

Empa Quarterly

FORSCHUNG & INNOVATION II #88 II JULI 2025

FOKUS: OBERFLÄCHEN

FORSCHUNG AN DER GRENZE



TITAN IM KÖRPER
FLIEGENDE IONEN
LICHT GEGEN KEIME

[INHALT]

[FOKUS: OBERFLÄCHEN]



28



20



31



15



18

[FOKUS]

12 DÜNNSCHICHTEN
Timing ist alles

15 MEDIZIN-
TECHNOLOGIE
Ein aggressives Milieu

18 GRÜNER
WASSERSTOFF
Endlich günstig

20 KORROSION
Was den stärksten Stahl
schwach macht

22 ZUKUNFTSFONDS
Licht an – Bakterien tot

[THEMEN]

08 PORTRAIT
Der Zukunftsingenieur

26 SCHALL-
DÄMMUNG
Schallwellen in die
Irre führen

28 HOLZBAU
Nicht nichts!

31 SUPERKONDEN-
SATOREN
Druckertinte für
Superkräfte

[RUBRIKEN]

04 WISSEN IM BILD

06 IN KÜRZE

34 UNTERWEGS

TOTAL OBERFLÄCHLICH

Liebe Leserin,
lieber Leser,



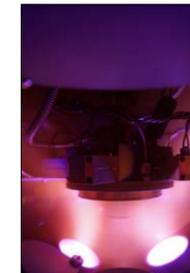
Was für uns als Charakter-
beschreibung negativ kon-
notiert ist, hat für Material-
forscherinnen und -forscher
einen durchaus positiven Klang. Denn: An der
Oberfläche spielt die Musik, chemisch be-
trachtet. Ob biologische Verträglichkeit bei
Implantaten, antibakterielle Beschichtungen
etwa im Spital oder katalytische Prozesse bei
der Herstellung von synthetischen Treibstof-
fen – für all das sind Oberflächen zentral.

Und häufig sind es just Oberflächen, die für
ganz bestimmte Eigenschaften des Materials
verantwortlich sind. Darauf beruhen diverse
High-Tech-Beschichtungstechnologien, mit
denen sich etwa piezoelektrische Dünnschichten
herstellen lassen – die wiederum in der Mikro-
elektronik weitverbreitet sind und auch in künf-
tigen Quantentechnologien und Photonikan-
wendungen eine entscheidende Rolle spielen
dürften (S. 12). Manchmal sind Beschichtungen
«nur» zum Schutz da. Bestimmte Oxidschichten
sind bei hochfesten Stählen, wo sie die «Was-
serstoffversprödung» verhindern und dadurch
Stabilität gewährleisten (S. 20), genauso wichtig
wie bei Titanimplantaten, die auf gleiche Weise
vor Biokorrosion geschützt sind. Denn unsere
Körpersäfte sind ein aggressives Umfeld, selbst
für so robuste Materialien wie Titan (S. 15).

Natürlich lohnt es sich auch immer, hinter
die Oberfläche zu blicken und den Sachen
auf den Grund zu gehen. Für die aktuelle
Ausgabe kratzen wir aber für einmal tat-
sächlich nur an der Oberfläche – denn auch
die birgt schon genügend Geheimnisse ...

Viel Vergnügen beim Lesen!
Ihr MICHAEL HAGMANN

[TITELBILD]



Dieses geheimnisvolle
Leuchten ist nicht bloss
dekorativ. Es handelt
sich um Argon-Plasma,
das der Herstellung
von Dünnschichten
mittels sogenanntem
Magnetron-Sputtern
dient. Empa-Forschernde
haben der bekannten
Technologie mit cleverem
Timing zu neuen Höhen
verholfen (S. 12).

Foto: Empa

[IMPRESSUM]

HERAUSGEBERIN Empa
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf, Schweiz
www.empa.ch

REDAKTION Empa Kommunikation
ART DIREKTION PAUL AND CAT.
www.paul-and-cat.com

KONTAKT Tel. +41 58 765 47 33
redaktion@empa.ch

www.empaquarterly.ch

VERÖFFENTLICHUNG
Erscheint viermal jährlich
PRODUKTION
anna.ettlin@empa.ch

myclimate
Wirkt. Nachhaltig
Drucksache
myclimate.org/01-25-631247



ISSN 2297-7406
Empa Quarterly (deutsche Ausg.)

Fotos: Empa

**SCHILLERENDE SCHICHTEN**

Dieses psychedelische Farbenspiel entstammt nicht der Hand eines Künstlers, sondern einem High-Tech-Beschichtungsverfahren namens Atomlagenabscheidung (engl. «Atomic Layer Deposition», ALD). Forschende des Empa-Labors für Werkstoff- und Nanomechanik nutzen das Verfahren, um mehrlagige Dünnschichten aus Keramiken wie Aluminiumoxid und Metallen, darunter Kupfer, herzustellen. Dabei setzen sich die nur wenige Nanometer dünnen Lagen aus Aluminiumoxid nicht nur auf der Probe, sondern auch an den Wänden der Vakuumkammer ab, die Doktorand Samuel Bojarski für dieses Foto abgelichtet hat. Die «Regenbögen» entstehen durch Interferenzeffekte: Dickere Oxidlagen erscheinen in anderen Farben als dünnere. Die mehrschichtigen Strukturen sind zugleich fester und geschmeidiger als ihre Einzelbestandteile. Sie könnten in besonders robuster Elektronik, optischen Anwendungen und anderen fortschrittlichen Beschichtungstechnologien zum Einsatz kommen.

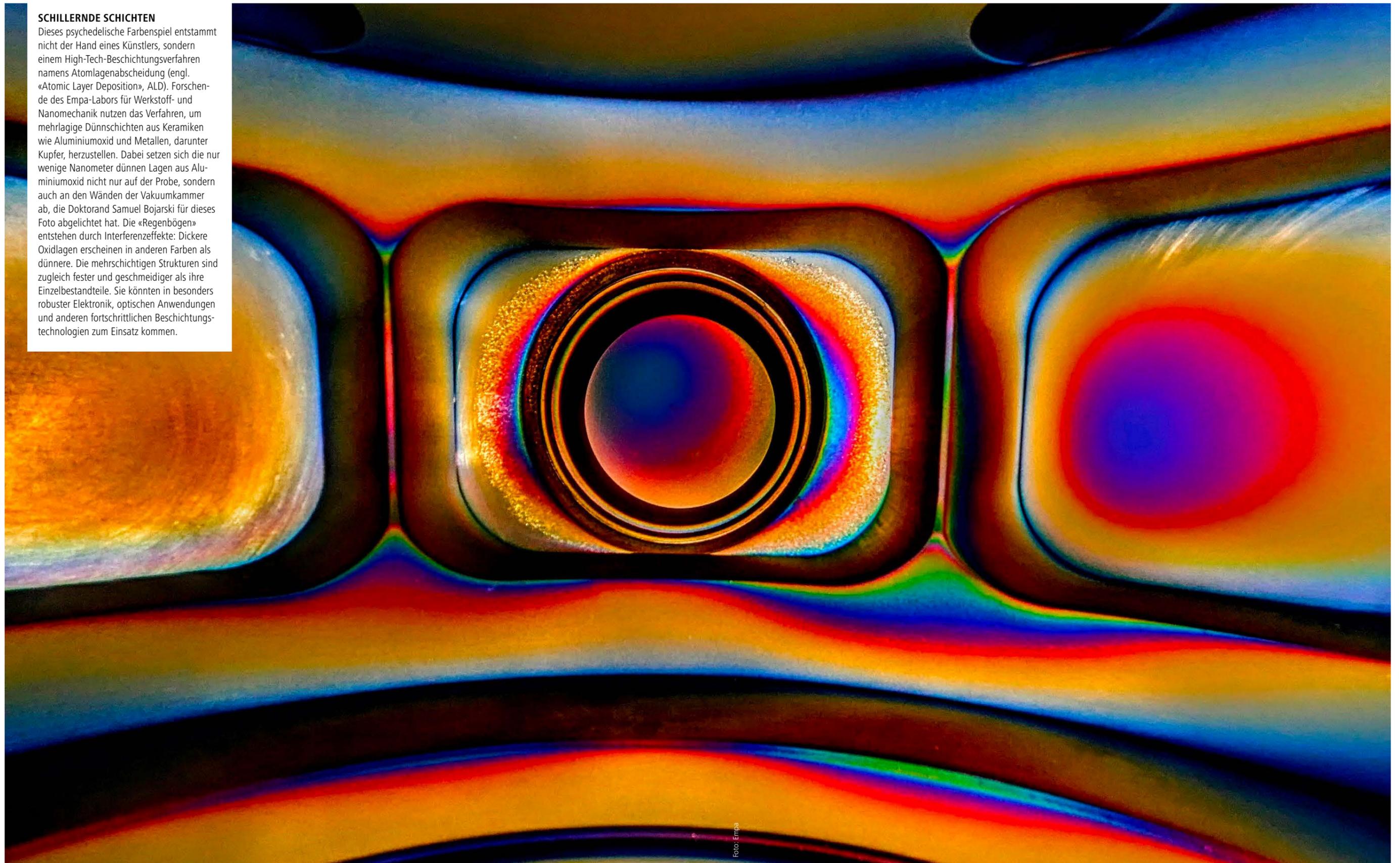


Foto: Empa

URS LEEMANN NEU STELLVERTRETENDER DIREKTOR DER EMPA



NEUE ROLLE

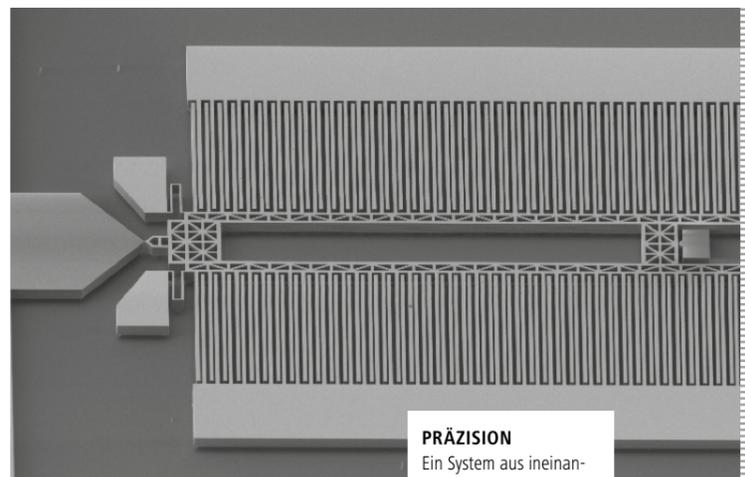
Urs Leemann, neuer stellvertretender Direktor der Empa und Leiter des Departements «Corporate Services».



Anfang April 2025 wurde Urs Leemann zum stellvertretenden Direktor der Empa ernannt. Der Leiter des Departements «Corporate Services» folgt auf Peter Richner, der sich aufgrund seiner Pensionierung aus der Direktion zurückzieht. Leemann bringt breite Erfahrung aus Forschung, Wirtschaft und Unternehmensgründung mit und engagiert sich unter anderem im «Cleantech Hub Dietikon Limmattal». Gemeinsam mit Direktorin Tanja Zimmermann und Lorenz Herrmann wird er die strategische Weiterentwicklung der Empa mitgestalten.

NANOMATERIAL UNTER SPANNUNG

Forschende der Empa und der ETH Zürich haben ein elektromechanisches System entwickelt, das Nanomaterialien gezielt unter Spannung setzt. So lassen sich elektronische Bauteile mit neuartigen Eigenschaften erzeugen, vielversprechend für Quanteninformatik, Kommunikation, Sensorik und Energieumwandlung. Ein Video des bewegten Systems von Empa-Forscher Peter Lendway wurde mit dem ersten Platz beim SNF-Wettbewerb für wissenschaftliche Bilder in der Kategorie «Video» ausgezeichnet.



PRÄZISION

Ein System aus ineinandergreifenden Kämmen, das sich durch elektrische Spannung bewegt.



