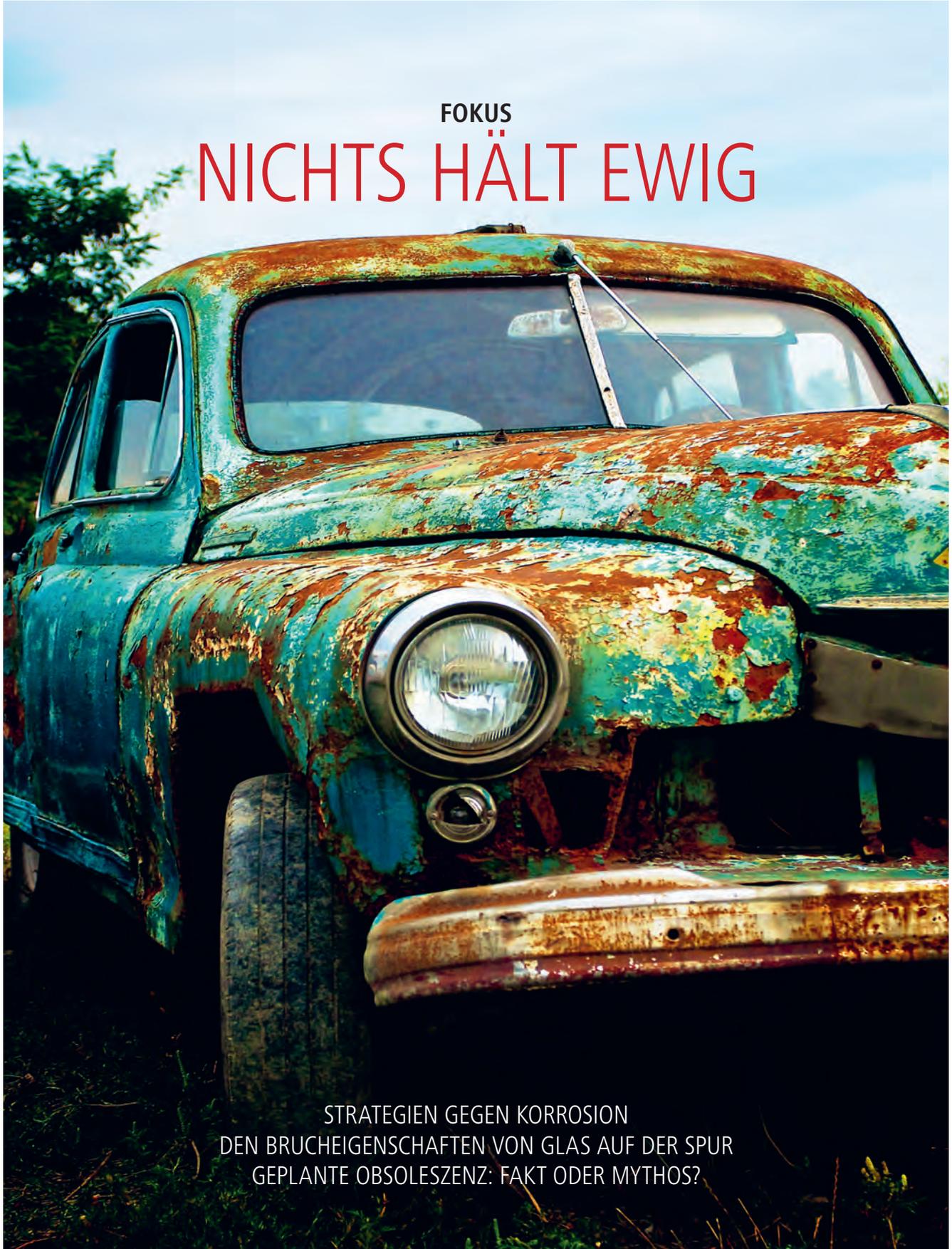


# Empa Quarterly

FORSCHUNG & INNOVATION II #66 II OKTOBER 2019

FOKUS

## NICHTS HÄLT EWIG



STRATEGIEN GEGEN KORROSION  
DEN BRUCHEIGENSCHAFTEN VON GLAS AUF DER SPUR  
GEPLANTE OBSOLESZENZ: FAKT ODER MYTHOS?

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

# [ INHALT ]

[ FOKUS: NICHTS HÄLT EWIG ]



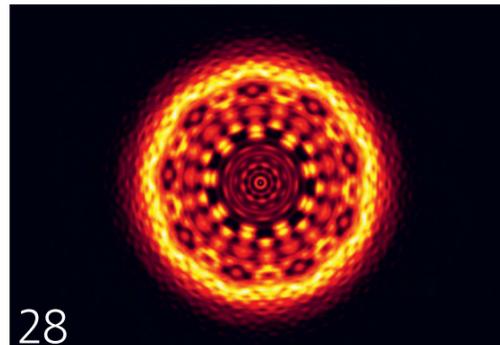
18



10



32



28



06

Fotos: Unsplash, Empa

[ FOKUS ]

**06 KORROSION**  
Materialversagen verhindern, bevor es zur Katastrophe kommt

**10 GLAS**  
Den Bruchigenschaften auf der Spur

**13 ELEKTRONIK**  
Geplante Obsoleszenz: Fakt oder Mythos?

[ THEMEN ]

**18 HOLZ**  
Vom nachwachsenden Rohstoff zum High-tech-Material

**21 IMPLANTATE**  
Orthopädische Schrauben mit funktionalisierten Oberflächen

**24 PORTRAIT**  
Jean Marc Wunderli forscht am Lärmschutz

**28 WUNDHEILUNG**  
Mit Terahertz-Strahlung durch das Pflaster blicken

**30 MOBILITÄT**  
Neuartiger Ventiltrieb spart bis zu 20 Prozent Treibstoff

**32 MUSIK**  
Historische Posaunen originalgetreu nachbauen

[ RUBRIKEN ]

**04 WISSEN IM BILD**

**16 IN KÜRZE**

**34 UNTERWEGS**

[ TITELBILD ]



Wenn Material korrodiert, verliert es wichtige Eigenschaften – und kann versagen. Die Empa forscht daran, diese Prozesse zu verstehen – und wenn möglich zu verhindern.  
Bild: istock

[ 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  
empaquarterly@empa.ch  
www.empaquarterly.ch

**VERÖFFENTLICHUNG**  
Erscheint viermal jährlich  
**ANZEIGENMARKETING**  
rainer.klose@empa.ch

ISSN 2297-7406  
Empa Quarterly (deutsche Ausg.)



No. 01-19-120301 – www.myclimate.org  
© myclimate – The Climate Protection Partnership



Foto: istock

## ÜBER DIE VERGÄNGLICHKEIT DER DINGE

Liebe Leserin,  
lieber Leser



Im Prinzip gibt es nur eine Richtung: bergab. Kaum ist etwas entstanden, nagt auch schon der Zahn der Zeit daran. Will man dem langsamen Zerfall etwas entgegenstellen, muss man erheblichen Aufwand betreiben.

Oft hört man, dass früher alles besser war – zumindest, was die Lebensdauer von Produkten anbelangt. Womöglich, so ein oft kolportierter Verdacht, haben umsatzwütige Unternehmen ihren Produkten gar ein programmiertes Verfallsdatum eingepflanzt. Doch die Wahrheit ist – wie so häufig – komplizierter, wie der Artikel auf S. 13 dieser Ausgabe zeigt.

Auch in der Materialforschung spielen Alterungs- und Ermüdungsprozesse eine wesentliche Rolle. Denn nur wenn man die Prozesse bis ins letzte Detail versteht, kann man ein Versagen frühzeitig vorhersagen beziehungsweise gar verhindern, etwa durch rechtzeitiges Reparieren oder Verstärken. Daher sind Schadensanalysen wie bei dem Kollaps der Morandi-Brücke in Genua enorm aufschlussreich.

Auf der anderen Seite hilft ein tiefes Verständnis der Schwachstellen verschiedener Materialien und Systeme auch dabei, neuartige Materialien zu entwickeln, die nicht mehr – oder zumindest nicht mehr so schnell – altern, zerfallen oder zu Bruch gehen (S. 6). In manchen Fällen ist Vergänglichkeit dagegen durchaus erwünscht, etwa bei sich selbst auflösenden chirurgischen Schrauben, die Patienten eine zweite Operation erspart (S. 21).

Viel Vergnügen, und bis zur nächsten Ausgabe!

Ihr MICHAEL HAGMANN



**GEFRORENE WOLKEN**

Aerogele sind die leichtesten bekannten Feststoffe. Die nanoporösen Strukturen erlauben Anwendungen in den Bereichen Pharmazie, Wärmedämmung und Katalyse. Hergestellt aus Cellulose, dem weltweit am häufigsten vorkommenden Polymer, mit attraktiven Eigenschaften wie biologischer Abbaubarkeit und Recyclingfähigkeit, ist dies ein nicht traditionelles Aerogel. Seine Eigenschaften sind gleichbedeutend mit Wolken, die geringe Dichte und Transluzenz zeigen.

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/de/web/s604/aerogel](http://www.empa.ch/de/web/s604/aerogel)

Foto: Deepanshu Sivaraman und Michal Garobjak

# SCHLEICHENDER ZERFALL

«Korrosion» stammt vom lateinischen «corrodere», zernagen. Darunter versteht man die allmähliche Zerstörung eines Stoffes durch Einwirkung von Stoffen aus seiner Umgebung. Spezialisten der Empa nehmen solche Prozesse unter die Lupe und können Wege finden, um Materialversagen durch Korrosion zu verhindern – lange bevor sich Katastrophen wie in Genua ereignen.

Text: Rainer Klose



## KORROSION IST ÜBERALL

Sie zerstört wertvolle Infrastruktur und kostet Milliarden. Doch nicht nur altbekannte Metalle korrodieren: neuartige Verbundwerkstoffe und Dünnschicht-Technologien werfen neue Fragen auf. Die Empa findet Antworten.

Der Bauherr einer neuen Schweizer Industrieanlage für Hightech-Geräte stand vor einem Rätsel: Kilometerlange, nagelneu verlegte Druck- und Kühlleitungen aus nichtrostendem Stahl und Aluminium im Wert von mehreren hunderttausend Franken gingen noch während des Baus an zu korrodieren. Was hatte die Metalle so schnell angegriffen? Experten der Empa nahmen das ganze System unter die Lupe: Waren korrosive Baustoffe im Spiel, waren Reinigungsmittel schuld, oder waren schlicht die falschen Materialien ausgewählt worden? Schliesslich fanden sie den Schuldigen in Form einer kleinen Flasche auf einem Werkstattwagen: Der Montagetrupp hatte statt eines professionellen Dichtigkeitsprüfmittels ein Universalreinigungsmittel aus dem Supermarkt verwendet, um mit dem Schaum Undichtigkeiten zu lokalisieren. Doch das Mittel aus dem Supermarkt enthielt Säuren und Chloride, die die Metalle korrodieren liessen.

Szenenwechsel: Dem Hausmeister einer Schule in der Ostschweiz fällt bei Reinigungsarbeiten in den Frühjahrsferien 2019 Korrosion an den Befestigungen der Deckenlampen in der Turnhalle auf. Die Schulverwaltung zieht den Architekten zu Rate, der den Bau seinerzeit beaufsichtigt hatte. Der Architekt informiert die Empa. Die Deckenverkleidung wird abgebaut. Ergebnis: Die gesamte Deckenkonstruktion weist massive sicherheitsrelevante Korrosionsschäden auf. Bei der Sanierung einige Jahre zuvor hatten die Arbeiter, aus Unkenntnis des Materials, Metallhaken durch Isolationsplatten aus Phenolharz-Schaum gebohrt. Kondenswasser liess die Isolation später feucht werden. Der Phenolharzschaum entwickelte daraufhin starke Säuren, die die Befestigungshaken praktisch durchrosten liessen. Die Decke wäre irgendwann herabgestürzt.

