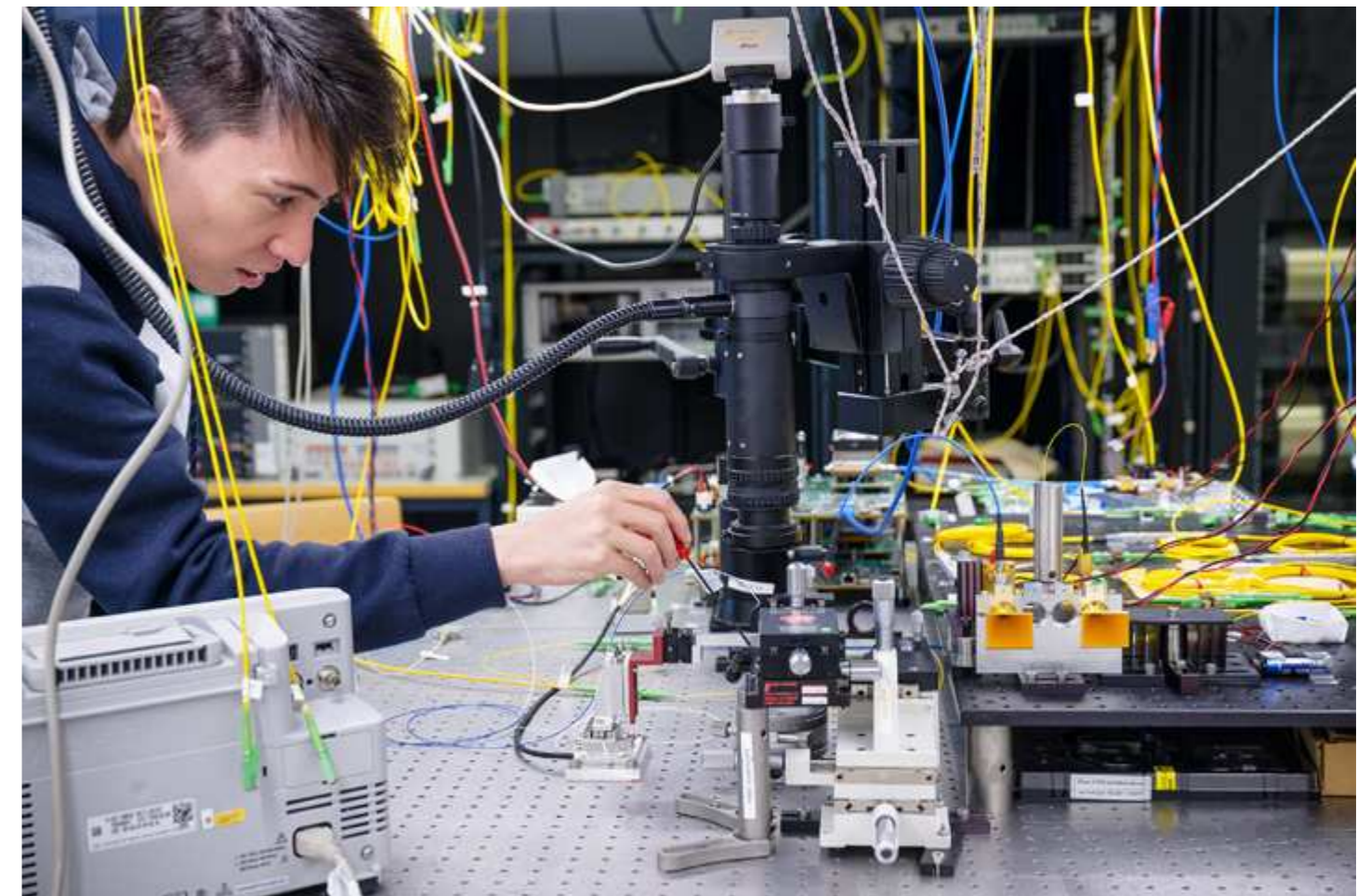
Gerade im Bereich der digitalen Geräte ist der Energiebedarf in den letzten Jahren sprunghaft angestiegen. Immer bessere Geräte und immer neue Möglichkeiten steigern den Bedarf. Ein Beispiel dafür seien Programme, die künstliche Intelligenz einsetzen, sagt Jürg Leuthold. «ChatGPT und Co. funktionieren extrem gut – aber sie werfen für die einfachsten Fragen ihre gesamte Suchmaschinen an. Das verbraucht enorm viel Energie.»

Genau hier könnte das Projekt des Einzelatom-Schalters wertvoll sein. «Wir gehen damit die nächste Generation Mikrochips an, die eine Effizienzsteigerung um den Faktor 100 oder gar 1000 bringen kann», sagt Leuthold. Das bedeute nicht, dass die Gesellschaft dann 1000 Mal



Die thermoelektrischen Substanzen werden am IST Austria auch mit bildgebenden Methoden untersucht.

Die Elektronik der Zukunft: Im Labor von Jürg Leuthold an der ETH Zürich entstehen Mikrochips, auf denen die Schaltung mittels einzelner Atome erfolgt.



weniger Energie für die Kommunikation verbrauche als heute. «Denn es werden gleichzeitig auch neue Technologien entwickelt, welche mit weniger Energie mehr leisten.» Als gutes Zeichen wertet er, dass gemäss Studien der weltweite Energieverbrauch für Kommunikation seit etwa zwei Jahren erstmals konstant blieb. «Nicht weil die Nachfrage nachgelassen oder die übermittelte Datenmenge kleiner wurde, sondern weil neue Innovation zu Einsparungen geführt hat.» Sprich: Die Innovation hin zu energiesparenden Geräten und Techniken scheint erstmals den wachsenden Kommunikations hunger ausgleichen zu können.

Leutholds Gruppe ist bei dieser innovativen Forschung vorne dabei. Eines ihrer Spezialgebiete sind sogenannte Modulatoren – Schlüsselemente der Kommunikationsinfrastruktur, die elektrische Signale auf Laserstrahlen kodieren. Modulatoren, welche elektrische Signale in optische Signale umwandeln, sind entscheidend in der heutigen Informationswelt. Denn auf der einen Seite liegen die Informationsdaten auf unseren Geräten, im Mobiltelefon oder in einem Datacenter in elektronischer Form vor. Auf der anderen Seite verläuft die Verteilung der Daten über Glasfasernetze, in denen Photonen, also optische Signale, die Rolle des Informationsträgers übernehmen.

Laserstrahl statt Tiefseekabel?

Die Forschenden an der ETH Zürich haben sogenannte plasmonische Phasenmodulatoren entwickelt, die eine sehr schnelle und effiziente Umwandlung ermöglichen. Und sie haben demonstriert, dass sich diese Modulatoren in verschiedenen Konfigurationen für etliche Anwendungen eignen. In einer kürzlich publizierten Studie etwa beim Übergang von einem WLAN-Adapter auf eine Antenne vor dem Haus. «Ein Verstärkermechanismus konvertiert das Signal direkt», erklärt Leuthold. «Und das Ganze braucht einen Faktor 100 bis 1000 weniger Energie als ein traditionelles Modem.» Doktoranden seiner Gruppe haben mittlerweile auch ein Start-up gegründet, das solche Modulatoren zu kommerzialisieren versucht.

Neben den Modulatoren gibt es viele andere Teile, die für das Funktionieren eines Kommunikationsnetzwerks nötig sind. «In vielen Bereichen gibt es neue Impulse und Innovationen», sagt Leuthold. Seine Gruppe hat kürzlich auch aufgezeigt, welche tiefgreifende Veränderungen solche Innovationen in der Kommunikationswelt herbeiführen können. Mit einem Test zwischen dem Jungfrau joch und Bern wiesen sie nämlich nach, dass sich mittels optischer Datenkommunikationslaser Datenmengen von bis zu einem Terabit pro Sekunde über grosse Luftstrecken übertragen lassen.

Das war ein wichtiger Test, um zu zeigen, dass man von einem Satelliten aus die Information auch über grosse Distanzen in der Atmosphäre übertragen kann. «Im Weltall kann man mit solchen Lasern schon heute einfach kommunizieren», sagt Leuthold. Aber in der Atmosphäre stören Luftturbulenzen die Übertragung. Mit einer Kombination von verschiedenen Innovationen ha-

ben er und seine europäischen Partner es nun geschafft, die grossen Datenmengen trotz dieser Störungen auslesbar zu machen. Wenn die Technik den Schritt zur Anwendung schafft, wird sie die enorm teuren Tiefseekabel ersetzen, die heute das Rückgrat der weltweiten Internetverbindungen bilden.

Und wer weiss, vielleicht gelingt Leutholds Gruppe mit dem WSS-Projekt der Einzelatom-Schaltung bald ein weiterer Coup. Das Projekt ist auf gutem Weg dazu. Bereits früher konnten die Forschenden aufzeigen, dass die neue Methode zu enormen Effizienzsteigerungen führen kann. Im vergangenen Jahr haben sie nun eine Studie publiziert, die nachweist, dass Atomschalter sich auch punkto Geschwindigkeit mit herkömmlichen Schaltern messen können.

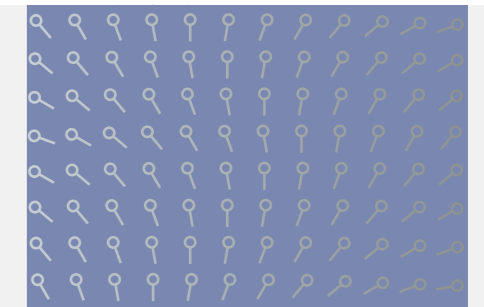
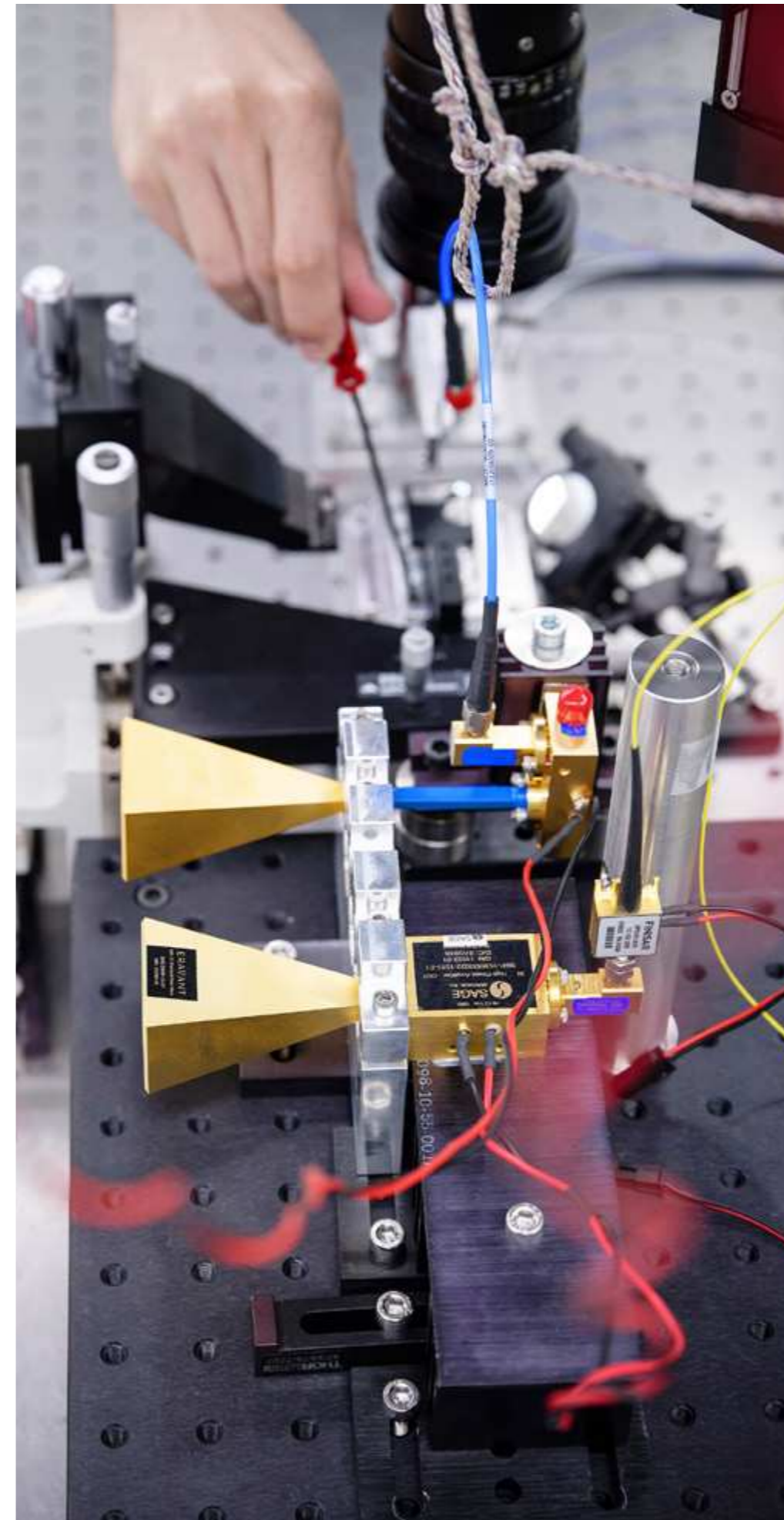
Wahnsinnstempo beim Schalten

Die Geschwindigkeit ist eine wichtige Kennzahl. Wenn Atomschalter beim Ein- und Ausschalten langsam reagieren, können sie noch so klein sein – sie werden sich nicht durchsetzen. Leuthold und seinem Team gelang es, diesen Wert auf unter 20 Pikosekunden zu senken. Eine Pikosekunde ist ein Millionstel einer Millionstel Sekunde. Das liegt in der Grössenordnung der heutigen Silizium-Chips. Die Schaltgeschwindigkeit ist künftig also kein Argument mehr, das gegen Atomschalter spricht.

Der zweite Durchbruch, der den Forschenden im vergangenen Jahr gelang, betrifft die Schaltungstypen. In der Elektronik unterscheidet man zwischen volatilen und nicht volatilen Schaltern. Volatile Schalter klappen nach der Aktivierung wieder zurück. Nicht volatile Schalter bleiben so lange aktiviert, bis man ihren Zustand wieder ändert. Dem Team um Leuthold gelang es nun erstmals, mit seiner Atomschalter-Methode beide Arten von Schaltern zu bauen. «Das ist wichtig, weil wir so unseren Werkzeugkasten erweitern», sagt Leuthold.