Fotos: Empa

CO₂ ALS ROHSTOFF: EMPA-FELLOWSHIP FÜR CARLOTA BOZAL-GINESTA



AUSGEZEICHNET

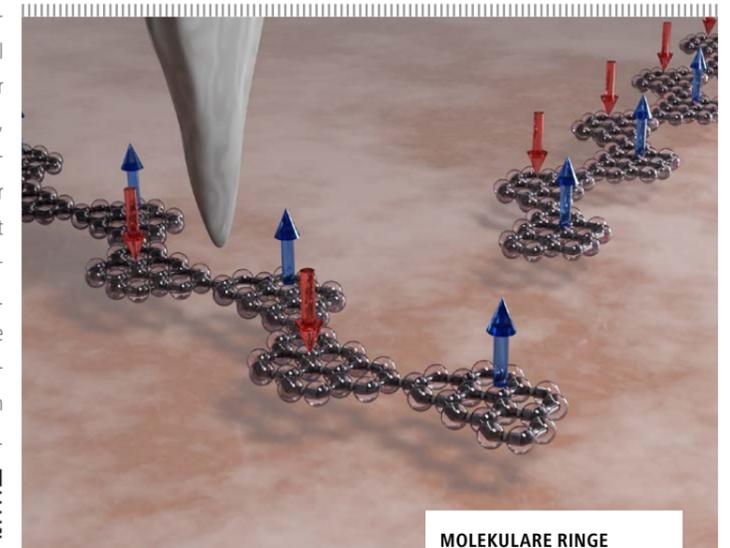
Empa-Forscherin Carlota Bozal-Ginesta an der Versuchsanlage zur CO₂-Elektrolyse.

Die junge Empa-Forscherin Carlota Bozal-Ginesta will CO₂ effizienter nutzbar machen. Mit maschinellem Lernen und Hochdurchsatz-Experimenten entwickelt sie bessere Elektroden für die CO₂-Elektrolyse, eine Schlüsseltechnologie zur Herstellung synthetischer Treibstoffe. Ziel ist es, eine möglichst geringe Anzahl spezifischer Produkte anstelle komplexer Gemische zu erzeugen. Für ihr innovatives Projekt wurde sie mit einem zweijährigen «Empa Young Scientist Fellowship» ausgezeichnet.



ZWEITES QUANTENSPIN-MODELL AUS NANOGRAFPHEN-MOLEKÜLEN

Empa-Forschende des «nanotech@surfaces»-Labors haben bereits zum zweiten Mal ein fundamentales theoretisches Modell der Quantenphysik experimentell nachgebaut, das auf den Physik-Nobelpreisträger Werner Heisenberg zurückgeht. Grundlage für das erfolgreiche Experiment bildet eine Art «Quanten-Lego» aus winzigen Kohlenstoff-Molekülen, sogenannten Nanographenen. Der zweite Erfolg verdeutlicht: Diese Methode ermöglicht vielseitige experimentelle Forschung an Quantentechnologien, die diesen einst zum Durchbruch verhelfen könnte.



MOLEKULARE RINGE

Für die Heisenberg-Kette wurde das Nanographen-Molekül Olympicon verwendet, das aus fünf Kohlenstoffringen besteht.



Fotos: Empa

DER ZUKUNFTSINGENIEUR



FORSCHER UND PRAKTIKER
Matthias Sulzer leitet das Departement Ingenieurwissenschaften.

Foto: Marion Nitsch

Seit Januar 2025 leitet Matthias Sulzer das Empa-Departement Ingenieurwissenschaften und beschäftigt sich mit der ganzen Palette der Materialien und Technologien für die gebaute Umwelt. Der ausgebildete Ingenieur ist überzeugt, dass Forschung und Industrie gegenseitig voneinander profitieren – ein Grundsatz, den er in seiner Karriere in beiden «Welten» stets gelebt hat. Der wahre Schlüssel zum Erfolg sind für ihn aber die Menschen.

Text: Anna Ettlin

Strukturiert, aufgeräumt, ästhetisch: Hier ist ein visueller Mensch zuhause, merkt man im Büro von Matthias Sulzer. Ein handgezeichnetes Poster zeigt die Schritte der Strategieentwicklung auf: Eine Strasse windet sich einen Berg hoch, Wegweiser markieren die wichtigsten Meilensteine. «Ich zeichne Probleme gerne auf, auch als Diskussionsgrundlage», sagt der Forscher und Ingenieur. Diskussionen und Besprechungen gehören in seiner neuen Rolle zum Alltag: Seit dem 1. Januar 2025 leitet Sulzer das Empa-Departement Ingenieurwissenschaften.

Sein Weg dorthin war ebenso gewunden wie die metaphorische Strasse auf besagtem Poster. Die erste Berührung mit der Empa hatte Sulzer genau 30 Jahre zuvor, während seiner Bachelorarbeit. «Es ging um die thermische Modellierung von Wärmespeichern», erinnert er sich. Die Forschung an Energiesystemen würde Sulzer durch seine gesamte eher untypische Karriere begleiten – obwohl sein Hauptinteresse lange Zeit nicht der akademischen Welt galt.

ANWENDUNG TRIFFT FORSCHUNG

Schon als Schüler war Sulzer ein Praktiker. Sein Vater war ebenfalls Ingenieur und vermittelte seinem Sohn die Liebe zu Mathematik und Technik. Sulzer

machte eine Lehre als Lüftungsplaner und schrieb sich danach an der Fachhochschule für ein Ingenieursstudium ein, ermutigt durch seinen Lehrmeister. Die Freude am Lernen, in Kombination mit seiner unternehmerischen Ader, führte ihn danach an die australische «University of New South Wales» für einen Master in Business Administration mit Vertiefung in «Energy Economics».

«Australien war damals führend auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien, und die Uni war sehr international», erinnert sich Sulzer. Diese Erfahrungen prägten ihn, als er wenig später mit zwei Partnern eine Firma gründete.

Was als traditionelles Gebäudetechnik-Unternehmen begann, entwickelte sich unter seiner Leitung schnell zu einem Innovationsführer auf dem Gebiet der Energiesysteme. Der Schlüssel zum Erfolg: Forschung. Denn zeitgleich mit der Firmengründung bekam Sulzer einen Forschungsauftrag an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

Dank dieser Doppelrolle konnte er die Brücke in beide Richtungen schlagen: Innovative Anwendungen und angewandte Forschung gaben sich die Hand. Neuartige Fernwärmenetze, Hydrauliksysteme für Wasserkraftwerke, Anlagen für die chemische Industrie – als CEO stellte sich Sulzer gerne den

unterschiedlichsten Herausforderungen. Es folgten prominente Projekte, darunter etwa das Anergie-Netz am ETH-Campus Höggerberg oder die Entwicklung, Planung und Bau der Gebäudetechnik der hochalpinen Monte-Rosa-Hütte.

2017 nahm sein Karriereweg die nächste Windung: Mit seinen Partnern brachte Sulzer das Unternehmen an die Börse und beschloss, sich von nun an voll und ganz der Forschung zuzuwenden – an der Empa. Der Ingenieur stiess als Senior Researcher zum «Urban Energy Systems Lab» und übernahm die Leitung des institutionsübergreifenden schweizweiten Kompetenzzentrums «Swiss Competence Centre for Energy Research: Future Energy Efficient Buildings and Districts» (SCCER FEED&D).

Im akademischen Umfeld fühlte sich der Industrieabgänger schnell wohl. «Die Empa verbindet exzellente Forschung mit dem Wissenstransfer in die Industrie», sagt er – ein Brückenschlag ganz nach seinem Herzen, das sowohl für die Forschung als auch für die Ingenieurskunst schlägt.

FORSCHEN UND BAUEN FÜRS KLIMA

Die gebaute Umwelt hat einen enormen Einfluss auf Klima und Umwelt. «95 Prozent aller menschengemachter Materialien, die ein urbanes Gebiet verbraucht, fliessen in die Bauindustrie», so Sulzer. Sein Forschungsdepartement an der Empa begegnet dem Klimawandel dreifach: durch Dekarbonisierung von Energiesystemen, einen geschlossenen Materialkreislauf sowie durch die Forschungsinitiative «Mining the Atmosphere», die atmosphärischen Kohlenstoff als Rohstoff wiederverwenden und -verwerten will.

Das Innovationspotenzial ist entsprechend gross. Besonders interessant findet Sulzer, dass sein Departement

die gesamte Palette der Empa-Vision abdeckt: Materialien und Technologien für eine nachhaltige Zukunft. Dabei geht die Forschung am Departement über die Entwicklung nachhaltiger Baustoffe und -technologien hinaus. «Wir forschen auch an innovativen Lösungen in der Robotik, der experimentellen Kontinuumsmechanik und dem Maschinenbau, mit Anwendungen in diversen Bereichen. So entwickeln wir im Labor für Nachhaltige Robotik beispielsweise Drohnen für autonome Reparaturen an Infrastrukturen und das Umweltmonitoring. Die experimentelle Kontinuumsmechanik liefert grundlegende Erkenntnisse für die Entwicklung und den Einsatz neuer Materialien mit verbesserten Eigenschaften, zum Beispiel in der Medizintechnik. Das Labor «Mechanical Systems Engineering» konzentriert sich auf die Optimierung von metallischen Werkstoffen, Kunststoffen und Verbundwerkstoffen für eine breite Palette von Anwendungen», erläutert Sulzer. «Und das auf ganz unterschiedlichen Skalen, angefangen bei Molekülen und chemischen Wechselwirkungen bis hin zu nationalen und internationalen Analysen von Infrastrukturen und Energiesystemen.»

1 + 1 = 3

Um das Departement, die Empa, und die Schweizer Forschungslandschaft als Ganzes für die Zukunft zu rüsten, braucht es gemäss Matthias Sulzer vor allem eines: Menschen. «Unsere wichtigste Aufgabe ist es, die nächste Generation von Forschenden auszubilden», ist er überzeugt. Seine Rolle sieht er dabei als Ermöglicher wissenschaftlicher Exzellenz: «Ich will Räume schaffen, die den Forschenden optimale Voraussetzungen für ihre Arbeit bieten», sagt er. Dazu zählt für ihn auch die inter- und transdisziplinäre Zusammenarbeit, die sogenannte «Team Science». «Forschende werden durch die klassische akademische Laufbahn zur individuellen Exzellenz trainiert», so Sulzer.

«Das ist wichtig und richtig. Mein Ziel ist es, diese exzellenten Forscher dann so in ein Team zu integrieren, dass 1 + 1 nicht nur 2 ergibt, sondern 3 – ein echter Mehrwert. Dies gilt besonders in interdisziplinären Projekten, wie zum Beispiel die Entwicklung biokompatibler Materialien für medizinische Implantate, wo die Zusammenarbeit von Ingenieuren, Materialwissenschaftlerinnen und Medizintechnikern zu innovativen Lösungen führt.»

MATTHIAS SULZER

WERDEGANG: Matthias Sulzer studierte Gebäudetechnik an der Hochschule Luzern, mit einem anschliessenden Master in Business Administration (MBA) mit Vertiefung in Energiewirtschaft an der «University of New South Wales» in Sydney, Australien. Nach seiner Rückkehr in der Schweiz gründete er mit zwei Partnern eine Unternehmensgruppe im Bereich Energie- und Gebäudetechnik, die er erfolgreich an die Börse brachte. Nebenberuflich war an der Hochschule Luzern tätig, wo er sich in verschiedenen Forschungsprojekten engagierte und dabei den Professorentitel erlangte. 2017 kam Sulzer als leitender Wissenschaftler an das «Urban Energy System Lab» der Empa. Seit Januar 2025 leitet er das Empa-Departement Ingenieurwissenschaften.

Das Zusammenstellen und Führen schlagkräftiger Teams sieht er als die grösste Herausforderung und den roten Faden durch seine eigene Laufbahn. Führung ist für ihn keine reine Talentsache: Noch wichtiger sind das richtige Handwerk und die Erfahrung, die Sulzer als eine Art Leadership-Klavatur versinnbildlicht, die mit der Zeit immer mehr spielbare Tasten bekommt.

Seine Freizeit verbringt der Departementsleiter allerdings nicht mit Klavier



Foto: Marion Nitsch

MENSCHEN IM VORDERGRUND
Matthias Sulzer im Gespräch mit Empa-Forscher David Häusermann.

spielen, sondern mit Klettern – am liebsten in der Natur – und mit Segeln auf dem Mittelmeer. Seit seine erwachsenen Kinder ausgezogen sind, geniesst der Familienvater auch die Zweisamkeit mit seiner Frau. Als Ausgleich zum intensiven Job des Departementsleiters

«Unsere wichtigste Aufgabe ist es, die nächste Generation von Forschenden auszubilden.»

hat sich Sulzer zudem einen kleinen Raum für die Forschung freigehalten: am «Lawrence Berkeley National Laboratory» in den USA, das er einmal pro Jahr als Gastforscher besucht. Auch hier kann der Ingenieur nicht anders, als Brücken zu bauen: «Die «Energy Technology Area» am Berkeley Lab hat eine ähnliche Ausrichtung wie das Departement Ingenieurwissenschaften der Empa – das führt zu einem sehr fruchtbaren Austausch», sagt er. ■



TIMING IST ALLES

Wenn Bruchteile von Sekunden entscheiden: Empa-Forschende haben ein Verfahren für High-Tech-Dünnschichten entwickelt, in dem ein ausgeklügeltes Timing hochwertige funktionale Schichten bei niedriger Prozesstemperatur ermöglicht. Anwendungen für die neue Methode gibt es sowohl in der Halbleiter-Industrie als auch in künftigen Quanten- und Photonik-Technologien.