Foto: iStock

## INGENIEUR UND WISSENSCHAFTLER – ZWEI HERZEN IN EINER BRUST

Ist das also die typische Tätigkeit von Korrosionsforschern? Sind sie so etwas wie die Pathologen der Bauwirtschaft, die Material-Leichen sezieren und immer von Neuem nach Tätern suchen? Keineswegs. Korrosionsforscher sind viel mehr. Sie arbeiten an der Schnittstelle zwischen Materialwissenschaft und Konstruktion einerseits, Chemie und Physik andererseits. Mit einem Bein sind sie Ingenieure, mit dem anderen Naturwissenschaftler. Und sie betrachten nicht nur Fehler der Vergangenheit, sie blicken auch in die Zukunft.

Ein Beispiel: die Wasserstoffwirtschaft. Die angestrebte Energiewende wird es in den nächsten Jahren nötig machen, grosse Mengen an Überschussstrom in Wasserstoff umzuwandeln. Nur so ist Solar- und Windstrom aus dem Sommer bis in den Winter speicherbar. Doch dazu braucht es nicht nur Speichertanks, sondern auch Leitungen, Ventile, Zapfpistolen, Transportfahrzeuge und diverses Zubehör, etwa Zählwerke für die gelieferte Menge des Gases. All dies muss aus hochfes-

## KURS «ELEKTROCHEMISCHE CHARAKTERISIERUNG UND KORROSION»

Am 7. Februar 2020 findet an der Empa Akademie in Dübendorf der eintägige Kurs zum Thema statt. Der Kurs beginnt mit einer Einführung in die Korrosion und in wichtige elektrochemische Standard-Messtechniken. Die Teilnehmenden sind am Ende des Kurses in der Lage, die wichtigsten Korrosionsarten zu identifizieren, und wissen, welche Erkenntnisse sowie Korrosionskenngrössen mit Hilfe von elektrochemischen Messtechniken gewonnen werden können. Weitere Informationen und Anmeldung unter: <https://bit.ly/2kfuEK9>

ten Stählen gebaut sein, die Hunderte Atmosphären Druck aushalten und mit Dichtungen versehen sein, die Leckagen über Jahre verhindern. Doch Wasserstoff dringt in manche Stähle ein und führt schon bei normalen Umgebungstemperaturen zu einer Versprödung des Stahls. Bei Temperaturen über 300 Grad Celsius reagiert der Wasserstoff zusätzlich mit dem Kohlenstoffanteil des Stahls und verschlechtert dessen Qualität. Die Empa erforscht schon heute die Mechanismen der so genannten Wasserstoff-Versprödung und entwickelt Materialien für die Energieversorgung der Zukunft.

## SPURENSUCHE MIT MIKROSENSOREN

Fatalerweise entsteht Wasserstoff nicht nur gewollt, er kann auch bei der Korrosion entstehen und in das Material eindringen. Und dort hat er, in kleinsten Mengen eingelagert, die gleiche zerstörerische Wirkung: Er macht Hightech-Legierungen spröde und bruchanfällig. Um zu verstehen, was passiert und wie dies zu verhindern ist, müssen die Forscher ganz nahe an die Mikrostruktur eines Materials heranzoomen und die chemischen Reaktionen in winzigen, von Korrosion betroffenen Bereichen untersuchen. Die Empa hat hierfür eigens Mikrosensoren entwickelt, die Oberflächen von weniger als einem hunderttausendstel Quadratmillimeter analysieren können und dabei weniger als ein millionstel Gewichtsprozent Wasserstoff aufspüren. Mit diesen Methoden untersuchen sie kritische Zonen in Bauteilen, etwa Schweissnähte, die durch atomaren Wasserstoff spröde werden und letztlich versagen könnten.

Lars Jeurgens leitet seit 2012 die Empa-Abteilung «Fügetechnologie und Korrosion» und pflegt mit seinem Team eine gut ausbalancierte Mischung aus Forschung und industrierelevanten Dienstleistungen. «Wir haben Absolventen der ETH Zürich und der EPFL bei uns im Team ▶

und nutzen das geballte Wissen dieser beiden führenden Ingenieursschulen», sagt Jeurgens. Er selbst stammt aus Holland, hat lange am Max-Planck-Institut in Stuttgart gearbeitet. «Korrosion kennt keine Grenzen – daher sind wir international sehr gut mit Experten aus Wissenschaft und Industrie vernetzt und tauschen uns über neuste Erkenntnisse und Methoden aus. Es ist sehr wertvoll für uns, diese Erfahrungen zu teilen. Gemeinsam lassen sich viele komplexe Probleme leichter und schneller lösen.»

**ALLE HÄNDE VOLL ZU TUN**

Und es gibt wahrlich genug zu tun für die Korrosionsspezialisten. So arbeitet etwa die Auto- und die Flugzeugindustrie immer häufiger mit Verbundwerkstoffen, die aus unterschiedlichsten Materialien zusammengesetzt sind. Über deren Korrosionsverhalten unter teilweise extremen Bedingungen ist nur wenig bekannt. Vielenorts sind auch Legierungen aus Eisen, Titan und Aluminium im Einsatz. Sie verdanken ihre Korrosionsbeständigkeit einer winzigen, nanometerdünnen Passivschicht an ihrer Oberfläche, die man nur mit speziellen Analysemethoden überhaupt nachweisen – und erst dann optimieren – kann.

«Korrosion gehört auf die Checkliste – nicht erst am Schluss eines Projekts, sondern schon in der Reissbrett-Phase»

Schliesslich wirft auch die Anwendung von funktionellen Beschichtungen bei miniaturisierten elektronischen Geräten und Bauteilen neue Korrosionsfragen auf. Lars Jeurgens gibt ein Beispiel: «Wenn ich eine Turbine mit einer korrosionsfesten Beschichtung herstelle und da jedes Jahr ein Hundertstelmillimeter Materialstärke verlorengeht, dann ist das kein Problem. Doch die gleiche Beschichtung

an einem elektronischen Gerät, die nur ein Hundertstelmillimeter dünn ist, wäre nach einem Jahr komplett weg. Was im Grossmassstab korrosionsfest erscheint, ist es im Mikromassstab also bei weitem nicht mehr. Wir brauchen also neue Konzepte für die Einstufung der Korrosionsempfindlichkeit eines Materials.»

**KORROSION IM MENSCHLICHEN KÖRPER**

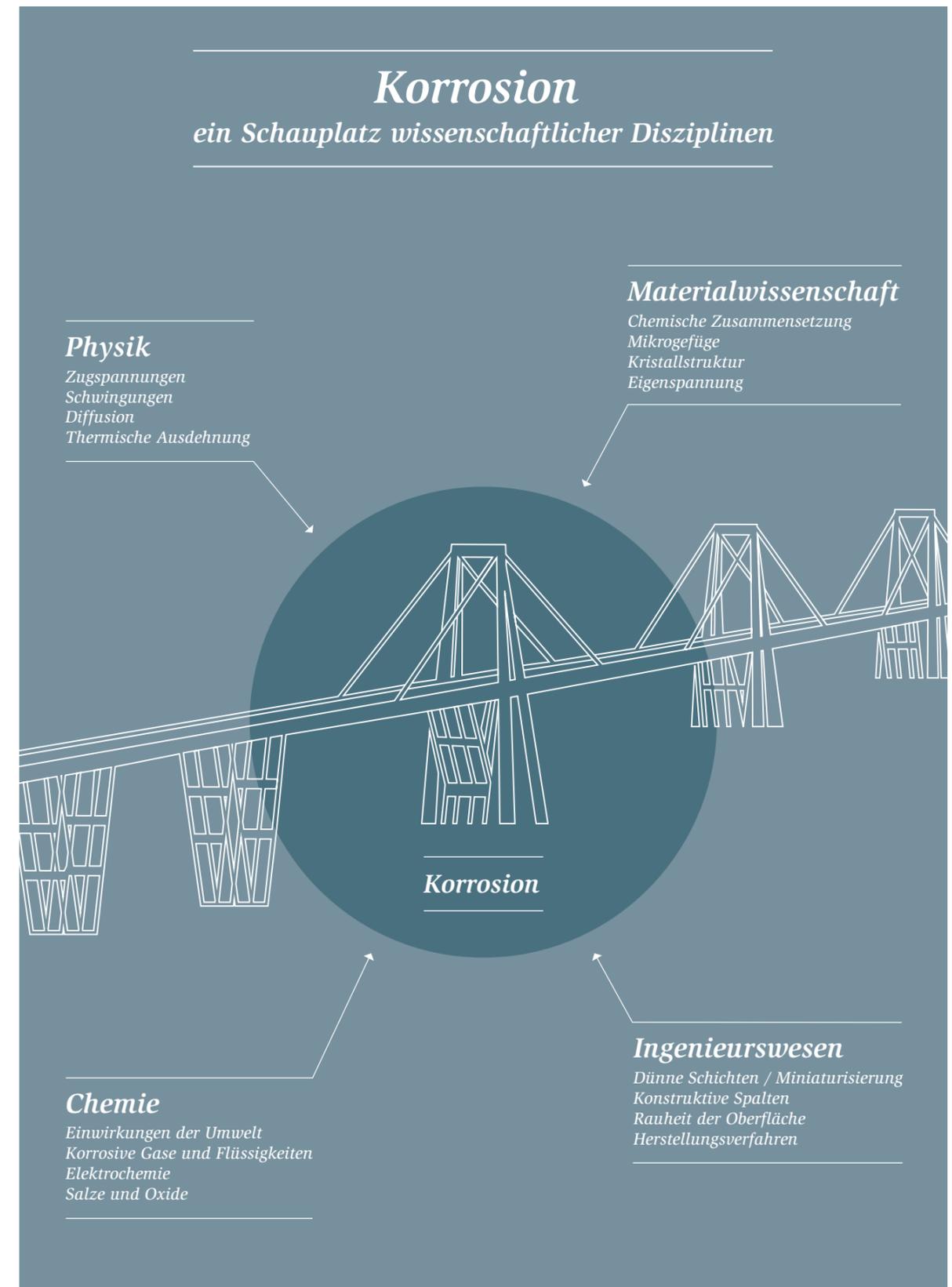
Bisweilen tritt Korrosion sogar dort auf, wo man sie am wenigsten vermutet: mitten im menschlichen Körper mit seinen warmen, anscheinend harmlosen Körperflüssigkeiten. Experten der Empa untersuchen den Abbau durch lokale Korrosion an Materialien wie Edelstahl und Titanlegierungen, die häufig für Implantate verwendet werden, sowie an Silizium, das in zahlreichen neuen Implantaten enthalten ist. Auf grossen, glatten Flächen geschieht dabei wenig, doch in mikroskopisch kleinen Spalten, die konstruktionsbedingt vorkommen, können menschliche Körpersäfte so einiges anrichten.

Vor kurzem konnte ein Empa-Team etwa die langsame Auflösung einer Silizium-Haftvermittlungsschicht im Labor nachweisen. Zwischen dem Implantat aus Titan und der abriebfesten Beschichtung war ein mikroskopischer Spalt entstanden. Dort kann unter Sauerstoffausschluss ganz langsam ein sehr aggressives Medium entstehen, das dann mit Hilfe der körpereigenen Phosphorverbindungen die Silizium-Haftvermittlungsschicht zerstören kann.

Die Empa-Forscher sind mit speziellen Sonden in der Lage, auch die lokale Korrosionschemie in solch feinen Spalten aufzuklären und die Korrosionsvorgänge für Versuchszwecke gar zu beschleunigen. So kann schon vor der Operation die voraussichtliche Nutzungsdauer eines Implantats recht genau vorausgesagt werden.

