

# Empa Quarterly

FORSCHUNG & INNOVATION II #81 II OKTOBER 2023

FOKUS: BATTERIEFORSCHUNG

## SAUBER, SICHER, SMART

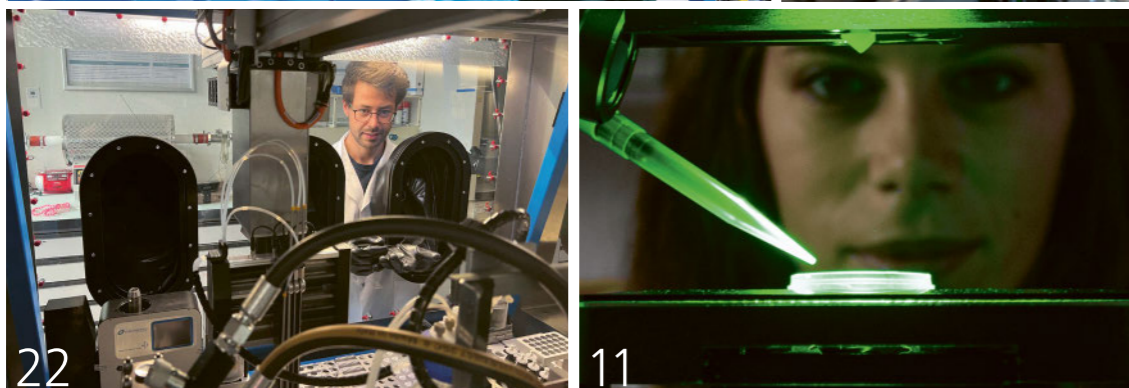


KÜNSTLICHE INTELLIGENZ  
SIMULIERTER BAHNLÄRM  
«MINING THE ATMOSPHERE»



# [ INHALT ]

[ FOKUS: BATTERIEFORSCHUNG ]



Fotos: MX3D and Joris Laarman Lab, Kyburz Switzerland AG, Marion Nitsch, Empa (2)

[ FOKUS ]

**14** PORTRAIT

Dünne Schichten, hohe Ziele

**18** MATERIALIEN

Was steckt in der Batterie der Zukunft?

**20** FLOW-BATTERIEN

Ich bin auch eine Batterie

**22** ROBOTER

Ein Sprungbrett für die Batterieforschung

**24** ANALYSE

Fahndung nach Schwermetallen

**26** RECYCLING

Noch lange nicht das Ende

[ THEMEN ]

**08** KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Vom Hilfsmittel zum Partner auf Augenhöhe?

**11** MIKROSKOPIE

Stachelige Erkenntnis

**12** MEDIZIN-TECHNOLOGIE

Ein Navi für die Knie-OP

**30** SIMULATION

So kommt Bahnärm nicht zum Zug

**32** «MINING THE ATMOSPHERE»

Aus der Luft gewonnen

[ RUBRIKEN ]

**04** WISSEN IM BILD

**06** IN KÜRZE

**28** ZUKUNFTSFONDS

Weitsicht bewiesen

**34** UNTERWEGS

[ TITELBILD ]



Gute Batterien sind unabdingbar für die Energiewende und somit für eine nachhaltigere Welt. Empa-Forschende entwickeln Akkus und Batterien für unterschiedliche Anwendungen, von Elektromobilität bis hin zu stationären Energiespeichern. Und auch das Recycling der ausgedienten Akkus darf nicht zu kurz kommen. Bild: Adobe Stock

[ 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



ISSN 2297-7406

Empa Quarterly (deutsche Ausg.)

## DIE ZEIT IST REIF FÜR GROSSE WÜRFE

Liebe Leserin, lieber Leser,



Keine Frage, Lösungen für Energiewende und Klimakrise sind Mammutaufgaben, deren Bewältigung vor allem eine Geisteshaltung benötigt: «Think big!» Will heissen: in grossen Zusammenhängen denken und alle Player involvieren, die zur Lösungsfindung beitragen können. Genau das haben wir uns an der Empa vorgenommen, etwa in der Batterieforschung, dem Fokus der aktuellen Ausgabe (ab S. 14). Ob mit unseren Schwesterinstitutionen im ETH-Bereich, mit Industriepartnern oder in gesamteuropäischen Forschungskonsortien – interdisziplinäre Zusammenarbeit steht bei uns stets im Zentrum unserer Forschungsaktivitäten.

Energie speichern zu können – in welcher Form auch immer –, ist nämlich ein zentraler Pfeiler eines nachhaltigen Energiesystems, stehen doch Sonnen- und Windenergie nicht immer dann ausreichend zur Verfügung, wenn man sie gerade benötigt. Daher spielen Batteriespeicher eine ganz wesentliche Rolle auf dem Weg zu Netto Null.

Doch das ist nur die halbe Miete. Denn wir haben über die letzten 200 Jahre die Erdatmosphäre mit CO<sub>2</sub> aus fossilen Quellen regelrecht zugemüllt. Und wer Dreck macht, der sollte ihn auch wieder wegräumen – und vielleicht erst noch was Schlaues damit anstellen. Das ist – kurz gesagt – die Idee, die hinter unserer gross angelegten neuen Forschungsinitiative «Mining the Atmosphere» steckt. Einen Vorgeschmack bekommen Sie auf S. 32 – in der nächsten Ausgabe stellen wir Ihnen das Grossprojekt dann detailliert vor. Wenn das kein Cliffhanger ist ...

Viel Spass beim Lesen.

Ihr MICHAEL HAGMANN



#### SCHÖNE UNVOLLKOMMENHEIT

Kristalldefekte können die Eigenschaften von funktionalen Materialien wie «Ferroelektrika» drastisch verändern. Diese Stoffe weisen eine Polarität auf – vergleichbar mit Magneten mit einem Nord- und einem Südpol, die jedoch nicht durch das Anlegen eines magnetischen, sondern eines elektrischen Feldes umgekehrt werden können. Diese Eigenschaft macht Ferroelektrika für den Einsatz in Datenspeichern geeignet, zum Beispiel in Computern. Um sie für technologische Anwendungen zu optimieren, ist jedoch ein gründliches Verständnis und eine genaue Kontrolle möglicher Defekte erforderlich. Forscher des Zentrums für Elektronenmikroskopie an der Empa verwenden modernste Bildanalysemethoden auf der Grundlage der Rastertransmissionselektronenmikroskopie, um solche «Fehlstellen» in Kristallen auf atomarer Ebene zu untersuchen. In diesem Bild mit atomarer Auflösung zeigt ein ultradünner ferroelektrischer Film (Schicht aus gelblichen Punkten) eine auffällige Anordnung von Teilchen am oberen Rand. Diese Atom-«Säulen», die in Paaren übereinander angeordnet sind, können die ferroelektrische Eigenschaft des Dünnsfilms negativ beeinflussen.

Mehr Information zum Thema finden Sie unter:  
[www.empa.ch/web/s299](http://www.empa.ch/web/s299)

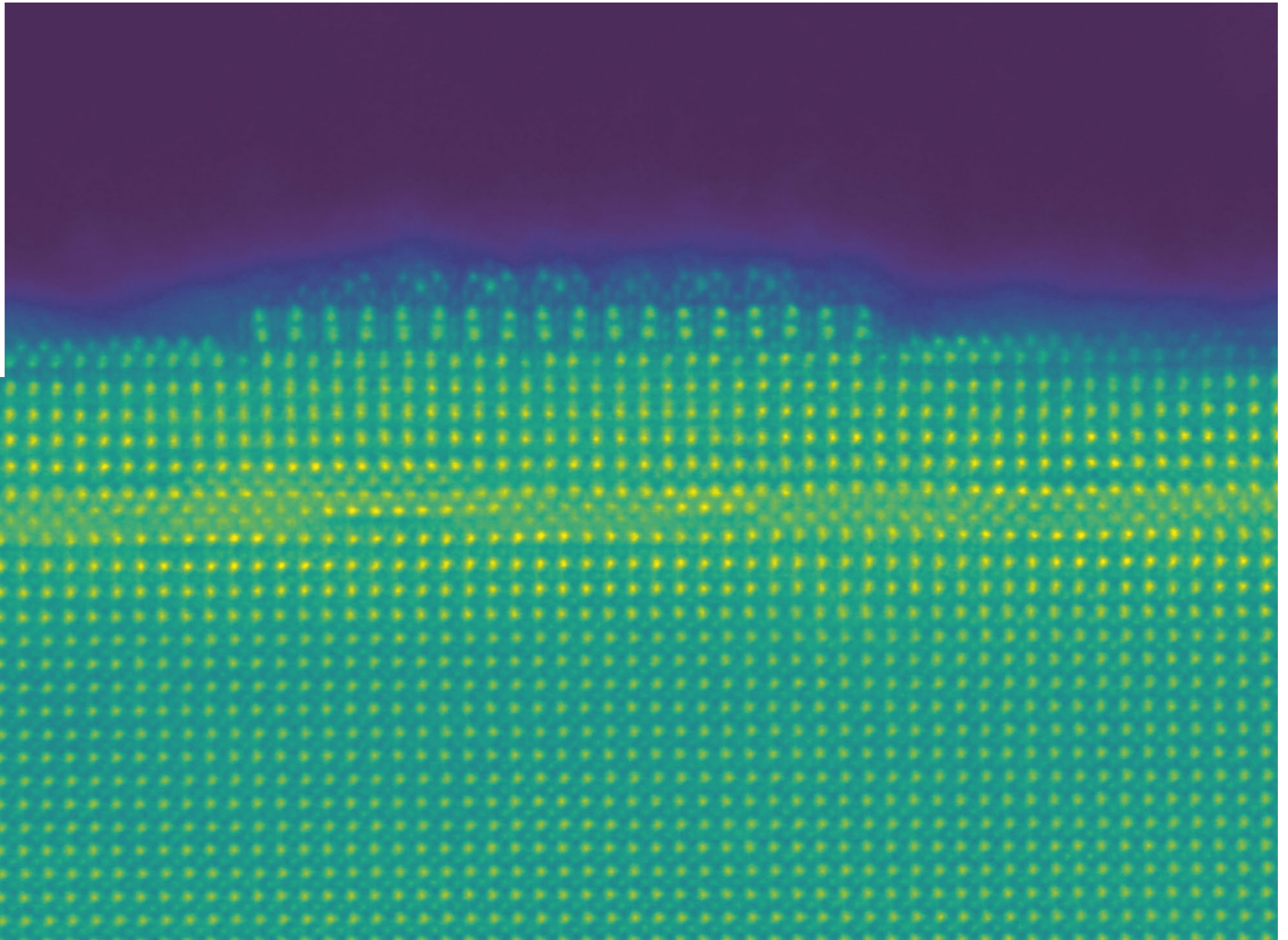


Foto: Empa



## «BRIGHT MINDS»: DEN BATTERIEMARKT REVOLUTIONIEREN



### VIDEOSERIE

In der aktuellen Episode von «Bright Minds» beleuchtet Empa-Forscher und Spin-off-Co-Gründer Abdessalem Aribia Herausforderungen und Höhenflüge.

Sicherere und langlebigere Lithium-Ionen-Akkus, die sich zudem wesentlich umweltfreundlicher herstellen lassen, sollen bald den Batteriemarkt revolutionieren. Solche bahnbrechenden Lösungen für die drängenden gesellschaftlichen Herausforderungen zu entwickeln, ist nicht einfach. Empa-Forschende stellen sich dieser Aufgabe – und dies äusserst erfolgreich. Die neue Videoserie «Bright Minds: Starke Ideen. Smarte Materialien» gibt Einblicke in die persönliche Reise unserer Forschenden – von der Entdeckung bis hin zur Umsetzung in praktische Anwendungen. In der aktuellen Episode beleuchtet Empa-Forscher und Spin-off-Co-Gründer Abdessalem Aribia die Herausforderungen und Höhenflüge bei der Entwicklung dieser vielversprechenden Batterietechnologie.

[www.empa.ch/bright-minds](http://www.empa.ch/bright-minds)

## LICHTSIGNAL FÜR BESSERE LUFT



### FENSTER AUF

Wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration steigt, wechselt das «Wuerfeli» seine Farbe auf orange und rot.

Das «Wuerfeli» macht Luftqualität sichtbar. Der kleine Sensor misst die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft und zeigt durch seine Farbe an, wann es Zeit zum Lüften ist. Ausserdem misst die kleine Pyramide Parameter wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck. Entwickelt wurde der Sensor mit Beteiligung der Empa im Rahmen einer gross angelegten Studie zur Luftqualität in Schulzimmern. Das Resultat ist ein effektives und geprüftes Luftmessgerät, hergestellt in der Schweiz. Das im Technopark Graubünden ansässige Start-up QE GmbH produziert das «Wuerfeli», das inzwischen online erhältlich ist.

[www.wuerfeli.ch](http://www.wuerfeli.ch)

Fotos: Empa, Wuerfeli

Bilder: BASF, zvg

## AUS VISION WIRD INNOVATION



### PODCAST

Empa-Direktorin Tanja Zimmermann im Gespräch mit Matthias Halusa, Landesleiter der BASF in der Schweiz.

Im BASF-Podcast «Schweizer Macher» spricht Empa-Direktorin Tanja Zimmermann über ihre Vision für die Empa als «Leuchtturm für neue Materialien und Technologien» und über zündende Ideen für eine nachhaltige Zukunft. Ausserdem verrät sie, wie Innovation an der Empa gelebt wird, wie Diversität dazu beiträgt und was wir aus «Science Fiction» lernen können. Das Gespräch ist auf Spotify, Apple Podcasts und im Web zu hören.

[in.basf.com/lwusxmk](https://in.basf.com/lwusxmk)

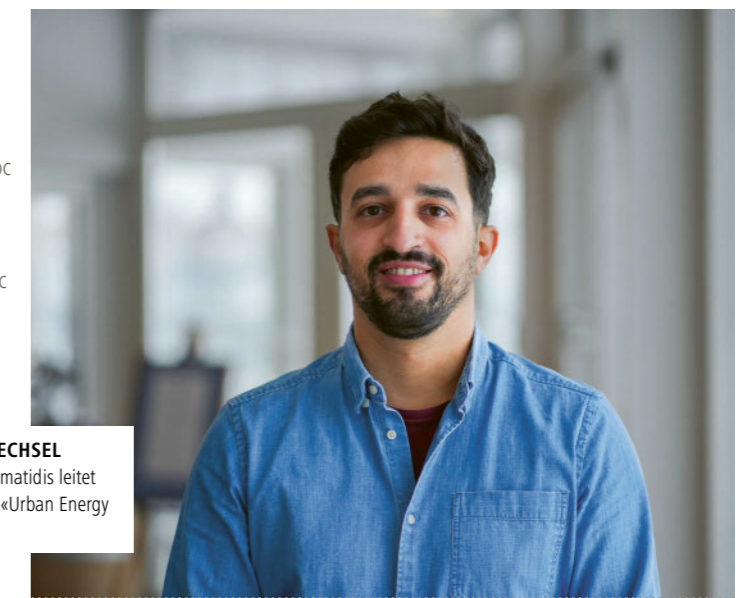
## NEUER LEITER DES «URBAN ENERGY SYSTEMS»-LABORS

Ab Oktober wird Georgios Mavromatidis die Leitung des Empa-Labors «Urban Energy Systems» antreten. Er übernimmt die Nachfolge von Kristina Orehounig, die als Professorin für Bauphysik und Bauökologie an die Technische Universität Wien berufen wurde. Mavromatidis, der derzeit «Senior Researcher» an der ETH Zürich ist, war bereits als Postdoc am «Urban Energy Systems»-Labor, wo sich seine Forschung um Multi-Energie-Systeme und Energieeffizienz in Gebäuden drehte. Er hat einen Dokortitel in Energiesystemmodellierung von der ETH Zürich, einen MSc in «Sustainable Energy Futures» vom «Imperial College London» und ein Diplom in Maschinenbau von der Aristoteles-Universität Thessaloniki.

