

# Empa Quarterly

FORSCHUNG & INNOVATION II #71 II APRIL 2021



FOKUS

## ENERGIEHAUSHALT RENOVIEREN

KLEBER FÜR INNERE WUNDEN  
SONNENENERGIE AUS DEM TIEFENLAGER  
FARBMOLEKÜLE IN EKSTASE



## [ INHALT ]

[ FOKUS: ENERGIEHAUSHALT RENOVIEREN ]



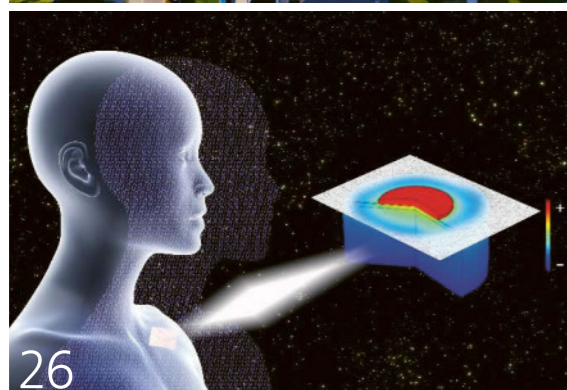
14



22



08



26



30

## [ FOKUS ]

## 14 ALTBAUTEN

Erst sortieren, dann sanieren

## 20 EIGENHEIM

Wohnen in der Kristallkugel

## 22 SIMULATION

Neue Energiesysteme komponieren

## 24 ENERGIESPEICHER

Sonnenenergie aus dem Tiefenlager

## [ THEMEN ]

## 08 RECYCLING

Was bringen Altreifen im Asphalt?

## 12 MEDIZINTECHNIK

Pflaster für innere Wunden

## 26 PERSONALISIERTE MEDIZIN

Der simulierte Patient

## 28 OPTIK

Moleküle in kollektiver Ekstase

## 30 ALTLASTEN

Entgifter aus der Deponie

## [ RUBRIKEN ]

## 04 WISSEN IM BILD

## 06 IN KÜRZE

## 34 UNTERWEGS

## [ TITELBILD ]



Das Heizen und Kühlen von Gebäuden gehört zu den grössten CO<sub>2</sub>-Quellen in der Schweiz. 1,8 Millionen Wohngebäude gibt es. Wenn die Energiewende gelingen soll, müssen die meisten davon saniert werden. Was man tun kann und wie man Prioritäten setzt, zeigt dieses Heft.  
Bild: iStockphoto

## [ 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

## PRODUKTION

rainer.klose@empa.ch

ISSN 2297-7406

Empa Quarterly (deutsche Ausg.)



myclimate.org/01-21-197924

Empa Social Media



## IN KREISLÄUFEN DENKEN

Liebe Leserin,  
lieber Leser

Fast alles hat einen Anfang und ein Ende: das Leben, die Corona-Krise (hoffentlich), die Präsidentschaft Donald Trumps – und unser Umgang mit Konsumartikeln. Herstellen, nutzen, wegwerfen, entsorgen. Dass so enorm viel Abfall anfällt und wertvolle Materialien verloren gehen, liegt auf der Hand. Dass unsere natürlichen Ressourcen endlich sind, auch.