Korrosionsforschung ist in vielen Lebensbereichen enorm wichtig, und doch wird die Arbeit der Pathologen der Ingenieurswelt oft noch unterschätzt. Lars Jeurgens und seine Kollegen machen sich dafür stark, an Universitäten und technischen Hochschulen wieder mehr Wert auf Know-how in diesem Bereich zu legen. «Korrosion gehört auf die Checkliste für jedes Bauvorhaben und jede Produktentwicklung – und zwar nicht erst am Schluss, sondern schon in der Reissbrett-Phase», so Jeurgens. «Oft werden wir für eine Analyse erst dann angefragt, wenn die Farbprospekte für ihr Produkt bereits gedruckt sind. Doch dann können wir oft nichts mehr für die Auftraggeber tun.»

Ansprechpartner zum Thema Korrosion finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s202/services](http://www.empa.ch/web/s202/services)



# UNZERBRECHLICH

Kann Glas bei Raumtemperatur fließen und dadurch harte Stösse aushalten? Eine Theorie aus den 1970er-Jahren sagte das voraus. Empa-Forscher haben nun den Beweis geliefert. Die Ergebnisse könnten die Basis bilden für robuste, 3D-gedruckte Mikrostrukturen aus Glas.

Text: Rainer Klose

**W**as wir gemessen haben, hat noch niemand auf der Welt gesehen», sagt Rajaprakash Ramachandramoorthy. «Wir sind den Brucheigenschaften von Glas weiter auf die Spur gekommen als je ein Forscherteam zuvor.» Raj – so sein Spitzname unter Kollegen – arbeitet in der Forschungsabteilung «Mechanics of Materials and Nanostructures» unter der Leitung von Johann Michler.

Das Team erkundet Materialeigenschaften im aller kleinsten Massstab: Selbst entwickelte Maschinen drücken mit winzigen Stempeln auf wenige Mikrometer dünne Säulen, sogenannte Mikrosäulen. Im Elektronenmikroskop und mit Hilfe feinsten Kraftmessungen wird während der Versuche beobachtet, wie genau die Mikrosäule zerbricht oder sich verformt. Mit den Ergebnissen können die Forscher Aussagen über die innere Struktur der Materialien treffen.

## MINUTENLANG DRÜCKEN UND SEKUNDENSCHNELL HÄMMERN

Ramachandramoorthy hat zusammen mit seinem Kollegen Jakob Schwiedrzik mit dieser Methode nun Quarzglas unter die Lupe genommen – und dabei Eigenschaften entdeckt, die mit der makroskopischen, uns wohlbekannten Glas-Welt wenig zu tun haben: Glas ist nämlich beim ganz langsamen Draufdrücken zäh wie Knetmasse, beim etwas schnelleren Drücken kann es reißen und bersten – und bei ganz kurzen, schnellen Druck-Impulsen verhält es sich wieder zäh und nachgiebig. «Unser langsamster Druckversuch hat etwa 20 Minuten gedauert», so der Empa-Forscher. «Unser schnellster Impuls auf den Mikrosäulen war dagegen 100 Mikrosekunden kurz, vergleichbar mit einem Hammerschlag.»

## THEORETISCHE VORAUSSAGEN AUS DEN 1970ERN VERIFIZIERT

Die Arbeiten der Empa-Forscher liefern nun erstmals praktische Erfahrungswerte und Messdaten für Materialeigenschaften, die bisher nur in der Theorie postuliert werden konnten. Die Verformungseigenschaften von amorphen

Materialien wie Glas waren Ende der 1970er-Jahre von den Physikern Frans Spaepen an der Harvard University und Ali S. Argon am benachbarten Massachusetts Institute of Technology (MIT) unabhängig voneinander vorausgesagt worden. Beide Theorien, wir wollen sie hier Glasfluss-Theorien nennen, weisen dabei in die gleiche Richtung und sagen: Wer ein bruchfestes mikromechanisches System bauen möchte, sollte es aus Glas bauen statt aus kristallinem Silizium. Denn Glas halte hohe Kräfte besser aus.

Doch in Experimenten konnte das nie bewiesen werden. Nur ganz langsame Druckversuche mit mikroskopisch kleinen Probekörpern waren möglich. In der makroskopischen Welt hingegen lösen dynamische Experimente mit hohen Geschwindigkeiten eine Stosswelle in der Probe aus, die die Verformungsmechanismen im Material überlagert. Es passiert etwas, das wir alle aus Erfahrung kennen: Das belastete Glas bricht, sobald die Schockwelle auf einen Materialfehler trifft, der in grossen Probekörpern praktisch immer vorkommt.

Ramachandramoorthy und Schwiedrzik fanden an der Empa den Ausweg: Sie nutzten Mikro-Säulen aus geätztem Glas, die so klein sind, dass statistisch kein Materialfehler mehr in ihnen schlummert, der die Ergebnisse verzerren könnte. Zugleich ist die Schockwelle kein Problem mehr: Sie läuft nun so schnell durch den mikroskaligen Probekörper, dass sich der Effekt nicht mehr mit dem Hammerschlag überlagert, der die Glas-Atome verschiebt. Nun lassen sich beide Effekte sauber getrennt voneinander dokumentieren. Erstmals lässt sich die 40 Jahre alte Glasfluss-Theorie von Spaepen und Argon experimentell überprüfen.

## 3D-GEDRUCKTE GLASBAUTEILE FÜR UHREN

Die Forschung an der Empa hat in der Schweizer Uhrenindustrie und bei Fabrikanten von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) bereits für Aufsehen gesorgt. Sie könnte die Grundlage liefern für 3D-gedruckte, gläserne Mikrobauerteile, die in stossfeste Uhren oder robuste Messin-

«Nun wollen viele Glashersteller mehr über die Mikro-Eigenschaften ihrer Produkte erfahren.»



Foto: iStock

**ZÄH WIE KNETMASSE?**  
Empa-Forscher sind den Brucheigenschaften von Glas auf der Spur.

**HAUCHZART**  
Der Minutenzeiger dieses Uhren-Prototyps ist aus Glas gefertigt und mit einer fluoreszierenden Flüssigkeit gefüllt.



strumente eingebaut werden könnten. Die Schweizer Luxusuhrenmarke Ulysse Nardin präsentierte im März 2019 bereits den Prototyp einer Uhr namens Freak neXt, der mit einem leuchtenden Minutenzeiger aus Glas ausgestattet war. Das Glas-Bauteil, eine hauchfeine Kapillare, gefüllt mit einer fluoreszierenden Flüssigkeit, hatte die Schweizer Spezialfirma Femtoprint im 3D-Druck hergestellt. Doch vom Prototyp für die Uhrenvitrine bis zum stofffesten Serienprodukt ist noch einige Entwicklungsarbeit zu leisten. Die Grundlagen hierfür wollen die Forscher der Empa nun legen.

**GLASHERSTELLER STEHEN SCHLANGE**  
Rajaprakash Ramachandramoorthy spürt bereits, dass er nicht nur als Ideenlieferant für die Uhrenindustrie gefragt ist.

Er hat alle Hände voll zu tun. Nach den publizierten Ergebnissen mit reinem Quarzglas haben Hersteller von Float-Glas und Boratglas angeklopft. Sie alle wollen mehr über die Mikro-Eigenschaften ihrer Produkte erfahren. Schon sind die nächsten Forschungsprojekte aufgegleist. «Mit unserer Methode können wir grundsätzlich jedes Materialsystem untersuchen, unter anderem amorphe Materialien, Metalle, Polymere, Biomaterialien oder Keramiken», sagt der Forscher.

Die im Labor in Thun entwickelte Maschinerie möchte er nun für ausgedehnte Versuchsreihen nutzen. «In Zukunft wollen wir die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen zwischen -150 und +1000 Grad Celsius bei

unterschiedlichen Geschwindigkeiten messen.» Der genaue Blick auf die Eigenschaften kleinster Mikrosäulen könnte bald den Weg freimachen für eine Reihe bedeutender Erfindungen. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s206](http://www.empa.ch/web/s206)

Foto: Ulysse Nardin

Fotos: IStock

# EINGEBAUTES ABLAUFDATUM?

Ob Handy oder automatische WC-Spülung – elektronische Geräte werden immer komplexer. Und wer kennt nicht Geschichten von Geräten, die just nach Ablauf der Garantie den Geist aufgeben? Die kürzere Lebensdauer ist laut Empa-Forscher Peter Jacob aber keine böseartig geplante Obsoleszenz, sondern hauptsächlich einem enormen Kostendruck geschuldet. Jacob und sein Team gehen Schadensfällen mit detektivischer Akribie nach.

Text: Karin Weinmann

**ROBUST**  
Alte Transistorradios lassen sich einfach reparieren – die Reparatur von modernen Radios lohnt sich oft kaum mehr.



**W**er um die 1950er-Jahre ein Radio kaufte, gab einen grossen Batzen Geld dafür aus und konnte sich dafür darauf verlassen, dass es sich im Schadensfall relativ einfach reparieren liess. Wenn ein modernes Radiogerät heute nicht mehr funktioniert, wird es hingegen in den meisten Fällen entsorgt und durch ein neues Gerät ersetzt. Das hat einen einfachen Grund: Während das Radio aus den 1950er-Jahren aus handelsüblichen Bauteilen und einigen wenigen einfach ersetzbaren Standardröhren bestand, enthalten heutige Radios Elektronik mit Tausenden, in Mikrochips verschalteten Transistorfunktionen. Diese Chips sind meist anwendungsspezifisch fabriziert. Geht das Radio einige Jahre nach dem Kauf kaputt, existieren oft schlicht keine Ersatzteile mehr.

Bei Handys muss man gar nicht so weit in die Vergangenheit zurückgehen, um

zu sehen, wie viel schwieriger nur schon der Ersatz eines Akkus geworden ist: Konnte man die Batterie früher einfach von Hand austauschen, sind die Gehäuse der heutigen Geräte für den Anwender nicht mehr zu öffnen. Für den Wechsel der Batterie braucht es Fachkenntnis oder aber Reparaturshops. Das hat nicht nur Nachteile, erklärt Peter Jacob, Leiter des Empa-Zentrums für Elektronik und Zuverlässigkeit: «Im Gegensatz zu früheren Batterietypen können die heute verwendeten Li-Ionen-Batterien bei unsachgemässer Handhabung Feuer fangen und schwere Verbrennungen hervorrufen. Zudem müssen die Batterien korrekt entsorgt werden. In einem Reparaturshop ist beides gewährleistet.»

#### KOSTENDRUCK ENTLANG DER KETTE

Das erklärt, warum elektronische Geräte häufig nicht mehr repariert werden. Doch warum halten sie oft nur kurze Zeit? «Auch dahinter steckt meist kein böser Wille», meint Jacob. Das Problem liege woanders: bei einer globalen Wettbewerbssituation mit enormem

Preisdruck und langen Lieferketten. Vor allem bei hohen Stückzahlen sind die internen Kostenvorgaben oft sehr strikt. Bauteile werden an ihren Grenzen spezifiziert. «Ein Kondensator wird heute oft hart an seiner Grenze belastet, auch wenn der Ingenieur eine Sicherheitsmarge bevorzugen würde.» Das gilt nicht nur für Billigelektronik wie blinkende Kinderspielzeuge, sondern sogar für professionelle Elektronik, etwa im Auto.

Der Kostendruck ist enorm und wird entlang der Lieferkette weitergereicht. Sie sind oftmals lang und komplex; allein an einer Auto-Klimaanlage sind oft mehr als 100 verschiedene Zulieferer beteiligt. Dies macht die Fehlersuche nicht ganz trivial. Dabei geht es auch um viel Geld. Gerade bei Produkten mit hohen Stückzahlen kann es für kleinere Zulieferfirmen um die Existenz gehen, wenn ein Fehler nachweislich bei ihnen zu finden ist. Solche Fälle untersucht das Zentrum für Elektronik und Zuverlässigkeitstechnik an der Empa als neutrale Anlaufstelle mit detektivischer Akribie.