Text: Anna Ettl

Unser Alltag ist so durchsetzt von Elektronik, dass wir sie kaum noch bewusst wahrnehmen. Beim beiläufigen Griff zum Smartphone denkt man kaum daran, wie komplex ein solches Gerät eigentlich ist. Hunderte

von winzigen Komponenten spielen darin zusammen – jede davon ein hochpräzises Meisterwerk der Ingenieurskunst.

Zu diesen kaum wahrgenommenen Komponenten zählen Frequenzfilter. Sie stellen sicher, dass ein Gerät nur

die richtigen Signale empfängt, sei es über WiFi oder über mobile Netzwerke. Jedes Gerät, das kabellos kommuniziert, enthält solche Filter. Häufig basieren sie auf sogenannten piezoelektrischen Dünnschichten. Piezoelektrische Materialien haben eine Besonderheit:

Sie erzeugen eine elektrische Spannung, wenn man sie verformt, und verformen sich im Gegenzug, wenn man eine elektrische Spannung anlegt.

Nebst Frequenzfiltern kommen piezoelektrische Dünnschichten für viele weitere Komponenten in der Mikroelektronik zum Einsatz, sei es als Sensoren, Aktoren oder winzige Energiewandler. Zusätzliche Anwendungen, etwa für Quantentechnologien, sind Gegenstand laufender Forschung. Eines ist jedoch klar: Damit solche Dünnschichten ihre Arbeit verrichten können, müssen sie eine hohe Qualität aufweisen. Je nach Zusammensetzung und Funktion der Dünnschicht braucht es dafür unterschiedliche Herstellungsverfahren.

Empa-Forschende aus der Abteilung «Surface Science & Coating Technologies» haben ein neues Beschichtungsverfahren für piezoelektrische Dünnschich-

ten entwickelt. Das besondere daran: Mit ihrer Methode lassen sich die High-Tech-Schichten in sehr hoher Qualität auf isolierenden Substraten und bei relativ niedriger Temperatur herstellen – ein Novum. Ihre Ergebnisse haben die Forschenden in der Fachzeitschrift «Nature Communications» veröffentlicht und das Verfahren zum Patent angemeldet.

NEUE STÄRKEN FÜR BEKANNTES VERFAHREN

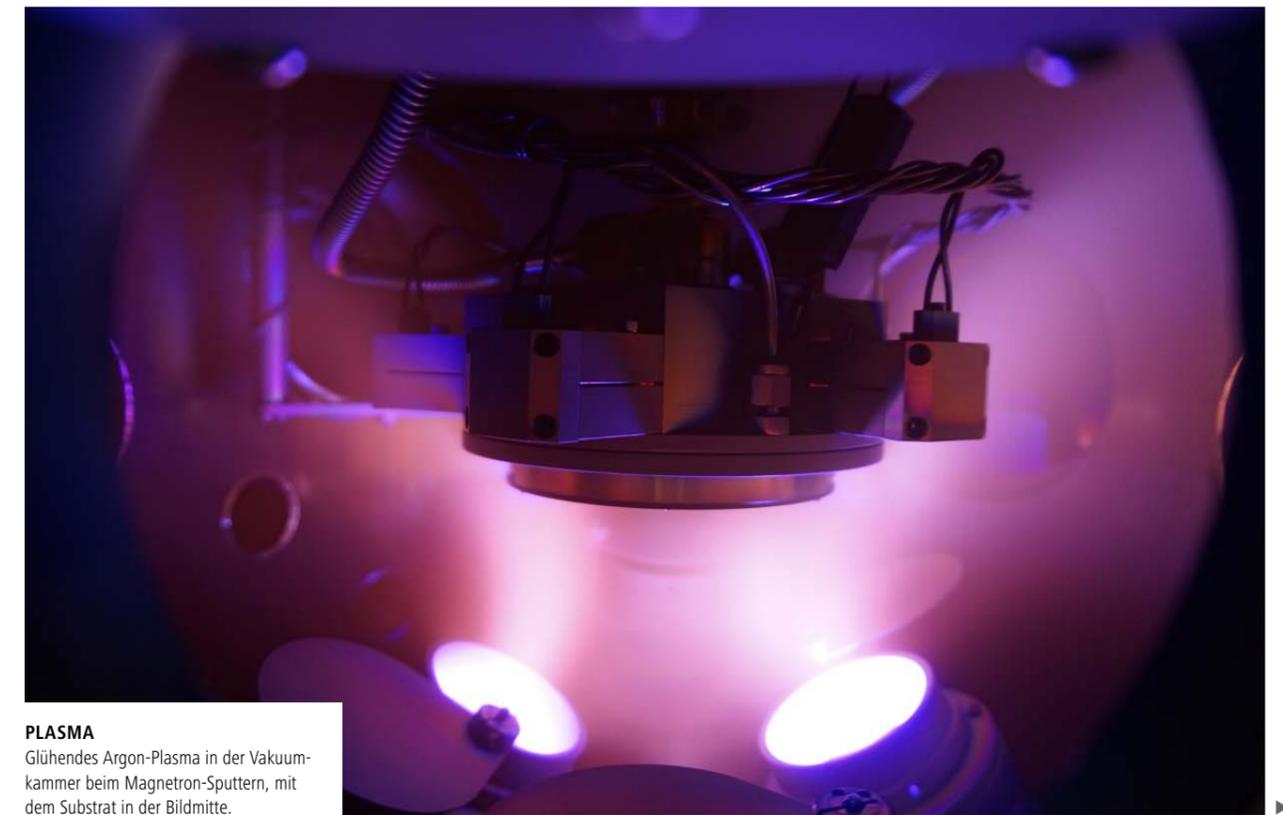
Als Grundlage diente den Forschenden ein gängiges Beschichtungsverfahren namens HiPIMS – kurz für «high power impulse magnetron sputtering», auf Deutsch Hochleistungsimpulsmagnetron-sputtern. Magnetronsputtern ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem Material aus einem Ausgangsstoff – dem Target – auf einem zu beschichtenden Bauteil – dem

Substrat – abgeschieden wird. Hierfür wird am Target ein Prozessgas-Plasma gezündet. Die Prozessgas-Ionen – meistens Argon – werden dabei auf das Target geschossen, aus dem sie dann Atome herauschlagen, die anschließend auf dem Substrat landen und die gewünschte Dünnschicht bilden. Als Target kommen viele Materialien in Frage. Für piezoelektrische Anwendungen sind es oft Metalle, mit denen sich unter Zugabe von Stickstoff Nitride, z.B. Aluminiumnitrid, herstellen lassen.

Das HiPIMS-Verfahren läuft im Grunde genommen genau gleich ab – nur, dass der Prozess nicht laufend stattfindet, sondern in kurzen, aber besonders energiereichen Impulsen. Dies führt nicht nur dazu, dass die herausgeschlagenen Target-Atome schneller unterwegs sind. Viele von ihnen werden bei ihrem Weg durch das Plasma auch ihrerseits ionisiert. Das macht das Ver-



FOKUSSIERT
Sebastian Siol (links) und Jyotish Patidar kontrollieren das HiPIMS-Verfahren am Computer.



PLASMA
Glühendes Argon-Plasma in der Vakuumkammer beim Magnetron-Sputtern, mit dem Substrat in der Bildmitte.

Fotos: Empa

fahren spannend für die Forschung. Im Gegensatz zu neutralen Atomen lassen sich Ionen beschleunigen, zum Beispiel indem am Substrat eine negative Spannung angelegt wird. Seit rund 20 Jahren wird das Verfahren zur Herstellung von Hartstoffschichten genutzt. Hier sorgen die hohen Energien für besonders dichte und widerstandsfähige Schichten.

Für piezoelektrische Dünnschichten kam das Verfahren bisher jedoch nicht in Frage. Denn wenn am Substrat eine Spannung anliegt, werden nicht nur die schichtbildenden Target-Ionen auf das Substrat beschleunigt, sondern auch die Argon-Ionen aus dem Prozessgas. Diesen Argon-Beschuss gilt es zu vermeiden. «In Hartstoffschichten können teilweise mehrere Prozent Argon eingeschlossen sein», weiss Empa-Forscher Sebastian Siol. «An eine piezoelektrische Dünnschicht müssen oft hohe Spannungen angelegt werden. Da würde das zu einem katastrophalen elektrischen Breakdown führen.»

Dennoch glaubten die Forschenden rund um Siol an das Potenzial von HiPIMS für piezoelektrische Dünnschichten. Die hohe Energie, mit der die Ionen auf das Substrat zufliegen, ist nämlich äusserst vorteilhaft. Prallt das Ion mit genügend Energie auf, bleibt es auf dem Substrat noch eine kurze Zeit mobil und kann einen optimalen Platz im wachsenden Kristallgitter finden. Aber was tun gegen die Argon-Einschlüsse?

Im Rahmen seiner Doktorarbeit entwickelte Jyotish Patidar eine clevere Lösung. Nicht alle Ionen kommen gleichzeitig am Ziel an. Der Grossteil der Argon-Ionen befindet sich im Plasma vor dem Target. Somit sind sie oft schneller am Substrat angelangt als die Target-Ionen, die erst einmal aus dem Target geschlagen werden müssen und zusätzlich die gesamte Strecke

überqueren müssen. Patidars Kunstgriff war das Timing: «Wenn wir die Spannung am Substrat genau im richtigen Moment anlegen, beschleunigen wir nur die gewünschten Ionen», erklärt Siol. Die Argon-Ionen sind zu diesem Zeitpunkt bereits vorbeigeflogen – ohne die zusätzliche Beschleunigung haben sie zu wenig Energie, um auf dem Substrat Fuss zu fassen.

«ELEKTRONENDUSCHE» ALS FLUGLOTSE

Mit diesem Kniff gelang es den Forschenden, erstmals hochwertige piezoelektrische Dünnschichten im HiPIMS-Verfahren herzustellen – gleichwertig oder sogar besser als mit herkömmlichen Methoden. Nun kam die nächste Herausforderung: Je nach Anwendung will man die Dünnschicht auf einer isolierenden Unterlage herstellen, etwa Glas oder Saphir. Ist das Substrat nichtleitend, kann aber keine Spannung daran angelegt werden. Zwar gibt es in der Industrie eine Möglichkeit, die Ionen trotzdem zu beschleunigen – aber auch sie führt oft zu Argon-Einschlüssen in der Schicht.

Hier gelang den Empa-Forschenden der Durchbruch. Um die Ionen auf das isolierende Substrat zu beschleunigen, nutzen sie den Magnetron-Puls selbst – den kurzen Impuls, der die Prozessgas-Ionen auf das Target schießt. Das Plasma in der Kammer enthält nämlich nicht nur Ionen, sondern auch Elektronen. Jeder Puls des Magnetrons beschleunigt automatisch auch diese negativ geladenen Elementarteilchen auf das Substrat. Die winzigen Elektronen kommen dabei viel schneller als die Ionen am Ziel an. Normalerweise ist diese «Elektronendusche» für den HiPIMS-Prozess nicht weiter relevant. Wenn die Elektronen am Substrat ankommen, verleihen sie ihm aber für einen Sekundenbruchteil eine negative Ladung – genug, um Ionen zu beschleunigen. Lösen die Forschenden einen nachfolgenden Magnetron-Puls

im genau richtigen Zeitabstand aus, beschleunigt die Elektronendusche jeweils diejenigen Target-Ionen, die beim vorangehenden Puls «losgeflogen» sind. Und natürlich lässt sich das Timing auch hier so einstellen, dass nur die richtigen Ionen in der Dünnschicht landen.