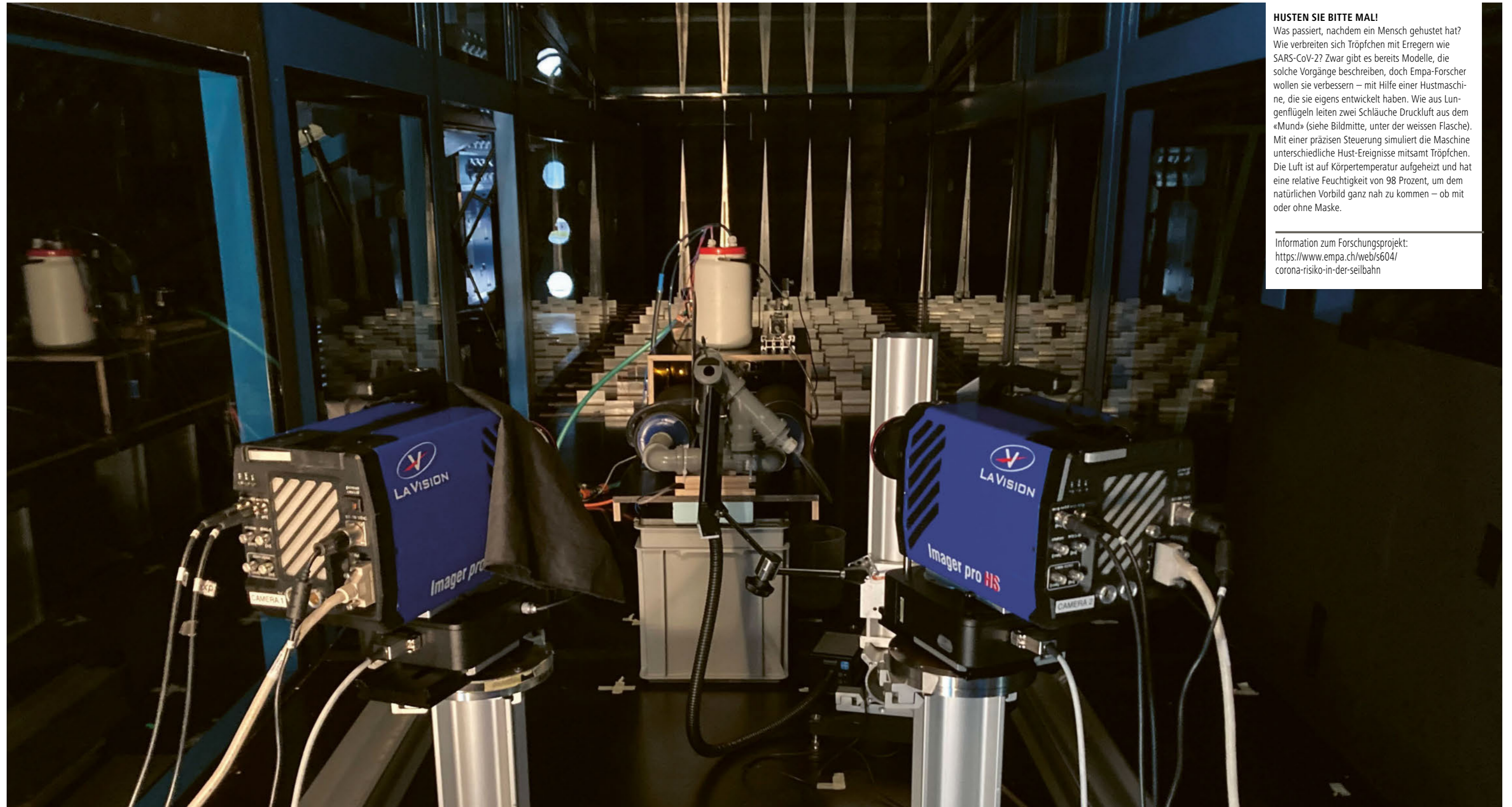
Logische Konsequenz: Wir müssen endlich vom Wegwerf- in den Kreislaufmodus wechseln. Will heissen: (Fast) nix ist Abfall, (fast) alles Rohstoff. Geht vermutlich nicht immer, aber wir sollten es zumindest versuchen.

Etwa, indem wir das Klimagas CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in klimaneutrales Methan verwandeln. Dieser geschlossene Kohlenstoffkreislauf, den wir im Mobilitätsdemonstrator «move» erforschen, ist Thema einer neuen Ausstellung im Verkehrshaus der Schweiz (s. S. 34). Die gleiche Chemie beherrschen auch Mikroben tief unten in der Erdkruste. Ein europäisches Forschungsprojekt will sich dies zunutze machen, um ebenfalls CO<sub>2</sub>-neutrales Methan zu produzieren (s. S. 24).

Selbst alte Autoreifen sollten nicht einfach in der KVA oder auf der Deponie landen; Empa-Forschende nutzen sie, um daraus eine neue Art Asphalt herzustellen und diesen auf seine Praxistauglichkeit zu testen (s. S. 8). Dass aus einer Mülldeponie auch einmal etwas Nützliches kommt, zeigt die Entdeckung verschiedener Bakterienstämme aus Chemiemülldeponien. Diese zersetzen selbst hartnäckigste Umweltgifte – völlig biologisch (s. S. 32).

Viel Spass beim Lesen!  
Ihr MICHAEL HAGMANN





**HUSTEN SIE BITTE MAL!**

Was passiert, nachdem ein Mensch gehustet hat? Wie verbreiten sich Tröpfchen mit Erregern wie SARS-CoV-2? Zwar gibt es bereits Modelle, die solche Vorgänge beschreiben, doch Empa-Forscher wollen sie verbessern – mit Hilfe einer Hustmaschine, die sie eigens entwickelt haben. Wie aus Lungenflügeln leiten zwei Schläuche Druckluft aus dem «Mund» (siehe Bildmitte, unter der weissen Flasche). Mit einer präzisen Steuerung simuliert die Maschine unterschiedliche Hust-Ereignisse mitsamt Tröpfchen. Die Luft ist auf Körpertemperatur aufgeheizt und hat eine relative Feuchtigkeit von 98 Prozent, um dem natürlichen Vorbild ganz nah zu kommen – ob mit oder ohne Maske.