#### GESTEUERT

Ein klassischer Fall geplanter Obsoleszenz: Der Drucker meldet, dass die Tintenpatrone leer ist, und blockiert den Druck, obwohl noch genügend Tinte vorhanden wäre.

Foto: iStock

#### DER TEUFEL STECKT IN DEN DETAILS

Manchmal trifft das Team unter der Leitung von Peter Jacob auf klare Konstruktionsfehler: Bei einer sanitären Anlage waren die Schaltkreise mit einer 5-Volt-Spannung schlicht zu nahe an diejenigen platziert, die mit 230 Volt betrieben wurden. Die feuchte Umgebung im Badezimmer tat ihr übriges. Gefährliche Kurzschlüsse waren das Resultat.

In anderen Fällen entpuppt sich die Suche nach der Ursache eines Ausfalls indes als komplexes Zusammenspiel vieler Ursachen. Jacob erwähnt ein Beispiel eines Autoherstellers, bei dem neue Fahrzeuge eines bestimmten Typs nach rund 10 000 Kilometern in der Werkstatt landeten, mit immer demselben Defekt, bei dem ein bestimmter Teil der Motorsteuerungseinheit ausfiel. Interessanterweise geschah dies nur in Ländern ohne Geschwindigkeitslimit, und nachdem die Einheit einmal repariert war, kam der Defekt nie wieder vor. Eine genauere Inspektion zeigte, dass die Einheit zwischen Gummischläuchen ohne Erdung installiert worden war. Die Empa-Forscher nutzten eine kontaktlose elektrostatische Spannungssonde, um die Ladung auf dem Metallgehäuse der Einheit zu messen. Und siehe da! Bei einer Geschwindigkeit von unter 150 km/h wurde kein Ausfall beobachtet. Fuhr das Auto schneller, traten plötzlich hohe elektrostatische Spannungen an dem Gehäuse auf – höher, als Jacobs Sonde überhaupt messen konnte. Es zeigte sich, dass die Spannung durch den extrem hohen Luftdurchfluss und dessen Verwirbelungen entstand und wegen der fehlenden Erdung nicht abfliessen konnte. Die hohe Spannung erreichte die Steuereinheit und zerstörte sie in kürzester Zeit. Doch warum trat das Problem nur in den ersten 10 000 Kilometern auf? Auch dafür fanden die Forscher eine Erklärung: Nach dieser Distanz hatte sich genug Dreck und Staub

an den Gummischläuchen gesammelt, dass sie elektrisch ableitfähig wurden – und die fehlende Erdung ersetzten. Bei beiden Fällen – den sanitären Anlagen und den Autos – traten die Defekte also immer am gleichen Ort auf, aber keineswegs geplant.

#### MYTHOS ODER ABSICHT?

Ist die geplante Obsoleszenz also nur ein Mythos und die immer schnelleren Produktlebenszyklen einzig einem System geschuldet, bei dem Konsumenten nach neuer Technologie dürsten und Hersteller und Lieferanten dem Konkurrenz- und Kostendruck entsprechend gezwungen sind, die Bauteile hart an ihren Belastungsgrenzen zu betreiben? Ganz so einfach ist es nicht. Tatsächlich gibt es belegbare Beispiele, bei denen Firmen gezielt auf Obsoleszenzstrategien setzen, um die Kunden zu zwingen, neue Geräte zu kaufen.

Die zweifelhafte Ehre des ersten dokumentierten Falls von geplanter Obsoleszenz kommt Glühbirnen zu: Die von Thomas Edison entwickelten Leuchtmittel waren so langlebig, dass sie viel zu selten ersetzt werden mussten, und damit blieb der Profit der grossen Glühbirnenhersteller aus. Das Kartell der Fabrikanten sprach sich darum in den 1920er-Jahren ab, die Lebensspanne ihrer Produkte von 2500 auf 1000 Stunden zu beschränken. Der Glühfaden wurde – bei gleicher Betriebsspannung – etwas verkürzt, woraus sich eine tiefere Brenndauer ergab. Hersteller mit langlebigeren Produkten wurden gebüsst. Mit Erfolg: Der Absatz von Glühbirnen stieg massiv an, bis schliesslich der Zweite Weltkrieg die Koordination der aus nun feindlichen Ländern stammenden Hersteller verunmöglichte und das Kartell zur Auflösung zwang.

Heute steckt hinter geplanten Obsoleszenzfällen oftmals Software: Beispielsweise sind Tintenpatronen

in Druckern mit Chips ausgestattet, die das Drucken verunmöglichen, sobald das Fülllevel der Patrone unter einen bestimmten Grenzwert fällt. Die Patrone muss ersetzt werden, obwohl noch Tinte vorhanden wäre.

Auch Smartphones sind vor geplanter Obsoleszenz nicht gefeit: 2018 wurden die Hersteller Apple und Samsung mit Millionenbussen gestraft, weil deren Betriebssystem-Updates ältere Geräte so langsam werden liessen, dass sich die Nutzer gezwungen fühlten, die Geräte zu ersetzen.

Geplant oder nicht – dass Software die Lebensdauer technischer Produkte verkürzt statt, wie einst gehofft, verlängert, zeigt sich immer öfter: Der Mechanismus von Software-Updates führt dazu, dass immer neue Anforderungen an die Hardware gestellt werden. Dies trägt vermutlich mehr zur Entwertung von Geräten bei als die geplante Obsoleszenz.

Und wird das Internet der Dinge tatsächlich Realität, droht die Obsoleszenz durch Software noch deutlich häufiger zu werden. Denn nun werden potenziell alle Alltagsgegenstände von Software-Updates abhängig. Das hat auch die Empa mit vielen tadellos funktionierenden Mikroskop-Kameras erfahren müssen, als sie wegen eines Windows-Software-Updates reihenweise ersetzt werden mussten. Im Internet der Dinge sind Situationen nicht mehr fern, in denen etwa ein perfekt kühlender Kühlschrank ersetzt werden muss – weil die darin eingesetzten Schaltkreise nicht mehr mit dem neusten Software-Update kompatibel sind.

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s498](http://www.empa.ch/web/s498)

## SENSOREN FÜR AUTOMATISIERTES FAHREN



**EXAKT**  
Das Team der Empa-Abteilung «Fahrzeugantriebssysteme» mit dem zur Verfügung gestellten Lexus.

Sensorsysteme spielen beim autonomen Fahren eine zentrale Rolle. Sie erfassen das Umfeld des Fahrzeugs und liefern die nötigen Informationen, damit das Auto sicher durch den Verkehr gelenkt wird. Dabei sind die Sensoren jedoch verschiedensten Witterungs- und Umwelteinflüssen wie auch mechanischen Belastungen ausgesetzt. Die Empa und Lexus haben nun eine Zusammenarbeit vereinbart, um die Sensorik für automatisierte Fahrzeuge zu verbessern. Lexus stellt der Empa dazu ein Testfahrzeug zur Verfügung, das nun mit Sensoren und einem Datenerfassungssystem ausgerüstet wird, um das Verhalten der Sensoren im realen Betrieb zu untersuchen.

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



**ERSCHRECKEND**  
5000 Tonnen Plastik landen in der Umwelt.

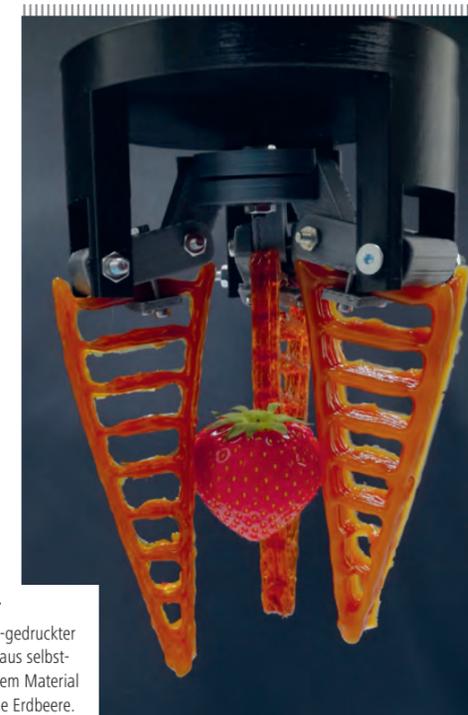
## JÄHRLICH MEHR ALS 5000 TONNEN PLASTIK IN DIE UMWELT FREIGESETZT

Plastik gehört nicht in die Umwelt. Um das Ausmass der Verschmutzung in der Schweiz erstmals genau abzuschätzen, hat das Bundesamt für Umwelt (BAFU) Forscher der Empa beauftragt, zu berechnen, wie viel Plastik in die Umwelt gelangt. Erfasst hat die Empa die sieben am häufigsten verwendeten Kunststoffe. Demnach werden jedes Jahr rund 5000 Tonnen Plastik in die Umwelt eingetragen. Es zeigt sich, dass die Plastikbelastung auf und im Boden viel grösser ist als in den Gewässern.

[www.empa.ch/web/s604/mikroplastik-bafu](http://www.empa.ch/web/s604/mikroplastik-bafu)

Fotos: Empa (Z)

## ROBOTER FÜHLEN SCHMERZ UND REPARIEREN SICH SELBST



**SANFT**  
Ein 3-D-gedruckter Greifer aus selbstheilendem Material hält eine Erdbeere.

Roboter spielen eine immer grössere Rolle im täglichen Leben. Um mit zerbrechlichen Objekten geschickt umgehen zu können und die Sicherheit der Menschen zu gewährleisten, werden viele Roboter zukünftig aus flexiblen Materialien bestehen. Das macht sie jedoch anfällig für Risse durch scharfe Gegenstände, und Reparaturen sind kostspielig. Ein internationales Team von Forschenden in Kollaboration mit der Empa arbeitet im Rahmen des Projekts SHERO (Self-HEaling soft RObotics) an Technologien, mit denen solche Roboter Schäden eigenständig heilen können. Selbstheilenden Materialien wie etwa flexiblen Kunststoffen, aus denen die Roboter gebaut werden, bieten Aussicht auf eine Lösung. Ehrgeiziges Ziel des europäischen Projekts ist es, einen Roboter aus selbstheilendem Material zu schaffen, der Schäden erkennt, die notwendigen Schritte einleitet und den Defekt selbst behebt. So kann er laufende Arbeitsprozesse abschliessen, um danach während Servicearbeiten vollständig repariert zu werden.

[www.empa.ch/web/s604/self-healing-robot](http://www.empa.ch/web/s604/self-healing-robot)



**KOMPLEX**  
Im Winter geht die Produktion von Solarstrom stark zurück, doch genau dann ist der Strombedarf am höchsten. Wie können wir diese Lücke schliessen?

## WEGE IN DIE ENERGIEZUKUNFT

Es liegt noch viel Arbeit vor uns, wenn die Schweiz einst ohne fossile Brenn- und Treibstoffe auskommen soll. Eine neue Empa-Studie, die Ende Juni im Fachmagazin «Energies» erschien, schlägt zwei Lösungen vor: im Sommer grosse Mengen Energie speichern und im Winter unseren Bedarf einschränken oder aber Energie im sonnigen Süden beziehungsweise im windigen Norden der Erde gewinnen und in unsere Regionen transportieren. Die Empa-Forscher sehen ihre Studie als Gedankenanstoss für Politik und Gesellschaft.

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

Fotos: Istock, Vrije Universiteit Brussel

# DAS HOLZ-PARADOXON

Es lässt sich beliebig verformen und ist dreimal stärker als natürliches Holz: Das Holzmaterial, das Marion Frey, Tobias Keplinger und Ingo Burgert an der Empa und der ETH entwickeln, hat das Potenzial zum Hightech-Werkstoff. Dabei entfernen die Forschenden genau jenen Teil aus dem Holz, der ihm in der Natur seine Stabilität verleiht: das Lignin.