VON CHIPS ZU QUBITS

Die Resultate überzeugen: «Mit unserer Methode konnten wir auf isolierenden Substraten genau so gute piezoelektrische Dünnschichten herstellen wie auf leitfähigen», resümiert Siol. Das Verfahren nennen die Forschenden «Synchronized Floating Potential HiPIMS», kurz SFP-HiPIMS. Der grosse Vorteil: Mit SFP-HiPIMS lassen sich piezoelektrische Dünnschichten in sehr hoher Qualität bei niedrigen Temperaturen produzieren. Das öffnet neue Wege für die Herstellung von Chips und Elektronikkomponenten, die oft keine Temperaturextreme vertragen. Insbesondere das Verfahren für isolierende Substrate ist für die Halbleiterindustrie von Bedeutung: «Die Prozesse bei der Halbleiterherstellung sind so gestaltet, dass oft gar keine Möglichkeit besteht, eine elektrische Spannung am Substrat anzulegen», weiss Siol.

Mit seiner Forschungsgruppe widmet er sich als nächstes der Herstellung von ferroelektrischen Dünnschichten – eine weitere Schlüsseltechnologie in der heutigen und auch künftigen Elektronik. Ausserdem starten die Empa-Forschenden aufgrund dieses Erfolgs gleich mehrere Projekte mit anderen Forschungsinstitutionen, um ihre Dünnschichten in Anwendungen von Photonik bis Quantentechnologien zu bringen. Und schliesslich wollen sie das innovative Verfahren mit Hilfe von maschinellem Lernen und Hochdurchsatz-Experimenten noch weiter optimieren. ■



Foto: Empa

EIN AGGRESSIVES MILIEU

Was passiert mit Titan-Implantaten im Körper? Warum werden sie manchmal abgestossen oder brechen sogar? Die Empa-Forscherin Martina Cihova sucht die Antworten auf diese Fragen an der Grenzfläche zwischen dem Implantat und dem Körper, zwischen Materialwissenschaft und Medizin. Für ihr Forschungsvorhaben hat sie vor Kurzem einen «Ambizione-Grant» des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) erhalten.

Text: Anna Ettlín



TITAN IM FOKUS

Martina Cihova untersucht, wie der Körper die Oberfläche von Titanimplantaten angreifen kann.

Dank medizinischen Fortschritten leben wir Menschen immer länger. Dabei wollen wir – verständlicherweise – bis ins hohe Alter gesund und mobil bleiben. Implantate und Prothesen ersetzen «abgenutzte» Gelenke und Zähne, stoppen Schmerzen und erhöhen die Lebensqualität. Moderne medizinische Implantate sind kleine Wunderwerke der Biomaterial- und der Bioingenieurskunst zugleich. Dennoch kommt es gelegentlich zum Versagen von Implantaten, was schwerwiegende Folgen für die Patientinnen und Patienten haben kann.

Warum kommt es zu diesen Versagen – und warum nehmen sie in den letzten Jahren eher zu als ab? Die Empa-Forscherin Martina Cihova aus dem Labor «Fügetechnologie und Korrosion» will Antworten auf diese Fragen finden. Dafür nimmt sie das Verhalten von Implantaten im Körper unter die Lupe – oder, genauer gesagt, unter das Mikroskop. Für ihr Forschungsvorhaben hat die Wissenschaftlerin einen vierjährigen «Ambizione-Grant» des Schweizerischen Nationalfonds erhalten.

Viele Implantate – darunter künstliche Gelenke, Zahnimplantate und Herzschrittmacher – bestehen aus Titan. Dieses Übergangsmetall ist leicht und stabil, ist im Körper sehr beständig und lässt Knochen besonders gut anwachsen. Für diese Eigenschaften ist eine dünne Oxidschicht verantwortlich, die sich bei Kontakt mit Luft an der Titanoberfläche bildet. So ist es schliesslich nicht das Titan selbst, sondern die schützende Schicht an der Oberfläche der Implantate, die in Kontakt mit dem Körper kommt. «Da diese natürliche Passivschicht weniger als zehn Nanometer dick ist, wird sie in der Medizintechnologie und Forschung oft zu wenig beachtet», so Martina Cihova.

Hinzu kommt, dass manche Hersteller die Oxidschicht verändern, etwa verdicken, um unterschiedlichen Implantatgrössen oder -modellen eine Farbcodierung zu verleihen und den Ärztinnen und Ärzten so die Arbeit zu erleichtern. Andere rauhen die Oberfläche der Implantate auf, damit der Knochen besser anwachsen kann – oder gravieren mit einem Laser die Seriennummer ein. Auch 3D-Druck von patientenspezifischen Implantaten ist heute mittels Laserverfahren möglich. Alles sinnvolle Anwendungen, nur: «Jegliche Oberflächenbehandlung kann die Titanoxide an der Oberfläche verändern», weiss Cihova, «und es ist zu wenig erforscht, was das für die Interaktion des Implantats mit dem Körper und für seine Korrosionsbeständigkeit bedeutet.»

FORSCHUNG AN DER GRENZE

Diese Wissenslücke will die Empa-Forscherin mit ihrem Projekt schliessen. Schon als Bioingenieur-Studentin begeisterte sich Cihova für Materialwissenschaften. Daher schlug sie für ihr Doktorat einen neuen Weg ein – die Metallurgie –, um ihr Interesse an Materialien weiter zu vertiefen. Nun bringt sie ihre Expertise in den beiden Gebieten zusammen und richtet sie genau auf die Stelle, wo Metall, beziehungsweise Metalloxide, und Biologie aufeinandertreffen: die Grenzfläche zwischen Implantat und menschlichem Körper.

«Solche Biogrenzflächen sind hochkomplex, aber auch äusserst interessant», sagt die Jungforscherin. «Wenn man an Korrosion denkt, dann denkt man an salziges Meerwasser, feuchte Luft, vielleicht das rostige Velo – aber nicht an den menschlichen Körper.» Dabei kann gerade der eine durchaus überraschend aggressive Umgebung sein, insbesondere, wenn Immunreaktionen stattfinden. Immunzellen geben diverse Stoffe ab, die unter anderem

den pH-Wert senken und das Implantat angreifen können. Was macht der Körper also mit Materialien, die wir als stabil ansehen? Genau hier setzt die Forschung zur Biokorrosion an.

Diese Vorgänge sind auf (elektro-) chemischer und biologischer Ebene sehr komplex. Dazu kommt, dass Titanoxid eben nicht gleich Titanoxid ist. Es kann drei unterschiedliche kristalline Formen annehmen – alle mit der gleichen chemischen Zusammensetzung, TiO_2 , – oder amorph, sozusagen strukturell «undefiniert», vorliegen. All diese Formen unterscheiden sich in ihren elektronischen und elektrochemischen Eigenschaften und somit potenziell auch in ihren Wechselwirkungen mit dem Körper.

KOMPLEXITÄT KONTROLLIERT STEIGERN

Die Oberflächenbehandlung von Implantaten kann die Kristallformen der Oxide verändern, entweder am gesamten Implantat oder nur punktuell. Um die Auswirkungen insbesondere dieser lokalen Heterogenität auf die ohnehin komplexe Biogrenzfläche zu verstehen, braucht es ein strukturiertes Vorgehen. Zunächst stellen Cihova und ihr Team in Zusammenarbeit mit den Empa-Experten für Laserverarbeitung von Metallen in Thun Mustersubstrate mit unterschiedlich strukturierten Titanoxidschichten her, die in ihrer Heterogenität systematisch variieren. Diese Substrate werden dann sukzessive immer komplexeren Körperflüssigkeiten ausgesetzt, um die fundamentalen Zusammenhänge von Struktur, Eigenschaften und Reaktivität der Oxide zu untersuchen.

«Wir beginnen mit simulierten physiologischen Flüssigkeiten, die lediglich Wasser und Ionen enthalten», erklärt Cihova. In einem nächsten Schritt kommen Proteine hinzu, etwa das an der Immunantwort und der Wundheilung beteiligte Fibrinogen. Schliesslich planen

die Forschenden zu untersuchen, wie sich die Biogrenzfläche in Kontakt mit lebenden Makrophagen-Zellen – der «Polizei des Körpers» – verhält. Dafür arbeiten sie mit Empa-Forschenden in St. Gallen zusammen. «Ich freue mich sehr, dass wir für dieses Projekt Kolleginnen und Kollegen aller drei Empa-Standorte begeistern konnten», sagt Cihova. «Das ermöglicht es uns, solche komplexen Fragestellungen interdisziplinär anzugehen.»

Bei jedem dieser Schritte werden die Grenzflächen «auf Herz und Nieren» untersucht, mittels elektrochemischer Methoden gepaart mit hochauflösender Elektronen- und Rasterkraftmikroskopie. «Sehen heisst Verstehen – auch, wenn das heisst, auf eine Grössenskala zu schauen, die weit kleiner ist als eine menschliche Zelle», sagt Cihova. «Gerade dort lassen sich oft entscheidende Details entdecken.»

Die Empa-Forscherin hofft, dass die Erkenntnisse aus den nächsten Jahren zu sichereren und stabileren Implantaten führen. Und auch, «dass wir mehr darüber lernen, wie sich die faszinierende Bandbreite von Oxideigenschaften gezielt in der Biomedizin nutzen lässt.» Im Anschluss an ihr «Ambizione»-Projekt 2028 will sie die neuen Methoden auch auf andere medizinische Materialien ausweiten. In Zukunft, ist Cihova überzeugt, wird das Forschungsgebiet noch mehr an Bedeutung gewinnen: «Auch in den aufstrebenden Bereichen der Nanomedizin oder der implantierbaren Sensorik ist das Verhalten von Metalloxiden an Biogrenzflächen für deren Performance zentral.» ■



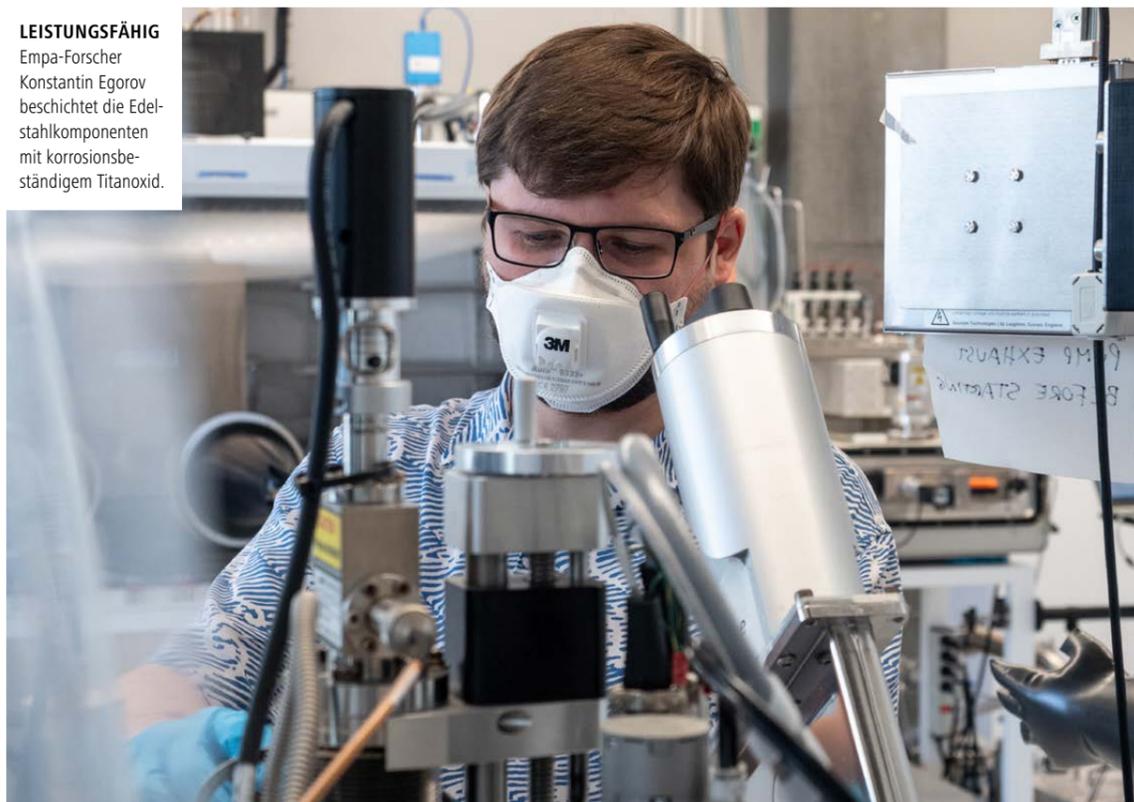
Fotos: Empa



OXIDSCHICHTEN UNTER DER LUPE

Oben: Martina Cihova am Rasterkraftmikroskop, das die Untersuchung der Proben unter kontrollierten Bedingungen möglich macht. Mitte/unten: Die unterschiedliche Beschaffenheit des Titanoxids an der Oberfläche der Proben verleiht ihnen unterschiedliche Farben.