In den nächsten Jahren geht es nun darum, unterschiedliche Elemente zu verbinden. «Bisher haben wir immer den einzelnen Schalter angeschaut», sagt Leuthold. «Aber letztlich müssen mehrere Schaltelemente miteinander verknüpft werden, damit wir eine Funktion realisieren können.» Eine Funktion, die auf clevere Art dazu beitragen könnte, den künftigen Energieverbrauch zumindest im Zaum zu halten.

Damit die Messungen gelingen, müssen die Einstellungen an den komplexen Schaltelementen exakt vorgenommen werden.



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. Forscherinnen und Forscher 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
Projektdauer 2017–2025
Projektleitung Prof. Dr. Jürg Leuthold,
Direktor des Instituts für Elektromagnetische Felder, ETH Zürich



«Wir stecken mitten in einer Polykrise»

Um unsere Zukunft nicht zu gefährden, müssten wir jetzt handeln, sagt Sandrine Dixson-Declève, die Co-Präsidentin des Club of Rome. Die Wissenschaft spiele eine wichtige Rolle auf dem Weg zur Nachhaltigkeit – aber es brauche mehr als neue Technologien, um die multiplen Krisen in den Griff zu bekommen, in denen sich die Menschheit befinde.

Sandrine Dixson-Declève, lässt Ihre Arbeit als Co-Präsidentin des Club of Rome Sie oft schlaflos, wütend oder depressiv werden?

Wie viele, die auf diesem Gebiet arbeiten, schwanke ich zwischen Hoffnung und Verzweiflung. Es gibt Momente, in denen ich optimistisch bin. In denen ich sehe, dass wir die meisten Lösungen haben, die wir brauchen. Dass wir Entscheidungsträger haben, die zuhören. Aber leider ist das oft nicht der Fall. Wenn ich momentan zum Beispiel sehe, wie Erdöl- und Gasbohrungen zunehmen oder wie Regierungen nach rechts schwenken, dann werde ich sehr besorgt. Wir stecken mitten in einem planetaren Notstand – und die meisten Menschen haben das Gefühl, wir könnten weitermachen wie bisher.

Trotzdem scheinen Sie nicht ganz zu verzweifeln.

Dana Meadows, die Hauptautorin des Club-of-Rome-Berichts «Die Grenzen des Wachstums», sagte einmal: «Es gibt zu viele gute Nachrichten, um zu verzweifeln, aber zu viele schlechte Nachrichten, um selbstzufrieden zu sein.» Ich glaube, das ist sehr wichtig. Wir müssen jeden Tag daran denken, dass es gute und schlechte Nachrichten gibt. Aber wir müssen die Hoffnung behalten.

Bis heute ist der Club of Rome am bekanntesten für «Die Grenzen des Wachstums», das vor mehr als 50 Jahren erschien. Meadows und ihre Mitautoren warnten damals vor katastrophalen Folgen, sollten wir nichts unternehmen gegen Bevölkerungswachstum, Industrialisierung, Umweltverschmutzung, Unterernährung und Ausbeutung nicht erneuerbarer Ressourcen. Haben sich diese Herausforderungen bis heute verändert?

Ich glaube, es sind ungefähr dieselben geblieben. Die Weltbevölkerung ist in den letzten 50 Jahren weiter gewachsen. Das belastet die natürlichen Ressourcen weiter. Im letzten Herbst bestätigte ein Bericht des Stockholm Resilience Centre, dass wir von neun planetaren Grenzen sechs bereits überschritten haben. Genau das sagte «Die Grenzen des Wachstums» voraus für den Fall, dass wir mit einer Rohstoffwirtschaft weiterfahren, die Produktivität um jeden Preis will.

Manche Beobachter kritisierten, die Prognosen des Berichts hätten sich nicht bewahrt.

Manche Leute sagen: «Aber wir haben das Ölfördermaximum nicht überschritten. Wir haben immer noch natürliche Ressourcen.» Ja, das stimmt. Der Report sagte nicht, wir hätten keine Ressourcen mehr. Er zeigte, dass mit dem Bevölkerungswachstum der Zugang zu Ressourcen schwieriger wird. Und dass es kombinierte Effekte von sozialen und ökologischen Spannungen gibt.

Welches ist das wichtigste Problem, mit dem wir heute konfrontiert sind?

Wir sehen heute ein Nebeneinander

von sozialen und Umwelt-Kippunkten. Wenn man sich die Szenarien in «Grenzen des Wachstums» anschaut, dann zeigten sie, dass in den 2020er-Jahren eine Serie von starken Kippunkten erreicht sein könnte. Nun sind wir in den 2020er-Jahren: Und wir stecken mitten in einer Polykrise – mit einer Klimakrise, mit einer Gesundheitskrise, mit der Ukraine-Invasion, aber auch mit einer Biodiversitätskrise. Wir haben zum 50-Jahr-Jubiläum von «Die Grenzen des Wachstums» ein Buch geschrieben, «Earth for All», um diese Spannungspunkte und mögliche alternative Zukunftsszenarien anzusprechen.

Welches Fazit ziehen Sie in Ihrem Buch? Wir zeigen, dass die soziale Krise der grösste Kippunkt sein wird. Und wahrscheinlich unsere grösste existenzielle Bedrohung. Die Ungleichheit in den reichsten Nationen, etwa den USA oder Grossbritannien, nimmt zu. Und die Ungleichheit zwischen reichen und armen Ländern hat exponentiell zugenommen. Das führt zu sozialen Spannungen, begünstigt autoritäre Regimes, destabilisiert Demokratien und ist ein Nährboden für Populismus.

«Ich schwanke zwischen Hoffnung und Verzweiflung.»

Und solche Entwicklungen können dann überschwapen auf andere Probleme wie die Klimakrise?

Genau. Wobei es nicht ein Überschwapen ist, sondern ein Zusammenwirken. Wir sehen zum Beispiel, dass höhere Temperaturen in Indien eine direkte Auswirkung haben auf die Art, wie Männer ihre Frauen behandeln. Es gibt mehr Aggression, mehr häusliche Gewalt.

Weshalb?

Zum einen machen heissere Temperaturen Menschen automatisch aggressiver. Zum anderen wachsen

mit der Klimaerwärmung ihre Ängste – mit der Hitze wachsen in diesem Fall männliche Aggressionen, weil die Ernten kleiner werden. Die Männer machen sich Sorgen, dass sie ihre Familien nicht mehr durchbringen. Wer hätte gedacht, dass einer der Folgeeffekte des Klimawandels mehr Aggression ist? Aber genau darum geht es bei der systemdynamischen Modellierung und dem Systemdenken. Mit dieser Methode lassen sich komplexe Systeme untersuchen – und beispielsweise eine Reihe miteinander verknüpfter Spannungspunkte identifizieren.

Gibt es weitere solche kombinierte Effekte?

Wir sahen dasselbe in der Corona-Krise, als die Menschen häufiger drinnen blieben. Auch das hatte einen Einfluss auf die häusliche Gewalt – besonders in Familien, die in engen Verhältnissen leben. Oder die Ukraine-Invasion kombiniert mit dem sehr, sehr trockenen, heissen Sommer in Frankreich, Italien und Spanien. Das führte zu einem starken Preisanstieg bei Lebensmitteln und zu Unterbrechungen der Wertschöpfungskette. Wir vergessen oft, dass es solche kombinierte Effekte gibt. Und dass es direkte Auswirkungen einer Polykrise und der Beziehung zwischen komplexen Systemen sind.

In «Earth for All» schlagen Sie fünf Pfade vor, aus dieser Krise zu kommen: Sie betreffen Armut, Ungleichheit, Selbstbestimmung, Energie und Ernährung. Sehen Sie in einigen dieser Bereiche Fortschritte?

Es geht nicht mehr um einzelne Bereiche. Die fünf müssen zusammenwirken. Manche Menschen glauben zum Beispiel, wir könnten alles durch Technologie lösen. Technologische Erfindungen gelten als Hype, als sexy. Aber mit Technik allein lösen wir das Ungleichheits- und das Armutproblem nicht. Wir brauchen mehr: Wir brauchen die richtige Staatsführung, um die ökonomischen und Finanzsysteme neu zu verkabeln – und um neue technische Lösungen im nötigen Tempo und in der nötigen Skala zu ermöglichen. Aber mit dem politischen und wirtschaftlichen Wandel tun wir uns schwer.

Einer Ihrer Vorschläge ist die Einführung einer universellen Grunddividende: Unternehmen würden für ihren Verbrauch von Ressourcen besteuert, die eigentlich der Gemeinschaft gehören: Wasser, Land, Mineralien, fossile Energien, Daten. Bewegt sich etwas in diese Richtung?

Norwegen und Alaska haben Systeme, die unserem Vorschlag sehr ähnlich sind. Sie geben der Bevölkerung jedes Jahr einen Check oder Steuerrabatte – so sieht diese, wie die Global Commons, die natürlichen Ressourcen, geteilt werden. Nur ist der Anteil nicht sehr gross, verglichen mit den Profiten der Firmen.

«Die soziale Krise ist unsere grösste existenzielle Bedrohung.»

Ganz allgemein ist eine der wichtigen Forderungen des Club of Rome eine Ausrichtung der Wirtschaft auf Nachhaltigkeit, weg vom Wachstum, das sich nur am Bruttoinlandsprodukt orientiert.

Wie wollen Sie das erreichen?

Es ist nicht die Wirtschaft, die sich bewegen wird. Es sind die Regierungen, die neue Indikatoren schaffen müssen, welche die Bedeutung des Bruttoinlandsprodukts, der Produktivität abschwächen. Indem sie anderen ökonomischen Indikatoren wie dem Zugang zu sozialen Leistungen, Wohnraum, Gesundheitswesen und Bildung mehr Gewicht beimessen. Indem sie externe Kosten besteuern, welche Energie oder Nahrungsmittel verursachen. Indem sie dem einen echten Wert geben, was für das Leben und die Lebensgrundlagen der Menschen am wichtigsten ist. Das passiert nicht. Aus diesem Grund haben wir einen Wohlstandsindex entwickelt. Er zeigt, dass das allgemeine Wohlbefinden zwar vor allem in Ländern mit hohem Einkommen bis Anfang dieses Jahrzehnts gestiegen ist. Insbesondere in den letzten Jahren verzeich-

nen wir jedoch einen dramatischen Rückgang des Wohlbefindens der Menschen – aufgrund der Pandemie, der ukrainischen Invasion und der Inflationseffekte.

Weshalb?

Es gab eine völlige Abkopplung der Finanzmärkte von der Realwirtschaft. Wir sehen, dass der grösste Teil des Profits in die Taschen der Aktionäre oder von Interessengruppen geht statt in die produzierende Wirtschaft. Dass es keinen sozialen Kontrakt gibt. Wenn ein Unternehmen viele Menschen entlässt, gehen die Aktien hoch. Das ist gut für die Firma und die Aktionäre. Aber die Entlassungen verursachen Kosten für die Sozialsysteme, die Gesellschaft und die individuellen Lebensbedingungen.

Also geht es wieder um Ungleichheit.

Ja.

In «Earth for All» schreiben Sie, dass die Menschheit an einem Scheideweg steht. Wie viel Zeit bleibt uns, um die richtigen Weichen zu stellen?

Uns bleibt keine Zeit mehr, wir müssen es jetzt tun. Wir sind bei einer Erderwärmung von 1,2 Grad angelangt und werden höchstwahrscheinlich 1,5 Grad im Jahr 2030 erreichen. Wir sehen schon jetzt grosse Auswirkungen, sogar in Europa: Überflutungen, Trockenheiten, Waldbrände. Zwischen 1,5 und 2 Grad Erwärmung werden die Auswirkungen noch grösser werden. Verbunden mit den klimatischen Kippunkten sind gravierende soziale Kippunkte. Das ist die Hauptaussage des Buches: Die Gesellschaft steht an einem Scheideweg, weil soziale und ökologische Kippunkte zusammenkommen.

Welche Rolle spielt die Wissenschaft dabei, einen Wandel zu ermöglichen oder zu beschleunigen?

Wissenschaft ist grundlegend. Auf ihr gründen unsere Modelle. Wir brauchen die Wissenschaft aber auch bei laufenden politischen Verhandlungen, zum Beispiel über Klimamassnahmen. Leider bemerken wir hier ein Auseinanderdriften: Die Wissenschaft wird zwar immer robuster in



Sandrine Dixon-Declève
Sandrine Dixon-Declève ist Co-Präsidentin des Club of Rome, gleichberechtigt mit dem indischstämmigen Nachhaltigkeitsexperten Paul Shrivastava. Die in den USA aufgewachsene Belgierin hat Umweltwissenschaften, Ökonomie und Internationale Beziehungen studiert. Sie hat die UNO, die EU, Regierungen auf der ganzen Welt, Unternehmen, akademische Einrichtungen und Nichtregierungsorganisationen zu Nachhaltigkeit, neuen Wirtschaftsmodellen, Klima- und Energiepolitik beraten. Das Medienunternehmen GreenBiz zählt sie zu den 30 einflussreichsten Frauen weltweit, die den Wandel zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft vorantreiben und grüne Unternehmen fördern. Zum 50-Jahr-Jubiläum des Club of Rome hat sie gemeinsam mit renommierten Mitautorinnen und -autoren «Earth for All» veröffentlicht, um aufzuzeigen, wie die Menschheit die grossen Probleme der Welt in den Griff bekommen kann.

Sandrine Dixon-Declève, Owen Gaffney, Jayati Ghosh, Jørgen Randers, Johan Rockström, Per Espen Stoknes:
«Earth for All – Ein Survivalguide für unseren Planeten», Oekom Verlag, 2022

Bezug auf ihre Voraussagen, doch in den Verhandlungen wird dieses neue Wissen nicht einbezogen. Zusätzlich gibt es Teile von Regierungen, Teile der Wirtschaft, die überhaupt nichts wissen wollen von einem Wandel. Denn es würde heissen, dass sie Änderungen anschieben müssten. Und sie wollen weder Macht noch Profit verlieren. Hier wird es zunehmend angespannter. Zwischen den Mächtigen und Leuten wie mir oder aus den Wissenschaften oder der Jugend, die sagen: Es ist nicht mehr die Zeit, sich einfach an die Macht zu klammern. Wir müssen die Dinge anders angehen, um nicht nur unsere individuellen Interessen zu schützen, sondern auch die kollektiven.