[www.empa.ch/web/s313](http://www.empa.ch/web/s313)

### FÜHRUNGSWECHSEL

Georgios Mavromatidis leitet ab Oktober das «Urban Energy Systems Lab».







«KOLLEGE ROBOTER»  
Die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine muss richtig platziert sein.

# KI: VOM HILFSMITTEL ZUM PARTNER AUF AUGENHÖHE?

Foto: Adobe Stock

Künstliche Intelligenz – KI – ist nicht bloss in allen Medien, sondern hält auch Einzug in unsere Arbeitswelten, von der Industrie bis hin zur Forschung. Doch wie können wir das Synergiepotenzial von Mensch und Maschine am besten nutzen und was gilt es zu bedenken? Einige Gedanken dazu von Pierangelo Gröning, bis vor kurzem Direktionsmitglied der Empa.

Text: Pierangelo Gröning

Computer und Internet sind zentrale technologische Pfeiler unserer zunehmend digitalisierten Gesellschaft, indem sie den Zugriff, die Verarbeitung und den Austausch von Daten in Geschwindigkeiten ermöglichen, die weitab menschlicher Möglichkeiten liegen. Bei physischen Arbeiten in der realen Welt haben Roboter industrielle Fertigungsprozesse revolutioniert, indem sie diese Arbeiten schneller, zuverlässiger, ausdauernder und mit grösserer Präzision durchführen als es dem Menschen möglich ist.

Mit der zunehmenden Verbreitung von Künstlicher Intelligenz (KI) dürften sich diese Technologien in nicht allzu ferner Zukunft vom blossen Hilfsmittel und «Erfüllungsgehilfen» zum (mehr oder weniger) gleichberechtigten Partner menschlichen Schaffens weiterentwickeln. Sie werden nicht nur wie bisher zugewiesene Aufgaben akkurat und höchst effizient ausführen, sie werden diese auch ausarbeiten, vorschlagen und gegebenenfalls selbstständig durchführen. Computer, Roboter und KI werden dadurch zu ArbeitskollegInnen, der Begriff «Human-Machine Interaction» erhält so eine vollkommen neue Qualität.

Zusammenarbeit ist in der Regel dann besonders erfolgreich, wenn sowohl Stärken als auch Schwächen der beteiligten Partner bekannt sind, die Partner sich auf ihre Stärken fokussieren und diese zielführend einbringen. In der Zusammenarbeit mit «Kollege Roboter» oder «Kollegin KI» wird dies nicht anders sein; ja, es wird sogar essentiell sein. Ganz zentral dabei ist die richtige Platzierung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, damit das Synergiepotential des «Teams» optimal – und vor allem zum Nutzen des Menschen! – zum Tragen kommt.

Erste allgemein bekannte Anwendungen sind Roboter in Pflege und Rehabilitation, Chatbots zur Kundenberatung oder der medial allgegenwärtige ChatGPT. Dieser ermöglicht nun allen den Zugang zu KI und liefert dank selbstlernenden Algorithmen auf Basis der im Internet verfügbaren Daten plausible Antworten auf (fast) jede X-beliebige Frage; er generiert gar mittels einiger Stichwörter ganze (je nach konkreter Problemstellung mehr oder weniger sinnstiftende) Texte, sei es als Zusammenfassung, in Prosa oder als Lyrik, um nur einige zu nennen.

In Wissenschaft und Forschung sind KI wie auch das zugrundeliegende «Machine Learning» längst alltägliche Hilfsmittel. Sei es, um mittels KI, ähnlich digitalen Routenplanern, die Reaktionsschritte komplexer (bio-)chemischer Synthesepfade von den Edukten zum Produkt zusammenzustellen, oder um Prozessparameter in komplexen Fertigungsprozessen wie dem 3D-Metalldruck zu optimieren, um nur zwei Anwendungsbereiche aus der Empa-Forschung zu nennen.

Für die Gesellschaft als Ganzes wird der Umgang mit KI und KI-basierten Systemen indes eine enorme Herausforderung, darin sind sich alle einig. Ein erster kleiner Vorgeschmack sind die sozialen Netzwerke und die dahinterliegenden Algorithmen, die ihrer eigenen Geschäfts- oder «Like»-Logik folgen – mit all den bekannten Auswüchsen wie Fake News etc. Die Gefahr des Verlusts von Arbeitsplätzen ist eine weitere Thematik, der wir uns als Gesellschaft stellen müssen.

## DIE KERNFRAGE: WIE KANN MAN KI GESELLSCHAFTSVERTRÄGLICH GESTALTEN?

Im Bewusstsein dessen diskutieren Regierungen, NGOs und weitere Stakeholder derzeit über Massnahmen und Regularien wie KI, salopp ausgedrückt, gesellschaftsverträglich gestaltet





**BRÜCKEN BAUEN**  
Ein harmonisches  
Miteinander zwischen  
Mensch und KI ist  
das Ziel.

werden kann. Auf der anderen Seite betuern und versprechen die grossen US Tech-Konzerne, die KI anbieten, verbreiten und zu ihrem eigenen Geschäftserfolg einsetzen, einen verantwortungsvollen Umgang mit KI. Ob das reicht?

Um ein harmonisches Miteinander zwischen Mensch und KI zu etablieren, wird es wichtig sein, über die Werte und die Rolle des Menschen in einer Welt mit KI nachzudenken. Die Auseinandersetzung mit ganz grundsätzlichen Fragen wie: «Kann ein KI-generiertes Gemälde Kunst sein – oder ist es einfach nur eine Komposition von Farben auf einer Leinwand?» oder «Ist ein von KI verfasster Roman Literatur?» – spricht: Was ist eigentlich Kreativität? – werden vielleicht helfen, KI sinnvoll und zum Wohle des Menschen einzusetzen.

Was die industrielle Fertigung betrifft, so hat die EU-Kommission bereits 2020 die Vision «Industry 5.0 – Towards a Sustainable, Human-centric and Resilient Industry»<sup>1</sup> entwickelt und wie folgt beschrieben: «Industrie 5.0 zielt darauf ab, die menschlichen Aufgaben in der Fertigung grundlegend umzustrukturieren, so dass die ArbeitnehmerInnen davon profitieren. Sie werden dazu

befähigt, anstatt manuelle kognitive Arbeiten sowie Aufgaben mit Mehrwert in der Produktion zu übernehmen und unbesorgt an der Seite ihrer autonomen «KollegInnen» zu arbeiten.»<sup>2</sup>

KI und KI-gestützte Systeme werden aber auch die Forschungs- und Entwicklungslandschaft massiv verändern. Und zwar in mehrerlei Hinsicht: Zum einen werden durch KI die Entwicklungszyklen noch einmal erheblich verkürzt und – dadurch bedingt – angewandte Forschung und Entwicklung noch näher zusammenrücken bis hin zur Verschmelzung in gewissen Bereichen. Im Extremfall könnte angewandte Forschung gar obsolet werden, denn eine problemlösungsoptimierte KI liefert auf jede klar umrissene Fragestellung eine passende Antwort – spricht: ein Produkt. Der kommerzielle Erfolg dürfte also zu einem zentralen Indikator werden, um die Qualität dieser Art von «Forschung» zu bewerten.

Zum anderen kommt dem Primärprodukt von Forschung – Daten – eine herausragende Bedeutung zu. Denn wir lernen KI? Wie entwickelt sie sich weiter? Indem sie permanent mit neuen – und vor allem verlässlichen – Daten gefüttert wird. Wohl gemerkt: nicht-KI-generierte

Daten, sie braucht also Input von aussen! Dies dürfte der «Open Data» Politik, dem freien Zugang zu Forschungsdaten, zusätzlichen Schub verleihen. Erfolgt dies nicht, oder nicht in ausreichendem Mass bzw. nur mit «qualitativ minderwertigen» Daten, dann liefert KI nur immer wieder das Gleiche oder – noch schlimmer – vermutlich bald nur noch Nonsense.

Und schliesslich braucht es, um echten Fortschritt zu erzielen, nach wie vor neue bahnbrechende wissenschaftliche Erkenntnisse. Trotz der immensen Möglichkeiten, die KI der Forschung eröffnet, wird die Grundlage, um wissenschaftliche Quantensprünge zu erzielen oder neue wissenschaftliche Horizonte zu eröffnen, weiterhin Neugier, Beharrlichkeit und Intuition sein. Und vor allem eine ausgeprägte Fehlerkultur, denn nur aus Fehlschlägen lernt man etwas – wohingegen KI primär dazu dient, Fehler zu vermeiden. Diese Tugenden gilt es unbedingt zu erhalten, sie dürfen der Verlockung des durch KI ermöglichten schnellen Erfolgs keinesfalls zum Opfer fallen. ■

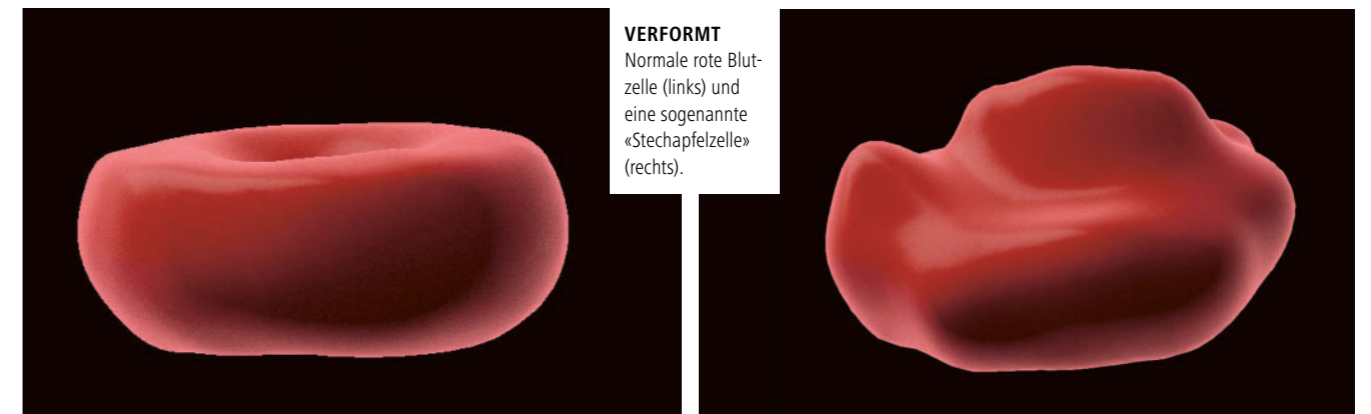
<sup>1</sup> ISBN 978-92-76-25308-2

<sup>2</sup> F. Longo et al. Appl. Sci. 10 (2020) 4182

# STACHELIGE ERKENNTNIS

Empa-Forschende haben lebende rote Blutzellen dabei beobachtet, wie sie sich in «Stechapfelzellen» verwandeln, wenn sie mit hohen Konzentrationen des Medikaments Ibuprofen behandelt werden. Mittels holotomographischer Mikroskopie konnten sie die roten Blutkörperchen in Echtzeit bei ihrer Verwandlung vermessen und in 3D-Renderings darstellen. Ihre Erkenntnisse haben sie unlängst im Fachmagazin «ACS Nanoscience Au» publiziert.

Text: Andrea Six



**VERFORMT**  
Normale rote Blutzelle (links) und eine sogenannte «Stechapfelzelle» (rechts).

**B**lut ist in der Tat «ein ganz besonderer Saft». Was bereits der Dichter und Naturforscher Goethe ahnte, lässt sich heute mit innovativen Bildgebungsverfahren tatsächlich sichtbar machen. Eine dieser Besonderheiten ist nämlich zugleich jene Zelle, die am häufigsten in der Blutbahn vorkommt: der Erythrozyt. Billionen dieser roten Blutkörperchen drehen jede Minute ihre Runden durch den menschlichen Körper. Dass sie dabei nicht immer eine rundliche Gestalt einnehmen, ermöglicht ihnen, sich durch engste Äderchen zu quetschen, um die entlegensten Winkel unseres Körpers mit Sauerstoff zu versorgen.

Manche Formänderungen der Erythrozyten sind allerdings auch typisch für spezielle Veränderungen in der Umgebung: So treten sogenannte Stechapfelzellen mit zugespitzten Ausläufern

etwa bei Verbrennung, Leberschäden oder bei Kontakt mit bestimmten Medikamenten auf. Empa-Forschende konnten die Verwandlung von roten Blutkörperchen in Stechapfelzellen nun mittels digitaler holotomographischer Mikroskopie beobachten.

Talia Bergaglio und Peter Nirmalraj vom «Transport at Nanoscale Interfaces»-Labor in Dübendorf provozierten hierzu die Verformung von lebenden roten Blutkörperchen durch Zugabe des Arzneimittels Ibuprofen. Die Verwandlung von rundlichen «Donuts» zu Stechapfelzellen konnten sie dank der holotomographischen Mikroskopie in Echtzeit nachverfolgen. Diese innovative Technik funktioniert ähnlich wie eine Computertomographie (CT), wobei die Bildgebung über Lasertechnik anstatt mittels Röntgenstrahlen stattfindet. Die digitale holotomografische Mikroskopie

ist damit besonders geeignet für biologische Proben wie Blutzellen, da sie hochauflösende, berührungslose und Marker-freie Aufnahmen ermöglicht, die sich im Anschluss zu einer dreidimensionalen Darstellung rekonstruieren lassen.