LEISTUNGSFÄHIG
Empa-Forscher Konstantin Egorov beschichtet die Edelstahlkomponenten mit korrosionsbeständigem Titanoxid.



ENDLICH GÜNSTIG

Grüner Wasserstoff – mit erneuerbarer Energie aus Wasser hergestellt – ist ein wichtiger nachhaltiger Treibstoff und Energiespeicher. Seine industrielle Herstellung ist allerdings deutlich teurer als die konventionelle Gewinnung von Wasserstoff aus fossilen Quellen. Empa-Forschende entwickeln mit ihren Partnern Materialien für die Wasserelektrolyse, die nicht nur leistungsfähiger und günstiger sind, sondern sich auch in industriellem Massstab skalieren lassen.

Text: Anna Ettl

Grüner Wasserstoff kann fossile Brennstoffe ersetzen und ist somit ein wichtiger Pfeiler der Energiewende. Die Idee ist simpel: Strom aus erneuerbaren Quellen plus Wasser ergibt Wasserstoff und Sauerstoff. Verbrennt man den Wasserstoff, so reagiert er mit atmosphärischem Sauerstoff wieder zu Wasser und der Kreis

schliesst sich – ganz ohne Treibhausgasemissionen. So zumindest der Idealfall. In der Realität hat die Herstellung von «grünem» Wasserstoff mittels Elektrolyse starke Konkurrenz. Über 90 Prozent des Wasserstoffs wird heute aus fossilen Quellen gewonnen, überwiegend aus Erdgas. Der Hauptgrund: Der nachhaltigere Wasserstoff aus der Elektrolyse ist rund doppelt so teuer in der Herstellung.

In einem vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und der französischen «Agence Nationale de la Recherche» (ANR) unterstützten Projekt wollen Empa-Forschende aus dem Labor «Materials for Energy Conversion» nun Abhilfe schaffen. Ein Kostentreiber der Elektrolyse sind nämlich die Materialien, die bei der Herstellung der Elektrolyseure zum Einsatz kommen. Gemeinsam mit

Forschenden der französischen Forschungsinstitute «Institut de la Corrosion» in Brest und «LEMTA» in Nancy arbeiten die Empa-Forschenden an günstigeren Alternativen für zwei Schlüsselkomponenten der Elektrolyse-Geräte.

KEINE ANGST VOR KORROSION

Im Visier der Forschenden steht die sogenannte «Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis»-Technologie, kurz PEMWE. PEMWE-Elektrolyseure sind effizient und kompatibel mit Energieschwankungen, die aus erneuerbaren Quellen zu erwarten sind. Die Umgebung, die im Elektrolyseur herrscht, ist allerdings korrosiv. In der zentralen Kammer des Elektrolyseurs löst sich Stahl schlichtweg auf «wie Zucker in einer Tasse Tee», so Empa-Forscher Konstantin Egorov. Selbst Komponenten, die nicht mit dem hochsaurigen Milieu in Kontakt kommen, korrodieren.

«Wir wollen etwas entwickeln, was die Industrie tatsächlich gebrauchen kann.»

Die Komponenten für die Zu- und Ableitung des Wassers und der entstehenden Gase innerhalb des Elektrolyseurs bestehen deshalb aus Titan, das sowohl teuer als auch schwierig zu verarbeiten ist. Selbst das ist nicht genug: Damit das Titan nicht oxidiert und die Wirksamkeit des Elektrolyseurs beeinträchtigt, müssen die Bauteile noch mit dem Edelmetall Platin beschichtet werden, was die Kosten weiter in die Höhe treibt.

Materialwissenschaftler Egorov sucht deshalb nach Wegen, das teure Platin zu ersetzen, ohne die Korrosionsbeständigkeit zu beeinträchtigen. Dafür

setzt er auf eine besondere Form des Titanoxids, das sogenannte hochkristalline sauerstoffarme Rutil. Bei diesem Oxid fehlen an bestimmten Stellen Sauerstoffatome, was dem Material eine gute Leitfähigkeit verleiht, während seine Hochkristallinität für eine hohe Korrosionsbeständigkeit sorgt – genau die richtigen Voraussetzungen für die PEM-

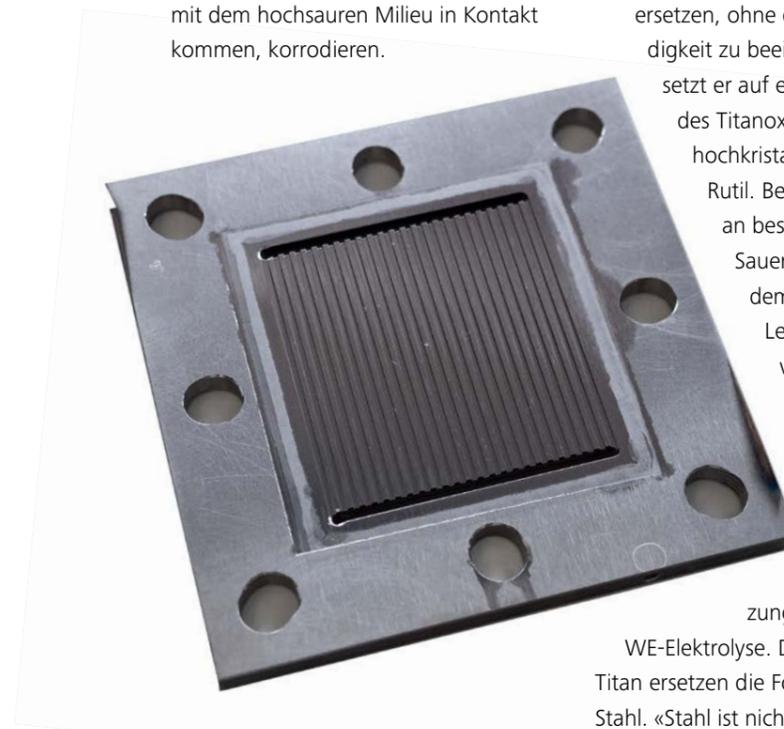
WE-Elektrolyse. Das Trägermaterial Titan ersetzen die Forschenden durch Stahl. «Stahl ist nicht nur günstiger, sondern auch viel einfacher zu verarbeiten. Das ermöglicht neue, fortschrittliche Komponentendesigns, die die Effizienz der Zelle steigern», erklärt Egorov. Dank der robusten Beschichtung soll die korrosive Umgebung dem Material nichts mehr anhaben können.

DIE UMSETZUNG IN DER INDUSTRIE GLEICH MITGEDACHT

Die ersten Ergebnisse bestätigen die hohe Korrosionsbeständigkeit der innovativen Beschichtung. «Wir konnten eine Methode entwickeln, um die erste Komponente des PEMWE-Elektrolyseurs, die sogenannte bipolare Platte, erfolgreich mit Titanoxid zu beschichten», sagt Egorov. Die Methode, die der Empa-Wissenschaftler dafür nutzt, heisst physikalische Gasphasenabscheidung (engl. «physical vapour deposition» oder PVD) und ist in der Industrie weit verbreitet. «Es ist uns wichtig, etwas zu entwickeln, was die Industrie tatsächlich gebrauchen kann», betont der Forscher.

Die Komponenten, die Egorov an der Empa herstellt, unterziehen seine Partner gründlichen Korrosionstests, zunächst unter Laborbedingungen, dann in einem funktionierenden Elektrolyseur. Die bipolare Platte hat die Tests bereits erfolgreich überstanden. Als nächstes wollen die Forschenden eine weitere Schlüsselkomponente mit Titanoxid beschichten, die sogenannte poröse Transportschicht.

«Die Beschichtung von porösen Materialien birgt viele Herausforderungen», weiss Egorov. Die Poren müssen gleichmässig beschichtet werden, damit das darunterliegende Material nicht korrodiert – zugleich dürfen sie aber nicht verstopfen. Der Beschichtungsexperte ist jedoch zuversichtlich, dass dies machbar ist. Das Projekt läuft noch bis 2026. Danach hoffen die Empa-Forschenden, einen Industriepartner an Bord zu holen, um die innovative Technologie in Richtung Kommerzialisierung weiterzuentwickeln.



BESTÄNDIG
Die Platte zeigt keine Spur von Korrosion.

Und schon geringste Mengen an gelöstem Metall im hochreinen Wasser, das zur Elektrolyse in das Gerät strömt, führen zu Einbussen in seiner Leistung und seiner Lebensdauer.

Foto: Empa

Foto: Empa

WAS DEN STÄRKSTEN STAHL SCHWACH MACHT

Wasserstoff schadet Stählen. Insbesondere hochfeste Stähle, wie sie für den Bau von Brücken, Hochhäusern sowie Öl- und Gasinfrastruktur eingesetzt werden, sind anfällig auf Versprödung durch atomaren Wasserstoff aus der Umwelt. Die komplexen Mechanismen dahinter sind noch nicht vollumfänglich verstanden. Native Oxidschichten auf Stahl können als Barrieren wirken, die das Eindringen von Wasserstoff in das Werkstück verhindern. Empa-Forschende wollen untersuchen, wie Wasserstoff mit den dünnen Oxidschichten interagiert, und zwar räumlich und zeitlich hoch aufgelöst.

Text: Anna Ettlin

In der Nacht auf den 11. September 2024 stürzte ein rund 100 Meter langer Abschnitt der Carolabrücke in Dresden in die Elbe. Die Ursache: Risse an der stählernen Spannstruktur der Brücke. Der Schuldige: Wasserstoff. Die Carolabrücke ist längst nicht das erste Bauwerk, dem Wasserstoff zusetzt. Weitere bekannte Beispiele sind der Londoner Wolkenkratzer «122 Leadenhall Street», im

Volksmund als «Cheesegrater» bekannt, sowie der Teilneubau der Bay Bridge in San Francisco, bei denen das Versagen der Stahlbolzen Sanierungskosten in Millionenhöhe zur Folge hatte.

Der Prozess heisst Wasserstoffversprödung. Bestimmte Korrosionsprozesse in Anwesenheit von Wasser setzen an der Oberfläche von Stahlbauteilen atomaren Wasserstoff frei – das kleinste Element

des Periodensystems. Dank seiner geringen Grösse diffundiert der Wasserstoff in den Stahl, wo er durch verschiedene Mechanismen Rissbildung begünstigt.

Dass Wasserstoff Metalle angreift, ist bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt. Vollständig verstanden sind die komplexen Mechanismen hinter der Wasserstoffversprödung allerdings bis heute nicht – trotz zahlreicher Studien.



SCHUTZ-ATMOSPHERE
Chiara Menegus arbeitet in einer Glovebox, um Umwelteinflüsse auszuschliessen.

Foto: Empa

Empa-Forschende aus dem Labor für Füge-technologie und Korrosion untersuchen nun eine Seite der Wasserstoffversprödung, der bisher sehr wenig Aufmerksamkeit zuteil kam: die Interaktion des Wasserstoffs mit der sogenannten nativen Oxidschicht auf Stahl. Die native Oxidschicht, auch Passivierungsschicht genannt, ist eine dünne Schicht, die sich auf natürliche Weise an der Oberfläche der meisten Metalle und Legierungen bildet. Sie verleiht rostfreien Stählen ihre Korrosionsbeständigkeit. Die Art und die Zusammensetzung der nur wenige Nanometer dicken Schicht unterscheiden sich von Stahl zu Stahl. Gewisse Oxide sind deutlich stabiler und resistenter gegenüber Wasserstoff als andere. Sie schützen den Stahl besser vor Versprödung. Dies wollen die Empa-Forscherinnen Chiara Menegus und Claudia Cancellieri untersuchen. Ein besonderes Augenmerk legen sie dabei auf die Grenzfläche zwischen dem Metall und seiner Oxidschicht. «Wasserstoff sammelt sich im Material jeweils dort an, wo Unordnung herrscht», erklärt Doktorandin Menegus. «Die Grenzfläche zwischen dem Metall und dem Oxid ist eine solche Stelle.»

DIE GRENZE IM FOKUS

Die Forschung an Wasserstoff im Stahl ist herausfordernd. Das leichte Element lässt sich mit gängigen Analysemethoden gar nicht bestimmen. Auch müssen die Experimente unter Ausschluss aller weiteren Umweltfaktoren wie Sauerstoff und Feuchtigkeit stattfinden – ansonsten entstehen komplexe Interaktionen und Korrosionsprozesse, die den Wasserstoffeinfluss maskieren. Die letzte grosse Herausforderung ist die Grenzfläche selbst: «Es ist schwierig, eine verborgene Grenzfläche im Inneren des Materials zu untersuchen, ohne die Probe zu zerstören», weiss Claudia Cancellieri, Forschungsgruppenleiterin im Labor für Füge-technologie und Korrosion.