«Wir verzeichnen einen dramatischen Rückgang des Wohlbefindens der Menschen.»

Was können Wissenschaftsstiftungen wie die Werner Siemens-Stiftung zu einer nachhaltigeren Zukunft beitragen?
Ich glaube, Stiftungen müssen die heutige Rolle der Wissenschaft verstehen. Wissenschaft und Forschung dürfen nur einen Fokus haben: die Gesellschaft in die Lage zu versetzen, innerhalb der planetarischen Grenzen zu gedeihen. In einer Zeit, in der wir uns in einer planetaren Krise befinden, müssen wir alle unsere Forschungsgelder dort investieren, wo es wirklich wichtig ist. Die Wissenschaft darf nicht im Elfenbeinturm bleiben, sie muss sich fokussieren auf die wichtigsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Und Resultate müssen rasch umgesetzt und skaliert werden. Denn in vielen Fällen sind Forschung und Innovation viel zu langsam. Ich bin auch Vorsitzende der «Expert Group on the Economic and Societal Impacts of Research and Innovation» für die Europäische Kommission. Dort arbeiten wir daran, Wis-

senschaft relevant zu machen für die politische Entscheidungsfindung. Wir sehen, dass politische Entscheidungsträger wissenschaftliche Erkenntnisse oft nicht zur richtigen Zeit bekommen – dann, wenn sie Entscheidungen treffen müssen.

Nicht nur Politiker müssen Entscheidungen treffen, sondern jeder Mensch. Und wir alle wissen, dass der Klimawandel eine Bedrohung für uns darstellt und dass wir Ressourcen nicht unbegrenzt verbrauchen können. Dennoch gibt es viele – nicht nur jene an der Macht – die nichts tun. Wie erklären Sie sich diese Kluft zwischen Wissen und Handeln?
Die Menschheit ändert sich vielfach erst dann, wenn ein Schlag sie mitten ins Gesicht trifft. Das ist die Vogel-Strauss-Taktik: Wir stecken unsere Köpfe in den Sand. Die Menschen sind besorgt, ängstlich, einige haben aufgegeben. Sie sind zynisch geworden gegenüber ihren Regierungen. Aber ich glaube, wenn man ihnen eine hoffnungsvolle Vision gibt, eine alternative, positive Zukunft, dann sind sie bereit für den Wandel.

Und wie gibt man ihnen diese Vision?
Wir haben eine Umfrage in allen G20-Ländern durchgeführt. Darin erklärten 74 Prozent der Bürgerinnen und Bürger, dass sie einen Wandel hin zu einer Wirtschaft wünschen, die ein grösseres Wohlergehen für alle und nicht nur für einige wenige gewährleistet. Dies ist die Kernaussage unseres Buches und diejenige, über die ich vor Regierungen und anderen Zuhörern spreche. Ich glaube, es ist nicht clever, Ängste zu schüren. Dafür wird die Umwelt- und Klimabewegung oft kritisiert. Ich bevorzuge es, die Dinge als Herausforderung anzuschauen – vielleicht, weil ich in den USA aufgewachsen bin. Wer ein Rennen läuft, weiss, dass es hart wird. Was einen antreibt, ist das Gefühl, wenn man das Ziel erreicht hat, das Gefühl des Sieges. Es wird ein Marathon, den wir laufen müssen – und wir müssen den Menschen irgendwie die Belohnung aufzeigen, die am Ende auf sie wartet. Nämlich, dass sie ein ganzheitliches, positives Leben werden führen können.



Club of Rome

Der Club of Rome ist ein Zusammenschluss von Experten verschiedener Disziplinen aus mehr als 30 Ländern. Die gemeinnützige Organisation wurde 1968 gegründet und setzt sich für eine nachhaltige Zukunft der Menschheit ein. 1972 publizierte er die vielbeachtete Studie «Die Grenzen des Wachstums». Die Studie warnte damals vor wirtschaftlichen Schwierigkeiten im 21. Jahrhundert, sollte die Gesellschaft insbesondere bei der Nutzung natürlicher Ressourcen nichts ändern.

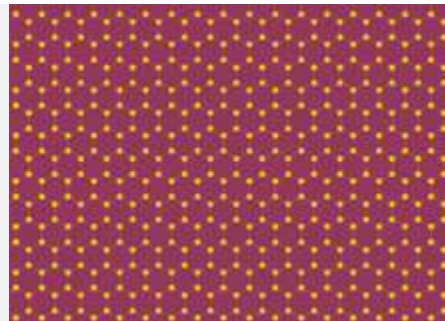


Projekte

Neben pionierhaften Forschungsprojekten rund um Energie und Nachhaltigkeit unterstützt die Werner Siemens-Stiftung auch Vorhaben in anderen technischen und naturwissenschaftlichen Disziplinen: von der Medizintechnik über die Quantenphysik bis zur Informatik. Die folgenden Seiten zeigen auf, welche Fortschritte die laufenden Projekte machen.

«Nano-Magnete» stabilisieren

Im Projekt CarboQuant bauen Forschende quantisierte magnetische Momente, sogenannte Spins, in ihre Graphen-Nanobänder ein und verknüpfen sie kontrolliert miteinander. Nun geht es darum, diese «Nano-Magnete» als Schaltelemente für Quantenanwendungen in der Sensorik, Kommunikation und Datenverarbeitung nutzbar zu machen. Für diese Aufgabe konnte eine der weltweit führenden Expertinnen auf dem Gebiet des Quantenmagnetismus gewonnen werden.



CarboQuant

Das CarboQuant-Projektteam am Eidgenössischen Forschungsinstitut für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung (Empa) in Dübendorf, Schweiz, will kleinste quantenelektronische Bauteile entwickeln, die idealerweise bei Raumtemperatur funktionieren und so im Alltag Verwendung finden können.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

15 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2022–2032

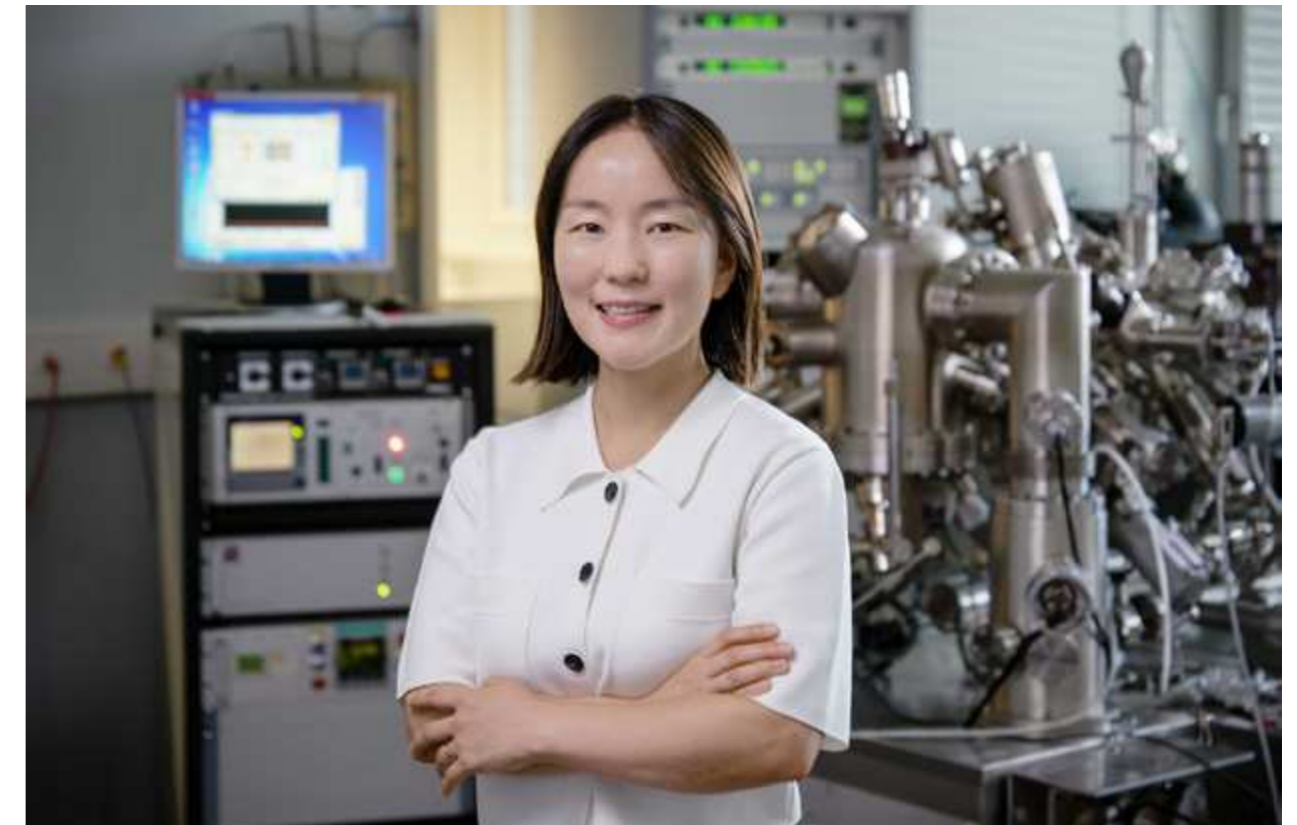
Projektleitung Prof. Dr. Roman Fasel, Leiter des nanotech@surfaces Laboratory, Empa, Dübendorf
Dr. Oliver Gröning, Co-Projektleiter CarboQuant und stv. Leiter des nanotech@surfaces Laboratory, Empa, Dübendorf

«CarboQuant ist zum Zement geworden, der all unsere Forschungsaktivitäten verbindet», sagt Co-Projektleiter Oliver Gröning. Mit Roman Fasel, Leiter des nanotech@surfaces Laboratory am Eidgenössischen Forschungsinstitut für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung (Empa) in Dübendorf bei Zürich, hat er im letzten Jahr die in ihrer Abteilung arbeitenden Forschungsgruppen neu strukturiert: in die Bereiche Kohlenstoff-Nanomaterialien, atomistische Simulationen, lokale optische Spektroskopie, molekularer Quantenmagnetismus und Material-Integration in Schaltkreise. Die Doktorierenden und Postdoktorierenden in diesen Gruppen arbeiten nun vorwiegend bei CarboQuant mit. «Starke Querverbindungen zwischen den Forschungsgruppen sind für uns enorm wichtig», betont Gröning. «Die neue Struktur der interdisziplinären Zusammenarbeit ist unerlässlich für den Schritt von der Grundlagenforschung in die Quantenanwendung.»

Die Finanzierung durch die Werner Siemens-Stiftung (WSS) hat der Projektidee grossen Schub verliehen. «Wenn der Stein mal am Rollen ist, stösst er weitere Steine an», freut sich Gröning. Die 15 Millionen Schweizer Franken, die die WSS CarboQuant für die Jahre 2022 bis 2032 zugesichert hat, erlauben es den Projektleitern, die Förderung von spezialisierten Teilbereichen etwa durch den Schweizerischen Nationalfonds und den Europäischen Forschungsrat (ERC) besser zu vernetzen und in das langfristige Ziel von CarboQuant zu integrieren.

Eine der weltweit Besten

«CarboQuant zieht enorm an», sagt Gröning, «auch personell.» So konnte mit der südkoreanischen Quantenphysikerin Dr. Yujeong Bae eine weltweit führende Spezialistin auf dem Gebiet der Quantenkontrolle von Elektronen- und Kernspins auf Oberflächen für das Projekt gewonnen werden. Bae leitete eine eigene Forschungsgruppe am renommierten Center for Quantum Na-



Die südkoreanische Quantenphysikerin Dr. Yujeong Bae stösst zum neu aufgestellten interdisziplinären CarboQuant-Team

noscience in Seoul, bevor sie im Januar 2024 in die Schweiz gezogen ist. Dank der WSS-Unterstützung können ihr bei CarboQuant Topbedingungen geboten werden.

«Yujeong Bae war unsere Wunschkandidatin», erzählt Gröning. «Sie bringt genau das richtige Know-how für unsere Ziele mit – den Quantenmagnetismus mit atomarer Präzision zu kontrollieren.» Weltweit gebe es nur eine Handvoll Personen mit den nötigen Qualifikationen. Dass Bae die Empa und CarboQuant als neue Heimat für ihre Forschung gewählt hat, habe sicher auch damit zu tun, dass den jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern hier grosse Freiräume gewährt werden. «Wir erfahrene Projektleiter geben Richtungen vor, räumen Hindernisse aus dem Weg und öffnen Türen; den Weg sollen die jungen Forschenden selbstständig gehen», sagt Gröning. Die Flexibilität, auf unerwartete Befunde eingehen zu können und neue Wege zu beschreiten, ist explizit möglich. «Diese Freiheit ist

unglaublich attraktiv und eröffnet ein kreatives Forschungsfeld, das nur wenige Institutionen bieten können.»

Und Kreativität ist für die kommenden Schritte gefragt. Das Ziel ist klar: Es sollen Nanomaterialien entwickelt werden, in denen sich die Spins von Elektronen gezielt einsetzen und kontrollieren lassen, um damit quantenmechanische Operationen und Funktionen unter Alltagsbedingungen durchführen zu können. Dazu muss man die Spins nicht nur miteinander verknüpfen, sondern auch eine sogenannte «Quantenverschränkung» kontrolliert herstellen, dann steigen die Kombinationsmöglichkeiten exponentiell – und damit auch die potenzielle Rechenpower.

Verknüpft, aber noch instabil

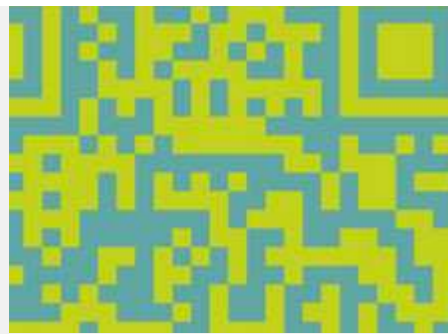
«Bei den Kohlenstoff-Nanomaterialien von CarboQuant gelingt das Verknüpfen der Spins schon ganz hervorragend», sagt Gröning. Die grosse Herausforderung besteht nun darin, die äusserst flüchtige Quantenverschränkung zu realisieren und auch mög-

lichst lange zu erhalten. «Das ist die Aufgabe, mit der sich Yujeong Bae intensiv beschäftigen wird.»