Text: Stephan Kälin



**HIGHTECH-HOLZ**  
Delignifiziert, verformt,  
verdichtet und wasser-  
abstossend gemacht.

**H**olz ist einer der ältesten Werkstoffe der Welt. Holz ist leicht, hat hervorragende mechanische Eigenschaften, wächst nach – und bindet dabei erst noch CO<sub>2</sub>. Insbesondere die letzten beiden Eigenschaften werfen vor dem Hintergrund der aktuellen Klimadiskussion die Frage auf, wie Holz noch mehr und besser genutzt werden kann. Seit Jahren geht die Forschungsgruppe von Ingo Burgert an der Empa und der ETH Zürich dieser Frage nach. Ihr Ziel: die natürlichen Eigenschaften von Holz

verbessern und mit neuen Funktionen ausstatten, um dadurch das Anwendungsspektrum von Holz zu erweitern.

Gemeinsam mit Tanja Zimmermann, der heutigen Leiterin des Empa-Departements «Functional Materials», hat Ingo Burgert in der Unit «Vision Wood» im Experimentalgebäude NEST bereits für verblüffende Holzobjekte gesorgt: Türgriffe aus antimikrobiellem Holz, mineralisiertes Holz für verbesserten Flammwiderstand oder eine Pinwand aus magnetisiertem Holz sind einige Beispiele. Während man

für die ersten beiden Beispiele nach rund drei Jahren Praxistest in der Studentenwohnung «Vision Wood» ein positives Fazit ziehen kann, gibt es beim Letzgenannten noch Luft nach oben. Die jüngsten Forschungsarbeiten der Gruppe «Wood Materials Science» der ETH Zürich und der Empa eröffnen dazu nun neue Möglichkeiten: «Wir haben einen Weg gefunden, wie wir die mechanischen Eigenschaften von Holz deutlich verbessern und gleichzeitig das Holz noch einfacher mit neuen Eigenschaften ausstatten können», sagt Burgert. ▶

Foto: Empa/ETH Zürich

### FLEXIBEL IM NASSEN, STABIL IM TROCKENEN ZUSTAND

Der Weg führt über eine Delignifizierung und Verdichtung des Holzes. Chemisch besteht Holz im Wesentlichen aus drei Bestandteilen: Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Das Lignin sorgt dafür, dass die langen Zellulosefibrillen stabilisiert werden und nicht knicken. «Mit Hilfe von Säure lösen wir genau dieses Lignin aus dem Holz und entfernen damit den natürlichen Klebstoff», erklärt Marion Frey, die in Burgerts Team zurzeit promoviert. Resultat: Das Holz – oder vielmehr die verbleibende, weisse Zellulose – lässt sich im nassen Zustand einfach in jede X-beliebige Form bringen. Zwischen den Zellen, wo einst Lignin für Stabilität gesorgt hat, verteilt sich dann Wasser, löst die Zellverbindungen auf und sorgt für Verformbarkeit. Trocknet man das delignifizierte Holz, verhaken sich die Zellen ineinander, und dies führt zu wiederum stabilen Verbindungen. Durch Pressen wird das Material zusätzlich verdichtet, so dass die Forschenden letztlich ein Material in ihren Händen halten, das rund dreimal steifer und zugfester war als naturbelassenes Fichtenholz. Eine wasserabweisende Beschichtung kann ausserdem dafür sorgen, dass das Holzinnere nicht mehr feucht werden kann, und damit die gewünschte Form behält.

### EINFACHERE FUNKTIONALISIERUNG

Die Entfernung des Lignins aus dem Holz hat neben der Verformbarkeit einen weiteren Effekt: Es führt zu einer höheren Porosität. «Das ist ein grosser Vorteil für die Funktionalisierung von Holz. Weil zwischen den Zellen und in den Zellwänden mehr Raum zur Verfügung steht, ist es einfacher, weitere Stoffe in die Holzstruktur einzubringen, die dem modifizierten Holz neue Eigenschaften verleihen», sagt Tobias Keplinger. Zur Magnetisierung von Holz wird beispielsweise Eisenoxid eingebracht. In ihren Experimenten konnten



#### FORMBAR UND STARK

oben: Durch die Entfernung des Lignins verliert das Holz seine Farbe. Nach dem Verdichten ist es dreimal stärker als das Ursprungsmaterial.

unten: Ein Velohelm und ein Wandelement aus delignifiziertem Holz: Die Designerin Meri Zirkelbach hat sich in ihrer Masterarbeit mit konkreten Produktideen beschäftigt.

die Forschenden nun zeigen, dass sich das Holz ohne Lignin deutlich besser magnetisieren lässt als natürliches Holz, wie es bislang in der NEST-Unit «Vision Wood» zum Einsatz kam.

### ANWENDUNGEN IN AUTOS UND FLUGZEUGEN

Anwendungsmöglichkeiten für ihr neues Material sehen die Forschenden in der Automobil-, der Aviatik- und in der Möbelindustrie. Im Rahmen einer Masterarbeit hat die Designerin Meri Zirkelbach

bereits erste Produktideen umgesetzt. Entstanden sind etwa ein Velohelm, die Innenverkleidung einer Autotür und der Seitenspiegel eines Fahrzeugs. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s302/](http://www.empa.ch/web/s302/)

Foto: Empa/ETH Zürich

# DIE LÖSLICHE SCHRAUBE

Wo Knochen bersten, müssen Chirurgen die Bruchstücke mit Implantaten zusammenfügen. Orthopädische Schrauben aus Magnesium, die sich mit der Zeit im Körper auflösen, ersparen Patienten eine weitere Operation nach der Heilung und mindern das Infektionsrisiko. Was mit derartigen Implantaten im Körper passiert, ist indes weitgehend unbekannt. Empa-Forscher analysieren die Korrosionsmechanismen von Magnesium, um optimale Legierungen und orthopädische Schrauben mit funktionalisierten Oberflächen zu entwickeln.

Text: Andrea Six

Wenn Chirurgen nach einem Knochenbruch die Fragmente und Splitter des Knochens am ursprünglichen Ort fixieren möchten, stellt sich die Frage, welche Art von Implantaten sie hierzu einsetzen sollen. Schrauben und Platten aus Titan oder Stahl, die im Körper mechanisch und chemisch sehr stabil sind, jedoch später durch einen zweiten Eingriff wieder entfernt werden müssen? Oder Implantate aus organischen Materialien, die sich mit der Zeit auflösen, aber mit gewissen anderen Nachteilen behaftet sein können, wie mangelnde Festigkeit oder ungünstige Abbauprodukte? Forscher der Empa arbeiten derzeit an einem Ausweg aus dem Dilemma: Kleine Implantate und Schrauben aus Magnesium, die zunächst mechanisch stabil sind und deren kontrollierte Auflösung im Körper später nicht zu Gewebeschäden führt.

Besonders interessant sind derartige Magnesium-Implantate für die medizinisch-orthopädische Anwendung bei Kindern, deren Knochen rasant wachsen. Die bioabbaubaren Schrauben beeinträchtigen das kindliche Knochenwachstum nicht und ersparen den kleinen Patienten eine zweite Operation. Zudem lassen sich so die Risiken einer Infektion mindern und Kosten sparen.

«Magnesium stellt man sich zwar eher als ein weisses Pulver vor, das häufig als Nahrungsergänzungsmittel eingenommen wird», sagt Arie Bruinink von der Empa-Abteilung «Fügetechnologie und Korrosion». «Implantate aus Magnesiumlegierungen sind jedoch nicht nur biokompatibel, sondern weisen darüber hinaus in der ersten heiklen Heilungsphase mechanische Eigenschaften auf, die knochenähnlich und daher sogar geeigneter sind als jene von Titan.»

Der Segen einer resorbierbaren Schraube kann unter Umständen auch ihr Fluch sein: Denn der Prozess der Auflösung ist mit komplexen Korrosionsprozessen und daraus resultierender Oberflächenumwandlung und Produktbildung verbunden. Je nach Art der Magnesiumlegierung kann aufgrund des zu geringen Korrosionswiderstands beim Abbau Wasserstoffgas entstehen, und zwar in einem Ausmass, dass sogar ein Gaskissen unter der Haut des Patienten entsteht. Zwar ist durchaus bezweckt, dass Magnesiumschrauben mittels Korrosion abgebaut werden, bei der Magnesium oxidiert und Wasserstoff freigesetzt wird. Bildet sich aber schlagartig mehr Wasserstoffgas, als der Körper ad hoc entfernen kann, wird der Heilungsverlauf des fragilen Knochens gestört.

Nun ist aber genau diese Biokorrosion, denen eine Magnesiumschraube ausgesetzt ist, ein bislang wenig ►

verständener Vorgang. Hier kommen die Korrosionsforscher der Empa ins Spiel, die mit eigens entwickelten Analyseverfahren die Biokorrosion im Körper unter möglichst realistischen Bedingungen abbilden. Das Ziel: optimale Legierungen aus Magnesium und anderen biokompatiblen Elementen sowie neue Oberflächenfunktionen für resorbierbare Magnesiumschrauben. Letztlich ist ein langsamer, kontrollierter Abbau der Implantate gefragt, bei dem sich keine Gasblasen im Gewebe bilden.

«Bisher ist bereits klar, dass die Reaktion je nach Säuregehalt des Gewebes unterschiedlich abläuft», erklärt Bruinink. In leicht saurer Umgebung bilden sich grosse Mengen an Wasserstoffgas bei der Magnesiumkorrosion; bei einem pH-Wert im alkalischen Bereich entstehen unter anderem Carbonat-haltige

Produkte, die den gewünschten Abbau sogar blockieren können. In neutralem Milieu bei einem pH-Wert von 7,4, wie etwa im Blut, entstehen hingegen Magnesiumhydroxide und Phosphatprodukte, die die weitere Korrosion zumindest einschränken. Blut vermag – als potenter Puffer – seinen pH-Wert permanent in konstantem Rahmen zu halten. Bisher seien herkömmliche Magnesiumimplantate mit vergleichbar potenten, aber nicht physiologischen Puffern im Labor analysiert worden, so Bruinink. Für realitätsnah hält er dieses Vorgehen nicht.

«Blut ist ein ganz besonderer Saft» – so lässt sich Goethes rastlose Forscherfigur Faust zitieren. Ob Doktor Faust auch etwas über die sogenannte interstitielle Flüssigkeit oder Gewebsflüssigkeit zu sagen wusste, ist nicht überliefert. Dabei übertrifft die salzhaltige Flüssigkeit mit

ihren rund zehn Litern das Volumen von Blut im menschlichen Körper bei Weitem. Gemächlich gleitet der unterschätzte Saft zwischen den Geweben und Zellen im hundertfach verlangsamten Tempo einer Schnecke. Und gerade diese interstitielle Flüssigkeit ist von entscheidender Bedeutung, will man neue Implantate entwickeln. Denn der Heilungsprozess des Bruchs, der von Immunzellen gesteuert wird und ein harmonisches Gefüge von Knochenabbau und Neuaufbau ergeben soll, ist vornehmlich in interstitielle Flüssigkeit eingebettet.

Der Säuregrad der Gewebsflüssigkeit ist allerdings viel grösseren Schwankungen ausgesetzt als jener von Blut. Abhängig von Körperteil und Gewebezustand, können unterschiedliche Einflüsse auf die eingesetzte Schraube einwirken. Um eine realitätsnahe Vorhersage zum Verlauf

der Biokorrosion im Körper zu machen, hat Bruinink experimentelle Analysegeräte und Fließzellen entwickelt, bei denen die pH-Regulierung dem Körper nachempfunden ist. In einer Batterie von zehn Flusszellen spannt der Forscher beispielsweise Proben von Magnesiumlegierungen ein, die von naturgetreuer interstitieller Flüssigkeit umspült werden – und zwar mit der gleichen Langsamkeit wie im menschlichen Körper.