HAXPES

HAXPES steht für «Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy» – harte Röntgenphotoelektronenspektroskopie. Diese Analysemethode beruht auf dem photoelektrischen Effekt, für dessen Entdeckung Albert Einstein 1921 den Nobelpreis in Physik erhielt. Mit Röntgenstrahlung werden aus dem Material Elektronen «herausgeschlagen», die Rückschlüsse auf die chemische Beschaffenheit der Probe ermöglichen. Während herkömmliche Röntgenphotoelektronenspektroskopie auf

die Oberfläche des Materials beschränkt ist, dringt die «harte» Version – HAXPES – dank hochenergetischer Strahlung deutlich tiefer ins Material ein und erlaubt eine präzise Charakterisierung von mehrschichtigen Strukturen und inneren Grenzflächen. Anwendungen hat HAXPES in der Entwicklung von Mikroelektronik-Komponenten, Festkörperbatterien und funktionalen Dünnschichten sowie in Katalyse- und Korrosionsforschung. Die einzige Anlage in der Schweiz steht im Labor für Füge-technologie und Korrosion an der Empa.

Diese Herausforderungen meistern die Forscherinnen mit einem innovativen Versuchsaufbau. Im ersten Jahr ihres Doktorats hat Chiara Menegus eine elektrochemische Zelle entwickelt, in der die Stahlprobe befestigt wird. Auf einer Seite der Probe befindet sich Wasser, auf der anderen das inerte Edelgas Argon. Durch Anlegen von elektrischer Spannung wird aus dem Wasser atomarer Wasserstoff generiert. Er diffundiert durch die dünne Probe, bis es die Oxidschicht auf der gegenüberliegenden Seite erreicht und hier mit dem nativen Oxid interagiert. «So können wir die Interaktion von atomarem Wasserstoff mit dem nativen Oxid von anderen Umwelteinflüssen isolieren», erklärt Menegus. Sämtliche Schritte – vom Zusammenbau der Zelle bis zur Analyse der Probe – finden unter Schutzatmosphäre statt, in einer Glovebox.

SCHUTZSCHILD ODER SCHLEUSE?

Für die Charakterisierung der Proben greifen die Forscherinnen auf eine in der Schweiz einmalige Analysetechnik zurück: Die sogenannte harte Röntgenphotoelektronenspektroskopie (engl. «Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy», kurz HAXPES – s. Infobox). Diese Spektroskopiemethode nutzt hochenergetische Röntgenstrahlung, um die Art und den chemischen Zustand von Atomen in einem Material zu bestimmen, und zwar

nicht nur an der Oberfläche, sondern bis zu 20 Nanometer in der Tiefe – genug, um die rund fünf Nanometer dicke Oxidschicht sowie die darunterliegende Grenzfläche zum Stahl zu erfassen.

Zwar lässt sich der Wasserstoff selbst damit nicht direkt erfassen – seine Auswirkungen auf die gesamte Oxidschicht konnten die Forscherinnen jedoch bereits deutlich demonstrieren. «Die ersten Versuche zeigen, dass der Wasserstoff die schützende Oxidschicht abbaut», sagt Menegus. Nun will sie die Oxide auf unterschiedlichen Eisen-Chrom-Legierungen sowie auf einigen gängigen Stählen untersuchen. Danach werden die Forscherinnen zusammen mit dem «Ion Beam Physics Lab» der ETH Zürich den Wasserstoffgehalt in den Proben direkt bestimmen – in Echtzeit, mit einer aufwändigen Teilchenbeschleuniger-Methode. «Wir hoffen, dadurch den Effekt von Wasserstoff auf die nativen Oxidschichten besser zu verstehen und besonders resistente Oxidformen zu finden», resümieren Menegus und Cancellieri. Ihre Erkenntnisse könnten zum Bau von langlebigeren Brücken führen – sowie zu besserer Infrastruktur für die Lagerung und den Transport von grünem Wasserstoff.



LICHT AN – BAKTERIEN TOT

Krankmachende Keime weglichten: So einfach könnte das Desinfizieren von Oberflächen sein. Damit aus dieser Idee eine wirksame Waffe im Kampf gegen antibiotikaresistente Pathogene wird, entwickeln Empa-Forschende eine Beschichtung, deren keimtötende Wirkung mittels Infrarotlicht aktivierbar ist. Zudem ist die Kunststoffschicht hautverträglich und umweltfreundlich. Eine erste Anwendung wird derzeit für die Zahnmedizin umgesetzt.

Text: Andrea Six

Bakterien, die gegen Antibiotika resistent sind, und neu auftretende Viren sind eine stark zunehmende Bedrohung für das globale Gesundheitssystem. So stehen jährlich rund 5 Millionen Todesfälle mit antibiotikaresistenten Keimen in Verbindung, und mehr als 20 Millionen Menschen starben während der COVID-19-Viruspandemie. Darum arbeiten Empa-Forschende an neuen, dringend benötigten Strategien, um derartige Krankheitserreger zu bekämpfen. Eines der Ziele: die Ausbreitung von resistenten Erregern und neuartigen Viren mit smarten Materialien und Technologien verhindern.

Ein besonders geeigneter Einsatzort für solche Materialien sind hierbei Oberflächen, die ständig mit Infektionserregern in Kontakt kommen, wie Türklinken in Spitälern oder Einrichtungsgegenstände in Operationssälen. Ein interdisziplinäres Team aus drei Empa-Labors hat nun gemeinsam mit der tschechischen Palacký-Universität Olmütz eine umweltfreundliche und bioverträgliche Oberflächenbeschichtung aus Kunststoff entwickelt, die Keime zuverlässig abtötet. Der Clou: Die Wirkung lässt sich immer wieder aufs Neue durch die Bestrahlung mit Licht aktivieren.

HEISS UND RADIKAL

«Das neue Material ist so konzipiert, dass Mikroorganismen lokal und schnell abgetötet werden», erklärt Empa-Forscher Giacomo Reina vom «Nanomaterials in Health»-Labor in St. Gallen. Hierzu wurde ein Grundgerüst aus Polyvinylalkohol verwendet, einem bioverträglichen Kunststoff, der auch in der Lebensmittelindustrie eingesetzt wird. Eingebettet in diese Matrix ist eigens synthetisierte Graphensäure, die aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften bestens als antimikrobielle Beschichtung geeignet ist. Ihr volles Potenzial lässt sich dabei durch die Verwendung von Nahinfrarot-Licht ausschöpfen. Sobald das Kompositmaterial damit bestrahlt wird, entfaltet es seine Doppelstrategie: Zum einen absorbiert es die Energie des Infrarotlichts und wandelt sie in keimtötende Hitze um. Ausserdem wird die Bildung von Sauerstoffradikalen angeregt, die den Krankheitserreger zusätzlichen Schaden zufügen.

Ein weiterer Vorteil hierbei ist, dass diese Strategie sich komplett von den Wirkmechanismen herkömmlicher Antibiotika unterscheidet. Damit bietet das Material einen kontinuierlichen Schutz gegen ein breites Spektrum von Mikroorganismen, ohne zur Resistenzbildung beizutragen. «Unsere Laborexperimente konnten die Wirksamkeit des antimikrobiellen Materials gegen verschiedene Bakterien und Viren klar bestätigen», so der Empa-Forscher.



MIKROBENJÄGER

Die Empa-Forschenden Paula Bürgisser und Giacomo Reina vom «Nanomaterials in Health»-Labor in St. Gallen.

Foto: Empa

ZUKUNFTSFONDS

Der Zukunftsfonds der Empa sucht für herausragenden Forschungsprojekte und Talente, die anderweitig (noch) nicht unterstützt werden, private Spenden. Falls auch Sie einen Beitrag zu dem Projekt leisten möchten, finden Sie hier unser Spendenformular:





GEGEN GEFÄHRLICHE RESISTENZ

Die Graphensäure wird durch Infrarotlicht aktiviert und wirkt tödlich für resistente Keime wie *Porphyromonas gingivalis* (Mitte), ein Erreger der schweren Parodontitis.



ROTLICHT IN DER MUNDHÖHLE

Eine erste Anwendung für die antimikrobielle Beschichtung wird derzeit für die Zahnmedizin entwickelt. Hierzu arbeiten Empa-Forschende gemeinsam mit dem Zentrum für Zahnmedizin der Universität Zürich an einer Zahnschiene, die Mikroorganismen in der Mundhöhle abtötet.

Die Keimflora im Mund ist ein besonders unangenehmer Gegner im Kampf gegen Infektionserreger: Hier tummeln sich komplexe Gemeinschaften von Bakterien in unzugänglichen Nischen, eingebettet in eine selbst produzierte schleimige Matrix. Antibiotika und Desinfektionsmittel durchdringen diese widerstandsfähigen Biofilme kaum. So können die Keime ungehindert Zähne ruinieren oder sogar zu ausgedehnten Infektionen im Körper führen. Das interdisziplinäre Team um Giacomo Reina arbeitet daher an einer Kunststoffschiene, in die Nanomaterialien wie Graphensäure stabil integriert werden. Da Nahinfrarotlicht das Gewebe einige Zentimeter tief durchdringen kann, kann die Schiene in der Mundhöhle platziert und von aussen durch eine Lichtquelle aktiviert werden, und zwar immer wieder.

Das Projekt kann dank den grosszügigen Zuwendungen der Eduard Aeberhardt-Stiftung und einer weiteren Stiftung durchgeführt werden. Klinikdirektor Ronald Jung vom Zentrum für Zahnmedizin der Universität Zürich schätzt diesen interdisziplinären Ansatz von Materialwissenschaft und klinischer Forschung. «Derartige neue und innovative Lösungen werden einen grossen Mehrwert für Patientinnen und Patienten bieten», ist Jung überzeugt.



Fotos: Empa, Adobe Stock

Die Medizin von morgen möglich machen.



Machen Sie den Unterschied!
Unterstützen Sie den
Empa Zukunftsfonds «Medizin».
empa.ch/zukunftsfonds

 **Empa**
Zukunftsfonds

SCHALLWELLEN IN DIE IRRE FÜHREN

Empa-Forschende haben neuartige Schallabsorber aus mineralischen Schäumen entwickelt. Sie sind nicht nur deutlich dünner als herkömmliche Materialien, sondern lassen sich auch gezielt für unterschiedliche Frequenzbereiche designen. Erstmals wurden sie nun bei einer Hofeinfahrt in der Stadt Zürich getestet, um damit Strassenlärm im Innenhof zu dämpfen.

Text: Manuel Martin

Im Kampf gegen Lärm zählt auf dem Bau jeder Zentimeter. Klassische Schallabsorber bestehen jedoch meist aus voluminösen Materialien wie Steinwolle oder Melaminschaum. Um auch tiefe Schallfrequenzen wirksam zu dämpfen, sind dicke Dämmschichten notwendig – was Platz kostet, gestalterisch einschränkt und im Aussenbereich oft nicht umsetzbar ist. Gemeinsam mit der Firma de Cavis haben Empa-Forschende deshalb ultradünne Schallabsorber aus mineralischen Gips- oder Zementschäumen entwickelt. Diese sind genauso wirksam wie herkömmliche Absorber, aber rund viermal dünner. Weitere Vorteile: Die Schäume lassen sich gezielt auf bestimmte Frequenzbereiche abstimmen sowie einfach zuschneiden und montieren. Hergestellt aus Gips oder Zement, können sie feuerfest und recycelbar sein, und setzen keine gesundheitsschädlichen Partikel frei. Zementschäume sind zudem wetterfest und damit auch für den Aussenbereich geeignet.