Rote Blutkörperchen sind hierbei ein perfektes Modellsystem, da sie sich im Verlauf ihrer Existenz von allen Bestandteilen trennen, die sie an ihrer Hauptaufgabe, dem Sauerstofftransport, hindern; sie sind letztlich (fast) leere Membranhüllen. «Daher lassen sich mit unserem bildgebenden Verfahren die Wechselwirkungen einer Vielzahl von Arzneimittelmolekülen mit der Zellmembran besonders gut an roten Blutkörperchen untersuchen», so Empa-Forscher Nirmalraj. ■

Mehr Informationen und Videos zum Thema unter: [www.empa.ch/web/s405](http://www.empa.ch/web/s405)



# EIN NAVI FÜR DIE KNIE-OP

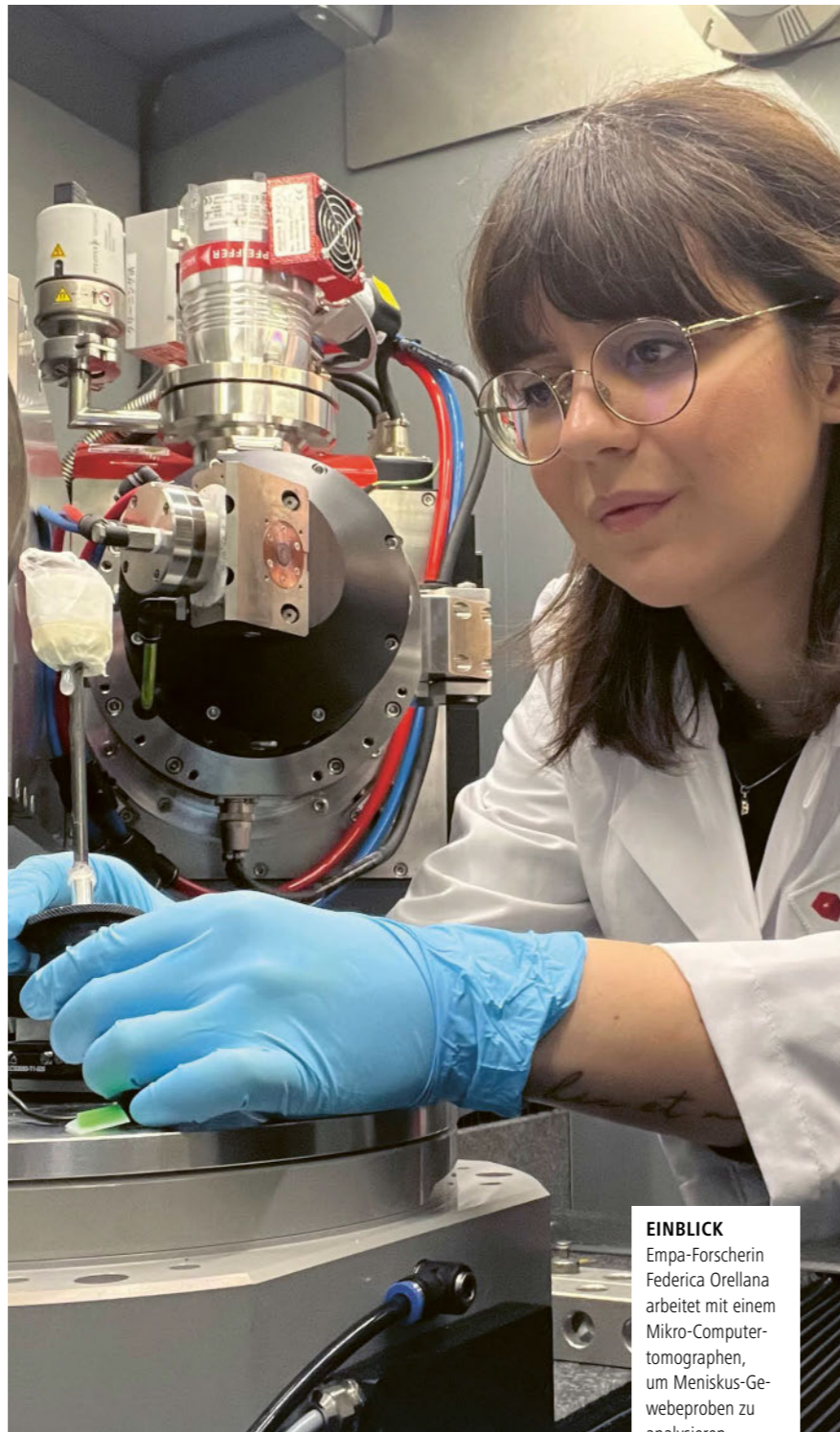
Knieoperationen am Meniskus sind ein häufiger Eingriff an einer besonders komplexen Körperstelle. Empa-Forschende wollen verbesserte Grundlagen für die Medizin liefern, um die Risiken der Operation zu senken. Mit 3D-Modellen, die auf Mikro-Computertomographie-Analysen im Labor beruhen, kartieren sie das Blutgefässnetzwerk des Meniskusknorpels im Nanometerbereich.

Text: Andrea Six

Das Kniegelenk ist eine äusserst komplexe biomechanische Errungenschaft der Evolution. Wer je selbst eine Verletzung dort erlitten hat, kennt die schmerzvollen Geduldsproben bei Diagnostik und Therapie. Ein nicht trivialer Mitspieler im anatomischen Orchester des zusammengesetzten Gelenks ist der Meniskus. Empa-Forscherinnen erstellen jetzt eine «3D-Landkarte» des kostbaren Knorpels.

## 3D-MODELLE FÜR DIE OPERATION

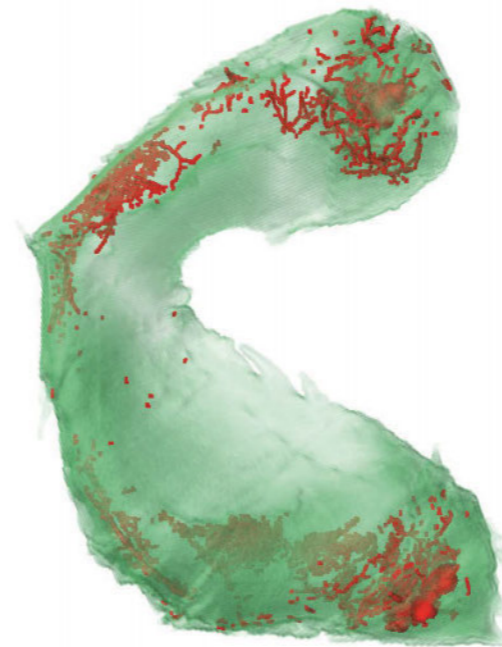
Als Mondsichel-förmiges Gleitkissen dämpft der Meniskus Erschütterungen und ermöglicht die reibungslose Bewegung zwischen Ober und Unterschenkel. Allerdings sind die beiden Menisken pro Knie anfällig für Verschleiss und Verletzungen. So weist etwa jedes dritte Knie in der Bevölkerung ab 40 Jahren einen deutlichen Meniskus-Verschleiss auf, und rund 15 Prozent aller Unfälle des Kniegelenks betreffen den Meniskus.



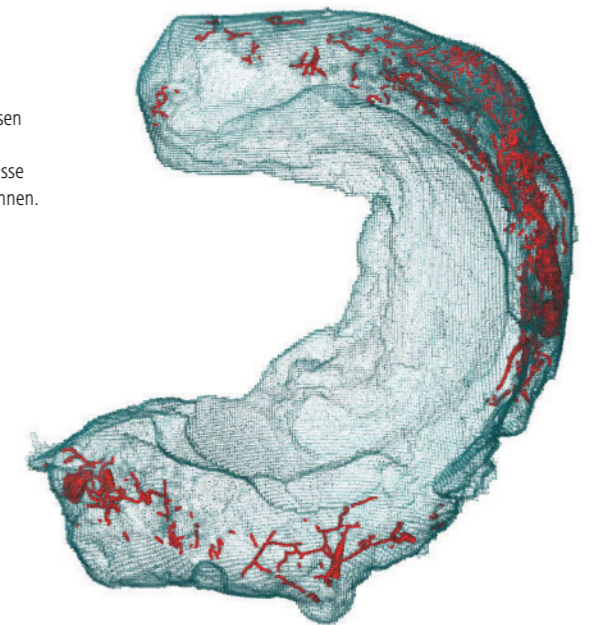
**EINBLICK**  
Empa-Forscherin Federica Orellana arbeitet mit einem Mikro-Computertomographen, um Meniskus-Gewebeproben zu analysieren.

Foto: Empa

Grafiken: Empa



**DURCHBLUTET**  
Der Meniskus und sein Netzwerk aus Blutgefässen in einem 3D-Rendering. Der Verlauf der Blutgefässe (rot) ist deutlich zu erkennen.



Allein diese Unfälle verursachen laut der Unfallversicherung Suva in der Schweiz jährlich Gesundheitskosten von über 650 Millionen Franken.

Soll zur Behandlung ein operativer Eingriff am Knie erfolgen, ist der Meniskus grundsätzlich kein dankbarer Kandidat, denn sein Gewebe wird nur in bestimmten Abschnitten mit Blut versorgt. Für gute Heilungschancen ist eine genaue Kenntnis dieses wertvollen Gefässgeflechts hilfreich. Bislang basieren die Informationen allerdings auf zweidimensionalen Bildern von Gewebeschnitten. Hierdurch gehen wertvolle Daten etwa zur Verformbarkeit des Knorpels oder zur Vernetzung der Gefässe verloren.

«Wir wollen eine dreidimensionale «Landkarte» durch den Meniskus in hoher Präzision erstellen», erklärt Federica Orellana vom «Center for X-ray Analytics» der Empa in Dübendorf. Dies könne die Behandlung optimieren und massgeschneiderte Therapien im Sinne einer personalisierten Medizin ermöglichen, so die Biophysikerin.

## VERÄSTELTE ÄDERCHEN

Das Team um Federica Orellana und Projektleiterin Annapaola Parrilli strebt dabei eine Genauigkeit an, die mit Apparaturen in Spitälern nicht zu erreichen ist. Gegenüber einer Auflösung im Millimeterbereich bei einer klinischen Computertomographie (CT), können die Mikro- und Nano-Computertomographen der Empa-Labors sogar die Mikrometergrenze unterschreiten. Aus diesen radiologischen Aufnahmen erstellen die Forscherinnen mathematische Modelle, mit denen sich die Dichte, die Struktur, die biomechanische Verformbarkeit und das Gefässnetz des Knorpels im Raum erfassen und kartieren lassen.

Mit der Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und gemeinsam mit den klinischen Partnern des «Istituto Ortopedico Rizzoli» in Bologna, des Kantonsspitals Winterthur und der Universität Zürich arbeiten die Forschenden derzeit mit einer Vielzahl von Laborproben, um eine möglichst aussagekräftige Datengrundlage aufzubauen. Erste Computersimulationen zeigen die verästelten Äderchen im

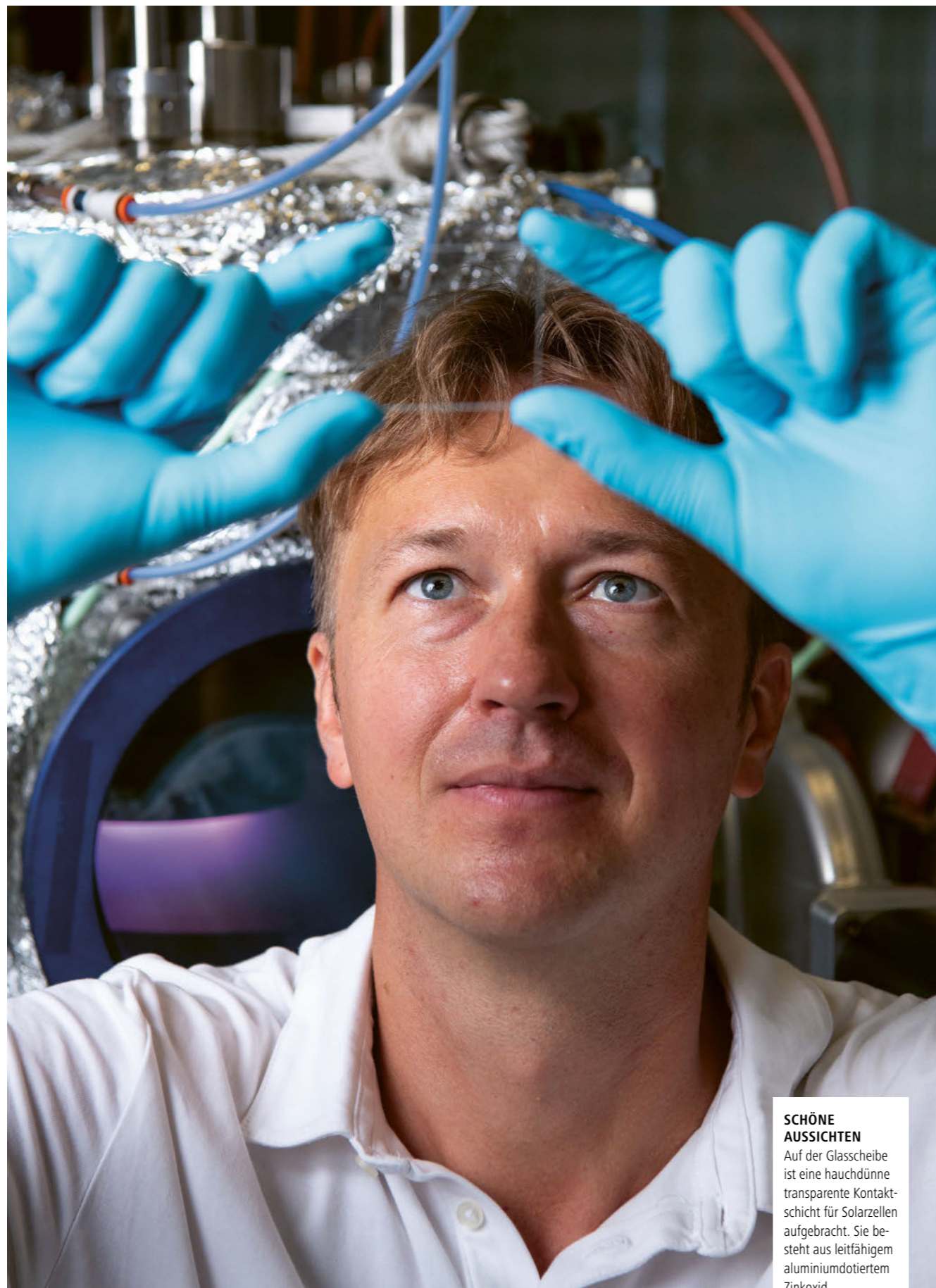
Meniskus bereits in vielversprechender Präzision. Die Mikro-CT-Bilder übermitteln die strukturelle Komplexität des Gewebes und erlauben in den mathematischen Modellierungen auch weitere Informationen wie die Porosität oder wie stark die Blutgefässe gewunden sind.