Denn die in CarboQuant genutzten Spins sind zwiespältige «Geschöpfe». Sie können zwar wunderbar an bestimmten Stellen der Nanostrukturen angeordnet und damit kontrolliert verknüpft werden, aber sie sind auch chemisch reaktiv, was sie instabil macht. «Damit sie stabil werden, müssen wir sie umhüllen», sagt Gröning. Dazu wird hexagonales Bornitrid, sogenanntes «weisses Graphen», benutzt. Damit lassen sich die Spins auf den Kohlenstoff-Nanobändern verkapseln und vor chemischen Reaktionen schützen. Diese Isolation ist die Grundvoraussetzung für den nächsten Entwicklungsschritt: Die so entstehenden molekularen «Nano-Magnete» sollen in Quantenanwendungen der nächsten Generation als Schaltelemente oder Sensoren genutzt werden.

Die Beweiskette steht

Im Internet werden hochsensible und vertrauliche Daten ausgetauscht. Am Zentrum für digitales Vertrauen an der ETH Zürich entwickeln Informatiker Sicherheitssysteme, denen man hundertprozentig vertrauen kann. Nun ist ihnen bei der Verifikation ein Durchbruch gelungen.



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, Informationssicherheit, ETH Zürich
Prof. Dr. Peter Müller, Department of Computer Science, Programmiermethodik, ETH Zürich
Prof. Dr. Adrian Perrig, Department of Computer Science, System- und Netzwerksicherheit, ETH Zürich
Prof. Dr. Matthew Smith, Institute of Computer Science, Usable Security and Privacy, Universität Bonn

Digitale Technologie prägt unser Leben: Wir suchen im Internet nach Informationen. Wir pflegen Kontakte über E-Mail-Programme, Social-Media-Plattformen und Nachrichtendienste. Wir bezahlen per Kreditkarte und wickeln Bankgeschäfte am Smartphone ab. Wie aber wissen wir, mit wem wir es bei solchen «Begegnungen» im digitalen Raum zu tun haben? Das ist die Frage, um die sich alles dreht im Zentrum für digitales Vertrauen an der ETH Zürich und der Universität Bonn.

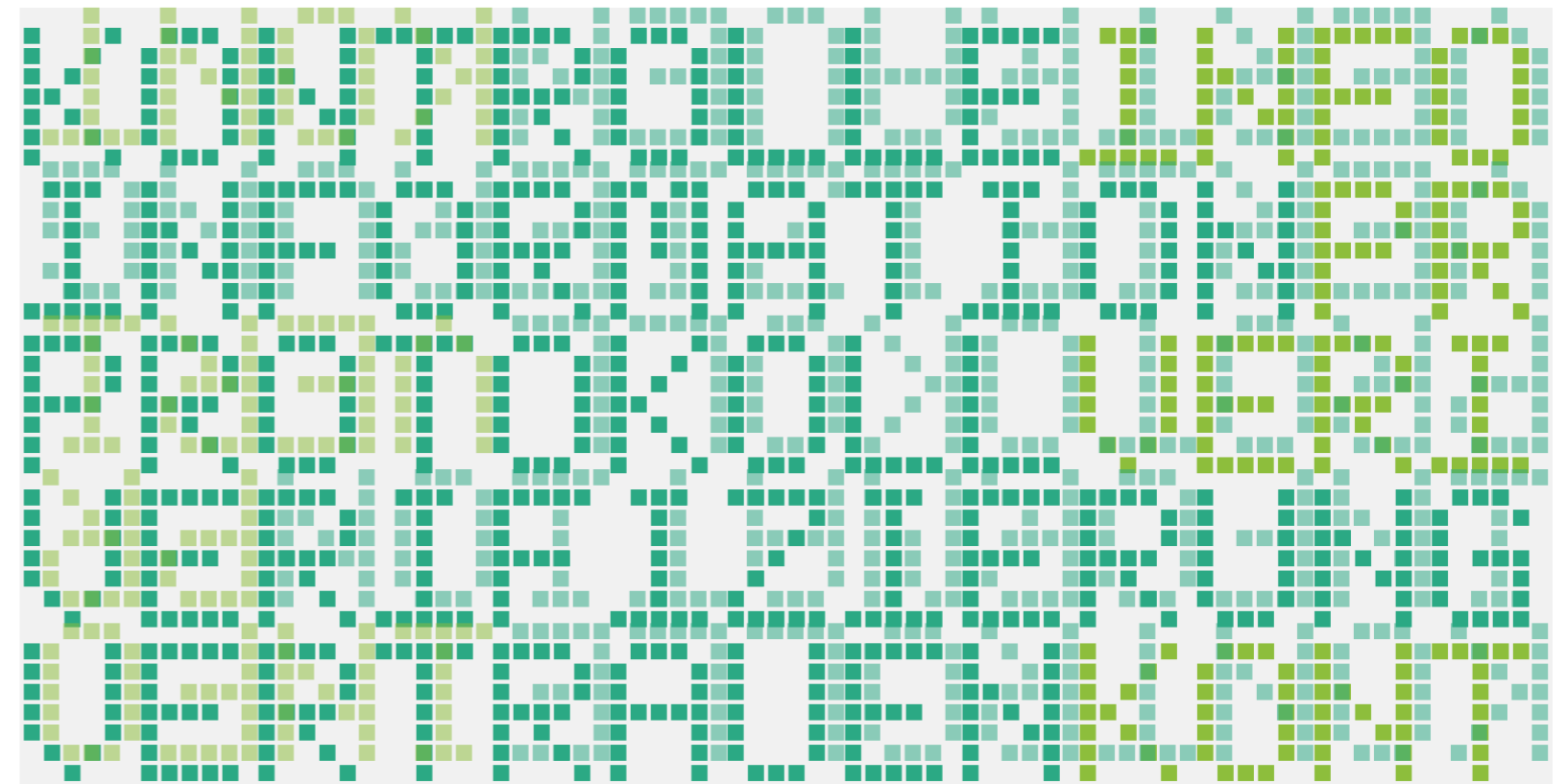
«In der realen Welt sehen wir unser Gegenüber und können beispielsweise nach einem Ausweis fragen», sagt David Basin, der das von der Werner Siemens-Stiftung unterstützte Projekt gemeinsam mit seinen ETH-Kollegen Peter Müller und Adrian Perrig sowie Matthew Smith von der Universität Bonn leitet. Im Internet ist das schwieriger – hier werden Datenpakete in Form von Bits ausgetauscht.

Um die Echtheit und die Verlässlichkeit eines Absenders oder einer Webseite zu gewährleisten, setzen Informatikerinnen und Informati-

ker sogenannte Protokolle ein. Dabei handelt es sich um Handlungsanweisungen, die zwischen Computern, Netzwerken oder digitalen Prozessen ablaufen. «Ein kryptographisches Protokoll namens TLS sorgt beispielsweise beim E-Banking dafür, dass der Kunde oder die Kundin sicher sein kann, mit seiner oder ihrer Bank zu kommunizieren, und die Daten während der Übertragung nicht gelesen oder manipuliert werden können», erklärt David Basin.

Den Schwachstellen auf der Spur

Trotzdem werden immer wieder Systeme gehackt und Daten gestohlen. Die Forschenden am Zentrum für digitales Vertrauen arbeiten deshalb an Techniken, die künftig völlig sichere Protokolle ermöglichen. Solche Protokolle müssen nicht nur geschrieben werden, sondern es muss auch garantiert werden, dass sie keine Schwachstellen enthalten, die ein Angreifer ausnutzen könnte. «Es gibt zwei Hauptgründe, die solche Systeme angreifbar machen: technisches Ver-



sagen und menschliches Versagen», sagt Peter Müller.

Während Matthew Smith die menschliche Komponente erforscht, kümmern sich David Basin und Peter Müller darum, technische Probleme auszuschliessen. Sie benutzen dazu eine Technik namens Verifikation. Sie führen dabei automatisiert mathematische Beweise, dass eine Software die vom Entwickler vorgesehenen Eigenschaften besitzt – etwa vor Angriffen geschützt ist. «Man definiert die Menge aller möglichen Abläufe, wie zwei Parteien ein Protokoll ausführen und ein Dritter – ein Angreifer – eingreifen könnte», sagt David Basin. Diese Formalisierung, die sogenannte Semantik, erlaubt anschliessend eine mathematische Prüfung.

Schnittstelle gleich Schwachstelle

Verifikation ist aufwändig. Denn nicht nur das Protokoll selbst kann Mängel aufweisen. Fehler passieren auch, wenn ein Protokoll mittels eines Programmcodes in eine Software eingebaut wird. «Bei dieser Implementie-

rung können Dinge vergessen gehen oder es tauchen Probleme auf, die im Protokoll selbst gar keine Rolle spielen», sagt Peter Müller. «Deshalb verifizieren wir sowohl das Protokoll als auch die Implementierung.»

Die Schnittstelle zwischen diesen beiden Schritten sei seit jeher eine Schwachstelle in der Beweisführung, dass ein Protokoll hundertprozentig korrekt ablaufe, sagt er. «An dieser Stelle gibt es bisher keine Werkzeuge, welche die Beweise überprüfen. Es waren bisher stets Menschen, die beurteilen, ob die Protokoll- und Implementierungsebene fehlerfrei ineinander übergehen – das ist fehleranfällig.»

In langwieriger Arbeit haben es die beiden Forscher und ihre Gruppen nun aber geschafft, diese beiden Ebenen mit mathematischen Beschreibungen so eng zu verknüpfen, dass diese Schwachstelle im Verifikationsbeweis vollständig eliminiert ist. «Das ist ein Durchbruch», freut sich David Basin. Und Peter Müller ergänzt: «Forschende arbeiten seit 60 Jahren an der Verifikation von Code und seit 30 Jahren an

der Verifikation von Protokollen. Aber niemand hat es vor uns geschafft, die Verifikation von Protokollen und leistungsfähigen Implementierungen derart eng zu verknüpfen.»

Fehlerfrei ist nicht genug

Die Verknüpfung bedeutet faktisch eine End-zu-End-Verifikation – in der ganzen Abfolge vom Protokoll bis zum Code gibt es keinen einzigen Schritt mehr, der nicht von einem Werkzeug geprüft wurde. Trotzdem gibt es noch viel Arbeit in dem Projekt. Zum einen gelte es, die Verifikationen weiter zu automatisieren und für komplexere Implementierungen anzupassen, sagt Peter Müller.

Zum anderen ist es zwar essenziell, künftig mit den neuen Verifikationsmethoden ausschliessen zu können, dass Fehler in Protokoll und Code auftreten. «Aber Fehlerfreiheit reicht nicht», sagt David Basin. «Anwender müssen solche Sicherheitssysteme auch verstehen und ihnen vertrauen.» Wie man dieses Vertrauen gewinnt, ist deshalb die andere zentrale Frage, der die Forschenden in Zukunft nachgehen werden.



Am Zentrum für künstliche Muskeln entstehen unter anderem künstliche Gesichtsmuskeln. Sie könnten dereinst Menschen mit einer Gesichtslähmung ihr Lächeln zurückgeben.

Training für künstliche Muskeln

Stetige Fortschritte und neue Projekte: Das Team am Zentrum für künstliche Muskeln in Neuenburg hat ein erfolgreiches Jahr hinter sich. Gemeinsam mit Chirurgen arbeitet es an innovativen Lösungen für Menschen mit Herzkrankheiten, Inkontinenz und Gesichtslähmungen.

Muskeln wachsen, wenn man mit ihnen arbeitet. Und genau so scheint es mit dem Zentrum für künstliche Muskeln (CAM) am Standort Neuenburg der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) zu sein: Das Team um Direktor Yves Perriard und Geschäftsführer Yoan Civet arbeitet kontinuierlich und beharrlich, sodass die Projekte auf allen Ebenen gedeihen.

Da ist das bisherige Vorzeigeprojekt: der elektroaktive, batteriebetriebene Polymerring, der die Pumpleistung der Aorta bei Menschen mit Herzschwäche entscheidend verstärken soll. Mit diesem System führten die Forschenden im Herbst 2022 Tests bei Schweinen durch. «Wir konnten die Pumpleistung um bis zu 15 Prozent erhöhen», sagt Yoan Civet. Das ist eine Verdreifachung gegenüber früheren Resultaten.

Reichen tut es aber nicht, wie Yves Perriard sagt. «Ursprünglich wünschten sich die Chirurgen eine Verbesserung der Herzleistung um 20 Prozent. Nun aber möchten sie mehr: 30 bis 40 Prozent.» Mit ein Grund dafür: Bislang verwenden die Forschenden eine invasive Operationsmethode. Sie müssen mit ihrem Muskelring einen Teil der Hauptschlagader ersetzen und diese dafür aufschneiden.

Leistungsfähiger oder schonender

Die Forschenden versuchen deshalb, den künstlichen Muskel leistungsfähiger zu machen. Dazu verwenden sie ein etwas dickeres Material und verlängern den Ring auf zwölf Zentimeter. «Damit erreichen wir in Labortests eine Pumpleistung von 20 Prozent», sagt Civet. Das sei sehr vielversprechend. Denn frühere Tests zeigten, dass die erreichte Druckveränderung im starren Laborsystem nur halb so gross sei wie später im lebenden Organismus.

Eine zweite Idee ist es, den Muskelring um die Aorta zu legen, statt in sie. «Damit wären wir viel weniger invasiv, die 20 Prozent Verbesserung würden reichen», sagt Yves Perriard. Auch hier sind erste Resultate vielversprechend: Im Labor gelang es, den Muskel um eine künstliche Aorta zu legen und damit die Leistung deutlich zu erhöhen. «Beide Systeme müssen wir nun im Schwein testen», sagt Perriard. Neben der Aorta-Pumpe läuft am CAM neu

ein zweites Herz-Projekt: Dabei geht es darum, Kindern mit einem Herz zu helfen, das nur aus einer statt zwei Kammern besteht. Bei ihnen vermischen sich der Lungen- und der Körperkreislauf. Chirurgen trennen diese beiden Herzkreisläufe, indem sie eine Röhre implantieren, welche das aus den Organen zurückkommende Blut in die Lungen weiterleitet.

«Unsere Idee ist es, diesen passiven Blutfluss durch einen aktiven zu ersetzen», erzählt Yoan Civet. Dafür kombinieren die Forschenden ihr weiches, verformbares Polymermaterial mit Blutgefässen. «Wenn wir die weichere Röhre in einer bestimmten Frequenz kontrahieren und wieder öffnen, erzeugen wir einen Fluss – ohne eine Klappe zu verwenden.» Auch hier seien erste Resultate sehr ermutigend.