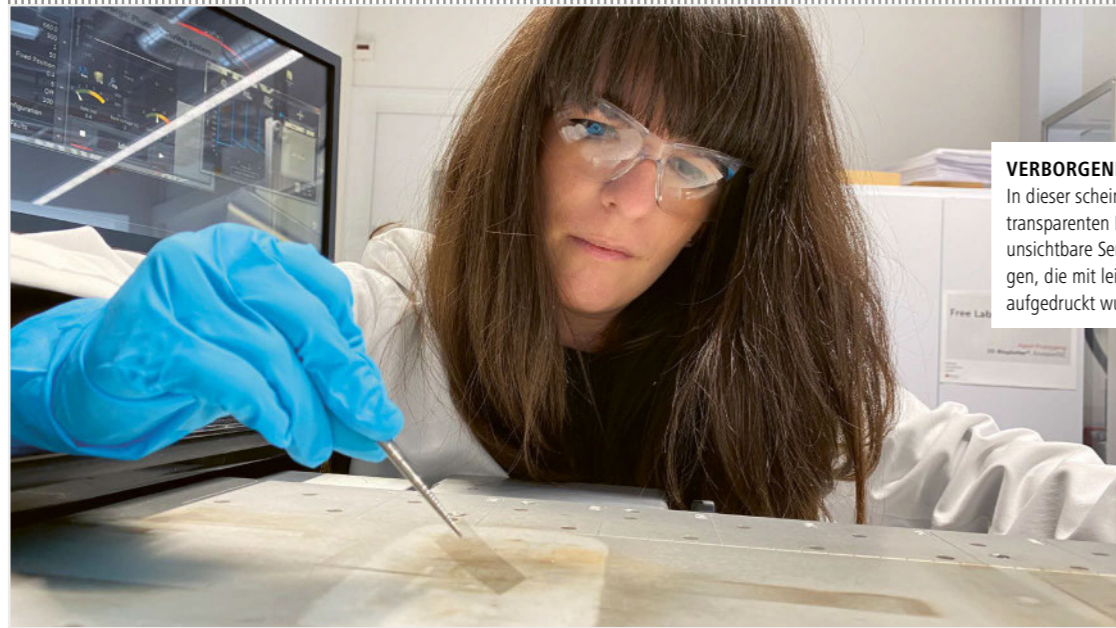
Information zum Forschungsprojekt:  
<https://www.empa.ch/web/s604/corona-risiko-in-der-seilbahn>



Foto: Empa



## DAS UNSICHTBARE TÜRSCHLOSS



**VERBORGENE SICHERHEIT**  
In dieser scheinbar einfachen transparenten Folie sind unsichtbare Sensoren verborgen, die mit leitfähiger Tinte aufgedruckt wurden.

Auf den ersten Blick wirkt die Idee von Empa-Forscherin Evgeniia Gilshtein unscheinbar – oder genauer gesagt: unsichtbar. Was zunächst lediglich wie eine simple Klarsichtfolie aussieht, verbirgt ein ganz neues Mass an Sicherheit in sich. Denn auf das transparente Trägermaterial sind unsichtbare Schaltflächen mit leitfähiger Tinte gedruckt, deren Position nur Eingeweihten bekannt ist. Derartige Schaltungen können etwa als Zugangscode mit einem Türschloss verbunden werden. Werden die Schaltflächen auf der Polymerfolie in einer festgelegten Sequenz gedrückt, lässt sich das Türschloss öffnen.

<https://www.empa.ch/web/s604/transparent-security>



## DIE FILIALE DER ZUKUNFT

Lidl Schweiz möchte seine Filialen künftig noch nachhaltiger und effizienter betreiben. In einem gemeinsamen Projekt mit der Empa wird dieses Vorhaben nun in die Tat umgesetzt. Zunächst werden der Energieverbrauch und das Zusammenspiel der Anlagen in bestehenden Filialen analysiert. Daraus entwickeln die Empa-Forscher ein optimiertes Konzept für die Filialen der Zukunft.

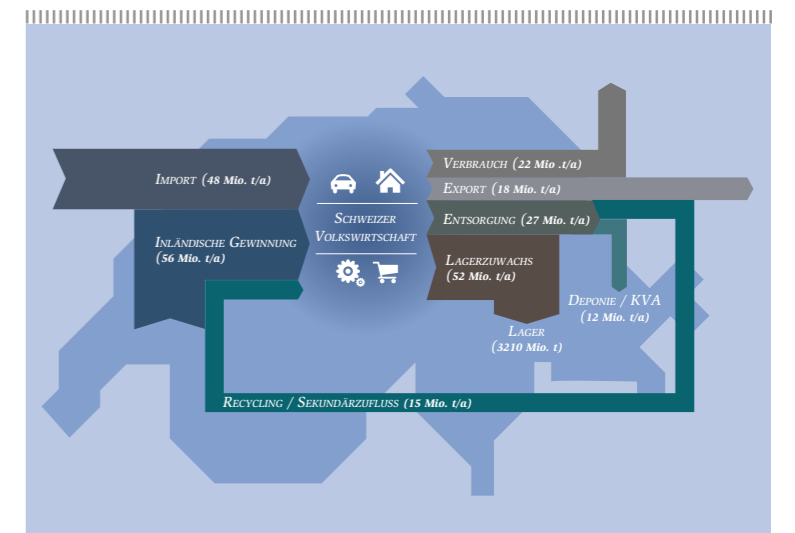
<https://www.empa.ch/web/s604/partnerschaft-lidl>

Fotos: Empa, Lidl Schweiz AG

## DIE SCHWEIZ WIRD SCHWERER

Empa-Forschende haben im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) die gesamten Material- und Energieflüsse der schweizerischen Volkswirtschaft erfasst. Ihr Synthesericht namens MatCH (Material flows Switzerland) liefert nun wichtige Daten und Vergleiche. Interessant: Jedes Jahr wird die Schweiz durch Importe, die im Land verbleiben, um 52 Millionen Tonnen «schwerer». 12 Millionen Tonnen Material werden entsorgt, 18 Millionen Tonnen exportiert.