## MASSGESCHNEIDERTE MENISKUS-BEHANDLUNG

Derzeit arbeitet Federica Orellana an einem 3D-Atlas mit gesunden Meniskus-Gewebeproben. In einem nächsten Schritt werden CT-Aufnahmen von Verletzungen und Abnutzungen aller Art in die Modelle integriert. So könnten Betroffene direkt während einer Untersuchung essenzielle Informationen zum Selbstheilungspotenzial des Gewebes erhalten und die Strategien für eine individuelle Behandlung könnte optimiert werden. Dabei, so betont die Biophysikerin, solle die 3D-Landkarte sowohl für Unfallpatientinnen und -patienten als auch bei Abnutzungsprozessen im Alter eingesetzt werden können. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s499](http://www.empa.ch/web/s499)





#### SCHÖNE AUSSICHTEN

Auf der Glasscheibe ist eine hauchdünne transparente Kontaktschicht für Solarzellen aufgebracht. Sie besteht aus leitfähigem aluminiumdotiertem Zinkoxid.

Foto: Marion Nitsch

# DÜNNE SCHICHTEN, HOHE ZIELE

Yaroslav Romanyuk arbeitet an der Empa seit rund 15 Jahren an komplexen Dünnschicht-Technologien für Solarzellen, gedruckte Schaltungen, neuartige Festkörperbatterien und andere Anwendungen. Seit Anfang Juli leitet er das Labor für «Dünnschichten und Photovoltaik» und verfolgt mit seinem Team ehrgeizige Ziele – von innovativen Materialien über ein Start-up bis zu künstlicher Intelligenz für künftige Experimente.

Text: Norbert Raabe

Er hätte in Deutschland leben können, in den USA, in Polen vielleicht oder daheim in der Ukraine. Doch dann erlebte Yaroslav Romanyuk seinen Postkarten-Moment. Anno 2002 fuhr er zu einem Vorstellungsgespräch für ein Doktorat zur EPFL nach Lausanne: von Luzk in der Ukraine mit dem Bus über Polen nach Zürich; von dort in den Zug nach Lausanne, hinein in den Tunnel hinter Puidoux – und hinaus in die hinreissende Aussicht über die Rebberge auf den Lac Léman. Jener malerische Ort, von dem der Volksmund sagt, dass die Deutschschweizer dort ihre Retourbillets zerreißen und aus dem Fenster werfen.

Und so wurde es die Schweiz. Roman-yuks Empa-Laufbahn begann noch in Zürich; 2008, als er mit dem inzwischen pensionierten Abteilungsleiter Ayodhya Tiwari mit dessen Solarzellen-Forschungsgruppe vom Zürcher Technopark an die Empa zügelte. Mit ihm verbinden den Chemiker wertvolle

Erfahrungen und Erfolge wie mehrere Weltrekorde beim Wirkungsgrad von flexiblen Dünnschichtsolarzellen, ein Dutzend erfolgreiche, gemeinsam betreute Doktorarbeiten und vieles mehr. «Wir haben zusammen Forschungsrichtungen eröffnet, an die wir anfangs nie gedacht hätten!», sagt Romanyuk.

So soll es weitergehen: grosse Ziele mit dünnen Schichten und neuartigen Materialkombinationen, die ihn faszinieren, seit er forscht. Wie schon als Postdoc an der «University of California» in Berkeley, wo er an Halbleitern aus Gallium-Nitrit und ähnlichen Kombinationen arbeitete, dotiert mit seltenen Erden – für Lichtemissionen, also optische Anwendungen oder künftige Laser. Am Ende funktionierte das allerdings nicht. «Die Hindernisse waren leider stärker als ich», gesteht Romanyuk unumwunden, «es war auch wirklich eine ehrgeizige Idee! Und ich wollte damals unbedingt etwas Neues versuchen.»

**FREUDE AN DER ARBEIT MIT TALENTEN**  
Probieren geht über Studieren – auch in seinen heutigen Forschungsfeldern. Neben sehr zielgerichteten Projekten mit seinen Mitarbeitenden wie neuartigen Festkörperbatterien, hergestellt durch «Physical Vapor Deposition» (Gasphasen-Abscheidung), oder gedruckter Elektronik mit digitalen Druckverfahren entstanden manche Resultate auch unerwartet, zum Beispiel transparente Sicherheitsfolien für unsichtbare «Schlösser». Nicht alles lässt sich planen, meint Romanyuk: Manche Entdeckungen geschehen einfach; plötzlich und überraschend, wenn Teams mit Begeisterung arbeiten.

Er hat schon viele Talente betreut und gefördert, mit grosser Freude. Mehr als 40 Diplomarbeiten, die abgeschlossenen Doktorarbeiten – und viele Absolventen, so erzählt der Chef, arbeiten heute in leitenden Positionen bei renommierten Hightech-Firmen der Schweiz. «Das ist das Beste!», sagt er, «zusehen, wie sie sich weiterentwickeln und immer



besser werden!» Nicht unter Druck, nein, weil Kreativität so nicht entstehen kann – sondern mit einem grossen Vorschuss an Vertrauen, Geduld und dem Wissen, dass auch Fehlversuche unter dem Strich oft zu wichtigen Fortschritten führen.

## YAROSLAV ROMANYUK

**WERDEGANG:** Der Forscher studierte Chemie an der «Volyn National University» in Luzk in der Ukraine und schloss das Studium 2002 mit dem Master summa cum laude ab. Sein Doktorat absolvierte er anschliessend an der EPFL, gefolgt von einem zweijährigen Forschungsaufenthalt an der «University of California» in Berkeley, den der Schweizerische Nationalfonds (SNF) finanzierte. An der Empa arbeitet Romanyuk seit 2008; ab 2012 vertrat er als Gruppenleiter den Laborleiter und verantwortete die chemische Sicherheit des Labors. Zudem koordinierte er mehr als zehn Jahre lang die Aktion «Bike to work» an der Empa.

### BATTERIESTAPEL ALS HOFFUNGSTRÄGER

Stolz ist Yaroslav Romanyuk auch auf seine Mitarbeiter Moritz Futscher und Abdessalem Aribia, die kürzlich die Start-up-Firma «BTRY AG» gegründet haben – mit dem Ziel, eine Lithium-Ionen-Festkörperbatterie zur Marktreife zu entwickeln, die sich den schnellen Ladungstransport in Dünnschichtbatterien zunutze macht. «Das Problem dabei: Solche Batterien haben nur eine geringe Kapazität», erklärt Romanyuk, «unsere Idee ist nun: Wir stapeln mindestens zehn einzelne Zellen übereinander und bekommen so leistungsfähige Batterien, die sich in extrem kurzer Zeit laden und entladen lassen!» Zudem sind solche Elemente robuster als gängige Produkte und sicherer, weil nicht brennbar (siehe Infografik). Um diese Technologie, die bereits patentiert ist, zur Einsatzreife zu entwickeln, sind freilich noch viele Schritte nötig. Derzeit arbeiten die Spezialisten

an einem Prototypen im Labormassstab und suchen schon nach Investoren für die Weiterentwicklung, die sich dereinst auch bei Anwendungen für anspruchsvollen Technologien wie in der Luftfahrt lohnen könnte. Zwar werden die Kosten für solche Batterien wegen der aufwändigen Herstellung deutlich über denen gängiger Produkte liegen – dennoch sieht Romanyuk grosses Potenzial. «Wir haben mal für eine iWatch berechnet, dass unsere Batterie den Gesamtpreis um etwa fünf Prozent erhöhen würde», erklärt er, «aber für eine Ladezeit von weniger als einer Minute könnte das attraktiv sein, oder nicht?»

Vielfältige Technologien, spannende Projekte, ehrgeizige Ziele: Das bedeutet viel Koordination, jede Menge Mails und Kontakte, immer neue Forschungsanträge – mehr Management als früher und ein strenges Pensum, auch körperlich. Die nötige Ausdauer brauchte er schon bei seinem allerersten Job in der Forschung: ein 10-Prozent-Pensum im dritten Studienjahr an der «Volyn National University» in der Ukraine.

«Meine Aufgabe war es, nachts einen Ofen für Halbleiterkristalle zu kontrollieren und die Temperatur richtig einzustellen», erzählt Romanyuk, «also jede Stunde aufwachen, die ganze Nacht über, allein in diesem riesigen Gebäude!» Verhältnisse, die heute undenkbar wären – dank moderner Gerätschaften, wie im «Coating Competence Center» der Empa (siehe Infobox), wo dünne Schichten, etwa für Kontakte von Dünnschichtbatterien oder -batterien, tagtäglich rund um die Uhr entstehen. Auch ein Kostenfaktor durch Zeit- und Energieaufwand.

### DIGITALE ZWILLINGE ALS HELFER

In Zukunft soll diese Arbeit effizienter werden: «Wir werden maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz einsetzen», sagt Romanyuk. Ein Beispiel?

### DAS «COATING COMPETENCE CENTER» DER EMPA

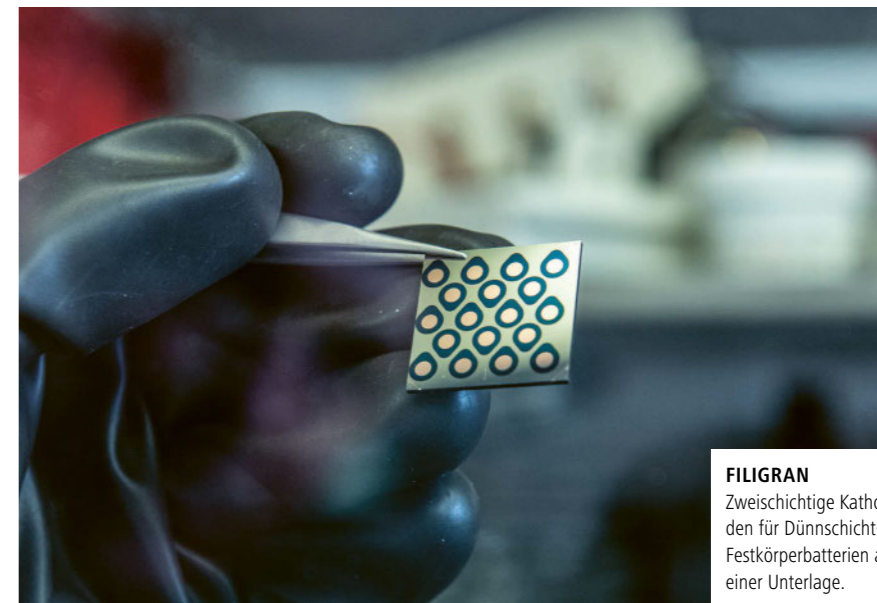
Die Lücke zwischen Laborforschung und industrieller Produktion für Beschichtungen zu schliessen: Das ist das Ziel des «Coating Competence Center» (CCC) der Empa, das 2016 in Betrieb ging. Um gedruckte Elektronik, Solarzellen, Dünnschichtbatterien und andere Elemente herzustellen, stehen dort vielfältige Technologien zu Verfügung. Dazu zählen etwa hochmoderne 3D-Drucker für «Additive Manufacturing» (AM) und Geräte, mit denen sich Schichten auf Substraten mit Lichtpulsen aus Xenon-Blitzlampen härten lassen. Von grosser Bedeutung ist das so genannte Magnetron-Sputtern. Dabei wird in Vakuumkammern mit dem Edelgas Argon ein Plasma erzeugt, das Atome aus einem «Target» herauslöst, die sich dann zielgerichtet auf dem gewünschten Substrat niederschlagen. Solche Schichten erreichen üblicherweise eine Dicke zwischen 10 Nanometer und 10 Mikrometer. Mit seinen vielfältigen Möglichkeiten ist das CCC als «Private-Public-Partnership» aufgebaut: Die Idee ist, dass die beteiligten Partner entlang der Wertschöpfungskette von der Wissenschaft bis zur Industrie zusammenarbeiten, um neue Technologien zu entwickeln und kreative Lösungen zu finden. Das Projekt vollständig zu finanzieren.

Die Entwicklung digitaler Zwillinge von Batterien oder Solarzellen, noch bevor sie tatsächlich fabriziert werden. Solche virtuellen Modelle liessen sich verwenden, um Materialeigenschaften vorherzusagen – und das wiederum könnte die Zahl der nötigen Produktionszyklen im Vakuum reduzieren, was Zeit und Energie spart. «Die Herstellung einer Charge von Dünnschichtbatterien kann heute bis zu einer Woche dauern», erklärt Romanyuk, «wir sind an der Empa sozusagen die Vakuum-Rekordler!»

### «Zusehen, wie sich junge Talente weiterentwickeln, das ist das Beste!»

Sein Ausgleich? Frische Luft! Beim Schwimmen, Laufen oder auf den sechs Kilometern auf dem Velo zur Arbeit. Und beim Naturschutzverein daheim in Fällanden: Vögel beobachten und zählen, Storchennester und Nistkästen bauen; auch mit den beiden Söhnen, Marco und Taras, 3 und 14 Jahre alt. Den Jüngeren zeigt Romanyuk auf einem fröhlichen Foto im Garten – doch kurz nach dem Schnappschuss griff er in ein Wespennest und wurde mit einem Stich bestraft. «Da hat der Papi einen Moment lang nicht aufgepasst», sagt der Chemiker mit einem Lächeln: ein Pieks, kein Drama – und eine erste Erfahrung in Sachen grosser Neugier alias Forschergeist.

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s207](http://www.empa.ch/web/s207)



**FILIGRAN**  
Zweischichtige Kathoden für Dünnschicht-Festkörperbatterien auf einer Unterlage.



**FACHDISKURS**  
Mitte: Doktorand Joel Casella (rechts) mit Yaroslav Romanyuk. Unten: Die «Gummi-Arme» erlauben die Arbeit in Boxen, die mit Argon gefüllt sind.



Fotos: Marion Nitsch



# WAS STECKT IN DER BATTERIE DER ZUKUNFT?

Die Empa-Forschungsgruppe von Maksym Kovalenko entwickelt innovative Materialien für die Akkus von morgen. Ob schnell aufladbare Elektroautos oder günstige Stromspeicher: Für jede Anwendung finden sie ein vielversprechendes Material oder ein neuartiges Herstellungsverfahren.

Text: Anna Ettlin



**UNTER DRUCK**  
Kostiantyn Kravchyk untersucht, ob sich das unerwünschte Wachstum von Dendriten mit Druck verringern lässt. Die Arbeit an den neuartigen Batterien erfolgt unter Schutzatmosphäre.

**W**as macht eine gute Batterie aus? Ist es ihre Kapazität? Wie schnell sie lädt? Oder doch ihr Preis? Die Antwort hängt davon ab, wo die Batterie zum Einsatz kommt, sagt Empa-Forscher Kostiantyn Kravchyk. In der Gruppe «Functional Inorganic Materials», die von Maksym

Kovalenko geleitet wird und Teil des Empa-Labors «Thin Films and Photovoltaics» ist, entwickelt der Wissenschaftler neue Materialien, um die Batterien von morgen leistungsfähiger und schneller, oder eben günstiger zu machen.