Plattform für Blasenzellkultur

Das zweite Arbeitspaket der Gruppe ist die Urologie. In einem Projekt arbeiten die Forschenden daran, mit einem künstlichen Muskel die Harnröhre abzuklemmen, um inkontinente Patienten zu entlasten. Momentan entwickeln sie eine künstliche Harnröhre, um ihre Idee im Labor einfach testen zu können. In einem zweiten Projekt geht es darum, für Urologen des Berner Inselspitals eine Plattform zu entwickeln, auf der diese Zellen der Harnblase wachsen lassen und untersuchen können. «Harnblasenzellen kann man nicht in einer Petrischale züchten», erklärt Yoan Civet. Denn die Blase vergrössert sich jedes Mal, wenn Urin gespeichert wird – und schrumpft, wenn sie entleert wird. Harnblasenzellen benötigen diese ständige Dehnung und Kontraktion, um korrekt zu wachsen und zu funktionieren.

Das extrem elastische Material, das die CAM-Forschenden für ihre künstlichen Muskeln verwenden, könnte sich perfekt eignen, um diesen Vorgang zu simulieren. Deshalb entwickeln sie nun eine elastische Membran, auf deren Oberseite und Unterseite die beiden Zelltypen wachsen werden, aus denen die Harnblase besteht.

Der dritte Arbeitsbereich ist die Gesichtrekonstruktion. Hier könnten künstliche Muskeln beispielsweise die aufwändige Transplantation von

körpereigenen Muskelstücken bei Patienten mit einseitigen Gesichtslähmungen ersetzen. Die Neuenburger Forschenden haben dazu kürzlich eine erste Studie publiziert. Darin zeigen sie, dass ihr künstliches Muskelsystem im Mundbereich die Nervensignale sehr rasch in eine Bewegung überträgt. Es könnte sich also eignen, um Patienten die Fähigkeit zu lächeln zurückzugeben. In einem Schädelmodell werden die Untersuchungen nun weitergeführt. Es gibt also viel zu tun im Zentrum für künstliche Muskeln.



Künstliche Muskeln

Herzschwäche ist eine Volkskrankheit. Von fünfzig Erwachsenen leidet einer darunter. Das Zentrum für künstliche Muskeln an der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) am Standort Neuenburg arbeitet an einer Weltneuheit, um Betroffenen zu helfen: Ein künstlicher Muskel soll die Pumpleistung des Herzens entscheidend verbessern. Die Idee ist es, einen elektroaktiven Polymerring in oder um die Hauptschlagader von Patienten zu legen. Angetrieben wird er durch eine Batterie, die der Patient auf sich trägt. Auch in anderen Bereichen der Medizin könnten künstliche Muskeln in Zukunft zum Einsatz kommen: Das Neuenburger Team arbeitet auch an Anwendungen im Harntrakt und in der Gesichtrekonstruktion.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung

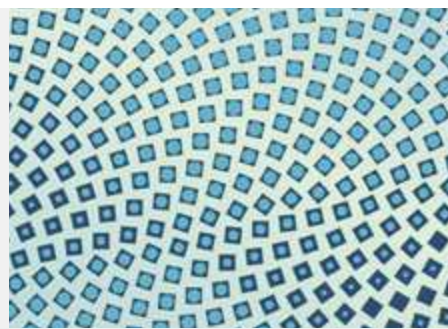
12 Mio. Schweizer Franken

Projektdauer 2018–2029

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

Automatisierte Hirnstrommessung

Die Medizingenieurin Jelena Skorucak erhält ein MedTechEntrepreneur-Fellowship der Universität Zürich. Sie will eine automatisierte Plattform zur Marktreife bringen, die in den Hirnströmen von Kindern Hinweise auf epileptische Erkrankungen findet.



Von der Idee zur Firma

Die Universität Zürich (UZH) 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 22 Nachwuchsforschende ein MedTechEntrepreneur-Fellowship der UZH erhalten. Bereits sind sechs Jungunternehmen daraus entstanden.

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

Bis zu einem Prozent der Bevölkerung leidet unter einer epileptischen Erkrankung. Besonders häufig betroffen sind Kinder. Bei manchen von ihnen lässt sich, aufgrund von schweren Anfällen, rasch eine Diagnose stellen. Bei anderen aber treten Anfälle oft oder praktisch ausschliesslich während des Schlafs auf. In Hirnstrommessungen, dem sogenannten Elektroenzephalogramm (EEG), äussern sich solche Anfälle als heftige Ausschläge. Im Fachjargon werden sie Spikes genannt.

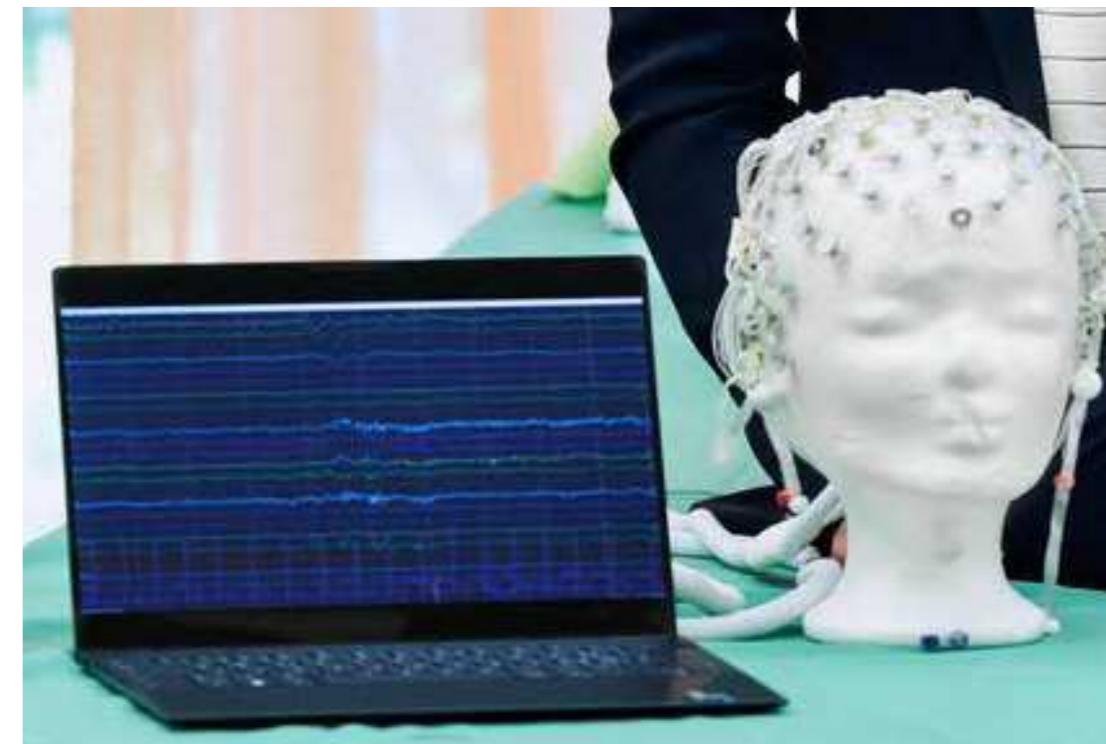
Neurologinnen und Neurologen erkennen diese Spikes im EEG. «Allerdings ist es eine enorm aufwändige Arbeit, das EEG einer ganzen Nacht zu analysieren», sagt Jelena Skorucak, Medizingenieurin und Postdoktorandin am Kinderspital der Universität Zürich. Die Forscherin hatte deshalb die Idee, die Analyse solcher Hirnstrommessungen zu automatisieren.

Sie entwickelte eine Software, die Spikes entdeckt. Zuerst validierten sie und ihre Kolleginnen und Kollegen die Plattform, indem sie deren Analysen

mit jenen von erfahrenen Fachpersonen in der Neurologie verglichen. Danach führten sie eine Studie durch mit einem Datensatz von über 400 Schlaf-EEGs, die am Kinderspital Zürich in den letzten 25 Jahren gemacht worden waren.

Vielversprechende Resultate

Zusätzlich eruierte die Software auch einen Marker für die Schlafqualität. Denn man vermutet, dass die Spikes den Schlaf und die Regeneration von Synapsen, den Nervenverbindungsstellen, im Gehirn beeinträchtigen. Epilepsiepatienten leiden denn auch oft an Müdigkeit sowie Konzentrations- oder Gedächtnisstörungen. Tatsächlich zeigte sich in der im Fachblatt «Scientific Reports» erschienenen Studie zum einen, dass die Software die Spikes und die Schlafqualität zuverlässig detektierte. Und zum anderen, dass Spikes und tiefe Schlafqualität auch wirklich gehäuft bei Epileptikerinnen und Epileptikern auftraten und miteinander korrelierten. Besonders gross



Jelena Skorucak hat eine Software entwickelt, die heftige Ausschläge in den Hirnströmen von Kindern entdeckt. Damit lassen sich epileptische Erkrankungen einfacher diagnostizieren.

war die Korrelation bei Kindern, die an einer schweren Epilepsieform litten, die unter dem Namen Lennox-Gastaut-Syndrom bekannt ist.

Diese vielversprechende Auswertungsplattform möchte Jelena Skorucak nun zur Marktreife bringen. Die ersten Schritte dazu unternehmen kann sie dank eines MedTechEntrepreneur-Fellowship, das sie im Frühjahr 2023 erhalten hat. Dieses von der Werner Siemens-Stiftung finanzierte Förderprogramm der Universität Zürich beinhaltet ein Stipendium in der Höhe von 150 000 Schweizer Franken. Zudem werden die Fellows von erfahrenen Coaches auf dem hindernisreichen Weg zur Firmengründung beraten und begleitet. Sie erhalten Zugang zum «UZH Incubator Lab» und sind Teil eines Netzwerks aus aktuellen und ehemaligen Geförderten.

Aufwändiger Zulassungsprozess

Sie habe schon viel profitiert von dem Programm, erzählt Jelena Skorucak. Wichtig sei für sie beispielsweise die

Unterstützung im regulatorischen Bereich. «Denn die grösste Herausforderung wird es wohl sein, alle Zertifikate für die Plattform zu erhalten.» Software fällt unter die Kategorie der Medizinprodukte – bis alle für die Zulassung erforderlichen Schritte durchlaufen sind, kann viel Zeit vergehen.

Zudem geht es auch darum, das Produkt so zu gestalten, dass es auf dem Markt seine Käufer findet. «Es muss beispielsweise einfach zu bedienen sein», sagt Skorucak. Und natürlich einen Mehrwert darstellen. Die Forscherin ist überzeugt, dies bieten zu können. Zumal ihre Analyseplattform ausbaufähig ist: Möglich wären etwa eine Anpassung an erwachsene Epilepsiepatienten oder Auswertungen nach Hirnregionen. Das könnte bei der Diagnose des Epilepsietyps mithelfen.

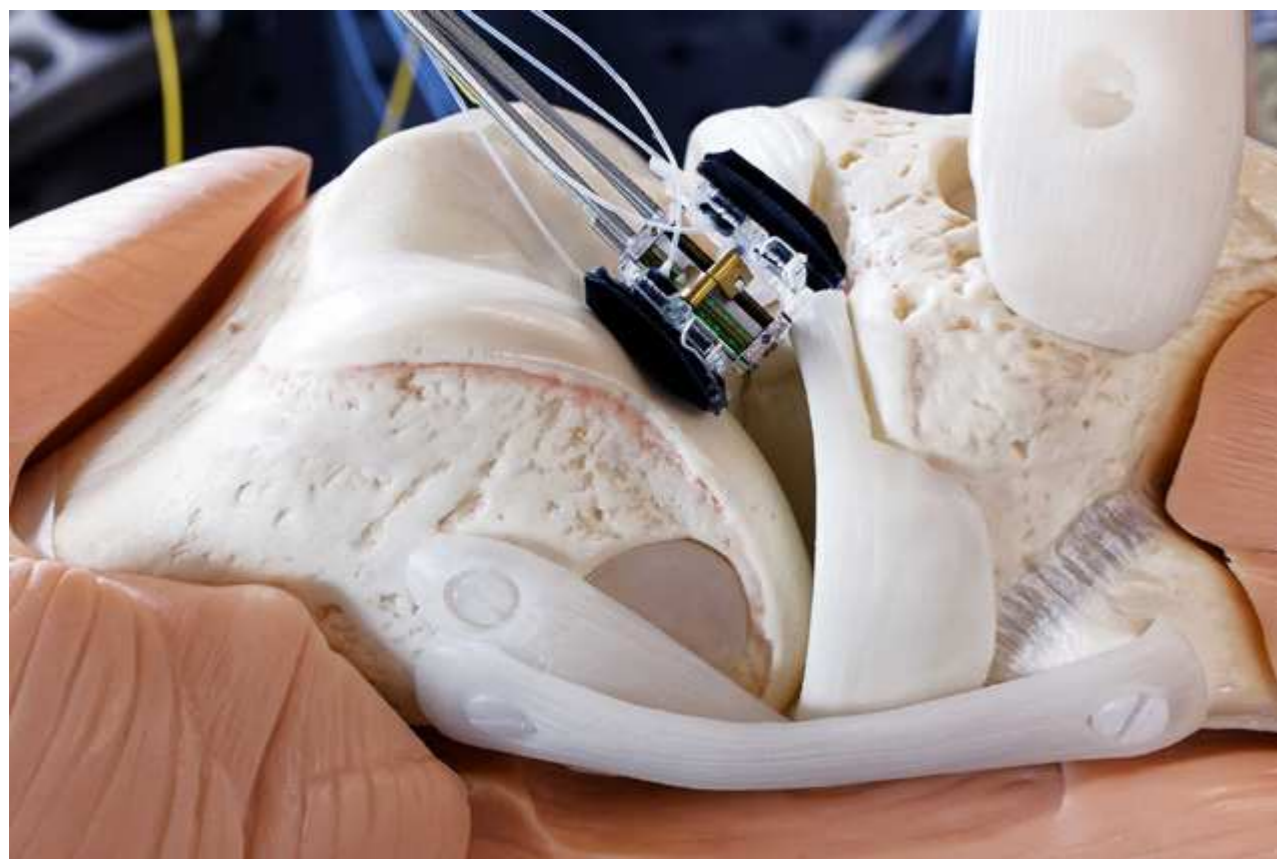
Und die Möglichkeiten gehen über die Epilepsie hinaus. Sie arbeite daran, die Plattform für die Untersuchung von Schlafapnoe zu erweitern, erzählt Jelena Skorucak. Zudem gebe es Hin-

weise, dass auch manche Patientinnen und Patienten mit Alzheimer oder ADHS epileptische Spikes während des Schlafes hätten. Es könnte also eine Plattform entstehen, die in EEG-Daten verschiedenste Schlaf-assoziierte Krankheiten aufspürt.