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



## PRÄZISION

Sensoren im CERN werden oft mittels Fäden oder Drähten positioniert.



## SPANNENDE SUPERFASER FÜRS CERN

Drähte, die gespannt werden, um Beschleunigerkomponenten am CERN auf den Mikrometer genau auszurichten, fransen mit der Zeit aus. Das kann bei Messungen zu Ungenauigkeiten führen. Empa-Forscher entwickeln für das CERN nun ein mit einem speziellen Polymer beschichtetes, metallisiertes Garn, das die Komponenten über längere Zeit ausrichten kann, ohne dabei an Spannung zu verlieren.

[www.empa.ch/web/s402](http://www.empa.ch/web/s402)

Foto: Cern; Grafik: Empa



**BELASTUNGSTEST**

Seit Oktober 2020 liegt zu Testzwecken Gummi-Asphalt an einer vielbefahrenen Kreuzung in Zürich.

# GIB GUMMI FÜR DIE UMWELT

Schweizer Autofahrer nutzen zahllose Autoreifen ab. Statt sie zu verbrennen, liessen sie sich quasi vor Ort wiederverwenden: Im Asphalt anderer Länder steckt längst Gummi aus Altreifen. Die Empa und Partner aus der Praxis beleuchten diese Idee für Schweizer Verhältnisse.

Text: Norbert Raabe

Fotos: Gian Vaitl, Empa

**A**utopendler, die über Verkehrsstress nörgeln, könnten dann und wann den Blick nach unten richten. Denn dort liegt einer, der es schwerer hat: Asphalt erträgt glühende Hitze, Kältestress und jede Menge Druck von oben. Möglichst leise soll er auch noch sein – und in Zukunft natürlich umweltfreundlicher.

Geformt aus einer heissen Gesteinsmischung und dem Bindemittel Bitumen bei etwa 160 Grad sorgt Asphalt für hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoss – durch Produktion, lange Transportwege und den Einbau. Um seine Umweltbilanz aufzubessern, wird Alt-Asphalt, schon heute rezyklierbar, künftig in grossem Stil in neuen Belägen landen. Zudem lassen sich Recyclingbeton oder andere Reststoffe in ihm «entsorgen» – etwa ausgediente Autoreifen, von denen es in der Schweiz reichlich gibt.

Ein Innosuisse-Projekt unter Federführung der Empa-Abteilung «Beton und Asphalt» hat erkundet, welchen Nutzen diese Idee hierzulande haben könnte. Konkret: Können Gummipartikel die Polymere in polymer-modifiziertem Bitumen für hochbelasteten Asphalt ersetzen? Schliesslich verleihen Verbindungen wie das verbreitete Styrol-Butadien-Styrol dem Belag mehr Plastizität, eine bessere Rückverformung und eine längere Lebensdauer.

Der Fokus des Projekts lag auf der Praxis: Nach einigen Vorversuchen entstanden die Asphaltmischungen für die Experimente bei den Herstellern FBB und Weibel AG. Die Sorten orientierten sich am Ernstfall: «SDA 4-12», ein «Flüster»-Deckbelag, in dem viele Luftporen die Lärmemission mindern. Und «AC B22 H», der sich für eine so genannte Binder-schicht darunter eignet – in diesem Fall zeitgemäss mit 30 Prozent Recycling-

asphalt. Auch die ausgewählten Gummigranulate stammten aus der Schweiz, vom Hersteller Tyre Recycling Solutions (TRS) in Préverenges im Kanton Waadt.

**NASS ODER TROCKEN?**

Gummi-Asphalt lässt sich mit zwei Verfahren herstellen. Bei der «nassen» Methode wird das Gummigranulat dem heissen Bitumen zugefügt; dann mischt man die Mixtur mit der definierten Gesteinskörnung – je nach Belag aus Sand und unterschiedlich grossen Steinen. Der Haken dabei: Die Bitumen-Gummi-Masse wird mit der Zeit weniger zähflüssig und das Gummi beginnt sich zu zersetzen; sie lässt sich nur etwa 48 Stunden lang verarbeiten. Beim «trockenen» Verfahren hingegen rieseln die Gummipartikel zunächst in die erhitzte Gesteinsmischung. Das Bitumen kommt erst später hinzu. Weil die Schweizer Fabrikanten darauf eingestellt sind, wählte man diesen Weg.

Die Erfahrungen bei der Herstellung waren beim Baustoffhersteller FBB in Bauma positiv. «Kein Problem», sagt Christian Gubler, Vorsitzender der Geschäftsleitung, «das war einfach.» Die Partikel wurden durch eine Klappe hindurch in die Gesteinsmischung geworfen – in Säcken, die sich bei der hohen Temperatur auflösen. «So wie wir das auch machen, wenn wir Farbstoffe hinzugeben, zum Beispiel für roten Asphalt», erklärt Gubler. Auch bei der Berner Weibel AG gab es keine Schwierigkeiten. «Das Handling war problemlos», sagt Samuel Probst, Leiter bituminöse Baustoffe und Belagswerke.