An den kleinen Flusszellen werden derzeit neben pH-Messungen auch detaillierte elektrochemische Charakterisierungen durchgeführt. Ausgewertet werden etwa elektrochemische Potenziale, Impedanz-Änderungen der Grenzflächen als Merkmal der Korrosion und die Bildung von Wasserstoffgas. «Die Flusszelle ist ein winziges Labor, das die Realität der Biokorrosion lebensnah simuliert»,

so Bruinink. In einem nächsten Schritt werden die Legierungsproben im Minilabor mit lebenden Zellen zusammengebracht, um das Geschehen im Körper noch detaillierter zu imitieren. «Sobald klar ist, was tatsächlich bei der Biokorrosion mit den Magnesiumlegierungen passiert, können wir die passenden Implantate mit funktionalisierten Oberflächen, die beispielsweise die Reaktionen der biologischen Umgebung begünstigen, erzeugen», sagt der Forscher. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s202](http://www.empa.ch/web/s202)



**KNOCHEN**  
Magnesiumlegierungen weisen Korrosionserscheinungen auf, wenn sie von körperähnlicher Gewebsflüssigkeit umspült werden (schwarz, linkes Bild). Wird hingegen für die Analyse ein nichtphysiologischer, herkömmlicher Puffer verwendet, bleibt die Magnesiumprobe nahezu unversehrt (weiss, rechts).

Foto: Empa



**PH-NEUTRAL**  
Der Empa-Forscher Arie Bruinink hat Flusszellen für die Untersuchung von Magnesiumlegierungen entwickelt, bei denen die Säureregulierung dem menschlichen Körper nachempfunden ist.

Foto: Empa

# EIN OFFENES OHR FÜR LÄRM

Ein plätschernder Bach ist das Lieblingsgeräusch von Jean Marc Wunderli. Sein Forschungsalltag hat mit beruhigenden Naturklängen jedoch wenig zu tun. Er setzt sich mit ganz anderen Geräuschen auseinander: Lärm von Flugzeugturbinen, Zuglärm, stark befahrene Strassen, Windrädern und neu sogar Drohnen. All diese Emissionen gehören zur Forschungstätigkeit in der Empa-Abteilung «Akustik/Lärminderung», deren Leitung Wunderli vergangenen Juli übernommen hat.

Text: Cornelia Zogg

**G**eräusche begleiten unseren Alltag – einige verursachen Stress, andere fördern unsere Erholung. Während die Lärmbekämpfung in den letzten Jahrzehnten vor allem bemüht war, die lautesten Geräuschpegel zu senken, führen Verdichtung und die fortschreitende Technisierung zu einer stetigen grossflächigen Verlärmung. Dem Trend möchte Jean Marc Wunderli, neuer Leiter der Empa-Abteilung «Akustik/Lärminderung», entgegenwirken: «Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass durch Lärm verursachter Stress besser ertragen wird, wenn ein Zugang zu Grün, zu Erholungsräumen gewährleistet ist.» Des Themas wollen sich die Forscherinnen und Forscher in Wunderlis Team in den nächsten Jahren annehmen und die wissenschaftlichen Grundlagen für einen verbesserten Schutz wohltuender akustischer Landschaften erarbeiten. Im Fokus steht

der urbane Raum und die Frage, wie die Lebensqualität und Gesundheit auch in stark verdichteten Gebieten aufrechterhalten und gefördert werden kann.

## DER GERÄUSCHCHARAKTERISTIK AUF DER SPUR

Bei der Lärmforschung steht für Wunderli nicht die Anzahl Dezibel im Zentrum, sondern der Mensch. «Die menschliche Wahrnehmung ist viel komplexer, als dass sie durch eine blosse Dezibel-Zahl abgebildet werden könnte», sagt er. Ein klassisches Beispiel sind Windturbinen. Im Vergleich zu Strassenlärm fühlen sich Anwohner bei gleichem Lärmpegel durch den Lärm von Windturbinen deutlich mehr gestört. Das liege an der Zusammensetzung und Frequenz der akustischen Signale, erklärt der Forscher. Eine tiefe Frequenz, im Takt unseres Herzschlags, beenge die Zuhörer. «Anwohner von Windturbinen erklären, dass sie das Gefühl haben, das

sonore Wummern der Windräder zwingt ihnen einen bestimmten Herzrhythmus auf, was bei ihnen natürlich Stress auslöst», so Wunderli. So gehört nicht nur die Akustik als Teilgebiet der Physik zu seinen Kernthemen, sondern auch die sogenannte Psychoakustik. Wunderli und sein Team arbeiten eng mit Soziologen, Psychologen und Epidemiologen zusammen, um nicht nur den Lärm an sich, sondern auch dessen Wirkung auf den Menschen zu erforschen.

Als Jean Marc Wunderli seine Forscherkarriere nach dem Studium als ETH-Kulturingenieur an der Empa startete, unterschied sich die Abteilung Akustik erheblich von dem, was sie heute ist. «Die Akustik-Abteilung war wie eine Art kleines Ingenieurbüro.» Als Teil seiner Tätigkeit beurteilte er Lärmquellen wie Schiessanlagen. Forschung stand damals noch nicht im Vordergrund. Doch als die Empa um die Jahrtausendwende



**JEAN MARC WUNDERLI**  
Neuer Leiter der Abteilung  
Akustik/Lärminderung

Bild Empa / Gian Vaiti

begann, sich von einer klassischen Prüfanstalt zu einer modernen Forschungsinstitution zu wandeln, veränderte sich auch die Abteilung. «Damals stand sogar die Diskussion im Raum, die Akustik zu privatisieren», erklärt Wunderli.

Diese Idee sei aber begraben worden – zum Glück, wie er anfügt. Die Empa als unabhängige Institution sei zentral, und deren Gutachten genossen einen enormen Stellenwert. «Wir profitieren enorm von unserer engen Vernetzung mit Verwaltung, Politik und Industrie», erklärt er. Einerseits sind die Empa-Forschenden Ansprechpartner für das Bundesamt für Umwelt (BAFU) oder das Bundesamt für Energie (BFE). Andererseits arbeiten sie eng mit Industriepartnern zusammen, um Materialien und Technologien zu entwickeln, die den Lärm zu reduzieren helfen.

#### VOM JET BIS ZUR DROHNE

Auch bei eher unkonventionellen Fragen setzt die Schweiz auf die Kompetenz der Akustikerinnen und Akustiker der Empa, beispielsweise bei der Beschaffung neuer Kampfjets. Die Empa begleitet das laufende Evaluationsverfahren, misst die Lautstärke der Jets im Betrieb und erstellt Quellenmodelle für sämtliche Kandidaten. Dies erlaubt die Simulation von Einzelflügen sowie ganzer Betriebsszenarien. Dadurch kann beurteilt werden, welcher Lärmbelastung die Bevölkerung nach Einführung neuer Jets ausgesetzt sein wird.

Die Kampfjets von heute sind vielleicht die Drohnen von morgen, und auch hier setzen die Bundesämter auf Wunderlis Expertise, um einen Blick in die Zukunft zu wagen. Der technologische Fortschritt eröffnet hier gänzlich neue Möglichkeiten, wie erste Versuche mit Drohnen-transporten zeigen. Was es bedeute, wenn Hunderte von Drohnen durch Schweizer Städte surren, das lässt sich

«Die menschliche Wahrnehmung ist viel komplexer, als dass sie durch eine blosse Dezibel-Zahl abgebildet werden könnte»

heutzutage schwer vorstellen. Wie laut kann das tatsächlich werden? Und als wie störend wird es empfunden? Fragen, denen Wunderlis Team nachgeht. Ein Weg, um sich solche Geräuschkulissen vorstellen zu können, ist die so genannte Auralisierung – also das Hörbarmachen von akustischen Landschaften. Dabei generieren die Forschenden mit Hilfe von Algorithmen die exakten Emissionen von unterschiedlichen Lärmverursachern, beispielsweise Züge. Alles vollkommen digital und aus dem Computer.

#### LÄRM MACHT KRANK

Im kommenden Jahr wird Wunderli Präsident der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung, bei der er zurzeit das Amt des Vize-Präsidenten innehat. Grenzwerte sind ihm nicht zuletzt deshalb ein grosses Anliegen, weil sie ein wichtiger Treiber sind, um den notwendigen Druck aufzubauen, technische Lösungen auch in der Praxis einzusetzen. «Lärm ist zusammen mit der Luftverschmutzung eine der wichtigsten Umwelteinwirkungen auf den Menschen», erklärt er. Lärm ist nicht nur eine Empfindung, die als angenehm oder unangenehm bewertet wird, sondern sie hat auch medizinische Auswirkungen, die überraschen: So sind rund 500 Herzinfarkte pro Jahr und rund 2500 Fälle von Diabetes in der Schweiz auf die Folgen von Lärm zurückzuführen. Lärm zieht also auch volkswirtschaftliche Kosten nach sich. «Es ist ein wichtiges Thema, aber auch ein Spannungsfeld», so Wunderli.

Eines der Spannungsfelder ist der Flugverkehr, der aus der modernen Welt zwar kaum wegzudenken ist, aber schädliche Luftemissionen und Lärm verursacht. Diese Spannung wird sich auch künftig laut Wunderli nicht lösen lassen. Die Akustikerinnen und Akustiker der Empa liefern jedoch die wissenschaftlichen Grundlagen für politische Diskussionen und arbeiten eng mit allen Beteiligten an technischen Lösungen, die die negativen Auswirkungen zumindest mindern können.

Der Empa-Forscher selbst ist durch seine Arbeit natürlich stärker auf Lärm sensibilisiert, auch da er sich dessen Auswirkungen bewusst ist. In der Freizeit geniesst er daher die Ruhe der Natur, zum Beispiel beim Spazieren mit seinem Hund oder in den Ferien fernab touristischer Zentren. Eine Ruhe, die ihm bei seiner künftigen Arbeit wohl kaum gegönnt sein dürfte: Er muss als Leiter der Akustik-Abteilung an der Empa schon berufsmässig für alle Lärmfragen ein offenes Ohr haben.

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter:  
<https://www.empa.ch/web/s604/zuglaerm-simulation>



**LÄRMMESSUNGEN**  
Jean Marc Wunderli bei Lärmmessungen von Kampfjets am Flugplatz in Payerne. Die Empa begleitet das laufende Evaluationsverfahren für den Kauf neuer Kampfflugzeuge mit umfangreichen Messungen und modelliert die zu erwartende Lärmbelastung durch die Kampfjet-Kandidaten.



Bilder: Rolf Dammer, VBS

**WUNDSPION**

Terahertz-Forscher Lorenzo Valpiano hat eine Phasenbestimmungstechnik entwickelt, mit der sich ein verborgenes Objekt hinter einem Glasfaser-Textil sichtbar machen lässt.



# IM GEHEIMDIENST IHRER MEDIZIN

Ob eine Wunde unter einem Verband gut verheilt, lässt sich von aussen nicht erkennen. Empa-Forscher ermöglichen nun den Blick durchs Pflaster à la James Bond. Die verfeinerte Anwendung von Terahertz-Strahlung könnte im medizinischen Bereich die Analyse mehrschichtiger Gewebe voranbringen und bei der Wundbehandlung oder der Diagnostik von Blutgefässablagerungen zum Einsatz kommen.

Text: Andrea Six

**E**in Abend im Casino, der Spion im Smoking zieht das neueste Gadget aus der Tasche: eine blau getönte Brille. Und mit dem Blick durch die Spezialgläser vermag James Bond in «Die Welt ist nicht genug» mühelos durch die Kleidung der Casino-Schurken zu sehen und ihre Waffen unter den Jacketts zu erkennen.

Doch nicht nur fiktive Gestalten wie Bonds tüftelnder Quartiermeister Q befassen sich mit dem Röntgenblick. In der Realität wird der Blick durchs Textil bereits angewendet, beispielsweise bei den Sicherheitschecks am Flughafen mittels so genannter Body- oder Nacktscanner. Damit die freie Sicht auf verborgene Objekte auch in der Biomedizin genutzt werden kann, entwickeln Empa-Forscher neue Verfahren, die beispielsweise einen Blick auf eine Wunde ermöglichen, ohne den Verband ablösen zu müssen.