Um Diagnosen zu stellen und Resultate zu prüfen und zu interpretieren, werde es aber weiterhin den Menschen brauchen, sagt Skorucak. «Es ist ein halbautomatisiertes System: Unsere Idee ist es nicht, Ärztinnen und Ärzte zu ersetzen, sondern ihnen die mühsame Analysearbeit zu ersparen.»

Verzahnt und verknüpft

Das Projekt MIRACLE II an der Universität Basel entwickelt einen Laserroboter, der schonende, minimalinvasive Knochenoperationen ermöglichen wird. So langsam greifen die Rädchen dieses hochkomplexen Vorhabens ineinander: Die Forschenden führen Techniken und Systeme zusammen, die sie in den letzten Jahren konzipiert und entwickelt haben.



Mithilfe einer Konstruktion, die Luftkissen ähnelt, fixiert sich der Chirurgieroboter im Kniegelenkspalt, damit der Laser bewegungsfrei arbeiten kann.

Der Umzug in topmoderne Räumlichkeiten war für die Forschungsgruppen von MIRACLE II an der Universität Basel ein Höhepunkt des abgelaufenen Jahres. Und er steht stellvertretend für die neue Phase, in die das Projekt einbiegt: Die neuen Räume und Labors bieten nicht nur mehr Platz, sondern sind auch so konzipiert, dass sie den Austausch zwischen den Forschenden fördern.

Die Zusammenarbeit der verschiedenen Gruppen in dem Projekt werde immer wichtiger, sagt Projektleiter Philippe Cattin. «Wir arbeiten vermehrt an der Integration der verschiedenen Systeme und Sensoren, die wir während MIRACLE I entwickelt haben.» Sie alle dienen dem grossen Ziel von MIRACLE II: der Entwicklung eines robotergesteuerten Lasersystems, das minimalinvasive Knochenoperationen vornimmt und passende Implantate in den Körper bringt.

Eine wichtige Rolle spielt dabei ein Virtual- und Augmented-Reality-System, das Cattin mit seinem Team entwickelt hat. Es dient der Planung und Überwachung von Operationen. Das System analysiert zum Beispiel ein defektes oder von einem Tumor zerfressenes Knochenstück im Körper. «Wir haben ihm beigebracht zu berechnen, wie das Ersatzstück aussehen muss, damit es beispielsweise die Schädelform wieder schön füllt», erzählt Cattin.

Von der VR zum 3D-Drucker

Dazu entwickelten die Forschenden eine künstliche Intelligenz, die über ein anatomisches Verständnis verfügt. Sie muss beurteilen können, wo Knochen fehlt – und wie dieses Stück bei einem gesunden Menschen dieser Grösse aussieht. «Heute zeichnen hochbezahlte Spezialisten mit CAD-Programmen die Form solcher Implantate», sagt Cattin.

Seine Gruppe hat dieses automatische Planungssystem nun bereits verknüpft mit der Implantate-Herstellung, für welche das Forschungsteam von Florian Thieringer verantwortlich ist. Der Chefarzt für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie am Universitätsspital Basel leitet auch das spitaleigene 3D-Druck-Labor. Die Berechnung der künstliche Intelligenz wird an

den 3D-Drucker geschickt, der dann das passende Implantat druckt.

Noch muss die Datei, die das Planungstool erstellt, zuerst abgespeichert und dann im Drucktool neu gestartet werden. «Aber unser Ziel ist es, dass wir im VR-Programm bloss einen Knopf drücken müssen, um die Produktion im 3D-Drucker zu starten», sagt Cattin. Auch wenn das System technisch prima funktioniert, wird die Automation momentan in der Klinik noch nicht benutzt. Zuerst müssen die regulatorischen Aspekte geklärt werden.

Laser arbeiten zusammen

Auch in anderen Projektbereichen fügen sich die MIRACLE-Entwicklungen langsam, aber sicher zusammen. Ein Herzstück des Projekts ist ein winziger Laser, der beschädigte Knochenstücke genau und sauber herauszuschneiden wird. Er wird imstande sein, das umliegende Gewebe vollkommen intakt zu lassen. Dazu muss er wissen, wo im Körper er gerade ist und welche Art von Gewebe er vor sich hat.

In einem ersten Schritt hatten die Forschenden deshalb drei verschiedene Lasersysteme entwickelt: einen Laser, der die Schnitttiefe misst, einen Laser, der Gewebe charakterisiert, und einen Laser, der schneidet. «Anfangs arbeitete jeder Doktorand für sich an seinem Teilproblem», erzählt Philippe Cattin. «Erst als alle funktionierten, konzentrierten wir uns darauf, wie wir sie zusammenbringen.» Das ist kürzlich gelungen: In einer Publikation zeigt das MIRACLE-Team, wie das Zusammenspiel dieser Laser-Typen funktioniert. Es gelang ihnen, Knochen genauestens zu schneiden – und gleichzeitig dank der Mess- und Charakterisierungsmethoden den Schaden am Knochenmark auf ein Minimum zu beschränken.

Damit der Laser dereinst einen genauen und sicheren Schnitt vornehmen kann, müssen weitere Voraussetzungen erfüllt sein. So darf sich das winzige, robotergesteuerte Endoskop, in dem sich der Laser befindet, während des Eingriffs keinesfalls bewegen. Es muss sich also im Körper festhalten. «Das klingt trivial, ist aber wissenschaftlich höchst anspruchsvoll», sagt Philippe Cattin. Eine Dok-

torandin von Co-Projektleiter Georg Rauter hat nun eine Lösung für dieses Problem gefunden: Sie entwickelte, am Beispiel des Kniegelenks, einen Befestigungs-Prototyp.

Das System funktioniert mit speziellen Ballons oder Luftkissen. Am Bestimmungsort angekommen, blasen sie sich auf und füllen den Raum zwischen Roboter und Gewebe. So wird der Roboter fixiert. «Hat der Laser seinen Schnitt gemacht, kann man Luft aus den Kissen rauslassen und der Roboter wandert weiter zur nächsten Stelle», erklärt Cattin.

Und genauso, Schritt für Schritt, treibt das MIRACLE-Team die Revolution der Knochenchirurgie voran.



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 Patientinnen und 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

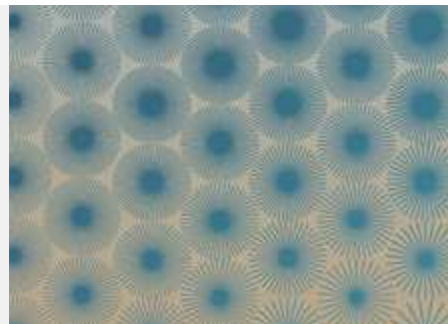
Prof. Dr. Philippe Cattin, Leiter Department of Biomedical Engineering (DBE), Universität Basel

Prof. Dr. Dr. Florian M. Thieringer, Chefarzt Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und Leiter Swiss MAM Forschungsgruppe, DBE und Universitätsspital Basel

Prof. Dr. Georg Rauter, Leiter Bio-Inspired Robots for MEDicine-Lab (BIROMED-Lab), DBE Universität Basel

Erntezeit in der Steinzeit

Das Projekt Paläobiotechnologie hat im vergangenen Jahr einen Meilenstein erreicht. Die Forschenden fanden bis zu 100 000 Jahre alte mikrobielle Wirkstoffe und liessen sie «auferstehen». Damit ist klar, dass die kühne Idee funktioniert.



Paläobiotechnologie

Ist eine Reise in die Vergangenheit die Zukunft der Medizin? Im Projekt Paläobiotechnologie gehen der Chemiker Pierre Stallforth und die Archäologin 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.

Forschen ist ein bisschen wie Gärtnern. Es braucht Geduld, vor dem Ernten kommt das Säen. Diese Aufbauarbeit hat beim Projekt Paläobiotechnologie in Jena ungefähr drei Jahre gedauert. Nun darf sich das Team um Chemiker Pierre Stallforth und Archäogenetikerin Christina Warinner auf die Erntezeit freuen. Im abgelaufenen Jahr wiesen die Forschenden nämlich nach, dass ihr Vorhaben funktioniert: Ihnen gelang es erstmals überhaupt, aus dem Zahnstein von Frühmenschen Naturstoffe wieder herzustellen, die vor 100 000 Jahren von Bakterien produziert worden waren.

Für die Studie, die im renommierten Fachmagazin «Science» publiziert wurde, untersuchte das Team den Zahnstein von Neandertalern, die vor ungefähr 100 000 bis 40 000 Jahren lebten, und von Menschen, die vor 30 000 bis 150 Jahren lebten. Mit eigens dafür entwickelten Methoden fanden sie darin eine Vielzahl von Erbgutfragmenten, setzten sie – ähnlich wie die Teile eines Puzzles – zusammen zu sehr

langen DNA-Abschnitten und rekonstruierten so die Genome zahlreicher Bakterienarten.

Neues Forschungsfeld mit Relevanz

Aus einem besonders gut erhaltenen Genom eines Grünen Schwefelbakteriums rekonstruierten sie einen sogenannten Biosynthese-Gencluster – einen Bauplan für Enzyme, die Naturstoffe oder kleine Moleküle produzieren. Sie bauten diese Gene mit modernsten biotechnologischen Methoden in lebende Bakterien ein. Tatsächlich bildeten diese in der Folge funktionierende Enzyme, die zwei bisher unbekannte mikrobielle Naturstoffe produzierten. Stoffe, die vor Zehntausenden von Jahren einem damals lebenden Bakterium wahrscheinlich bei der Regulierung der Photosynthese dienten.

Die Publikation ist ein Meilenstein für die Arbeiten von Warinner und Stallforth. «Wir zeigen damit, dass unsere Idee tatsächlich umsetzbar ist: Wir können uralte mikrobielle Wirk-



Mit der neuen Automatisierungsplattform können die Forschenden in Jena künftig im Schnellzugtempo Moleküle testen, die sie im Zahnstein von Frühmenschen gefunden haben.

stoffe finden und neu herstellen», sagt Christina Warinner. Von der Forschungsgemeinschaft wurde die Studie enorm positiv aufgenommen. «Die Forschungskolleginnen und -kollegen beachteten unsere Publikation nicht nur stark», sagt Warinner, «sie attestierte unserem Ansatz auch eine grosse Relevanz.»

Damit ein solches interdisziplinäres Projekt zustande kommt, müssen viele Rädchen ineinandergreifen. Ein Highlight war für Pierre Stallforth denn auch die Zusammenarbeit der Forschungsgruppen. Es sei spannend und herausfordernd gewesen, eine gemeinsame Sprache zu finden zwischen Archäologinnen, Chemikern und Bio-Informatikerinnen, sagt er.

Proben testen im Schnellzugtempo

Nun kann das Paläobiotech-Team die nächsten Schritte angehen; man könnte sagen: die Ernte einfahren. Möglich machen dies laut Stallforth vor allem zwei Entwicklungen: Zum einen haben die Bioinformatiker im Projekt

ein Screening-Tool namens nf-core/funcscan entwickelt, das eine rasche Analyse von Naturstoff-Gensequenzen erlaubt. Zum anderen hat das Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie in Jena neu eine weltweit einzigartige Automatisierungsplattform aufgebaut, um standardisiert und mit hohem Durchsatz neu gefundene Moleküle zu testen – zum Beispiel bezüglich ihrer antibiotischen oder antimykotischen Wirkung.

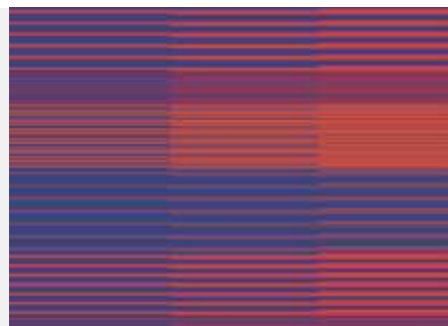
Die Geräte dieser Robotikplattform können nicht nur die ganze Nacht durcharbeiten, sondern auch Mikrotiter-Platten mit 96 oder gar 384 Vertiefungen in einem einzigen Arbeitsschritt befüllen und auslesen. «Dadurch können wir 100- bis 1000-mal mehr Proben testen als bisher», sagt Stallforth. Zudem unterlaufen den Robotern im Gegensatz zu Menschen keine Fehler oder Unregelmässigkeiten beim Pipettieren. «Wir können in Zukunft aus dem Vollen schöpfen», bilanziert Stallforth.

Das nächste Ziel besteht darin, möglichst viele Proben zu untersuchen

– und zu verstehen, wozu bestimmte Naturstoffe einst in ihrer natürlichen Umgebung dienten. «Je mehr wir darüber wissen, welche Rolle ein Stoff hatte, desto mehr neue Anwendungen werden wir finden», ist Christina Warinner überzeugt. Man darf gespannt sein, welche neuen Stoffe das Paläobiotech-Team in Zukunft aus der Vergangenheit in die Gegenwart holen wird.

Ganganalysen und Bruchsimulationen

Das Projekt Smarte Implantate geht in den zweiten Teil der Finanzierungsphase. Die Forschenden haben einen guten Überblick über den Heilungsverlauf von Knochenbrüchen gewonnen. Nun geht es darum, das Wissen zu bündeln – und in ein neuartiges Implantat zu verpacken.



Smarte Implantate

Intelligente Implantate sollen künftig direkt am Knochen überwachen, wie gut Schienbeinbrüche 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

Drei Jahre Forschungsarbeit seien nötig gewesen, um wirklich Neuland zu betreten, sagt Tim Pohlemann, Direktor der Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie am Universitätsklinikum des Saarlandes. Er leitet gemeinsam mit seiner Kollegin Bergita Ganse das Projekt Smarte Implantate, das von der Werner Siemens-Stiftung seit 2019 unterstützt wird. Mit Hilfe neuartiger Technologien aus der Materialtechnik entwickelt das Saarländer Team intelligente Implantate, welche die Heilung von komplizierten Knochenbrüchen verbessern sollen, indem sie den Heilungsprozess überwachen, bei Fehlbelastungen warnen – und durch eigene, gezielte Bewegungen an der Bruchstelle den Heilungsprozess anregen.