Die hohe Schallabsorption trotz geringer Materialdicke beruht laut Empa-Forscher Bart Van Damme auf einer patentierten Konstruktion: «Die variierende Porenstruktur der mineralischen Schäume zwingt die Luftpartikel auf einen längeren Weg, um ins Material und wieder hinauszugelangen. Trotz geringer Dicke entsteht so für die Schallwellen der Eindruck eines viel dickeren Absorbers.» Entscheidend dafür sind möglichst grosse Poren mit möglichst dünnen Poren-

LABYRINTH FÜR SCHALLWELLEN

wänden. Für die neuartigen Schallabsorber verwenden die Forschenden der Empa-Abteilung Akustik/Lärminderung mehrere poröse Schichten. Dabei variieren sie nicht nur die Dicke der einzelnen Schichten und die Grösse der Poren, sondern versehen sie zusätzlich noch mit kleinsten Löchern. Während sich die Schäume aus Gips oder Zement mit etablierten Verfahren und über 90 Prozent Porenanteil herstellen lassen, erfolgt die Perforierung derzeit noch von Hand. Mit Hilfe eines numerischen Modells bildeten die Forschenden zudem nach, wie auf kleinster Ebene die Luft durch die Poren der Mineralschäume strömt. «So lässt sich das akustische Verhalten des gesamten Materials simulieren – und durch Variation von Porengrösse, Perforation und Schichtaufbau gezielt beeinflussen», sagt Van Damme.

neralschaum mit einer Gesamtdicke von rund 5,5 Zentimetern als Dämmmaterial ausreichen. Ein erster Prototyp mit insgesamt zwölf Quadratmetern Fläche wurde bereits in einer Hofeinfahrt zusammen mit der Stadt Zürich getestet. In der vorgängigen Simulation der Einfahrt optimierten die Forschenden die Anordnung der einzelnen Paneele an den Wänden. Kontrollierte Messungen vor Ort bestätigten die Prognosen: Der Lärmpegel sank dank den 72 Paneelen um bis zu 4 Dezibel. Besonders deutlich war die Wirkung bei vorbeifahrenden Autos, die sich der Einfahrt näherten oder von ihr entfernten, da der Schall auf dem Weg in den Innenhof mehrfach an den Paneelen reflektiert wird. Im Vergleich mit herkömmlicher Steinwolle zeigte sich: Die neuen Absorber sind bei tiefen Frequenzen zuverlässiger, bei höheren dagegen etwas weniger effizient – reduzieren aber dennoch die Schallübertragung im Bereich der Spitzenabsorption. «Bereits eine so kompakte Installation wie in der Einfahrt senkt also den Lärm deutlich hörbar», so das Fazit von Van Damme.

MASSGEFERTIGT STATT MASSIG

Verkehrslärm bewegt sich typischerweise im Bereich zwischen 500 und 1000 Hertz. Modellberechnungen zeigen, dass für diesen Frequenzbereich vier abgestimmte Schichten aus feinporigem Mi-

Die Idee für den Absorber entstand laut Bart Van Damme bereits vor einigen Jahren. Der Durchbruch gelang jedoch erst durch die Kombination von Materialentwicklung und akustischer Modellierung im Rahmen eines Inno-suisse-Projekts. Dank der Modellierung lässt sich der Absorber nun flexibel massanfertigen: Soll er besonders tiefe Töne dämpfen wie etwa in grossen Sälen? Oder eher im Mitteltonbereich wirken wie zum Beispiel in Büros und Klassenzimmern oder bei Verkehrslärm?

PRÄDESTINIERT FÜR SPEZIALANWENDUNGEN

Die mineralischen Schallabsorber könnten künftig also bei lärmbelasteten Strassen in Einfahrten, unter Balkonen oder an Fassaden nachträglich montiert werden. Voraussetzung ist wie bei allen offenporigen Absorbieren ein Schutz vor Witterung und Verschmutzung, etwa durch eine perforierte Deckschicht. «Idealerweise werden die Absorber bei Neubauten bereits im architektonischen Entwurf berücksichtigt», erläutert Van Damme. Darüber hinaus lassen sich die Elemente gut in Treppenhäusern oder grossen Innenräumen wie Büros, Kantinen oder Sporthallen integrieren – auch aus gestalterischer Sicht, da der poröse Mineralschaum aus demselben Material wie die Wandoberflächen besteht.

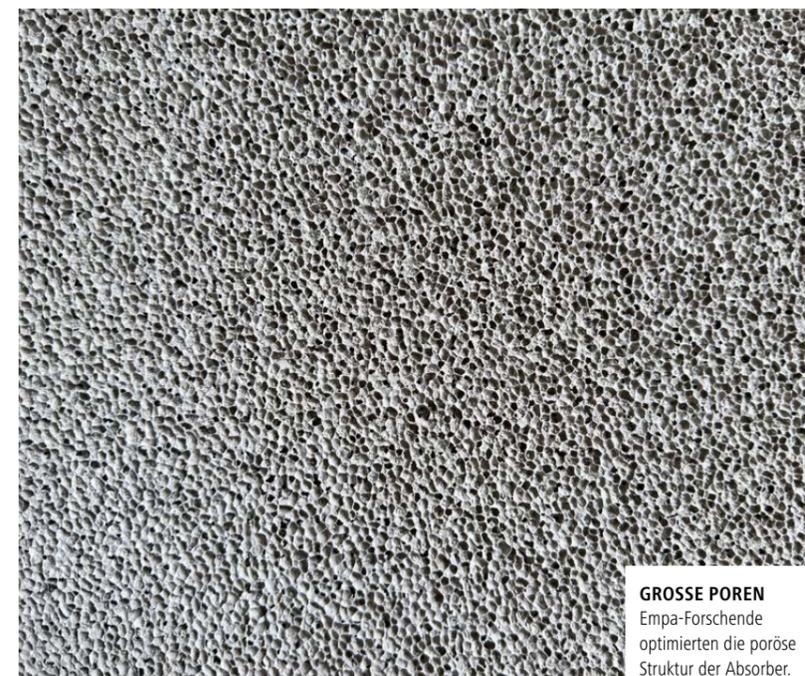
Aktuell ist die Fertigung noch aufwendig und erfolgt zum Teil von Hand. Gemeinsam mit einem geeigneten Industriepartner soll das Material nun weiterentwickelt und in grösserem Massstab produziert werden. Denn das Potenzial ist da – vor allem für Spezialanwendungen, bei denen begrenzter Platzbedarf, Brandschutz und Designanspruch gleichzeitig berücksichtigt werden müssen.



AUSSENEINSATZ
Die Schallabsorber wurden in einer Hofeinfahrt in Zürich getestet.

Foto: Empa

Foto: Empa



GROSSE POREN
Empa-Forschende optimierten die poröse Struktur der Absorber.



NICHT NICHTS!

Holzbau ist eine nachhaltige Alternative zu Beton. Bei der statischen Berechnung von Bauten in Holzrahmenbauweise gibt es jedoch eine Lücke: Wände mit Fensteröffnungen werden für die horizontale Aussteifung nicht berücksichtigt, weil Daten zu ihrem Tragverhalten fehlen. Ein Projekt der Empa, der Berner Fachhochschule und der ETH Zürich, in Zusammenarbeit mit dem BAFU und der Industrie, will das ändern – mit mathematischen Modellen und gross angelegten Versuchen.

Text: Anna Ettl

Das Holz knarrt und ächzt, während die Zahl auf dem Bildschirm immer weiter ansteigt. Bei über 100 Kilonewton Horizontallast ertönt ein lauter Knall: Einer der Balken in der zweigeschossigen Hauswand ist unter dem enormen Druck gespalten. Empa-Forscherin Nadja Manser ist zufrieden: Der Versuch war erfolgreich. Über die nächsten Tage wird die hölzerne Hauswand in der Bauhalle der Empa abgebaut und mit einer neuen Wand ersetzt, die ihrerseits bis zum Versagen belastet wird, überwacht von zahlreichen Kameras und Sensoren.

Die spektakulären Versuche bilden die Abschlussphase eines vierjährigen Forschungsprojekts der Empa, der Berner Fachhochschule und der ETH Zürich, unterstützt vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) im Rahmen des «Aktionsplans Holz» sowie von mehreren Industriepartnern und Verbänden. Das Ziel: mehr Effizienz im Holzrahmenbau dank verbesserten statischen Berechnungen. «Wir untersuchen die horizontale Aussteifung von Gebäuden mit Holzrahmenbauwänden, die Fensteröffnungen enthalten», präzisiert Manser.

AUSSTEIFEND UND TRAGSICHER GEGEN WIND UND ERDBEBEN

Gebäude müssen nämlich nicht nur den vertikal wirkenden Lasten standhalten, wie Schnee und Eigengewicht, sondern auch solchen, die von der Seite auf sie einwirken, etwa durch den Wind an der Fassade oder durch Erdbeben. Diese horizontalen Lasten müssen Bauinge-



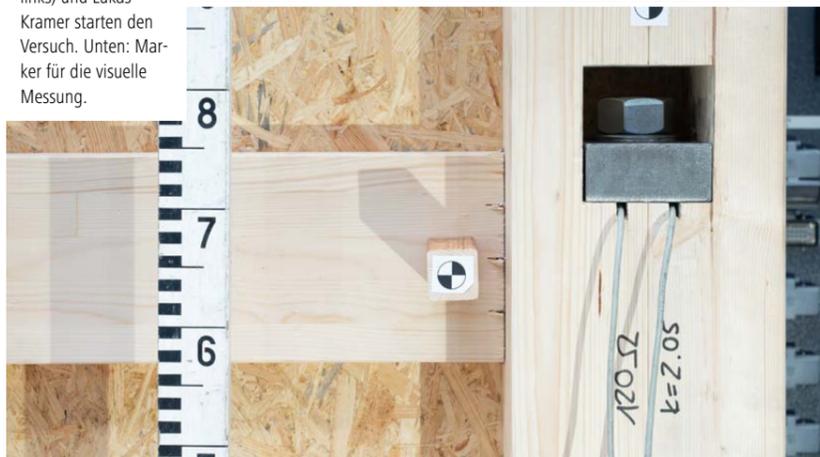
Foto: Empa

IM GROSSEN RAHMEN
Eine zweigeschossige Hauswand mit Fensteröffnungen wird kontrolliert unter Druck gesetzt.



MESSUNG IM GANGE

Nadja Manser (oben links) und Lukas Kramer starten den Versuch. Unten: Marker für die visuelle Messung.



nieure im Planungsprozess berechnen, um ausreichend steife und tragsichere Bauten zu entwerfen. Beim Holzrahmenbau gibt es hier allerdings eine entscheidende Wissenslücke: «Weder in der Schweiz noch in anderen europäischen Ländern gibt es heute eine Regelung dazu, wieviel Horizontallast

eine Holzrahmenwand trägt, wenn sie eine Fensteröffnung enthält», so Nadja Manser. «Sobald ein Fenster in der Fassade eingeplant ist, muss das ganze Wandsegment vom planenden Ingenieur so behandelt werden, als sei dort nur Luft. Das ist nicht effizient.»

Also haben sich Manser, ihr Team und ihre Projektpartner 2021 zum Ziel gesetzt, die Wissenslücke zu schliessen und die Voraussetzungen dafür zu schaffen, auch Wände mit Fensteröffnungen bei der Gebäudeaussteifung zu berücksichtigen. Die Versuche begannen im kleinen Rahmen an der Berner Fachhochschule in Biel, zunächst mit einzelnen Beplanungsplatten, wie sie im Holzrahmenbau verwendet werden, danach mit kleinen Wandelementen und schliesslich mit eingeschossigen Wänden mit verschieden grossen Fensteröffnungen.

BETEILIGTE PARTNER

- Berner Fachhochschule – Architektur, Holz und Bau
- Empa, Labor für Ingenieur-Strukturen
- ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) – Aktionsplan Holz
- Swiss Timber Engineers
- Holzbau Schweiz
- Ancotech AG

ZEIT UND MATERIAL SPAREN

Die abschliessenden Grossversuche führten die Forschenden in der Bauhalle der Empa durch: zuerst mit zweigeschossigen Holzwänden, danach mit langen eingeschossigen Wänden, mit jeweils zwei Fensteröffnungen nebeneinander. Die Erkenntnisse daraus fliessen in ein neues Computermodell, mit dem die horizontale Aussteifung der Wände mit Fensteröffnungen berechnet werden kann. Die Arbeiten am Modell sind noch nicht abgeschlossen, die ersten Ergebnisse sind jedoch vielversprechend: Der Beitrag der Wände mit Fensteröffnungen an die Gebäudeaussteifung ist gross genug, dass in Zukunft weniger teure und arbeitsintensive Stahlverankerungen benötigt werden. «Bei gewissen Gebäuden kann womöglich auf einen Betonkern verzichtet werden, der heute bei vielen Holzbauten notwendig ist, um die gewünschten Steifigkeitswerte zu erreichen», sagt Nadja Manser. Dies spart Zeit und Material und ermöglicht wirtschaftlichere und nachhaltigere Holzbauten. Bevor das neue Berechnungsmodell in der Industrie zum Einsatz kommen kann, wird es noch vereinfacht. «Momentan haben wir ein komplexes Forschungsmodell mit vielen Parametern. Das Ziel ist, daraus ein vereinfachtes Praxismodell abzuleiten, das weniger rechenintensiv ist, aber trotzdem ausreichend genaue Werte liefert», erklärt Manser. Dafür arbeiten die Forschenden eng mit ihren Industriepartnern zusammen – wie schon während des gesamten Projekts. «Es war nicht immer einfach, die unterschiedlichen Ansprüche seitens der Industrie und der Forschung unter einen Hut zu bringen. Aber dafür können die Resultate unserer Arbeit rasch zur Anwendung kommen», so die Forscherin und Bauingenieurin. ■



Fotos: Empa

Foto: Empa

DRUCKERTINTE FÜR SUPERKRÄFTE

Superkondensatoren sind schnelle, leistungsfähige Energiespeicher. Sie ergänzen die relativ langsam ladenden und entladenden Batterien in zahlreichen Einsatzgebieten, von Elektroautos über Industriemaschinen bis hin zu Windrädern. Ein Empa-Team will bessere Superkondensatoren auf der Basis von druckbarer Graphentinte entwickeln – und sie gleich fit machen für die kommerzielle Herstellung im Grossmassstab.