Zwei Einsatzbereiche von wiederaufladbaren Batterien sind für die Energiewende ausschlaggebend: Einerseits die

Elektromobilität, andererseits sogenannte stationäre Speicher, die Strom aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne speichern. Akkus für Elektroautos müssen kompakt und leicht sein, eine hohe Kapazität haben und sich so schnell wie möglich aufladen. Stationäre Batterien dürfen mehr Platz in Anspruch nehmen. Wirtschaftlich sind sie aber nur dann, wenn sie möglichst wenig kosten.

Foto: Empa

Im Grunde genommen besteht jede Batterie aus einer Kathode, einer Anode und einem Elektrolyten. Bei herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus besteht die Anode aus Graphit, die Kathode aus einem Mischoxid von Lithium und anderen Metallen, etwa Lithium-Kobalt(III)-Oxid. Der Elektrolyt leitet die Lithium-Ionen von der Kathode zur Anode und zurück, je nachdem, ob die Zelle gerade aufgeladen oder entladen wird.

## KEINE EINFACHE AUFGABE

Wenn es um Akkus für Elektromobilität geht, ist eine möglichst hohe Energiedichte erwünscht. «Mit einer Anode aus reinem metallischem Lithium anstelle von Graphit könnten wir in einer gleich grossen Zelle ein Vielfaches an Energie speichern», sagt Kravchyk. Allerdings wird das Lithium beim Laden und Entladen der Zelle nicht gleichmässig ab- und wieder aufgetragen. Es kommt zur Bildung von sogenannten Dendriten: verzweigten Strukturen aus metallischem Lithium, die die Batterie kurzschliessen können.

Eine Möglichkeit, das Wachstum von Dendriten zu verlangsamen, ist die Verwendung von festen Elektrolyten. Bei sogenannten Festkörperakkus leitet anstatt einer Flüssigkeit eine feste Materialschicht die Lithium-Ionen von der Kathode zur Anode und zurück. Die Ansprüche an das Elektrolytmaterial sind allerdings hoch. «Man spricht davon, Batterien innert zehn bis fünfzehn Minuten aufzuladen», erklärt Kravchyk. «Das bedingt eine sehr hohe Stromdichte, bei der selbst in Festkörperbatterien Dendriten entstehen.» Die Stromdichte ist das Verhältnis der Stromstärke zur Fläche, durch die der Strom fliesst. Eine weitere Gefahr: Durch die ungleichmässige Ab- und Auftragung von Lithium bilden sich an der Grenze zwischen Elektrode und festem Elektrolyt Hohlräume, die die verfügbare Fläche reduzieren und die Stromdichte noch weiter erhöhen.

## EIN MATERIAL, ZWEI SCHICHTEN

Im Rahmen der Fraunhofer-Förderlinie ICON («International Cooperation and Networking») haben Kravchyk und weitere Empa-Forschende nun einen vielversprechenden Feststoffelektrolyten weiterentwickelt. Das Material, Lithium-Lanthan-Zirkon-Oxid, kurz LLZO, besitzt eine hohe Ionenleitfähigkeit und chemische Stabilität – ideale Eigenschaften für den Einsatz in Batterien.

«Wir haben LLZO zu einer zweischichtigen Membran verarbeitet, die aus einer dichten und einer porösen Schicht besteht», sagt Kravchyk. Lagert man in den Poren Lithium ein, entsteht eine sehr grosse Kontaktfläche zwischen dem Lithium und dem Elektrolyten, und die Stromdichte bleibt gering. Die dichte Schicht stellt sicher, dass keine Dendriten zur anderen Elektrode wachsen und einen Kurzschluss verursachen können. Und auch an die Wirtschaftlichkeit haben die Forschenden gedacht: Sie haben ein einfaches, kostengünstiges und skalierbares Verfahren entwickelt, um die zweischichtigen Membranen herzustellen.

## GÜNSTIGES EISEN STATT TEUREM KOBALT

Einen ganz anderen Ansatz verfolgten die Forschenden in einem Projekt, bei dem es um die stationäre Speicherung von erneuerbaren Energien ging. «Die mit Abstand wichtigste Metrik beim stationären Speicher ist der Preis», erklärt Kravchyk. Die heute vereinzelt verwendeten Batterien für stationäre Speicherung basieren auf der Lithium-Ionen-Technologie und sind vergleichsweise teuer. «Deshalb wird der Grossteil des Speicherbedarfs noch immer durch Pumpspeicherkraftwerke gedeckt, obwohl sie verglichen mit Batterien eine sehr niedrige Energiedichte haben», fährt der Forscher fort. Einer der grössten Kostentreiber für stationäre Batterien sind die verwendeten Materialien. Neben Lithium sind dies bei Lithium-Ionen-Akkus Kobalt und Ni-

ckel, die für die Herstellung der Kathode benötigt werden. Die Suche nach besseren Materialien für die Kathode führte die Forschenden schnell zu einem der häufigsten Elemente der Erdkruste: Eisen.

Für ihre Kathode kombinierten die Forschenden das günstige Metall mit Fluorid. Genauer gesagt verwendeten sie Eisen(III)-hydroxyfluorid. «Bisherige Ansätze, eine Batterie auf Basis von Eisenfluoriden zu machen, setzten auf chemische Konversion», erklärt Kravchyk. Dabei wandelt man die Eisen-Ionen in metallisches Eisen um. «Dieser Prozess ist nicht sehr stabil», weiss der Forscher. «Im Idealfall wandern die Ionen einfach von einem Pol zum anderen, ohne grosse strukturelle Veränderungen zu durchlaufen.»

Eine Herausforderung für die Forschenden, denn eigentlich haben Fluoride eine schlechte Leitfähigkeit, sowohl für Elektronen als auch für Lithium-Ionen. Doch Kravchyks Team hat die Lösung: Mittels eines einfachen und kostengünstigen Verfahrens haben sie ihr Eisen(III)-hydroxyfluorid in eine spezielle Kristallstruktur gebracht. Diese sogenannte Pyrochlor-Struktur enthält in ihrem Inneren Gänge, die Lithium-Ionen leiten.

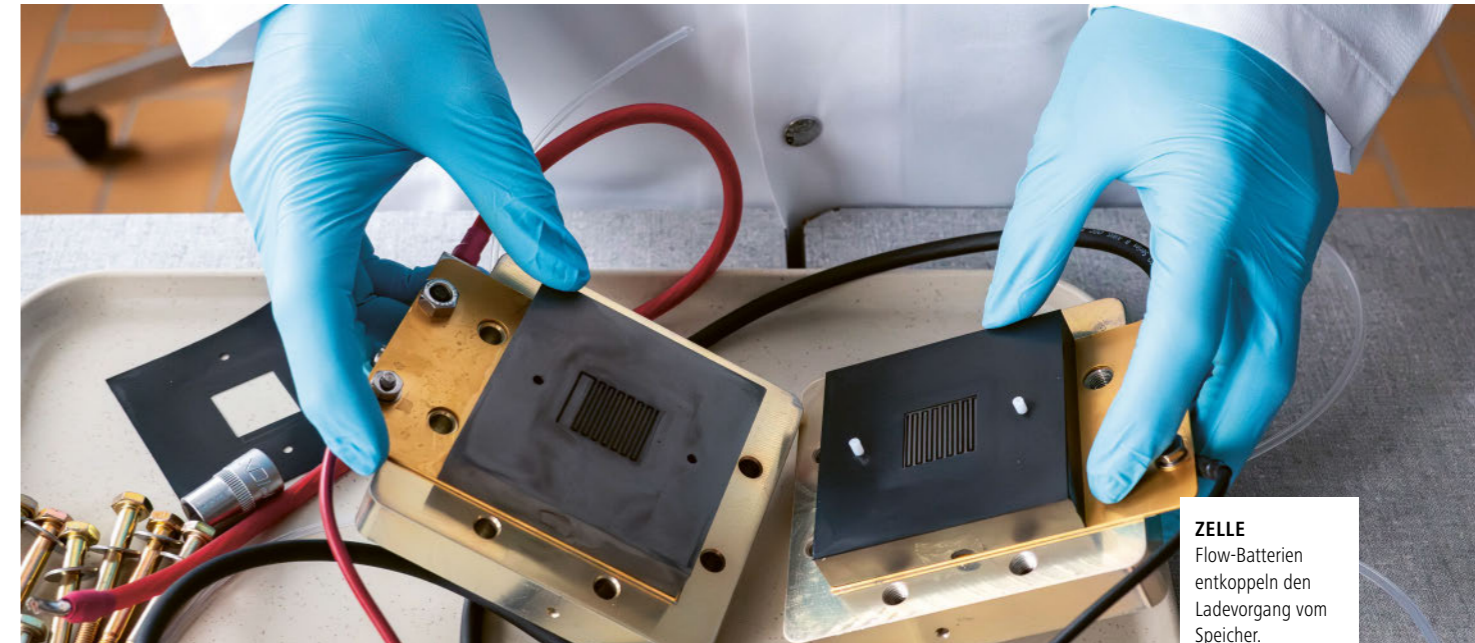
«Wir konnten mit unserer Batterie eine vergleichbare Leistung zu einem deutlich tieferen Preis erzielen», sagt Kravchyk. «Wir sind überrascht, dass bis jetzt kaum jemand erforscht hat, wie man dieses vielversprechende Material kostengünstig herstellen könnte.» ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s207](http://www.empa.ch/web/s207)





**FORSCHER**  
David Reber will eine bessere Art von Flow-Batterie entwickeln.



**ZELLE**  
Flow-Batterien entkoppeln den Ladevorgang vom Speicher.

# ICH BIN AUCH EINE BATTERIE

Ungiftige und skalierbare Flow-Batterien auf Wasserbasis wären eine gute Lösung, um erneuerbare Energie in urbanen Gebieten zu speichern – wenn da nicht ihre sehr geringe Energiedichte wäre. Empa-Forscher David Reber will mit cleverem Materialdesign Abhilfe schaffen.

Text: Anna Ettlin

Zwei farbige Flüssigkeiten, die durch Röhrchen blubbern: Sieht so die Batterie der Zukunft aus? Diese Frage will Empa-Forscher David Reber in den nächsten vier Jahren beantworten mit der Unterstützung eines «Ambizione»-Grants des Schweizerischen Nationalfonds (SNF).

So genannte Redox-Flow-Batterien sind bereits seit den 1970er-Jahren bekannt. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus speichern sie die Energie nicht in festen Elektroden,

sondern in Tanks mit flüssigen Elektrolytlösungen. Der Lade- und Entladevorgang geschieht nicht in den Tanks selbst: Dafür werden die Elektrolyte durch eine elektrochemische Zelle gepumpt.

Für Handys, Laptops oder Autos sind die Flüssigbatterien unpraktisch. Sehr vielversprechend sind sie hingegen für stationäre Speicherlösungen. Da die Energie ausserhalb der eigentlichen Zelle gespeichert wird, lassen sich Flow-Batterien besonders einfach und gezielt skalieren. Soll die Batterie schneller laden und entladen, braucht es eine

grössere elektrochemische Zelle. Soll sie eine grössere Speicherkapazität bekommen, müssen grössere Tanks her.

«Mit zunehmender Nutzung von erneuerbaren Energien werden wir Energiespeicher im grossen Massstab brauchen – auch in urbanen Gebieten», sagt Reber. Ein weiterer Pluspunkt für Flow-Batterien: Verwendet man Elektrolyte auf Wasserbasis, sind sie im Gegensatz zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus grundsätzlich nicht brennbar.

## AUSGELAGERTE ENERGIEDICHTE

Dennoch hat sich die Technologie bisher nicht durchgesetzt. Reber kennt das Hauptproblem: «Flow-Batterien haben eine rund zehnmal geringere Energiedichte als Batterien aus festen Speichermaterialien», erklärt er. Je mehr Speichermaterial sich im Elektrolyt auflösen lässt, desto höher die Energiedichte einer Flow-Batterie. «Allerdings machen hohe Konzentrationen die Lösung dickflüssig, und man braucht viel mehr Energie, um sie durch die Zelle zu pumpen», so der Forscher.

Genau dieses Problem will Reber in seiner Arbeit im Empa-Labor «Materials for Energy Conversion» nun lösen – mit einem ungewöhnlichen Ansatz. Während sich die meisten Projekte zu Flow-Batterien auf besser lösliche Speichermaterialien fokussieren, will er die Energiespeicherung komplett von der Elektrolytlösung entkoppeln. «Meine Vision ist, eine Art Hybrid aus einer Flow-Batterie und einer Lithium-Ionen-Batterie zu entwickeln», sagt der Forscher. Dafür will er feste Speichermaterialien, wie sie etwa in Handybatterien verwendet werden, in den Tank der Flow-Batterie

geben. «Wenn das gelöste Material und das feste Speichermaterial genau aufeinander abgestimmt sind, können sie untereinander Energie transferieren», führt Reber aus. «So lässt sich die Skalierbarkeit von Flow-Batterien mit der hohen Energiedichte von Batterien mit festen Speichermaterialien kombinieren.»

## TRAUMPAARE GESUCHT

Zuerst muss der Forscher allerdings geeignete Paare von Materialien finden, die den Energieaustausch ermöglichen und auch über eine längere Zeit stabil bleiben. «Eine Redox-Flow-Batterie sollte idealerweise etwa 20 Jahre betrieben werden können», sagt er.

Ob ein Materialpaar zusammenpasst, hängt von dem sogenannten Redox-Potenzial der Stoffe ab: bei welcher Spannung sie Elektronen abgeben oder aufnehmen. «Ich habe bereits einige mögliche Paare im Sinn», sagt Reber. Und sollte ein vielversprechendes Paar nicht ganz genau übereinstimmen, können seine Redox-Potenziale mit bestimmten chemischen Handgriffen manipuliert werden. Eine von Rebers Ideen ist, als gelöstes Speichermaterial

ein Chelat zu verwenden: ein mehrarmiges organisches Molekül, das sich um ein Metallion «schlingt». Je nachdem, wie viele Arme das organische Molekül – der Ligand – hat, verändert sich das Redox-Potenzial. An Chelat-basierten Redox-Flow-Batterien forschte Reber bereits während seiner Postdoc-Zeit an der «University of Colorado» in Boulder; dafür wird er im Oktober am Jahresmeeting der «Electrochemical Society» in Göteborg mit dem prestigeträchtigen «Battery Division Postdoc Award» ausgezeichnet.

Am Ende seiner «Ambizione»-Förderungszeit von vier Jahren hofft Reber, eine gut funktionierende Batterie mit einem zusätzlichen festen Speicher zu haben. «Wenn dieser Ansatz funktioniert, sind die Einsatzmöglichkeiten sehr vielfältig», sagt er. So könnten kompakte Flow-Batterien mit flexiblem Formfaktor im urbanen Raum deutlich einfacher integriert werden. «Alles, was es dafür braucht, wären Pumpen und ein paar Schläuche», ergänzt der Forscher. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s501](http://www.empa.ch/web/s501)

Foto: Empa

Foto: Empa



# EIN SPRUNGBRETT FÜR DIE BATTERIEFORSCHUNG

Empa-Forscher wollen die Entwicklung dringend benötigter neuer Energiespeicher mit Hilfe des Batterieroboters «Aurora» beschleunigen. Das Projekt gehört zur europäischen Forschungsinitiative «Battery2030+», die unlängst von der EU mit über 150 Millionen Euro gefördert wurde. Zudem ist das Projekt Teil der «Open Research Data»-Initiative des ETH-Rats, die die Digitalisierung und den freien Zugang zu Forschungsdaten vorantreibt.