**STRESSTESTS UNTER WASSER, KÄLTE, DRUCK**

Die fertigen Produkte untersuchte ein Empa-Team um Asphaltspezialistin Lily Poulikakos vom Mikro- bis hin zum Grossmassstab. Neben Standardtests auf Bitumengehalt und Luftporen zeigten Aufnahmen mit dem Elektronenmikroskop, ob und wie sich

die Gummipartikel in der Asphaltmatrix auflösen und verteilen.

Im Spaltzug-Test barsten Probekörper unter Druck von oben – je einer nass und trocken, um zu ermitteln, wie empfindlich sie auf Wasser reagieren. Wie sich das Material bei winterlicher Kälte verhält, zeigten Reissversuche bei minus 12 Grad. Schliesslich der Faktor Verkehr: Im «Hamburg Wheel Tracking»-Test erduldeten Proben in 50 Grad heissem Wasser 10 000 Überfahrten eines gut 70 Kilogramm schweren Stahlrades – ein harter Test auf Spurrillen. In die gleiche Richtung zielte ein Empa-eigener Simulator: Er setzte Beläge von 1,20 Metern Länge in acht Stunden 60 000 langsamen Reifen-Überfahrten mit hohen Lasten aus.

Die Analysen zeigten: Feinheiten entscheiden. So hängt zum Beispiel die optimale Dauer zwischen dem Mischen und dem Einbau auf der Strasse stark von Art und Menge des gewählten Gummigranulats ab. Im Vergleich mit dem altbekannten Polymerbitumen-Asphalt erfüllten die Deckschicht-Asphalte mit 0,7 oder 1 Prozent Gummi die Anforderungen mehrheitlich. Der Widerstand gegen Risse durch Kälte war bei einem Prozent Gummi deutlich grösser als beim Polymerbitumen-Asphalt. Bei der Wasserempfindlichkeit erfüllten die Baustoffe die Schweizer Anforderungen, allerdings mit einer Ausnahme. Und im Empa-eigenen Reifenlastsimulator entstanden in den Gummi-Asphalten zwar kleine, aber tiefere Spuren als im Polymerbitumen-Belag.

Fazit: Trotz einiger Nachteile erfüllte der Gummi-Asphalt die Anforderungen letztlich sicher. «Er ist auf jeden Fall für weitere Untersuchungen für den Einsatz im Strassenbau geeignet», resümiert Empa-Forscherin Poulikakos. Auch beim Hersteller TRS zeigt man sich mit den Ergebnissen zufrieden: ▶



«Wir haben damit eine professionelle Bestätigung bekommen», sagt Sonia Megert, Chief Operating Officer. «Das war eine sehr gute Zusammenarbeit.»

Dass damit nur ein erster Schritt getan ist, ist freilich allen Partnern klar. Das Labor entspricht trotz aller Mühen nicht den realen Verhältnissen, erklärt Poulidakos. Die Experimente geben zwar einen detaillierten Eindruck, doch wie sich die jahrelange Belastung in der Realität auswirkt, «ist dann doch eine andere Sache», so die Spezialistin. «Die Wahrheit liegt letztlich auf der Strasse.»

### DREI VERSUCHSSTRECKEN

Just dort fanden bereits weitere Schritte statt. In den Kantonen Jura und Waadt errichtete die Weibel AG mit Gummigranulat-Asphalt zwei Teststrecken auf Kantonsstrassen. «Ein Rauasphalt auf einer mittelstark belasteten Strecke», erläutert Samuel Probst, «und ein Deckasphalt auf einer relativ hoch belasteten Strasse. Es sollten ja echte Härte-tests sein.»

Anders als bei früheren Erfahrungen mit dem «nassen» Herstellungsverfahren verlief der Einbau «absolut problemlos», so der verantwortliche Leiter. Gerüche durch erhitztes Gummi mussten die Mitarbeiter vor Ort nicht ertragen. Und die Konsistenz und Verarbeitung des Asphalts war mit einem Polymer-modifizierten Asphalt vergleichbar. Seinen wahren Charakter wird er freilich erst nach Jahren zeigen. Der Einbau fand im vergangenen Sommer statt; der Belag steckt damit noch in den Kinderschuhen.

Genauso wie ein weiterer Testasphalt, der als obere Schicht an einer hochbelasteten Kreuzung in Zürich verbaut wurde. Seine Laborwerte waren nicht über alle Zweifel erhaben: Beim Härte-test des Bitumens mit einer eindringenden Nadel schwankten die Resultate stark und lagen teils deutlich über den Sollwerten.

«Das deutet daraufhin, dass er zu weich sein könnte», sagt Belagspezialist Martin Horat vom Tiefbauamt der Stadt Zürich. «Mal schauen, ob es Verformungen gibt, wenn es im Sommer heiss wird.»

Hans-Peter Beyeler, Direktor beim Verband «Eurobitume» in der Schweiz, beunruhigt das nicht sonderlich. «Davon habe ich schon gehört. Ich würde mir da vorerst keine Sorgen machen», sagt der Fachmann, der zuvor fast 13 Jahre als Belagspezialist beim Bundesamt für Strassen (Astra) tätig war. Wenn Gummi und Bitumen vermischt würden, entstehe ein neues Material; auch in seinem Verhalten entspreche es nicht mehr den ursprünglichen Zutaten. Seine Einschätzung: «Der Nadeltest liefert womöglich einfach keine brauchbare Aussage.»