Von der Klinik über die Simulation und die Computertechnik bis zur technischen Entwicklung habe jeder Forschungsbereich in dem Projekt zuerst sein eigenes Feld voranbringen müssen, sagt Pohlemann. «Nun aber können wir das neue Wissen konsoli-

dieren und so zusammenbringen, dass wir in die Richtung eines anwendbaren Implantats kommen.»

Was hat der Patient getan?

Ein Bereich, in dem die Forschenden im vergangenen Jahr besonders vorankamen, sind die Ganganalysen. «Wir haben inzwischen 90 Patienten in unsere Untersuchungen eingeschlossen und bei ihnen Daten über den Verlauf ihrer Knochenbruchheilung erhoben – im Labor und bei ihnen zuhause», erklärt Bergita Ganse, Werner Siemens-Stiftungsprofessorin für innovative Implantatentwicklung an der Universität des Saarlandes. Dies geschah mittels sogenannter Wearables – dünner, mit Druck-, Beschleunigungs- und Belastungssensoren bestückter Messsohlen, welche die Patienten in ihre Schuhe einlegten.

«Wir haben damit erste Langzeitdaten generiert und viele, inzwischen publizierte Ergebnisse gewonnen», sagt Ganse. Ein wichtiges Ziel ist es herauszufinden, welche Parameter sich



Ganganalysen geben den Forschenden um Bergita Ganse (links) wichtige Hinweise darauf, welche Parameter den Heilungsverlauf bei Knochenbruchpatienten gut abbilden.

im Heilungsverlauf wie verändern. Und darauf aufbauend jene Messwerte zu identifizieren, welche möglichst rasch anzeigen, dass die Heilung unerwünscht verläuft. «Wir haben viele Patienten, deren Knochenbruch geheilt ist», sagt Ganse, «aber leider gibt es noch zu viele, bei denen die Heilung ausbleibt.» Ein Parameter, der auf eine schlechte Heilung hindeuten könnte, ist laut ihr der Kraftunterschied zwischen rechtem und linkem Fuss. Ein anderer die Bewegung des Schwerpunkts unter der Fußsohle. «Wir können aus den Daten auch sehen, wie oft ein Patient das Bein hochgelegt hat», sagt Ganse. «Jedes einzelne Bewegungsmuster und seine Verteilung müssen nun im Zusammenhang mit der Heilungsprognose analysiert werden.»

Wichtig ist es aber auch, die Gründe für die von der Sohle gemessenen Belastungen oder Beschleunigungen auseinanderzuhalten. «Wenn wir hohe Beschleunigungen messen, müssen wir wissen, ob der Patient gerannt oder Bus gefahren ist», sagt Tim Pohlemann.

Untersucht haben die Forschenden auch die Effekte des Untergrunds (Asphalt, Sand, Wiese, Schotter) und der Topographie (Bergaufgehen, Bergabgehen, Treppensteigen) auf die Kraftkurve in der Sohle. Der Grund dafür liege in der Patientensicherheit, erklärt Bergita Ganse. Denn wenn dereinst ein intelligentes Implantat im Bein des Patienten steckt, soll es bei gefährlichen Fehlbelastungen Alarm schlagen und allenfalls Gegensteuer geben. Doch dazu muss es die verschiedenen Faktoren unterscheiden können, welche zu einer Belastungsänderung im Bein führen. Bei diesen Berechnungen sind statistische Standardverfahren oft überfordert. Um die schwer zu erkennenden Korrelationen aufzuspüren, haben die Forschenden deshalb spezifische KI-Algorithmen entwickelt.

Wie viel Bewegung ist nötig?

Schöne Resultate können die Forschenden auch im Bereich der Computersimulationen vorweisen. «Wir nutzen Computertomographie-Daten von Pati-

enten, um Knochenbrüche an verschiedenen Stellen und in verschiedenen Winkeln zu simulieren», erzählt Bergita Ganse. Das Ziel: Herausfinden, wie stark sich das Implantat dereinst – abhängig vom Bruchtyp – bewegen muss, um die Heilung optimal zu steuern.

Das ist keine einfache Aufgabe. Zum einen gibt es komplizierte Bruchtypen, zum Beispiel keilförmige Brüche, bei denen die Belastungen und Druckverteilungen komplex sind. Zum anderen gilt es auch, zeitliche Veränderungen in Betracht zu ziehen. «Die Steifigkeit des Gewebes nimmt während der Heilung zu, dann werden andere Kräfte nötig», sagt Bergita Ganse.

Solche Computersimulationen seien ein entscheidender Schritt, um herauszufinden, was das Implantat können müsse, ergänzt Tim Pohlemann. «Denn das ist der Kern des Projekts: Wir müssen das Implantat so bauen, dass es am Ende auch wirklich die richtigen Bewegungen und Druckveränderungen erzeugt, um die Heilung zu unterstützen.»

Fortschritte an vielen Fronten

Das Projekt TriggerINK am DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in Aachen will Knorpel in beschädigten Gelenken zum Nachwachsen bringen. Dazu braucht es Neuentwicklungen in verschiedenen Forschungsbereichen. Im vergangenen Jahr hat das Team diverse Fortschritte erzielt.



TriggerINK

Beschädigtes Knorpelgewebe mithilfe eines Stützgerüsts aus Bio-Tinte nachwachsen zu lassen: Das ist das Ziel des Projekts TriggerINK am DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in Aachen. Die Bio-Tinte wird mit einem 3D-Drucker in die Wunde gedruckt, mit Licht vernetzt und mithilfe eines Magnetfeldes ausgerichtet. Danach werden die in der Tinte enthaltenen Wirkstoffe und Wachstumsfaktoren von aussen zur gewünschten Zeit 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 2022–2026

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

Damit sich beschädigtes Knorpelgewebe regenerieren kann, setzt das Projekt TriggerINK auf eine neuartige, ausgeklügelte Strategie: Vereinfacht gesagt, wollen die Forschenden aus Aachen in einem ersten Schritt ein stützendes Gerüst aus einer gelatineartigen Substanz, der Bio-Tinte, ins beschädigte Gelenk einbringen. In einem zweiten Schritt werden mithilfe verschiedener Techniken und Materialien die Knorpelzellen dazu gebracht, entlang dieses Gerüsts Gewebe zu reparieren und die Heilung einzuleiten.

Dazu müssen eine Vielzahl Fragen geklärt und neue Techniken entwickelt werden. In vielen hat das Team im zweiten Projektjahr Fortschritte erzielt. Besonders wichtig, sagt Projektleiterin Laura De Laporte, seien jene bei der Gewebeanrichtung. Knorpel in einem Gelenk besteht nämlich aus verschiedenen Zonen, in denen die Zellen unterschiedlich ausgerichtet sind. Wer also Knorpel nachwachsen lassen will, muss in der Lage sein, das Zellwachstum in verschiedene Richtungen zu lenken.

Bei TriggerINK dienen diesem Zweck mikroskopisch kleine Gel-Stäbchen in der Bio-Tinte. Sie enthalten magnetische Nanopartikel, die sich mithilfe eines externen Magnetfeldes ausrichten lassen. Auf diese Weise können die Forschenden die Gel-Stäbchen in die gewünschte Richtung drehen – und so die Wachstumsrichtung der Knorpelzellen kontrollieren: Die Zellen spüren nämlich den Widerstand dieser Stäbchen und wachsen parallel zu deren Ausrichtung.

Die Stäbchengrösse ist entscheidend

Die Forschungsgruppe um Co-Projektleiter Matthias Wessling hat nun eine Methode entwickelt, um diese magnetischen Gel-Stäbchen in höherer Masse zu produzieren. Sie verwendet ein Verfahren namens Stop-Flow-Lithographie, bei der das Gel durch feine Schläuche fließt und mittels UV-Licht und einer speziellen Maske nur lokal ausgehärtet wird. Die Forschenden versetzten die Gel-Stäbchen mit spindelförmigen Magnetpartikeln aus einem Mineral namens Maghemit.



Mithilfe der Stop-Flow-Lithographie produzieren die Forschenden in Aachen Gel-Stäbchen, die bereits während des Vorgangs magnetisch ausgerichtet werden.

Es gelang ihnen, die Maghemit-Partikel schon während der Gel-Produktion magnetisch in verschiedene gewünschte Richtungen auszurichten.

Die Ausrichtung der Mikrogel-Stäbchen ist jedoch nicht der einzige Faktor, der beim Bau des Stützgerüsts zu beachten ist. Die Forschenden testeten, wie verschiedene Zusammensetzungen der Bio-Tinte die Ausrichtung verschiedener Knorpelgewebe-Zellen beeinflussen. Es zeigte sich, dass mesenchymale Stammzellen die geeignetsten Zelltypen sind für eine Knorpelregeneration. Diese Vorläuferzellen entwickelten sich in dem Stützgerüst zu sogenannten Chondrozyten, einem wichtigen Bestandteil von Knorpel. «Zudem fanden wir heraus, dass sich die mesenchymalen Stammzellen besonders gut im Stützgerüst ausrichten, wenn unsere Mikrogel-Stäbchen eine Abmessung von 10×10×100 Mikrometer haben», erklärt Laura De Laporte.

Ist es einmal gelungen, die Knorpelzellen schichtweise in korrekter Ausrichtung zum Wachsen anzuregen,

folgt jener Projektteil, der für eine rasche Genesung des Patienten sorgen soll: das sogenannte «In Vivo Gym». Im Hydrogel des Stützgerüsts stecken nämlich auch Mikropartikel, die sich mittels eines Lichtsignals von aussen verändern lassen. Je nach Signal schrumpfen die Partikel oder schwellen an, was die umliegenden Gewebezellen in Bewegung versetzt. Von solchen Bewegungen wird angenommen, dass sie den Heilungsprozess beschleunigen können.

Selbst entwickelter Druckroboter

Zum einen ist es den Forschenden im vergangenen Jahr gelungen, die Produktionsrate dieser Mikropartikel durch den Einsatz sogenannter Mikrofluidik-Chips mit bis zu 100 parallel geschalteten Kanälen um mehrere Größenordnungen zu erhöhen. Zum anderen wiesen sie nach, dass sich das Schrumpfen und Anschwellen der Partikel mit einer Frequenz von 1 Hertz auf das Stützgerüst überträgt und dieses über weite Distanzen in Bewegung versetzt. «Diese In-Vivo-Gym-Partikel

müssen mit einer bestimmten Bindungsstärke mit dem Stützgerüst verbunden sein, um die beste Wirkung zu erzielen», sagt Laura De Laporte. «Wenn die Bindung zu stark oder zu schwach ist, bleibt ihr Einfluss klein.»

Ein weiterer wichtiger Fortschritt betrifft den 4D-Druck-Roboter, den die Forschenden entwickeln, um die Bio-Tinte mitsamt ihren Ingredienzen dereinst direkt ins beschädigte Gelenk zu drucken. Der Roboterarm ist installiert und bewegt sich dank eines eigens dafür programmierten Codes bereits wie gewünscht. Zudem haben die Forschenden einen Druckkopf gebaut, der verschiedene Komponenten gleichzeitig drucken kann.

Noch gibt es viel zu tun, um das Ziel einer schonendenden und schnellen Knorpelregeneration zu erreichen. Aber die einzelnen Komponenten und Techniken, die dafür notwendig sind, nehmen in Aachen bereits Form an.



Einfach in der Anwendung: Das Antivirotikum der EPFL-Gruppe von Francesco Stellacci wirkt gegen viele Viren und lässt sich inhalieren.

Ein Spray gegen viele Viren

Das Team um Materialwissenschaftler Francesco Stellacci entwickelte letztes Jahr an der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) seine Breitband-Wirkstoffe gegen Viren zu einem inhalierbaren Pulver weiter. Das bedeutet: Das gegen viele Arten von Viren gleichzeitig wirkende Medikament kann der-einst unkompliziert verabreicht werden.

Im Supramolecular Nano Materials and Interfaces Laboratory von Projektleiter Francesco Stellacci an der EPFL konzentriert man sich derzeit auf die Entwicklung eines Medikaments gegen Virenarten, die Atemwegserkrankungen auslösen – wie das weit verbreitete Respiratory Syncytial Virus (RSV). In den meisten Fällen erholen sich die RSV-Infizierten nach ein paar Tagen von selbst, doch bei Säuglingen und älteren Personen kann es zu schweren Verläufen kommen.

Das von Francesco Stellacci designte innovative antivirale Medikament ist aber nicht nur gegen RSV wirksam. Seine breite Wirksamkeit wurde im Jahr 2023 in zwei grossen Tierstudien bestätigt: eine an Hamstern gegen SARS-CoV-2 und eine an Frettchen gegen Influenza.

Wirksam auch als spraybares Pulver

Das neu entwickelte antivirale Medikament gehört in die Klasse der sogenannten Eintrittshemmer, die den Viren den Zutritt zu Körperzellen verwehren und so deren Vermehrung und Ausbreitung verhindern – im Fall von RSV: dass das Virus nicht über Nase oder Mund in die Atemwege gelangt und dann die Lunge schädigt. Das antivirale Medikament der Stellacci-For-

schungsgruppe ist ein Breitband-Eintrittshemmer, dessen «Rückgrat» mit der chemischen Verbindung MUS kombiniert wurde. MUS ist in der Lage, eine Vielzahl von Viren zu neutralisieren. Es inaktiviert die Viren unwiderruflich, indem es über einen ausgeklügelten Bindungsmechanismus bestimmte Proteinteile des Virus besetzt.

Aufgrund der positiven Ergebnisse der präklinischen Studien unterzogen die Forschenden den Wirkstoff einem Trocknungsprozess und machten daraus ein inhalierbares Pulver, das mithilfe eines gängigen Trockenpulver-Inhalators verabreicht wurde. Es zeigte sich, dass auch dieses wirksam war und von den Versuchstieren gut vertragen wurde. So wird man das Antivirotikum dereinst ganz einfach inhalieren können.