Hierbei werden allerdings nicht ionisierende elektromagnetische Strahlen, wie bei der Röntgenuntersuchung beim Arzt, eingesetzt, sondern Terahertz-Strahlen im Wellenlängenbereich von 0,1 bis 1 Millimeter. Damit liegen die Wellen zwischen wärmendem Infrarot und Radiowellen und sind gesundheitlich unbedenklich.

**TRANSPARENTE TEXTILIEN**

Das Team um Peter Zolliker und Erwin Hack von der Empa-Abteilung «Transport at Nanoscale Interfaces» hat nun ein vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF\*) gefördertes Projekt abgeschlossen, bei dem die Terahertz-Strahlen nicht nur versteckte Objekte aufspüren sollen, sondern ebenfalls die Wechselwirkung zwischen verdecktem Zielobjekt und sichtbarer Oberfläche ermitteln. Diese Weiterentwicklung der Terahertz-Technik lässt sich künftig beispielsweise für die schonende Beobachtung von Wunden nutzen, die in einem Verband

sicher verpackt sind. Denn derzeit lassen sich zwei Vorgaben bei der Wundpflege nicht optimal vereinen: Einerseits möchte man den Patienten nicht dem Risiko einer Infektion aussetzen oder das fragile heilende Gewebe beschädigen, indem man einen Verband zu häufig ablöst. Andererseits ist das Monitoring von komplexen Wunden, etwa nach Verbrennungen oder bei chronischen Hautschäden, nötig und trägt zur personalisierten medizinischen Behandlung bei. Terahertz-Strahlen, für die eine Vielzahl von Materialien wie Textilien, Plastik, Papier und Holz transparent ist, erlauben hingegen eine berührungsfreie Inspektion. «Bisher war die Bildauflösung von Terahertz-Systemen allerdings ziemlich bescheiden», erklärt Empa-Forscher Lorenzo Valpiano. Zudem sei der Effekt von Textilien auf der Haut bisher nicht direkt beobachtbar gewesen.

Will man aber die Interaktion von Textil und Haut bestimmen, müssen auch die Eigenschaften des bedeckenden Materials in der Bildrekonstruktion der Hautoberfläche berücksichtigt werden. Valpiano hat hierzu eine neue Phasenbestimmungstechnik entwickelt, mit der das gewünschte Objekt und das bedeckende Textil mittels Durchstrahlungsgeometrie erfasst werden können.

Nötig sind unter anderem ein Dauerstrich-Gaslaser als Quelle der Terahertz-Strahlung und ein Flächendetektor, der die resultierenden Beugungsmuster aufnimmt. Mit Hilfe eines speziellen Phasenbestimmungs-Algorithmus lässt sich eine zusammenhängende, dreidimensionale Rekonstruktion aller Gebilde erstellen, da der Algorithmus die Trennung der Durchstrahlungsfunktionen der beiden Objekte erlaubt. Vergleichbar ist der Vorgang dem Auseinandersammeln von Papieren am Bürodrucker, wenn mehrere Druckaufträge gemischt im Ausgabefach landen.



**DURCHSICHT**  
Terahertz-Strahlen erlauben es, ein Objekt (oben) durch Textilien hindurch abzubilden, wie die Rekonstruktion (unten) zeigt.

**SCHÄRFUNG BIS IN NANOMETERBEREICH**

Während Körperscanner am Flughafen eine Auflösung im Millimeterbereich aufweisen, haben die Empa-Forscher die in ihren Experimenten auf zwei Zehntelmillimeter optimiert. Und: Weitere Schärfungen bis in den Nanometerbereich sollen folgen. So sollten sich künftig Blut, Hautprofil und Textilien gut unterscheiden lassen. Als weitere Anwendungen in der Biomedizin bieten sich die bildgebende Krebsdiagnostik ohne Kontrastmittelgabe und die nicht-invasive Analyse von Blutgefässen mit verdächtigen Ablagerungen an. ■

\*SNF Projekt «Mechanical contact of skin and textiles: THz imaging and modelling of the interface»

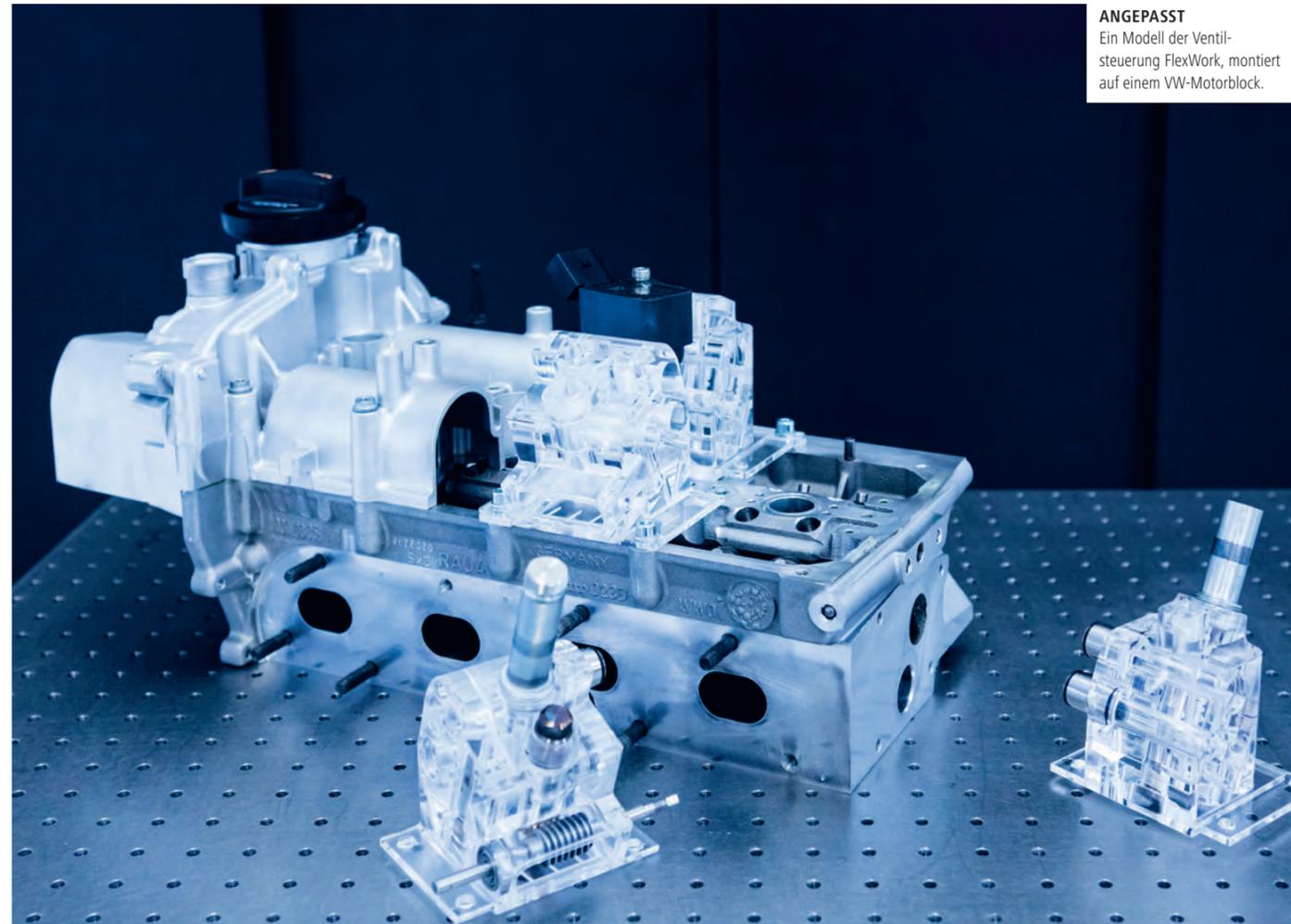
Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s405/thz-lab](http://www.empa.ch/web/s405/thz-lab)

Fotos: Empa

# ÖKO-TUNING FÜR MOTOREN

An der Empa wurde ein neuartiger, elektrohydraulisch betätigter Ventiltrieb für Verbrennungsmotoren entwickelt. Ventilhub und Steuerzeiten sind völlig frei wählbar. Die Technik läuft seit Monaten erfolgreich auf einem VW-Vierzylinder-Motorblock im Prüfstand der Empa und zeigt bis zu 20 Prozent Treibstoffersparnis. Der Ventiltrieb macht den Motor zudem höchst anpassungsfähig an erneuerbare Treibstoffe.

Text: Patrik Soltic und Rainer Klose



**ANGEPASST**  
Ein Modell der Ventilsteuerung FlexWork, montiert auf einem VW-Motorblock.

ohne Zündfunken selbst entzündet und praktisch schadstofffrei verbrannt.

## ZYLINDERKOPF OHNE ÖL

Eine weitere Spezialität des an der Empa aufgebauten Systems ist die Wahl der Hydraulikflüssigkeit: Anstatt wie üblich ein Öl zu verwenden, wird ein Wasser-Glykol-Gemisch, also Motorkühlwasser, eingesetzt. Dieses Medium eignet sich aufgrund der physikalischen Eigenschaften sehr gut für schnell schaltende hydraulische Systeme, da es sehr steif ist und folglich weniger Verluste verursacht. Dadurch wird der Zylinderkopf komplett ölfrei, was dazu führen kann, dass für den restlichen Motor ein einfacheres Motorenöl mit längeren Wechselintervallen eingesetzt werden kann.

## MEHRERE MONATE VERSUCHSBETRIEB

Im Rahmen des vom BFE geförderten Projekts FlexWork wurde der neue Ventiltrieb in einem mit Erdgas betriebenen – von einem VW-1.4I-TSI-Motor abgeleiteten – Personenwagenmotor in Betrieb genommen. Die erforderlichen Bauteile fertigte die Versuchswerkstatt der Empa. Das Steuerungssystem für den Versuchsmotor entwickelten die Empa-Forscher selbst. Der Ventiltrieb läuft seit Oktober 2018 auf einem Motorprüfstand der Empa und hat bereits viele Millionen Betätigungen im befeuerten Motorbetrieb problemlos überstanden.

Die FlexWork-Ventilsteuerung kommt dabei mit preisgünstigen Komponenten aus. Es werden keine teuren, sehr schnell schaltenden Ventile und keine aufwändige Sensorik benötigt. Die Empa ist in Gesprächen mit Motorenherstellern für den Transfer der Technologie, die sich nicht nur für Verbrennungsmotoren, sondern auch für Kompressoren eignet.

Der Ventiltrieb ist das Atmungsorgan von Verbrennungsmotoren: Er steuert die Zufuhr von Frischluft und die Ableitung der Abgase, was als Gaswechsel bezeichnet wird. Serienmotoren arbeiten heute ausschliesslich mit mechanisch angetriebenen Nockenwellen, häufig ausgerüstet mit einer teilweise recht aufwändigen Zusatzmechanik, etwa der Fiat Multi-Air-Technik. Damit kann ein von der Nockenwelle vorgegebenes Ventilbewegungsmuster modifiziert werden, was praktisch immer erhöhte Reibung verursacht, also Energie kostet. Dennoch bleibt die Flexibilität begrenzt. Gesucht – unter anderem für

die Anpassung an wechselnde Treibstoffeigenschaften – sind schnelle Ventilbewegungen auch bei niedrigen Drehzahlen, Hubanpassungen und variable Ventilsteuerzeiten, die für jeden Zylinder einzeln vorgegeben werden können.