Text: Andrea Six

Die Welt braucht dringend neuartige Energiespeicher. Komplett neue Konzepte für Batterien zu entwickeln und deren Potenzial zu erkunden, ist zurzeit allerdings ein langwieriger Prozess, wie Corsin Battaglia, Leiter des «Materials for Energy Conversion»-Labors der Empa in Dübendorf, betont «Unser Ziel ist es, diesen Prozess zu beschleunigen», so Battaglia. Diese Beschleunigung manifestiert sich derzeit in Form der Roboterplattform «Aurora», die vollautomatisiert und künftig auch autonom Materialauswahl, Montage und Analyse von Batteriezellen im Labor übernehmen soll. Als Teil der europäischen «Materials Acceleration Platform», die innerhalb des europäischen «Battery2030+»-Projektes «BIG-MAP» aufgebaut wird, sollen die derzeitigen Entwicklungsprozesse rund zehnmal schneller ablaufen.

Für eine international wettbewerbsfähige Batterieforschung und -entwicklung werden nun zeitaufwändige und fehleranfällige Arbeitsschritte im Innovationsprozess mittels «Aurora» automatisiert.

Die Roboterplattform wird derzeit in den Empa-Labors gemeinsam mit der Firma Chemspeed Technologies AG weiterentwickelt. Momentan implementiert Empa-Forscher Enea Svaluto-Ferro die Arbeitsschritte und «trainiert» «Aurora». «Während der Roboter die einzelnen Zellkomponenten in konstanter Präzision wiegt, dosiert und zusammenbaut, Ladezyklen exakt initiiert und abschliesst oder andere repetitive Schritte vollführt, können Forschende aufgrund der generierte Daten den Innovationsprozess weiter vorantreiben», sagt Svaluto-Ferro.

## SMART, AUTONOM UND CHEMIEAGNOSTISCH

Künftig soll «Aurora» darüber hinaus aber auch lernen, autonom zu arbeiten. Mittels maschinellem Lernen könnte die «Aurora» KI so mathematische Modelle erstellen und entscheiden, welche Experimente in einem nächsten Schritt ausgeführt werden sollen und welche Materialien und Komponenten besonders vielversprechende Kandidaten für die gewünschte Batterieanwendung darstellen. Denn weltweit läuft derzeit die Suche nach neuen Batterie-

## EU INVESTIERT 150 MILLIONEN IN NACHHALTIGE BATTERIEN

«Battery 2030+» ist eine europäische Forschungsinitiative, die sich für die Entwicklung der Batterien der Zukunft einsetzt. Ihr Schwerpunkt liegt auf umweltfreundlichen, leistungsstarken und langlebigen Batterien, die für den Übergang zu einer klimaneutralen Gesellschaft wichtig sind. Im Rahmen des EU-Forschungsprogramms «Horizon Europe» vergab die EU vor kurzem über 150 Millionen Euro für Forschungsprojekte, die von «Battery 2030+» koordiniert werden. «Battery 2030+» hat zum Ziel, Europa zum Weltmarktführer bei der Entwicklung und Herstellung umweltfreundlicher Batterien zu machen.

materialien, die kostengünstig und gut verfügbar sind und keine technischen Nachteile mit sich bringen.

Da die Plattform unabhängig von Materialien, Batterie-Chemie und -Generation nutzbar ist, könnten mit ihr also nicht nur Lithium-Ionen-Batterien erforscht werden, sondern künftig auch alternative Natrium-Ionen-Batterien oder



**UNTER SCHUTZ-ATMOSPHÄRE**  
In der Glove-Box kontrolliert Enea Svaluto-Ferro die Prozessschritte.

Foto: Empa

Batterien mit Selbstheilungsmechanismus getestet werden, so Svaluto-Ferro. «Mit der Chemie-agnostischen «Aurora» können wir zudem Prototypen aus unseren Labors, wie etwa Salzwasser-Batterien oder Feststoffbatterien, effizienter und schneller zur Marktfähigkeit bringen», sagt Laborleiter Battaglia.

«Aurora» ist dabei nicht allein. Die Roboterplattform ist eingebettet in die «Open Research Data»-Initiative des ETH-Rats, die zum Ziel hat, die Digitalisierung in der Forschung voranzutreiben und Daten der wissenschaftlichen Gemeinschaft frei zur Verfügung zu stellen. Genutzt wird dabei unter anderem «AiiDA», ein «Open Source Workflow Management»-System, das im Rahmen des Nationalen Forschungsschwerpunktes MARVEL entwickelt wurde. Für die Kommunikation zwischen der «Aurora» KI und der «AiiDA»-Plattform entwickeln Empa-Forschende derzeit in Zusammenarbeit mit Forschenden an der EPFL und am PSI die passende Software. Damit ist «Aurora» die erste Roboter-Plattform, die an das bestehende «AiiDA»-System angekoppelt wird. Daten werden schliesslich an das Daten-Management-System openBIS übergeben, das an der ETH Zürich entwickelt wird.

Für die Batterieforschung bedeutet dies, dass die verschiedenen Prozessschritte, die die vielen Batteriezellen durchlaufen, effizient überwacht und ausgewertet werden und Daten jederzeit zu ihrem Ursprung zurückverfolgt werden können. «Das beschleunigt Innovationsprozesse enorm und stellt der «Industrie 4.0» eine umfassende Digitalisierungsstrategie im Bereich Forschung und Entwicklung zur Seite», so Empa-Forscher Corsin Battaglia. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s501/research](http://www.empa.ch/web/s501/research)



# FAHNDUNG NACH SCHWERMETALLEN

Obwohl strenge Grenzwerte existieren, können alte Batterietypen schädliche Inhaltsstoffe wie Quecksilber, Cadmium und Blei enthalten. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) hat deshalb eine Kontrollkampagne gestartet. Mit einer eigens dafür entwickelten Methode zur Analyse von Schwermetallen hat die Empa die Grundlagen dafür gelegt.

Text: Rémy Nideröst



**RISIKO**  
Alte Batterietypen können zu viele Schwermetalle enthalten.

**A**us unserem Leben sind Batterien als Energiespeicher nicht mehr wegzudenken. Sie sind praktisch allgegenwärtig und werden als Starterbatterien, in Industrieanlagen, aber auch in Alltagsgegenständen wie Spielzeug, Uhren, Radios, Laptops, Handys, Taschenlampen, Hörgeräte usw. verwendet. Der Bedarf an Batterien – wozu auch Akkus gehören – ist riesig. Wegen der extremen Nachfrage nach den in den Stromspeichern verwendeten Rohstoffen werden diese teilweise schon knapp und entsprechend teuer. Daher wird intensiv daran geforscht, knappe oder sogar rare Materialien durch häufiger vorkommende zu ersetzen.

Zudem sind einige Inhaltsstoffe von bestimmten Batterien wie Cadmium oder Blei gesundheitsschädlich oder gar giftig. Auch hier sucht die Wissenschaft nach unproblematischen Ersatzstoffen. Und tatsächlich gibt es vielversprechende Forschungsansätze, um die Nachhaltigkeit von Batterien weiter zu verbessern.

Foto: Empa

## WAS IST DRIN IN EINER BATTERIE?

Obwohl heute auf dem Markt bereits viele weit verbreitete Batterietypen – etwa Lithium-Ionen-Akkus – ohne Schwermetalle erhältlich sind, gibt es immer noch alte Batterietypen mit Schwermetallen. In der Schweiz werden – hauptsächlich durch Grossverteiler – die unterschiedlichsten Batteriemodelle verkauft. Sie unterscheiden sich etwa durch die eingesetzten Materialien. Viele funktionieren auf der Basis von Zink-Mangan oder Lithium-Ionen, die beide ohne Schwermetalle auskommen. Sowohl in Schweiz wie auch in der EU sind Handel und Verkauf von Batterien, die Quecksilber (chemisch: Hg) oder Cadmium (Cd) enthalten, stark eingeschränkt. Es gilt ein Grenzwert für Quecksilber in Batterien von 5 mg/kg und ein solcher von 20 mg/kg für Cadmium. Für Blei gilt eine Deklarationspflicht auf der Batterie resp. auf der Verpackung ab einem Massenanteil von über 40 mg/kg.

Doch was nützen Vorschriften, wenn nicht kontrolliert werden kann, ob sie auch eingehalten werden? Denn bis vor kurzem gab es in der Schweiz kaum eine Möglichkeit, die Einhaltung zu überprüfen; es gab schlicht keine verlässliche und anerkannte Methode, die genannten Elemente in Batterien genau zu bestimmen.

## VIEL ÜBER BATTERIEN GELERNT

Ein Team der Empa-Forschungsabteilung «Advanced Analytical Technologies» um den Chemiker Renato Figi machte sich daher im Auftrag des BAFU daran, eine Methode zu entwickeln, um Analysen der Schwermetalle Quecksilber, Blei und Cadmium in diversen Batterietypen durchführen zu können. Eine Aufgabe, die sich als nicht ganz simpel herausstellen sollte. Denn anders als bei vielen Gegenständen, die zur Analyse ihrer Inhaltsstoffe einfach zerkleinert und dann die chemischen Elemente in

Foto: Empa

einer Lösung durch diverse Spektrometer analysiert werden können, dürfen Batterien nicht einfach geschreddert werden. Schon der Versuch, einen Stromspeicher zu öffnen, kann recht gefährlich werden. Immer wieder gibt es Unfälle, bei denen Batterien durch solche Manipulationen explodiert sind.

Dieser Gefahr durfte sich Claudia Schreiner im Empa-Labor nicht aussetzen. Sie wandte sich daher an einen Empa-Kollegen, einen Spezialisten auf dem Gebiet der Batterien und deren Gefahren. Marcel Held von der Abteilung «Transport at Nanoscale Interfaces» riet ihr vor allem, sämtliche zu untersuchende Batterien zunächst einmal sorgfältig zu entladen. Erst dann darf man sich an das «Innenleben» einer Batterie trauen.

Doch Batterie ist nicht gleich Batterie. Es gibt unzählige verschiedene Bauweisen. Selbst wenn eine Batterie von aussen einer anderen wie ein Zwilling gleich, kann sich der Aufbau im Inneren wesentlich unterscheiden! Und etwas Weiteres stellte sich bei den Arbeiten heraus: Nicht immer stecken die potentiellen Gefahrenstoffe dort, wo man sie vermuten würde. Sie können sich durchaus auch in der harmlos scheinenden Ummantelung befinden.

## EIN LANGER WEG

Doch die mühevollen Arbeit im Labor hat sich gelohnt: Mit der innovativen Methode der Empa können die Inhaltsstoffe der gängigen Batterien nun zuverlässig im Spurenbereich bestimmt werden. Zur Analyse müssen die Batterien zuerst entladen und anschliessend aufgetrennt werden. Die diversen Komponenten der verschiedenen Batterietypen werden sortiert und dann mittels einer Säuremischung kochend unter Druck aufgelöst. So gelangen die Schwermetalle in Lösung und können spektroskopisch bestimmt werden.



**INNENLEBEN**  
Kleine Knopfzellen werden als Ganzes analysiert, grössere Batterien werden zerlegt.

Die Methode ermöglicht es nun, die Einhaltung der bestehenden Vorschriften zu kontrollieren. Sie kommt im Rahmen einer breit ausgelegten Kampagne des BAFU zum Einsatz. Damit die Stichproben der unterschiedlichen Batterietypen ein möglichst repräsentatives Bild liefern, werden im Lauf des Jahres rund 80 verschiedene Batterien ausgewählt und anschliessend bei der Empa analysiert. Die Federführung der Kampagne liegt beim kantonalen Labor Zürich. Die Resultate werden 2024 erwartet. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter:  
[www.empa.ch/web/s502](http://www.empa.ch/web/s502)





**PILOTANLAGE**  
Hier werden ausgediente Batterien in ihre Einzelteile zerlegt.

# NOCH LANGE NICHT DAS ENDE

Die Empa und die Kyburz Switzerland AG suchen gemeinsam nach Wegen, ausgediente Lithium-Ionen-Batterien ressourcenschonend und effizient zu rezyklieren. Eine speziell dafür entwickelte Pilotanlage zerlegt die alten Batterien in ihre Bestandteile, damit die Materialien möglichst sortenrein zurückgewonnen werden können.

Text: Anna Ettlin

Jeder kennt das Phänomen von seinem Handy oder seinem Laptop: Mit der Zeit nimmt die Kapazität der Batterie ab, sodass man immer öfter zum Ladekabel greifen muss. Genau gleich ergeht es auch den viel grösseren Batterien in Elektrofahrzeugen: Obwohl Fahrzeughersteller für Lithium-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen inzwischen eine Lebensdauer von acht bis zehn Jahren garantieren können, müssen auch diese früher oder später rezykliert werden.

In einem vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projekt haben sich der Schweizer Elektrofahrzeughersteller Kyburz Switzerland AG und die Empa zum Ziel gesetzt, ausrangierte Batterien aus Elektrofahrzeugen zu rezyklieren. Dafür entwickelte Kyburz mit Unterstützung der Empa eine Recycling-Anlage, die alte Batterien in ihre Bestandteile zerlegt.

Bevor eine Batterie in der Recycling-Anlage landet, kann sie indes noch ein zweites, manchmal sogar ein drittes Leben erhalten. Nach ihrem ersten Einsatz in den schweizweit bekannten gelben elektrischen Dreiradrollern, die Kyburz für die Schweizerische Post AG herstellt, kann sie zum Beispiel noch in «Second-Life»-Fahrzeugen verwendet werden, die von bereits gebrauchten Batterien angetrieben werden. Sinkt die Kapazität der Batterie weiter, muss auch das noch nicht das Ende sein. Batterien mit verminderter Kapazität könnten etwa in stationären Anwendungen zum Speichern von Solarenergie verbaut werden. Mit diesem «Multi-Life»-Konzept soll die Nachfrage nach primären Rohstoffen in Zukunft signifikant vermindert werden.

## SORGFÄLTIG TRENNEN

Wenn die Kapazität der Batterie auch für diese Weiterverwendung nicht mehr genügt, kommt sie schliesslich in die Recycling-Anlage. «Bei dieser Art von Batterie

sind Kathode, Separator und Anode in mehreren Schichten in einem Kunststoffgehäuse verbaut», erklärt Empa-Forscher Andrin Büchel aus der Abteilung «Technologie und Gesellschaft». Durch ein geschicktes Abrollen des Separators werden die Kathoden und die Anoden – Metallfolien, die mit Partikeln beschichtet sind, um Lithium-Ionen einlagern zu können – in zwei getrennte Behälter sortiert.