### SCHADSTOFFE IM VISIER

Um gesundheitliche Risiken durch Gummizusätze in Strassenasphalt abzuschätzen, nahmen Chemiker von der Empa-Abteilung «Advanced Analytical Technologies» Bestandteile mit Risikopotenzial unter die Lupe. Die Resultate von Auswaschversuchen, die Auswirkungen eines Regengusses simulieren, zeigten, dass die Gehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Gummi tiefer sind als im Asphalt. Das gilt auch für PAK, die Krebs auslösen können. Bei Schwermetallen diente Zink als Leitelement; davon wurde sehr wenig ausgewaschen. Blei und andere schädliche Schwermetalle waren nur in unbedenklichen Spuren vorhanden. Doch die Tests zeigten, dass Benzothiazole, die bei der Reifenherstellung die Vulkanisation beschleunigen, schnell und in relativ hohen Dosen in die Umwelt gelangen. Der Rat der Fachleute: Vor dem Einbau der Gummipartikel im Asphalt sollten diese Verbindungen entfernt werden, zum Beispiel durch Auswaschen mit Wasser, das anschliessend fachgerecht entsorgt wird.

Dass es in der Branche auch Widerstand gegen Asphalt als «Müllschluck» für Recyclingstoffe und Skepsis gegenüber Gummi in der Strasse gibt, versteht Beyeler freilich – aus eigener Erfahrung. Vor rund 15 Jahren erlebte er, wie auf der A1 im Aargau ein Test mit gummi-modifiziertem Bitumen, als Granulat zugegeben, gründlich daneben ging: Das Material war im Mischgut ungenügend aufgelöst; es bildeten sich Klumpen im Asphalt. In der Fahrbahn verteilten sie sich an der Oberfläche; sie mussten ausgebohrt und mit Gussasphalt aufgefüllt werden.

### DIE WAHRHEIT LIEGT AUF DER STRASSE

Seitdem hat sich einiges getan; warum also, findet Beyeler, nicht nochmals versuchen? Schliesslich gebe es auch gute Erfahrungen – nicht nur in den USA, wo die Technologie seit langem Praxis ist, sondern auch in Bayern. Dort sind gummi-modifizierte Asphalte schon Teil der Bauvorschriften – also Stand der Technik. Die Vorteile, vor allem bei porösen Deckschichten: höhere Abriebfestigkeit, langsamere Oxidation des Bitumens in den vielen Luftporen und damit eine verzögerte Versprödung. Kurzum: eine längere Lebensdauer.

Rohstoff gäbe es jedenfalls genug. Rund 70 000 Tonnen Altreifen fallen pro Jahr in der Schweiz an. Ein kleiner Teil davon wird rezykliert; der grösste Teil aber thermisch verwertet – in Kehrichtverbrennungsanlagen und, en gros, in Zementwerken, wo die Reifen Kohle als Brennstoff ersetzen und so die CO<sub>2</sub>-Bilanz aufbessern.

### EIN NUTZEN FÜR DAS KLIMA?

Welche Auswirkungen die Nutzung von Altreifen in Strassenbelägen auf die Umwelt hat, untersucht Empa-Forscher Zhengyin Piao im Rahmen seiner Dissertation in Kooperation mit dem Institut für Umweltingenieurwissenschaften

der ETH Zürich. Dabei analysierte Piao den gesamten Lebenszyklus von zwei Flüsterbelägen mit Gummiasphalt. Seine Berechnung am Modell eines Strassenstücks von einem Kilometer Länge zeigt, dass diese Beläge beim Energieverbrauch ähnlich abschneiden wie ein Polymerbitumen-Asphalt. Doch sie sorgen für deutlich geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen – vor allem wegen der Polymere im Vergleichsprodukt.

Würden Gummigranulate in Strassen also zum Klimaschutz beitragen? Piao's Antwort: Es kommt auf die Situation an. In der Schweiz sparen Zementwerke durch die Verbrennung von Altreifen so viel CO<sub>2</sub>-Ausstoss ein, dass Asphalt mit Gummi unter dem Strich ein klein wenig schwächer abschneidet als mit Polymeren. Doch gelingt es den Zementwerken wie geplant, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen in den kommenden Jahren noch stärker zu senken oder mit «Carbon-Capture»-Technologien mitsamt unterirdischer Lagerung sogar teils zu neutralisieren: Die Karten wären neu gemischt – womöglich zu Gunsten der Klimabilanz von Gummi-Asphalt.

Ob sich die Idee in der Schweiz durchsetzen könnte, hängt freilich auch vom Markt ab. Einen Vorteil hätten sie, meint Fachmann Samuel Probst vom Hersteller Weibel AG: Zumindest im Moment seien sie günstiger als Polymerbitumen-Asphalte. Sein Fazit formuliert er gleichwohl zurückhaltend: «Ich könnte mir schon vorstellen, dass dafür einmal ein Markt entsteht», sagt er, «wenn sich die Teststrecken auf lange Sicht positiv entwickeln.» ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/s308](http://www.empa.ch/web/s308)



### BITUMEN IM BLICK

Lily Poulidakos leitet an der Empa die Testreihen und hilft, die Eigenschaften von Gummi-Asphalt realistisch einzuschätzen.