Alles muss stimmen

«Die Entwicklung von Medikamenten braucht sehr viel Zeit», sagt Stellacci. Nicht nur die Wirksamkeit der antiviralen Substanz, sondern auch deren Toxizität (Giftigkeit) wird streng geprüft. Ein Auftragsforschungsinstitut in Holland untersucht derzeit, wie viele Viren nach der Medikamentengabe in der Lunge der Versuchstiere überlebt haben – je weniger, desto besser – und ob die chemische Verbindung die Lunge geschädigt hat oder nicht. «Die Viren selbst schädigen die Lunge, und es darf natürlich nicht sein, dass unser Medikament das auch noch tut», so Stellacci. In der ersten präklinischen Studie mit Mäusen gab es «keine beobachtbaren Nebeneffekte», bilanziert Stellacci. Er ist optimistisch, dass das auch bei den anderen präklinischen Studien der Fall sein wird und sein innovatives antivirales Medikament gut verträglich ist. «Die Studiendaten sind bis jetzt sehr gut.»

Für die In-vivo-Studien zur Toxizität der chemischen Verbindung müssen die Moleküle in grossen (Industrie-)Mengen gemäss den weltweit herrschenden Vorschriften der Good Manufacturing Practice (GMP) produziert werden können. Derzeit arbeiten die Expertinnen und Experten an der EPFL zusammen mit Francesco Stellacci die nötigen Dokumentationen und Verträge aus.

Im letzten Jahr hat Projektleiter Francesco Stellacci neben den Forschungsaufgaben auch ein an die Werner Siemens-Stiftung gerichtetes Konzept für ein international vernetztes Virenforschungszentrum an der EPFL entworfen. Es ist als Ort des Austauschs und der gemeinsamen Forschungsanstrengungen verschiedener internationaler Gruppen im Kampf gegen Viren aller Art gedacht. «Es ginge grundsätzlich darum herauszufinden, welche Wirkstoffe gut gegen Viren sind», beschreibt Stellacci seine Vision eines Virenforschungszentrums.



Antivirale Medikamente

Materialwissenschaftler Francesco Stellacci und sein Team haben künstliche Moleküle entwickelt, die Viren vor dem Eintritt in die menschlichen Zellen mittels hydrophoben Drucks zerstören. Ziel ist die Entwicklung sowohl eines Breitband-Antivirotikums gegen unterschiedliche Virenarten als auch spezifischer Medikamente gegen bestimmte Viren, die sich mit dem Breitband-Antivirotikum nicht neutralisieren lassen. Erste präklinische Tests zeigten eine sehr gute Wirksamkeit und Verträglichkeit des neuartigen antiviralen Wirkstoffs, auch bei der Verabreichung mit einem Spray.

Mittel der Werner Siemens-Stiftung
 5 Mio. Schweizer Franken (2020–2021): Entwicklung Breitband-Antivirotikum)
 4,5 Mio. Schweizer Franken (2021–2023): Konzept eines Werner Siemens Foundation Center for Antiviral Research – WSS-CaRe)
Projektdauer 2020–2023
Projektleitung Prof. Dr. Francesco Stellacci, Supramolecular Nano-Materials and Interfaces Laboratory (SuNMIL), Institute of Materials, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)

Die Zukunft der Krebsbehandlung

Das Werner Siemens Imaging Center treibt die Entwicklung von bildgebenden Verfahren in der Krebs-Diagnostik voran. Mit künstlicher Intelligenz trainierte Software soll künftig die riesigen Datenmengen von PET- und MRI-Scannern auswerten – und so ganz neue Einblicke in Tumorgewebe erlauben.



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 Tumorthérapien» 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
18,4 Mio. Euro (2024 – 2033)
15,6 Mio. Euro (2016 – 2023)
12,3 Mio. Euro (2007 – 2016)
Projektdauer 2007–2033

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

Bösartige Tumore sind komplexe Gebilde. Sie bestehen nicht aus einheitlichem Gewebe, sondern aus zum Teil sehr unterschiedlichen Tumorarealen und Zellstrukturen, die sich erst noch im Verlauf der Zeit stetig verändern. Zudem ist jede Metastase eines solchen Tumors anders. Diese Heterogenität ist eine Herausforderung bei der Bekämpfung von vielen Krebserkrankungen. Sie führt sehr oft dazu, dass Therapien nicht wirken – oder dass ein Tumor gegen eine Therapie resistent wird, weil er nicht ganz ausgemerzt werden kann.

Mit heutigen Methoden ist es schwierig, Tumore in ihrer ganzen Verschiedenartigkeit zu charakterisieren. Meist versuchen Ärztinnen oder Forscher dies, indem sie eine Biopsie nehmen und untersuchen. «Aber mit einer Biopsie entnimmt man nur ein ganz kleines Stück des Tumors», sagt Bernd Pichler, der Leiter des Werner Siemens Imaging Center (WSIC) in Tübingen. Ausserdem sind Biopsien invasive, zuweilen gefährliche Eingriffe, man

kann sie nicht täglich oder wöchentlich durchführen.

Pichler und seine Forschungsteams am WSIC wollen neue, nicht invasive Diagnosemethoden entwickeln, welche mithilfe, die Heterogenität von Tumoren besser zu erfassen. Dabei haben sie stetige Fortschritte erzielt und im vergangenen Jahr einige viel beachtete Publikationen veröffentlicht. In einem Projekt gelang es ihnen, bei einem Darmkrebs mittels eines innovativen Ansatzes lebendes, totes, nekrotisches und fibrotisches Gewebe voneinander zu unterscheiden.

Intelligente Datenauswertung

Dazu untersuchten die Forschenden die Tumoren mit einem kombinierten PET-MRI-Scanner. Um die riesigen Datenmengen auszuwerten, die solche Untersuchungen liefern, entwickelten sie eine Machine-Learning-Software. Diese Software fütterten sie in einem ersten Schritt mit den Daten von rund 50 Mäusen, die an einem Darmkrebs litten, der als Modell für die menschl-



Mit einer Machine-Learning-Software werten die Forschenden des Werner Siemens Imaging Center in Tübingen riesige Datenmengen aus PET- und MRI-Scannern aus. Das eröffnet neue Möglichkeiten in der Tumor-Diagnostik.

che Erkrankung gilt. Anhand der Mausdaten lernte das Programm, die verschiedenen Gewebe zu unterscheiden.

In einem zweiten Schritt testeten sie das Erkennungsprogramm an Lebermetastasen von einem halben Dutzend Darmkrebs-Patienten. «Wir konnten zeigen, dass sich der Algorithmus sehr gut auf den Menschen übertragen lässt», sagt Bernd Pichler. «Und das ist nur ein erstes Beispiel.» Denn die Technik eröffne ungeahnte Möglichkeiten in der Tumordiagnostik. «Man kann damit viele andere Tumoreigenschaften untersuchen und differenzieren.»

In einem nächsten Schritt wollen die Tübinger Forschenden beispielsweise verschiedene Zellstadien unterscheiden. Manche Tumorzellen etwa befinden sich in einem sogenannten seneszenten Zustand. Sie haben aufgehört, sich zu teilen, leben aber weiter – und können aus diesem «Schlaf» heraus das Wachstum anderer Tumorzellen ankurbeln. Deshalb ist es wichtig, solche Zellen aufzuspüren und im richtigen Moment mit Medikamenten zu zerstören.

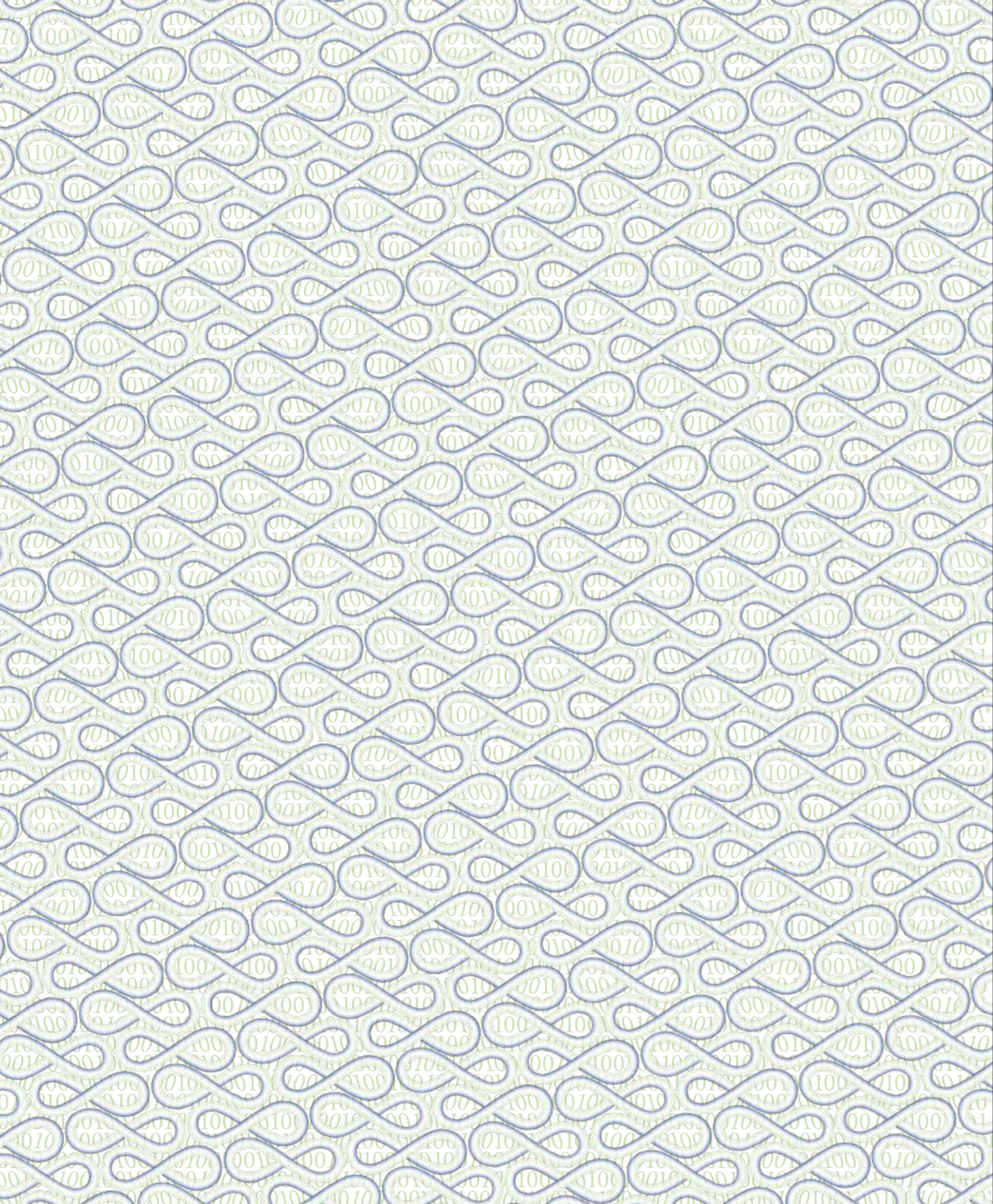
Auch die Immuneigenschaften unterschiedlicher Krebszellen oder Kennzeichen der Zellzwischenräume, der extrazellulären Matrix, könnten in Zukunft mit Machine-Learning-gestützten bildgebenden Analysemethoden charakterisiert werden. Entscheidend dafür ist die Entwicklung sogenannter Tracer. Diese radioaktiv markierten Moleküle werden in den lebenden Organismus gebracht und dort – je nach Art des Moleküls – von bestimmten Zellen aufgenommen oder für bestimmte Stoffwechselfvorgänge benutzt. Mittels bildgebender Methoden lassen sie sich im Gewebe nachweisen. «Auf diese Weise können wir das Mikroumfeld von Tumoren besser verstehen», sagt Bernd Pichler.

Personalisierte Krebsbekämpfung

Das wird auch neue Therapiemöglichkeiten eröffnen. Eine Vision hat das Team um Bernd Pichler ebenfalls letztes Jahr in einem Review-Artikel in der hoch angesehenen Fachzeitschrift «Nature Reviews Cancer» publiziert.

In Zukunft sollen Forschende mittels bildgebender Methoden die unterschiedlichsten Moleküle, Vorgänge oder Eigenschaften in Tumorgeweben nachweisen – und daraus personalisierte Therapien ableiten. «Wir könnten zum Beispiel untersuchen, wie weit der pH-Wert im Tumor angepasst werden muss, damit eine bestimmte Immuntherapie funktioniert», sagt Pichler, der 2023 zudem mit dem Gold Medal Award, der höchsten Auszeichnung der World Molecular Imaging Society, geehrt wurde.

Bis solche Visionen Realität werden, wird es noch eine Weile dauern. Aber die verschiedenen Forschungsgruppen am Werner Siemens Imaging Center arbeiten mit Hochdruck an diversen Nachweismethoden, welche die Krebsbekämpfung revolutionieren werden.



Wer wir sind

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
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.

Gianni Operto, Vorsitzender,
Ebmingen, Schweiz

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

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Matthias Kleiner,
Mitglied, ehem. Präsident Leibniz-
Gemeinschaft Berlin, 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
Brigitt Blöchlinger, Zürich

Gestaltung

bigfish AG, Aarau

Texte

Simon Koechlin, Brittnau
S. 30–67, 88–93, 98–113, 116–129, 132–133
Brigitt Blöchlinger, Zürich
S. 68–87, 114–115, 130–131
Mathias Plüss, Vordemwald
S. 94–97

Korrektorat

Niklaus Waber, Strengelbach

Fotografien

Felix Wey, Fotostudio, Baden
S. 8, 12–14, 17, 21, 22, 25, 30–42, 45, 46, 48, 56, 86,
88–92, 98–105, 115, 118, 125
Oliver Lang, Fotografie, Lenzburg
S. 9, 10, 16, 18, 20, 24, 50, 52, 54, 70, 71, 73–80,
122, 127, 133
Peter Winandy, RWTH Aachen, S. 44
Prof. Dr. Ueli Angst, ETH Zürich, S. 72
Foto Wild, Sanitz bei Rostock, S. 82
Innovationszentrum für Tiefsee-Umweltüberwachung,
MARUM, Bremen, S. 85
Justin Jin, Brüssel, S. 106
RachelPotter88, Wikimedia Commons,
CC BY-SA 4.0, S. 109
Saskia Rosset, Zürich, S. 121
Hannes Woidich, Fotografie, Dortmund, S. 129

Illustrationen

bigfish AG, Aarau

Druckerei

Kasimir Meyer AG, Wohlen

© Werner Siemens-Stiftung, 2023