Danach geht es an die Rückgewinnung der Elektrodenmaterialien. Die Kathode, eine mit Lithium-Eisen-Phosphat-Partikeln beschichtete Aluminiumfolie, kommt in ein Wasserbad, wo sich die Partikel von der Folie ablösen und nach Dekantieren und Trocknen wieder als Pulver zurückgewonnen werden. Genau gleich verfährt man mit der Anode, die aus einer mit Graphit-Partikeln beschichteten Kupferfolie besteht. In diesem Fall entsteht jedoch eine homogene Suspension, wodurch ein Extraschritt in einer Zentrifuge notwendig ist, um die Partikel abzutrennen.

«Am Ende des Recyclingprozesses erhalten wir das Gehäuse, den Separator, die Aluminium- und die Kupferfolien sowie die Elektrodenmaterialien sortenrein zurück», sagt Büchel. Diese Art von Recyclingverfahren wird als direktes Recycling bezeichnet. «Beim direkten Recycling wird die Batterie nur so weit zerlegt wie nötig, um die funktionalen Eigenschaften der Materialien zu erhalten. Dadurch können wir die Anzahl der notwendigen Arbeitsschritte, auch für die Weiterverarbeitung, möglichst gering halten», so Büchel.

## GENAU ANALYSIEREN

Doch mit dem Zurückgewinnen der Materialien ist die Arbeit noch nicht getan. Damit diese wieder in einer neuen Batterie zum Einsatz kommen können, müssen sie regeneriert werden. Genau daran arbeitet zurzeit Büchel abteilungs-

übergreifend mit seinem Empa-Kollegen Edouard Quérel. Im Batterielabor der Abteilung «Materials for Energy Conversion» haben sie bereits den Mechanismus hinter der Alterung des Kathodenmaterials aufgedeckt. «Das Lithium-Eisen-Phosphat hat eine kristalline Struktur, die bei jedem Lade- und Entladezyklus Lithium-Ionen abgibt und wiederaufnimmt», erklärt Büchel. «Diese Struktur bleibt erhalten, aber die Menge an aktiven Lithium-Ionen nimmt mit der Zeit ab». Zurzeit arbeiten die Forschenden daran, das Kathodenmaterial durch gezielte Zugabe von Lithium wieder «aufzufrischen». Das Endziel: Aus dem recycelten Material möglichst leistungsfähige neue Batterien bauen und den Kreislauf schliessen.

«Beim direkten Recycling wird die Batterie nur so weit zerlegt wie nötig.»

Bei herkömmlichen Recyclingverfahren werden Batterien geschreddert und die Wertstoffe mittels thermischen und nasschemischen Prozessen separiert. Das direkte Recycling soll im Vergleich dazu ressourcenschonender sein, indem es weniger Energie verbraucht und keine Chemikalien einsetzt. Allerdings eignet sich das von Kyburz und der Empa entwickelte Verfahren im Moment nur für die spezifische Bauweise und Zellchemie der Batterien, wie sie unter anderem in Kyburz-Fahrzeugen zum Einsatz kommen. «Ob und wie sich dieses Verfahren auch auf andere Zelltypen übertragen lässt, untersuchen wir zurzeit im Rahmen des Innosuisse-Projekts «CircuBAT», an dem neben Kyburz 23 weitere Partnerfirmen sowie elf Forschungspartner beteiligt sind», sagt Büchel.

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s506](http://www.empa.ch/web/s506)



# WEITSICHT BEWIESEN

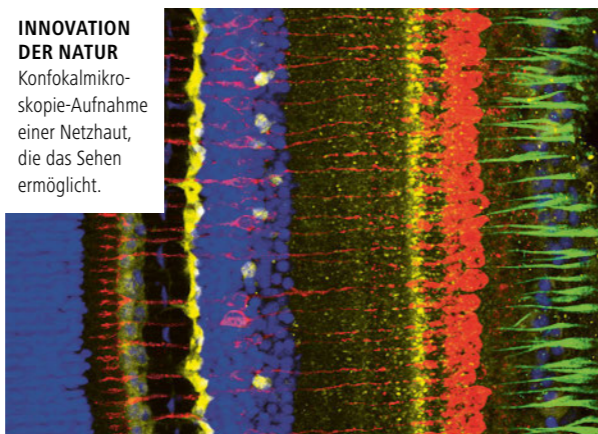
Als innovativer Instrumentenmacher für die Chirurgie gründete Heinz A. Oertli in jungen Jahren die Oertli Instrumente AG. Jetzt fördert er mit einem gleichnamigen Fonds im Rahmen des Zukunftsfonds innovative Projekte an der Empa.

Text: Andrea Six

**A**n Ideen hat es ihm nie gefehlt – Heinz A. Oertli machte sich im Alter von 24 Jahren als Instrumentenmacher für die Augen- chirurgie selbstständig, mitsamt seinem Ideenreichtum. Dank seinen begehrten Innovationen wuchs der ursprüngliche Einmannbetrieb zügig zu einem Qualitätswerk im St. Galler Rheintal mit heute rund 220 Mitarbeitenden an, das er allerdings vor rund 30 Jahren in andere Hände übergab. Die jüngste Idee des mittlerweile über 90-jährigen Erfinders kam ihm vor einiger Zeit bei einem Besuch der Empa in St. Gallen: Die Forschung an der Innovationsschmiede Empa, insbesondere im Bereich der Instrumentenentwicklung, könnte man doch zusätzlich mit privaten Mitteln voranbringen.

Die Gemeinsamkeit des ehemaligen Instrumentenmachers mit den Materialforschenden der Empa gehen dabei über den Innovationsgeist hinaus: Auch die Faszination für innovative Materialien und Technologien hielten Oertli bereits zu Beginn seiner Unternehmertätigkeit in Bann. Als Pionier in seinem Gebiet suchte er für die Augen- chirurgie neue Materialien für rostfreie, antimagnetische Präzisionsinstrumente. Fündig wurde er in der Uhrenindustrie, die vergleichbare Ansprüche an ihre Werkzeuge stellt. Diesen ihm eigenen Tüftlersinn fördert Heinz A. Oertli nun mit einem gleichnamigen Fonds im Rahmen des Empa Zukunftsfonds.

**INNOVATION DER NATUR**  
Konfokalmikroskopie-Aufnahme einer Netzhaut, die das Sehen ermöglicht.



## DRUCKSENSOR ZUR SELBSTHEILUNG

Nun unterstützt der 2022 gegründete «Heinz A. Oertli-Fonds» die ersten beiden Projekte. Eines davon befasst sich mit neuen Therapiemöglichkeiten für den Grünen Star. Ziel ist es, das Auge zu befähigen, sich ohne ärztliche Hilfe selbst zu behandeln. Bei Menschen, die an einem Glaukom leiden, sterben die Nervenzellen in der Netzhaut mit der Zeit ab – bis hin zur Erblindung. Bei einem Grossteil der Betroffenen stellt ein erhöhter Innendruck im Auge ein Risiko für die Ausbildung des Grünen Star dar. Empa-Forschende um Yashoda Chandorkar und Markus Rottmar vom «Biointerfaces»-Labor in St. Gallen entwickeln nun gemeinsam mit der Abteilung für Ophthalmologie am Tierspital Zürich ein selbstregulierendes System aus einem winzigen hochempfindlichen Sensor, der den Augendruck misst und über ein Ventil aus einem bioverträglichen Hydrogel den Druck der Kammerflüssigkeit im Auge normalisiert.

## LÖTEN STATT NÄHEN

Ein zweites Projekt, das ebenfalls durch den «Heinz A. Oertli-Fonds» unterstützt wird, hat zum Ziel, dank einem laser-basierten Klebverfahren das hochempfindliche Augengewebe bei Operationen zu schonen. Bisher ist bei Eingriffen an der Linse bei Grauem Star oder bei

Hornhaut-Operationen der Einsatz von Nadel und Faden üblich. Laser-basiertes Arbeiten wird derzeit zwar angewendet, allerdings basiert es auf einem Schweißverfahren bei entsprechend hohen Temperaturen. Inge Herrmann, ETH-Professorin und Leiterin der «Nanoparticle Systems Engineering»-Gruppe an der Empa in St. Gallen, entwickelt mit ihrem Team ein minimal-invasives Laserlötverfahren, mit dem Wunden am Auge effizient und schonend geschlossen werden können. Das biologische Lötmaterial mit sogenannten Nanoabsorbieren soll die mechanischen Eigenschaften im Gewebe verbessern, die Heilung beschleunigen und die Narbenbildung mindern. Das Projekt kann nun dank der Unterstützung durch den «Heinz A. Oertli-Fonds» in Zusammenarbeit mit dem Kantonsspital St. Gallen und dem Universitätsspital Zürich starten. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s404](http://www.empa.ch/web/s404) / [www.empa.ch/web/s403](http://www.empa.ch/web/s403)

Foto: PC Koch, M.Hess, J. Neurosci Res. 89:1316 (2011); doi:10.1002/jnr.22651

# Die Medizin von morgen möglich machen.



Machen Sie den Unterschied!  
Unterstützen Sie den  
Empa Zukunftsfonds «Medizin».  
[empa.ch/zukunftsfonds](http://empa.ch/zukunftsfonds)

 **Empa**  
Zukunftsfonds



# SO KOMMT BAHNLÄRM NICHT ZUM ZUG

An der Empa erkunden Akustik-Fachleute seit Jahren, wie Lärm durch Personen- und Güterzüge entsteht – und welche technischen und baulichen Massnahmen dagegen besonders wirksam sind. Ihre theoretischen und praktischen Erkenntnisse sind nun in das Projekt «SILVARSTAR» eingeflossen. Das Resultat ist ein Simulationstool für Bahnlärm, das auch in der Praxis weiterhelfen kann.

Text: Norbert Raabe



## BAHNLÄRM BEWERTEN

Der Monitor zeigt, was die Nutzerin in virtueller Realität dreidimensional sieht – mit dem realistischen Bahnlärm exakt in ihrer Position.

Für Anwohner von Bahnstrecken ist er oftmals lästig – und für Fachleute, die ihnen helfen möchten, eine so vielschichtige Herausforderung, dass es eigentlich einen Plural von «Bahnlärm» geben müsste. Rollgeräusche von Stahlrädern auf rauen oder glatteren Schienen, Bremsstöne in unterschiedlichen Frequenzen, Motorenlärm, aerodynamische Geräusche... – das alles gedämpft oder beeinflusst von Lärmschutzwänden, Böschungen, der Beschaffenheit des Bodens unter den Gleisen und auch von der Umgebung, in der sich die Schallwellen ausbreiten.

Wie komplex diese akustischen Folgen des Schienenverkehrs sind, wissen Empa-Forschende um Gruppenleiter Reto Pieren von der Abteilung «Akustik / Lärminderung» aus praktischer und theoretischer Erfahrung. Seit Jahren erkunden sie das Phänomen mit Messungen, Simulationen, Validierungen: Erkenntnisse, die in das zweijährige EU-Projekt «SILVARSTAR» mit vielen Partnern (siehe Infobox) mündeten. Die Resultate präsentierte Pieren

## INTERNATIONALES PROJEKT MIT FÖRDERUNG DER EU

Das europäische Forschungsprojekt «SILVARSTAR», das gut zwei Jahre lief, wurde im Rahmen des EU-Programms «Horizon 2020» durch «Europe's Rail» gefördert. Im Projekt-Konsortium wirkten neben der Empa industrielle und akademische Partner aus fünf europäischen Ländern mit: Vibratex (Frankreich, Koordination), Wölfel Engineering (Deutschland), die «University of Southampton» (England), KU Leuven und UNIFE, die «Union des Industries Ferroviaires Européennes» (beide aus Belgien). Neben der Simulation von Bahnlärm entwickelte das Projekt ausserdem Modelle für die Erschütterungen des Untergrundes durch Zugverkehr.

Foto: Empa

kürzlich an der Fachtagung «forum acusticum» in Turin: eine akustische Simulation von Bahnlärm unterschiedlichster Ausprägungen – hör- und erlebbar mit Hilfe von virtueller Realität.

Solche Tools für die «Auralisation» gibt es vereinzelt als Prototypen in der Forschung, doch in der Praxis von Planung und Lärmschutz sind sie bislang nicht verfügbar. Das «Komplettpaket» SILVARSTAR soll das ändern – dank des gebündelten Wissens vieler Fachleute. Während das Empa-Team, das bei der Simulation die Projektleitung innehatte, sein akustisches Expertenwissen aus zahlreichen Projekten einfliessen liess, steuerten Fachleute von der «University Southampton» und der Zürcher Firma Bandara VR GmbH wertvolles Knowhow bei, um ein nutzerfreundliches System zu entwickeln. Als Grundlage dazu diente unter anderem die verbreitete Software «Unity» für professionelle Game-Entwickler.

## VIELE FAKTOREN

Ziel war schliesslich ein Tool, das auch Laien nutzen können. Zum Beispiel Verkehrspolitiker, die Auswirkungen einer künftigen Bahntrasse abschätzen möchten. Wie sie solche virtuellen Vorbeifahrten erleben, zeigt beispielhaft ein Video von Vorbeifahrten, das im SILVARSTAR-Webauftritt der Empa zu finden ist: Für eine einzige Strecke lassen sich mehrere Szenarien vergleichen, zum Beispiel mit Zugtypen vom Güterzug über eine Regionalbahn bis zum ICE, mit hohen oder niedrigen Lärmschutzwänden, spezifischen Rad- und Dämpfungstypen, die ebenfalls einen hörbaren Einfluss auf den Bahnlärm haben, und vielen weiteren Faktoren. Und weil auch die Umgebung eine Rolle spielt, können Nutzer zwischen «Stadt» oder «Land» entscheiden oder eine ebenerdige oder erhöhte Position wählen, etwa auf einem Balkon. Hinter diesen Möglichkeiten stecken komplexe Algorithmen in einem

physik-basierten Rechenmodell, das akustische Signale nicht aus archivierten Tondateien erzeugt, sondern allesamt einzeln berechnet und erzeugt – für hunderte Geräuschquellen und Einflussfaktoren, je nach Komplexität des Szenarios. Das stellte das Empa-Team auch vor Herausforderungen. Die grosse Vielfalt von Einflüssen ermöglicht zwar realitätsnahe Simulationen. Doch sie erforderte zugleich, das Geflecht der Algorithmen sinnvoll auf das Wesentliche zu reduzieren – auch mit Blick auf die nötige Rechenzeit: Bis zu drei Stunden benötigt ein moderner PC für eine Vorbeifahrt eines 500-Meter-Güterzugs, damit dessen Lärmemissionen unter verschiedenen Bedingungen hörbar gemacht werden können.