# PFLASTER FÜR INNERE WUNDEN

Wunden im Verdauungstrakt zu verschliessen, ist eine Herausforderung. Empa-Forschende haben daher ein Polymer-Pflaster für den Darm entwickelt, mit dem Verletzungen stabil verklebt und abgedichtet werden können.

Text: Andrea Six

## PATENTIERT

Das Team um Inge Herrmann und Alexandre Anthis hat ein Hydrogel-Pflaster entwickelt, das Operationswunden stabil abdichtet.



**E**in geplatzter Blinddarm oder eine lebensgefährliche Darmverschlingung sind Notfälle, die eiligst von Chirurgen versorgt werden müssen. Eine rettende Operation, bei der Gewebe vom Verdauungskanal wieder zusammengefügt werden muss, birgt allerdings einige Risiken. Denn alles, was im Magen-Darmtrakt stetig Richtung Aussenwelt befördert wird, gehört auch tatsächlich dorthin – und sollte keinesfalls ins Innere der Bauchhöhle gelangen. Ätzende Verdauungssäfte und keimbeladene Nahrungsrückstände könnten eine Bauchfellentzündung oder sogar eine tödliche

lich oder gar giftig herausstellten, sind diese Pflaster heutzutage aus bioabbaubaren Eiweissen. Das Problem: Der klinische Erfolg ist nicht immer optimal und variiert je nach verklebtem Gewebe. Denn die Eiweisspflaster sollen vor allem den Heilungsprozess unterstützen, lösen sich jedoch beim Kontakt mit Verdauungssäften zu schnell auf und halten nicht immer dicht. «Leckagen nach Bauchoperationen gehören auch heute noch zu den besonders gefürchteten Komplikationen», erklärt Empa-Forscherin Inge Herrmann, die auch die Professur für Nanopartikuläre Systeme an der ETH Zürich bekleidet.

«Schliesslich würde man eine leckte Milchtüte nicht mit der Nadel zunähen wollen.»

Acrylsäuremethylester, Acrylamid und N,N'-Methylenbisacrylamid arbeitet dabei in perfekter Synergie, da jede Komponente mit einer spezifischen Eigenschaft zum Gesamtwerk beiträgt: eine stabile Bindung an die Schleimhaut, die Ausbildung von Netzwerken, die Stabilität gegenüber Verdauungssäften und Wasserdichtigkeit.

## MASSGESCHNEIDERTE PFLASTER

In Laborexperimenten zeigten die Forschenden, dass das Polymersystem die Erwartungen erfüllt. «Die Haftfähigkeit ist bis zu zehnmal höher als bei herkömmlichen Klebematerialien», sagt Empa-Forscher Anthis. «Weitere Analysen ergaben zudem, dass unser Hydrogel das Fünffache der maximalen Druckbelastung im Darm aushält.» Und im Design des Materials liegt seine massgeschneiderte Wirkung: Der gummiartige Verbundstoff reagiert selektiv mit Verdauungssäften, die aus Darmwunden entweichen könnten, quillt auf und schliesst umso dichter. Der kostengünstige, bioverträgliche Superkleber, der zu einem Grossteil aus Wasser besteht, könnte auf diese Weise Spitalaufenthalte verkürzen und Gesundheitskosten einsparen. Alexandre Anthis plant daher bereits die nächsten Schritte Richtung klinische Anwendung des neuen Wundpflasters: «Wir sind gerade dabei, ein Start-up zu gründen, um dieses innovative Material zur Marktreife zu bringen.»

## STABIL

Das Kompositmaterial hält auch bei Maximalbelastung.



Blutvergiftung (Sepsis) auslösen. Nadel und Faden allein sind allerdings nicht unbedingt das ideale chirurgische Werkzeug, um zwei Darmstücke aneinander zu fügen – schliesslich würde man auch eine leckte Milchtüte nicht zunähen wollen. Empa-Forschende haben daher jetzt ein Pflaster entwickelt, das zwei aneinandergenähte Darmstücke stabil abdichtet und somit gefährliche Lecks verhindert.

## GEFÜRCHTETE KOMPLIKATIONEN

Die Idee, vernähtes Gewebe in der Bauchhöhle mit einem Pflaster zu versiegeln, ist bereits im Operationssaal angekommen. Nachdem sich aber erste derartige Produkte als schlecht verträglich

Das Team um Herrmann und Alexandre Anthis vom «Particles-Biology Interactions» Labor der Empa in St.Gallen suchte deshalb gemeinsam mit Andrea Schlegel, Chirurgin am «Queen Elizabeth University Hospital» in Birmingham nach einem Material, das Darmverletzungen und Operationswunden zuverlässig abdichtet. Fündig wurden sie bei einem synthetischen Kompositmaterial aus vier Acryl-Substanzen, die ein chemisch stabiles Hydrogel bilden. Zudem vernetzt sich das Pflaster aktiv mit dem Darmgewebe bis keine Flüssigkeit mehr durchkommt. Diese neuartige Technologie konnten die Forschenden bereits erfolgreich patentieren lassen. Die Quadriga aus Acrylsäure,

Fotos: Empa



# ERST SORTIEREN, DANN SANIEREN

Die Schweiz ist bebaut. Rund 1.8 Millionen Gebäude stehen im Land, und pro Jahr wird nur ein Prozent dieses Gebäudebestandes saniert. Es dauert also rechnerisch 100 Jahre, bis der Gebäudebestand im Land durchgehend erneuert ist – das wäre zu langsam, um die Energiewende zu schaffen. Doch bevor die Politik stimulierende Förderprogramme beschliesst, muss diese gewaltige Aufgabe zunächst gegliedert werden: Welche Massnahmen sind wo sinnvoll? Womit fangen wir an?