Text: Anna Ettlín



SUPERMATERIAL

Die an der Empa entwickelte Tinte enthält hochwertiges Graphen – und ist trotzdem günstig herzustellen.

Superkondensatoren oder Supercaps (vom englischen «Supercapacitors») sind die flinken kleinen Geschwister von Batterien. Beide Technologien speichern elektrische Energie. Batterien haben eine grosse Energie-, aber eine geringe Leistungsdichte. Will heissen: Sie können viel Energie speichern, aber das Laden und Entladen ist eher langsam. Supercaps sind ziemlich genau das Gegenteil: Sie nehmen Energie blitzschnell auf und geben sie wieder ab, speichern können sie aber nur wenig davon.

«Batterien sind wie ein grosses Gefäss mit einem schmalen Hals, das sich nur langsam füllen lässt. Superkondensatoren sind eher kleine Tassen mit einer weiten Öffnung – sie füllen sich schnell, haben aber wenig Volumen», erläutert Empa-Forscher Sina Azad. Die beiden Technologien sind häufig als Team im Einsatz: Bei einem Elektroauto fangen Superkondensatoren die Bremsenergie schnell auf und geben sie später an die langsameren Batte-

rien zur Speicherung weiter. Auch in Solarfarmen und Windkraftanlagen sowie in Industriemaschinen, die zuweilen schnell viel Strom brauchen, finden sich Superkondensatoren.

Azad, Postdoktorand im Empa-Labor «Functional Polymers», und sein Team haben sich zum Ziel gesetzt, diese allgegenwärtigen «Schnellspeicher» zu verbessern, indem sie neuartige Elektroden aus Graphen entwickeln. Dank dieser zweidimensionalen Form des Kohlenstoffs sollen die Superkondensatoren wesentlich höhere Energiedichten erreichen.

«Rekordverdächtige Energiedichten für Superkondensatoren wurden in der wissenschaftlichen Literatur schon mehrfach beschrieben», räumt Azad ein. Bei seinem Forschungsvorhaben liegt das Augenmerk deshalb auch nicht auf Rekorden, sondern auf der Skalierbarkeit. Die Forschenden setzen von Beginn an auf Materialien und Prozesse, die sich nicht nur im Labor, sondern auch im

industriellen Massstab umsetzen lassen. Ihr Projekt wird deshalb im Rahmen von «Bridge» unterstützt, ein gemeinsames Förderprogramm des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und der Innosuisse.

DIE OBERFLÄCHE ZÄHLT

Ähnlich wie eine Batterie besteht ein Superkondensator aus zwei Elektroden, die von einem flüssigen Elektrolyten umgeben sind. Beim Laden und Entladen transportiert der Elektrolyt die Ionen – die Ladungsträger – von einer Elektrode zur anderen. Anders als bei der Batterie finden dabei jedoch keine chemischen Reaktionen statt. «Superkondensatoren speichern die Energie elektrostatisch, indem sie so viele geladene Teilchen wie möglich auf der Elektrode ablagern», erklärt Jakob Heier, Leiter der Forschungsgruppe «Functional Thin Film Solution Processing» im Labor für Funktionspolymere, zu der auch Sina Azad gehört.

Heisst also: Je grösser die Oberfläche der Elektrode, desto mehr Ionen können daran «andocken» – und desto höher

ist entsprechend die Energiedichte des Superkondensators. «Heute wird meist das hochporöse Material Aktivkohle als Elektrodenmaterial verwendet», weiss Empa-Forscher Vahid Charkesht. Allerdings hat Aktivkohle im Gegensatz zu Graphen nur eine sehr geringe elektrische Leitfähigkeit, was die Speicherkapazität der Elektrode senkt.

Ein weiterer Nachteil entsteht bei der Verarbeitung des Materials. Die Elektroden werden in der Industrie in einem sogenannten Rolle-zu-Rolle-Verfahren auf flexible Folien aufgedruckt, geschnitten und zu fertigen Superkondensatoren zusammengerollt. Um die pulverförmige Aktivkohle auf ein Trägermaterial drucken zu können, wird sie mit Bindemitteln und weiteren Zusatzstoffen versehen, die ihre Porosität beeinträchtigen.

VON DER TINTE ZUM FERTIGEN PRODUKT

Graphen zu drucken ist allerdings auch nicht selbstverständlich. Reines Graphen für industrielle Anwendungen wird meist aus Graphit gewonnen. Herkömmliche

Methoden liefern meist nur eine sehr geringe Ausbeute an reinem Graphen, das zudem noch aufwändig von Abfallprodukten getrennt werden muss. Hier haben die Empa-Forschenden aufgrund eines vorangehenden Forschungsprojekts jedoch ein Ass im Ärmel: Sie haben ein Verfahren entwickelt, mit dem sich hochwertiges Graphen kostengünstig und effizient aus Graphit «abschälen» und zu einer gelförmigen druckbaren Tinte verarbeiten lässt.

Diese Graphen-Tinte bietet einen entscheidenden Vorteil bei der Herstellung der Supercap-Elektroden: Durch eine geschickte Mischung zweier unterschiedlicher Graphen-Arten können die Forschenden die Grösse der Poren zwischen den Graphen-Schichten gezielt beeinflussen. «Wenn wir die Porengrösse der Elektrode auf die Grösse der Ionen im Elektrolyten abstimmen, steigt die Energiedichte des Superkondensators sprunghaft an», erklärt Azad. Bei Aktivkohle ist keine derartige Kontrolle möglich.

Mit der hohen Leitfähigkeit, der präzisen Porengrösse, der grossen Oberfläche und der Skalierbarkeit dürften die neuartigen Elektroden ein High-Tech-Produkt werden. «Am Ende des Projekts wollen wir unsere Technologie auf den Markt bringen, entweder mit Industriepartnern oder über ein eigenes Spin-off», sagt Jakob Heier.

Bis dahin – das Projekt läuft noch bis 2028 – gibt es jedoch noch viel zu tun. Die Forschenden wollen nämlich nicht nur die Technologie für die Elektroden entwickeln, sondern diese auch gleich herstellen und in funktionierende Prototypen von Superkondensatoren einbauen. Es gilt, die richtigen Prozessschritte zu definieren, einen passenden Elektrolyten zu finden, und die fertigen Superkondensatoren dann auch genau zu charakterisieren. «Wir wollen ein echtes, zuverlässiges Produkt entwickeln», resümiert Azad. ■



TEAMWORK

Von links: Sina Azad, Vahid Charkesht und Jakob Heier mit einer Elektrode aus Graphen.

Foto: Empa

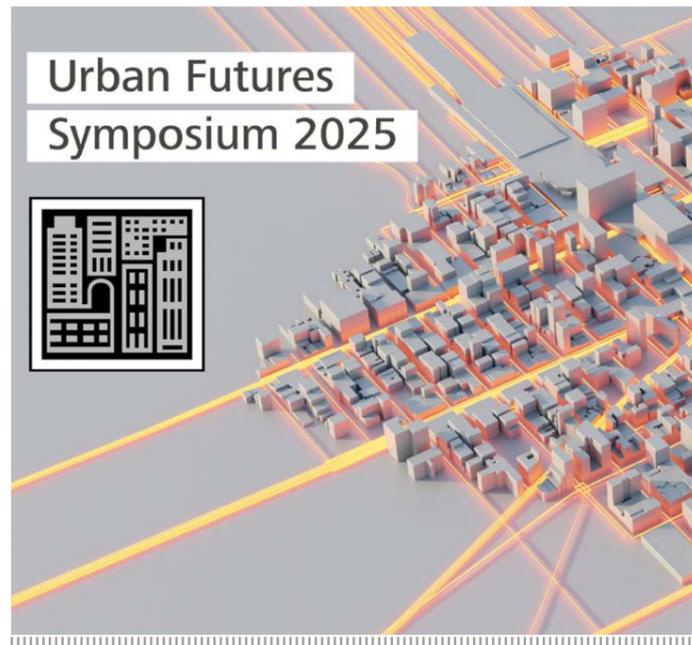


KNOPFZELLE

Ähnlich wie Batterien können auch Superkondensatoren die Form von Knopfzellen annehmen.

Foto: Empa

10 JAHRE INNOVATION IN URBANEN ENERGIESYSTEMEN



Am «Urban Futures Symposium» kommen Forschende, Industrievertreterinnen und politische Entscheidungsträger zusammen, um die Zukunft der urbanen Landschaften zu prägen. Der Anlass markiert das zehnjährige Jubiläum des «Urban Energy Systems Laboratory» der Empa und stellt interdisziplinäre Zusammenarbeit und den Wissensaustausch ins Zentrum. Das Symposium findet am 1. und 2. September an der Empa in Dübendorf statt.



ADDITIVE FERTIGUNG VON METALLEN UND LEGIERUNGEN

Vom 3. bis 5. September 2025 veranstalten die Empa und die EPFL gemeinsam das «Alloys for Additive Manufacturing Symposium 2025» (AAMS 2025) auf dem Campus der EPFL in Neuchâtel. Am Symposium, das sich an Fachleute aus Forschung und Industrie richtet, dreht sich alles um die additive Fertigung von Metallen und Verbundwerkstoffen mit metallischen Phasen, sei es von der experimentellen, der theoretischen oder der rechnerischen Seite. Ein besonderer Fokus wird auf die Optimierung bestehender und das Design neuer Legierungen für die additive Fertigung gelegt. Anmeldung und weitere Informationen zum Programm:



DEN BATTERIEKREISLAUF SCHLIESSEN



Am 13. und 14. November findet in Bern die «CircuBAT2025» statt. Die internationale Konferenz zum Thema «Kreislaufwirtschaft für Lithium-Ionen-Batterien» ist aus dem gleichnamigen «Flagship»-Projekt der Innosuisse entstanden, in dem elf Schweizer Forschungsinstitutionen, darunter die Empa, sowie 24 Industriepartner gemeinsam Innovationen für nachhaltigere Lithium-Ionen-Akkus entwickelt haben. An der Konferenz präsentieren die Projektteilnehmenden die Resultate aus den sieben Teilprojekten und zeigen die neuesten technologischen Fortschritte und wissenschaftlichen Entwicklungen in der Branche.



VERANSTALTUNGEN

25. – 27. AUGUST 2025
 Swiss Remote Sensing Days 2025
 Zielpublikum: Wissenschaft
www.empa.ch/web/swiss-remote-sensing
 Empa, Dübendorf

03. – 05. SEPTEMBER 2025
 Alloys for Additive Manufacturing Symposium
 Zielpublikum: Industrie und Wirtschaft
alloysforum.org
 EPFL, Neuchâtel

25. SEPTEMBER 2025
 Tage der Technik 2025: Future Health
 Zielpublikum: Industrie und Wirtschaft
www.tage-der-technik.ch
 Empa, Dübendorf

28. OKTOBER 2025
 Course: Laser Micromachining
 Target group: Engineer level required
www.empa-akademie.ch/laser
 Empa, Dübendorf

17. NOVEMBER 2025
 Course: Energy-autonomous embedded systems and the Internet-of-Things
 Target group: Development engineers, product managers, R&D managers
www.empa-akademie.ch/energy
 Empa, Dübendorf

Die aktuellen Veranstaltungen finden Sie hier:



THE PLACE WHERE INNOVATION STARTS.