## GLAUBWÜRDIG UND GENAU

Doch der Aufwand lohnt sich, wie die Validierung des Systems zeigte. Die Grafiken der synthetisierten Lärmverläufe liegen sehr nahe bei gemessenen Vergleichswerten und sind sogar teils deckungsgleich. Subjektive Eindrücke lieferten Vorführungen an Verkehrstechnik-Messen wie der «InnoTrans» im vergangenen Jahr in Berlin: Die Besucher attestierten der Simulation eine hohe Glaubwürdigkeit und zeigten grosses Interesse an der Anwendung des virtuellen «Bahnlärm-Spiels».

Für Interessenten ist der Download der Tools mitsamt Lizenzvereinbarung für nicht-kommerzielle Zwecke über die SILVARSTAR-Webseite der Empa möglich. «Die ersten Einsätze der Simulation beginnen bereits», sagt Empa-Forscher Reto Pieren, «wir sind mit den Resultaten sehr zufrieden und erwarten für die Zukunft zahlreiche Anwendungen.» ■

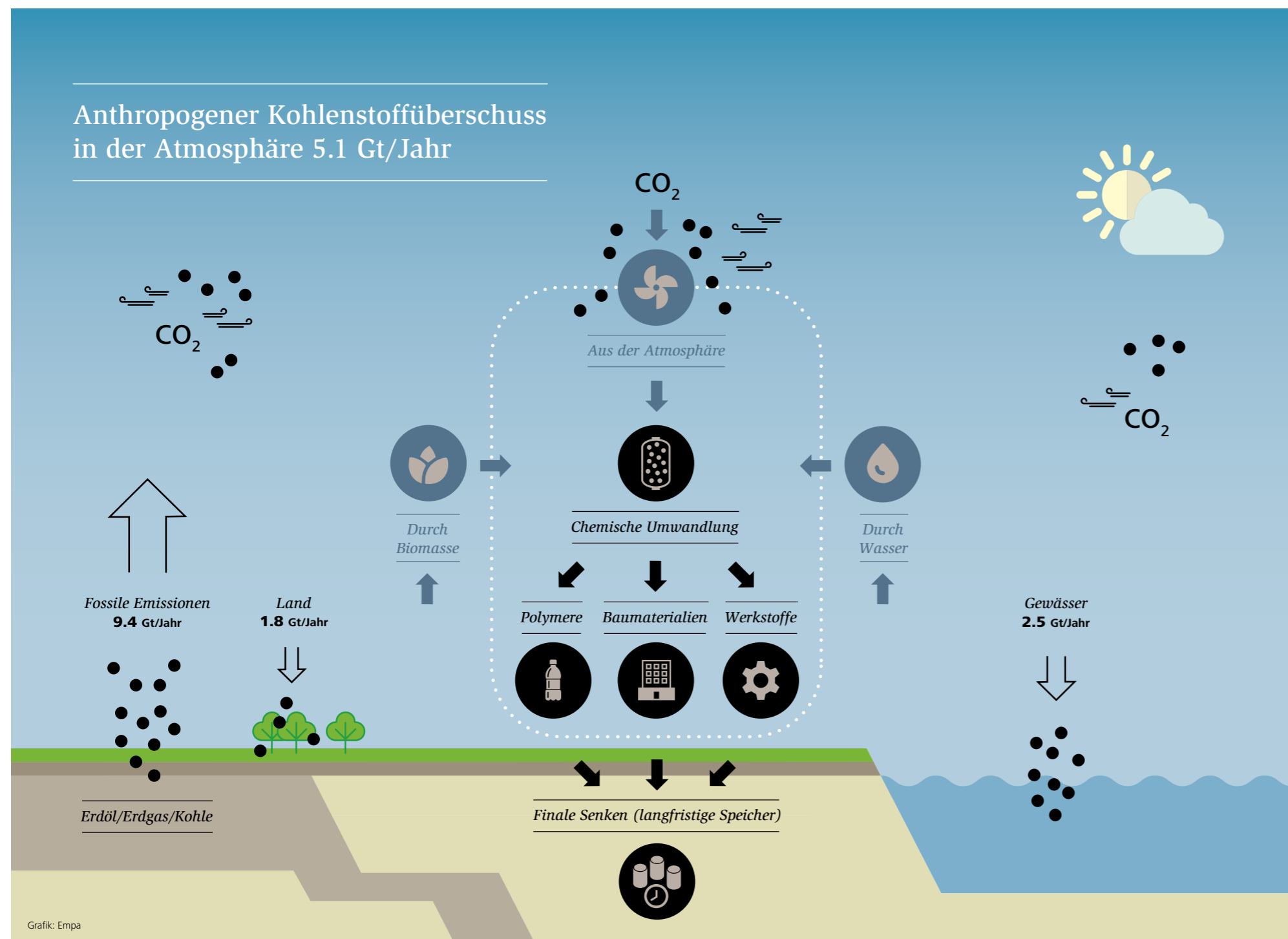
Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s509](http://www.empa.ch/web/s509)



# AUS DER LUFT GEWONNEN

Um irreversible Veränderungen des Klimasystems zu verhindern, müssen wir der Atmosphäre überschüssiges, vom Menschen verursachtes CO<sub>2</sub> wieder entziehen. Das ist das Ziel einer gross angelegten Forschungsinitiative der Empa: «Mining the Atmosphere».

Text: Michael Hagmann



Grafik: Empa

## «WISSEN2GO»

CO<sub>2</sub> EINFANGEN, VERWERTEN UND SPEICHERN, UM NETTO-NULL ZU ERREICHEN



Mittwoch, 25. Oktober 2023  
Empa Akademie und online via Zoom

Fossile Energieträger sind schlicht ... genial: einfach zu handhaben, hohe Energiedichte, vielseitig einsetzbar, in grossen Mengen verfügbar. Sie sind, das Fundament unseres technologischen Fortschritts und Wohlstands der letzten 200 Jahre. Dafür zahlen wir einen hohen Preis: Die Erde steuert auf den Klimakollaps zu. Jedes Jahr «pumpen» wir netto rund 9.4 Milliarden Tonnen Kohlenstoff (in Form von CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre. Durch natürliche Prozesse, vor allem über die Vegetation und die Weltmeere, wird dieser gigantische Ausstoss zwar teilweise kompensiert. Unterm Strich bleibt jedoch ein «Plus» von rund 5.1 Milliarden Tonnen atmosphärischem Kohlenstoff – jedes Jahr. Bereits seit 1988 liegt die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre über 350 ppm («parts per million»), der als Grenzwert für Klimastabilität gilt. Wird dieser längere Zeit überschritten, droht das Klimasystem der Erde zu kippen – mit teils irreversiblen Folgen.

Weiter wie bisher ist also keine Option, und auch Netto Null ist nur ein Zwischenziel. Gefragt ist ein gesamtheitlicher Lösungsansatz, der sich technisch umsetzen und auch finanzieren lässt. Womit wir bei «Mining the Atmosphere» wären. Im Unterschied zum blossen Einfangen des CO<sub>2</sub> und dessen Speicherung im Boden – der notwendige erste Schritt – geht der «Mining»-Ansatz wesentlich weiter: Ziel ist es, ein gänzlich neues globales Wirtschaftsmodell und den dazugehörigen Industriesektor zu

entwickeln, der CO<sub>2</sub> als Rohstoff der Zukunft in wertbringende Materialien umwandelt, um herkömmliche Baustoffe und Petrochemikalien zu ersetzen. Der Ansatz postuliert also einen Perspektivenwechsel: Wo bisher Rohstoffe in unterirdischen Minen abgebaut wurden, kehrt sich der Blick nun um Richtung atmosphärische «Mine». Gleichzeitig betrifft dies die ganze Gesellschaft, die sich von einer CO<sub>2</sub>-emittierenden Gesellschaft über die Energiewende in den nächsten 20 Jahren Richtung Netto Null hin zu einer CO<sub>2</sub>-bindenden Gesellschaft wandelt.

Soweit die Idee – deren Umsetzung eine Jahrhundertaufgabe ist, für die unzählige Akteure aus Forschung und Wirtschaft zusammenspannen müssen. Denn es gilt, schätzungsweise 400 Milliarden Tonnen Kohlenstoff (also rund 1500 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre zu entfernen. Und das ist erst der Anfang. Dann heisst es, diesen Kohlenstoff in wertschöpfende Materialien umzuwandeln, Polymere, Baumaterialien etc. Vor allem dem Bausektor kommt dabei eine Schlüsselrolle zu, könnten doch Beton und Co. aufgrund ihrer Masse einen enormen Teil des atmosphärischen Kohlenstoffs binden. Die kohlenstoffhaltigen Materialien könnten nach mehrmaligem Rezyklieren am Ende ihres «Lebens» als finale Kohlenstoffsenke deponiert werden. ■

Erfahren Sie mehr über dieses Thema in der Dezember-Ausgabe des Empa Quarterly.



## «MINING THE ATMOSPHERE»: NACHHALTIGER BAUEN



**CO<sub>2</sub>-SENKE**  
Ein Dämmmaterial aus pflanzlichen Rohstoffen könnte dauerhaft CO<sub>2</sub> binden.

Bauen wir in Zukunft mit CO<sub>2</sub>? Das Seminar «RFA Built Environment» am 7. November zeigt eine breite Palette an Empa-Forschung, die sich um das Konzept «Mining the Atmosphere» dreht, also darum, überschüssiges CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entnehmen und als nachhaltige Ressource etwa für die Bauindustrie zu verwenden. Der kostenlose Anlass richtet sich an Interessenvertreter, Praktikerinnen und Forschende aus den Sektoren Bau, Gebäude und Infrastruktur, Energie, Umwelt und Nachhaltigkeit.

Anmeldung bis 30. Oktober unter: [www.empa-akademie.ch/rfa](http://www.empa-akademie.ch/rfa)

## ÜBER PLASTIK SPRECHEN

Unter dem Thema «Plastik: Erfolg – um welchen Preis?» findet am Donnerstag, 26. Oktober, eine Podiumsdiskussion im Kursaal Engelberg statt. An dem von der Academia Engelberg organisierten Anlass sprechen auch die Empa-Forschenden Bernd Nowack und Claudia Som aus dem Labor «Technologie und Gesellschaft» über die Umweltbelastung durch Plastik und darüber, was wir dagegen tun können. Der Anlass ist öffentlich und kostenlos.

Anmeldung bis 15. Oktober unter: [academia-engelberg.ch](http://academia-engelberg.ch)



**PLASTIKABFALL**  
Die Podiumsdiskussion mit Fachleuten der Empa widmet sich der Umweltbelastung durch Plastik.

Fotos: Jamis Weimery/Empa; Adobe Stock

Fotos: Empa

## WIRTSCHAFT UND NACHHALTIGKEIT GEHEN HAND IN HAND



**EXPERTISE**  
Empa-Direktorin Tanja Zimmermann (oben rechts) und Laborleiter Mirko Kovac waren unter den Speaker des Symposiums.

Vom 5. bis 7. September fand in Winterthur das «Swiss Green Economy Symposium» statt. Die Konferenz zu Wirtschaft und Nachhaltigkeit in der Schweiz stand unter dem Themenschwerpunkt «Gemeinsam mehr Wirkung erzeugen» und zeigte an konkreten Beispielen auf, wie die Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und NGOs zu mehr Wohlstand, zum Schutz der Umwelt und zu einem nachhaltigeren Zusammenleben beitragen. Die Empa war wissenschaftlicher Partner am Anlass. Unter den 250 Speaker waren auch die Empa-Direktorin Tanja Zimmermann sowie Mirko Kovac, Leiter des «Sustainability Robotics Lab» an der Empa. Weitere Empa-Forschende beteiligten sich an verschiedenen Innovationsforen.

[sges.ch](http://sges.ch)

## VERANSTALTUNGEN

24. – 25. OKTOBER 2023

**Konferenz:** Precision Photonic Systems '23  
**Zielpublikum:** Wissenschaft und Industrie  
[www.empa-akademie.ch/precision-photonic](http://www.empa-akademie.ch/precision-photonic)  
OST Campus Buchs, St. Gallen

25. OKTOBER 2023

**Wissen2go:** CO<sub>2</sub> einfangen, verwerten und speichern, um Netto-Null zu erreichen  
**Zielpublikum:** Öffentlichkeit  
[www.empa.ch/web/w2go/netto-null](http://www.empa.ch/web/w2go/netto-null)  
Empa, Dübendorf

07. NOVEMBER 2023

**Seminar RFA Built Environment:**  
Mining the Atmosphere  
**Zielpublikum:** Wissenschaft und Wirtschaft  
[www.empa-akademie.ch/rfa](http://www.empa-akademie.ch/rfa)  
Empa, Dübendorf

16. NOVEMBER 2023

**Kurs:** Metallische Gläser  
**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
[www.empa-akademie.ch/metallglas](http://www.empa-akademie.ch/metallglas)  
Empa, Dübendorf

16. NOVEMBER 2023

**Technology Briefing:** Switzerland's Climate Neutrality 2050: The Journey through Energy Storage Technologies  
**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
[www.empa.ch/web/tb/energy-storage](http://www.empa.ch/web/tb/energy-storage)  
EPFL Auditorium, Neuchâtel

Die komplette Liste der Veranstaltungen finden Sie unter: [www.empa-akademie.ch](http://www.empa-akademie.ch)

## KOSTENLOSES ABO

## Lesen Sie Empa Quarterly

Einfach Postkarte ausfüllen – und schon liegt unser Forschungsmagazin viermal jährlich in Deutsch, Englisch oder Französisch bei Ihnen im Briefkasten. Völlig kostenlos.

Oder online unter [www.empaquarterly.ch](http://www.empaquarterly.ch)



Empa  
Redaktion Empa Quarterly  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf  
Switzerland



Empa  
Redaktion Empa Quarterly  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf  
Switzerland



JETZT KOSTENLOS ABONNIEREN

# Empa Quarterly

FORSCHUNG & INNOVATION



[www.empa.ch/web/s604/subscribenews](http://www.empa.ch/web/s604/subscribenews)

## GESCHENKABO FÜR:

Englisch

Deutsch

Französisch

Anrede  Frau  Herr

Vorname, Name \_\_\_\_\_

Firma \_\_\_\_\_

Strasse \_\_\_\_\_

PLZ, Ort \_\_\_\_\_

Land \_\_\_\_\_

E-Mail \_\_\_\_\_

Empfehlung durch \_\_\_\_\_

Ihre Daten werden vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

Ja, ich möchte Empa Quarterly kostenlos abonnieren.

Englisch

Deutsch

Französisch

Ich habe eine neue Adresse: Abonnenen-Nr. \_\_\_\_\_

Anrede  Frau  Herr

Vorname, Name \_\_\_\_\_

Firma \_\_\_\_\_

Strasse \_\_\_\_\_

Postfach \_\_\_\_\_

PLZ, Ort \_\_\_\_\_

Land \_\_\_\_\_

E-Mail \_\_\_\_\_

Ihre Daten werden vertraulich behandelt und nicht an Dritte weitergegeben.

THE PLACE WHERE INNOVATION STARTS.