## OPTIMIERTER GASWECHSEL UND VERRINGERTE REIBUNG

Patrik Soltic und sein Team der Empa-Abteilung «Fahrzeugsantriebssysteme» erfanden und entwickelten gemeinsam mit dem Hydraulikspezialisten Wolfgang Schneider einen elektrohydraulischen Ventiltrieb, der gegenüber heutiger Serientechnik deutlich flexibler ist. Die Ventile werden hydraulisch betätigt und einzeln über eine Magnetspule elektrisch

angesteuert. Sobald ein Steuerstrom fließt, öffnet sich ein speziell ausgelegtes Hydraulikventil, welches erlaubt, dass Hydraulikflüssigkeit das Gaswechselventil in Millisekunden gegen eine Feder auf den gewünschten Hub öffnet. Wird der Strom abgeschaltet, schliesst sich das Gaswechselventil durch die Federkraft wieder und speist dabei den Grossteil der zum Öffnen benötigten hydraulischen Energie zurück in das Hydrauliksystem. «Unser Flexwork-Versuchsmotor zeigt über weite Betriebsbereiche einen deutlich geringeren Energiebedarf als nockenwellengetriebene Motoren», sagt Projektleiter Patrik Soltic. Zusammen mit einem optimierten Gaswechsel ist der Treibstoffverbrauch

des Versuchs-Ottomotors in für Personenwagen typischen Lastbereichen rund 20 Prozent geringer als bei klassischen Motorkonzepten mit Drosselklappe und Ventilsteuerung über die Nockenwelle.

## ANPASSUNGSFÄHIG AUF ERNEUERBARE TREIBSTOFFE

Durch die Wahl der Betriebsparameter können Öffnungs- und Schliesszeit sowie der Ventilhub für jeden Zylinder völlig frei eingestellt werden. Damit kann jeder Motorbetriebszustand von Arbeitszyklus zu Arbeitszyklus verändert werden, zum Beispiel durch eine intelligente Lastregelung, durch die Wahl der im Zylinder verbleibenden Restgasmenge (Abgasrückführung), oder durch eine für den

Fahrer nicht bemerkbaren Deaktivierung nicht benötigter Zylinder. Dies macht den Motor höchst anpassungsfähig an neue erneuerbare Treibstoffe: Sauerstoffhaltige Treibstoffe wie Methanol oder Ethanol erlauben zum Beispiel, mehr Restgas im Zylinder zu belassen. Erdgas, Biogas und aus Wind- und Solarstrom erzeugtes Syngas besitzen erhöhte Klopfestigkeit: auch darauf kann der Ventiltrieb flexibel reagieren. Zudem lassen sich alternative Verbrennungskonzepte vergleichsweise einfach realisieren, zum Beispiel eine homogene Selbstzündung: ein Treibstoff-Luft Gemisch wird durch die Einstellung der korrekten Bedingungen gegen Verdichtungsende im richtigen Moment

Foto: Empa

# ROMANTISCHE REPLIKATE

Ein Musikstück so zu spielen, wie es vom Komponisten ersonnen wurde, liegt im Trend. Woher aber die raren historischen Instrumente nehmen? Die Lösung wären exakte Kopien der begehrten Originale. Ein Forscherteam mit Beteiligung der Empa analysiert derartige Replikat, mit dem Ziel, historische Posaunen mit ihrem typischen Klang nachzubauen.

Text: Andrea Six



#### EXAKTE KOPIE

Das historische Original (vorn) einer romantischen Posaune wurde von den Akustikforschern mit einem exakten Replikat (Mitte) der Experten vom Blechblasinstrumentenbau Egger in Basel und einem modernen Instrument (hinten) verglichen.

**M**usiker und Dirigenten der Klassikszene verlangen danach, und der Basler Instrumentenbauer Rainer Egger möchte liefern: Replikat von Posaunen aus der Romantik. Besonders an diesen Instrumenten ist ihr dunkler Klang, der die Symbolik in den damaligen Kompositionen zur Geltung kommen lässt. Beteiligt am Innosuisse-Projekt «The Sound of Brass» der Hochschule der Künste in Bern sind auch Empa-Forscher, die Material und Klang der historischen Originale analysierten – und die Ergebnisse mit den ersten Replikaten verglichen. Das Projekt soll zeigen, wie sich Nachbauten herstellen lassen, die historischen Instrumenten klanglich ebenbürtig sind oder sie gar übertreffen.

Egger, der Umsetzungspartner des Projekts, hat sich auf den historisch-informierten Instrumentenbau spezialisiert und will die Deutsche Romantische Posaune aus dem 19. Jahrhundert neu erstehen lassen. Brahms, Mahler und Bruckner mögen ihre Kompositionen für diese Posaunen geschrieben haben, denen Zeitgenossen einen «fabelhaft weichen und vollen Ton» bescheinigten. «Heutige Posaunen klingen anders», erklärt Egger. Er ist überzeugt, dass Konstruktionsweise, Material und Fertigungstechnik für den einzigartigen Klang verantwortlich sind. Wissenschaftlich bewiesen war dies bisher indes nicht.

#### PRÄZISE BEHUTSAMKEIT

Daher untersuchte der Empa-Forscher Martin Tuchschnid vom Empa-Labor «Fügetechnologie und Korrosion» 64 romantische Posaunen. Mit welchen Materialien Instrumentenbauer damals gearbeitet hatten, ermittelte er mittels mobiler energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie – eine zerstörungsfreie Methode, die zur Untersuchung metallischer Werkstoffe im Bau und in

der Industrie eingesetzt wird. Daraus resultierte ein Materialkatalog, der die verwendeten Legierungen minutiös auflistet. Man erfährt etwa, dass Teile der Posaune wie Kranz, Schallstück und Zug oft aus verschiedenen Materialien gearbeitet wurden. Häufig verwendet wurden Messing, die rötliche Kupferlegierung Tombak und Neusilber, eine Kupferlegierung mit Nickel und Zink. «Die Analysen ähnelten einer archäologischen Ausgrabung», so Tuchschnid. Denn es war schlicht nicht bekannt, woraus die historischen Posaunen bestehen.

«Die Replikat sollen wärmer, dunkler und sanfter klingen als moderne Instrumente»

#### WARM, DUNKEL, SANFT

Instrumentenbauer Egger wählte daraufhin geeignete Materialien aus und baute die Posaunen nach – in Handarbeit. Eggers Hypothese: Die Replikat sollten wärmer, dunkler und sanfter klingen als moderne Instrumente. Physikalisch messbar ist dies etwa in Form von Schallfrequenzen und -amplituden. Damit der Klang bei derartigen Experimenten nicht von der Spieltechnik des Musikers beeinflusst wird, entwickelte Egger zudem gemeinsam mit Experten der Empa-Abteilung «Akustik/Lärminderung» ein Gerät, das die Luftsäule in der Posaune kontrolliert anregt.

Die Empa-Forscher analysierten den Klang der Replikat und der Originale in einem reflexionsarmen Labor. Wie sich das Material beim Spielen verhielt, ermittelten sie mit einem «Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer». Ihr Fazit: Material, Fertigungstechnik und Design des Instruments haben einen deutlichen

Einfluss auf Klang und Struktur dynamik der Posaune. «Wir konnten erstmals zeigen, dass die stehenden Schallwellen in Blechblasinstrumenten und das Material über Resonanzen in Wechselwirkung treten, was Spielbarkeit und Klang deutlich beeinflusst», erklärt der Empa-Akustikforscher Armin Zemp.

Die Analysen ergaben zudem Hinweise zum Instrumentenbau, etwa die ideale Position für Querverstrebungen sowie Vorgaben für die thermische Behandlung. «Wird das Blech geglättet, bauen sich interne Spannungen ab. Die Posaune klingt dadurch deutlich weicher, da sich das Schwingungsverhalten des Materials ändert», so Zemp. Zudem ergeben härtere Legierungen mit höherem Zink- und Nickelanteil eine grössere Schallleistung.

Dass die so gearbeiteten Replikat überzeugen, zeigen erste Reaktionen von Experten. Ian Bousfield, Dozent für Posaune an der Berner Hochschule der Künste, spielte ein solches Instrument bereits auf Konzerten mit dem Sinfonieorchester Biel Solothurn. «Das Publikum fand, dass die Replikat manchmal sogar ausdrucksstärker klingen als das Original», sagt der Posaunenprofessor. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s202](http://www.empa.ch/web/s202)

## ZWEITER PLATZ FÜR SWISSLOOP



**ERFOLGREICH**  
Das Swissloop-Team holt an der Hyperloop Pod Competition die Silbermedaille.

Beim Finale der SpaceX Hyperloop Pod Competition in Los Angeles beschleunigte die Transportkapsel «Claude Nicollier» von Swissloop auf der nur 1,25 Kilometer langen Teststrecke auf beeindruckende 252 km/h. Die Studierenden der Empa, der ETH Zürich und anderer Schweizer Hochschulen sicherten sich damit den zweiten Platz. Sie durften sich ausserdem über einen Innovations-Award für ihren linearen Induktionsmotor freuen. Und um den Schweizer Triumph zu komplettieren, wurde ein Team von der EPFL Dritter.

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

## WASSERSTOFF-MOBILITÄT LIVE

An der Elmar-Expo im Verkehrshaus der Schweiz pilgerten Besucher jeden Alters zu den Elektromotorrädern, der elektrischen Vespa und den Elektrofahrern mehrerer Schweizer Hersteller. Die Spezialisten der Empa und der Avenergy Suisse waren vor Ort und informierten sie über die Wasserstoffmobilität. In der Simulation der Empa-Wasserstofftankstelle konnte jeder Besucher ausprobieren, wie sicher und schnell ein Brennstoffzellenfahrzeug mit nachhaltig erzeugtem Wasserstoff betankt werden kann.

[www.empa.ch/de/web/s604/move700bar](http://www.empa.ch/de/web/s604/move700bar)



**ANSCHAULICH**  
Wasserstoff-Experte Florian Freund (rechts) erläutert den Antrieb des Hyundai Nexo.

Fotos: Empa, Quade & Zurfluh AG, Adam Karas



**RECYCLING**  
Die Digitalisierung erlaubt neue Fortschritte bei der Wiederverwertung seltener Metalle

## DIGITALISIERUNG ERLEBEN

Am Schweizerischen Digitaltag am 3. September brachten unter dem Motto «digital gemeinsam erleben» über 90 Partner der Bevölkerung das Thema Digitalisierung näher. Die Empa war dabei und zeigte den Besuchern, wie die Digitalisierung Fortschritte in der personalisierten Medizin und der Wiederverwertung von seltenen Metallen ermöglicht.

[www.digitaltag.swiss](http://www.digitaltag.swiss)

## VERANSTALTUNGEN DER EMPA-AKADEMIE

30. OKTOBER 2019

**Kurs:** Additive Fertigung von Metallen  
**Zielpublikum:** Wissenschaft und Industrie  
[www.empa-akademie.ch/addfert](http://www.empa-akademie.ch/addfert)  
Empa, Dübendorf

4. NOVEMBER 2019

**RFA-Seminar Digitalisierung im Bauwesen**  
**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
[www.empa-akademie.ch/rfa](http://www.empa-akademie.ch/rfa)  
Empa, Dübendorf

25.–27. NOVEMBER 2019

**Kurs:** Advanced X-Ray Diffraction Methods for Coatings  
**Zielpublikum:** Wissenschaft und Industrie  
[www.empa-akademie.ch/ccmx](http://www.empa-akademie.ch/ccmx)  
Empa, Dübendorf

27. NOVEMBER 2019

**Kurs:** Polymerwerkstoffe für technische Anwendungen  
**Zielpublikum:** Öffentlichkeit  
[www.empa-akademie.ch/polymerwerkstoffe](http://www.empa-akademie.ch/polymerwerkstoffe)  
Empa, Dübendorf

28. NOVEMBER 2019

**Sensors: from Academic Research to Industrial Use**  
**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
[www.empa-akademie.ch/technobriefing](http://www.empa-akademie.ch/technobriefing)  
Neuchâtel

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

THE PLACE WHERE INNOVATION STARTS.