Text: Rainer Klose

**D**as Heizen und Kühlen von Gebäuden trägt zum CO<sub>2</sub>-Ausstoss in allen Industrieländern massgeblich bei. Um die Klimaziele des Bundesrats zu erreichen – Netto Null bis 2050 – muss also auch der Gebäudepark der Schweiz einen Beitrag leisten. Doch Planer und Entscheider brauchen eine Handreichung, um die passenden Massnahmen in der richtigen Reihenfolge einzuleiten. 2019 hat Kristina Orehounig mit ihrem Forscherteam eine solche Sortierung angestellt.

## ARCHETYPEN ALLER HÄUSER DER SCHWEIZ

Es gibt rund 1.8 Millionen Wohngebäude in der Schweiz. Den Sanierungsbedarf für jedes Haus einzeln zu modellieren, würde einen gewaltigen Rechenaufwand bedeuten. Also griffen die Empa-Forschenden auf «Data Mining» zurück. Sie durchforsteten nationale Datenbanken und sortierten die Gebäude in 50 verschiedene Archetypen, sortiert nach Baujahr, Heizungstyp und Anzahl der

Bewohner. Ergebnis: Die Mehrheit der Gebäude wurde zwischen 1949 und 1994 erbaut, und 77 Prozent dieser Gebäude werden elektrisch, mit Öl oder Gas beheizt. Hier zeigt sich also ein beachtliches Sanierungspotential.

Die gleiche Typisierung nahmen die Forscher bei Gewerbebauten in der Schweiz vor, sortierten sie an Hand von Datenbanken in 45 verschiedene Archetypen – Restaurants, Schulen, Spitäler, Büros und Ladengeschäfte, jeweils unterteilt nach Grösse und Baujahr.

Da Solarenergie eine wesentliche Basis für die Energieversorgung der Zukunft darstellt, wurden alle Archetypen auf ihre Eignung für Photovoltaik abgeklopft. Dazu dienten Klimadaten der jeweiligen Region, in der das Haus steht, sowie Dachgeometrie-Daten vom Bundesamt für Landestopografie (Swisstopo), die Rückschlüsse auf die Grösse und Neigung der Dachfläche ergaben.



### ÜBERBLICK

Kristina Orehounig leitet seit 2018 die Empa-Forschungsabteilung «Urban Energy Systems». Ihr Team forscht an vernetzten Energiesystemen mit dem Ziel, den Energiebedarf und den CO<sub>2</sub>-Ausstoss von Gebäuden und Quartieren massiv zu senken. Dafür arbeiten rund 30 Forschende aus unterschiedlichen Disziplinen zusammen: Vertreten sind die Bauingenieurwissenschaften, Maschinenbau, Elektrotechnik, Architektur und Umwelttechnik.

Foto: Daniel Kellenberger



**STADT UND LAND**

Die Auswahl der passenden energetischen Sanierungsmethode hängt auch von der Bebauungsdichte ab: Häuser in der Stadt können effizient an ein Wärmenetz angeschlossen werden – bei weit auseinanderliegenden Gebäuden auf dem Land ist ein Wärmenetz oft nicht sinnvoll. Folglich muss der Schweizer Gebäudebestand auch nach Stadt und Land sortiert werden.

«Treibhausgasemissionen könnten um 60 bis 80 Prozent gesenkt werden.»

Die Forscher teilten die gesamte Schweizer Landesfläche in Kacheln von einem Quadratkilometer Grösse auf, Kacheln ohne Häuser wurden ignoriert. Der Rest wurde erneut mit Hilfe von öffentlichen Datenbanken sortiert – abhängig von der Summe der Wohnfläche, die sich auf jeder Kachel befindet, sowie anderen Charakteristiken. Das Ergebnis sind zwölf

Schweizer Nachbarschafts-Archetypen: vier städtische (urban), vier vorstädtische (suburban) und vier ländliche Archetypen, die die Verteilung der Gebäude in der Schweiz beschreiben.

**SO SANIERT MAN WIRKUNGSVOLL**

Nach all der Sortierarbeit konnten Sanierungsmassnahmen für die einzelnen Archetypen berechnet werden. Fazit: Es lohnt sich, die Sanierung von Dächern und die Erneuerung von Fenstern bei älteren Häusern besonders rasch anzugehen. Alleine dadurch kann der Bedarf an Heiz- und Kühlenergie um 20 bis 30 Prozent gesenkt werden.

In einem nächsten Schritt sollten bei fast allen Haustypen Sanierungen der Heizanlagen folgen – Mehrfamilienhäuser, Schulen und Bürogebäude können dabei oft kostengünstiger saniert werden als freistehende Einfamilienhäuser. Warum? Bei grösseren Gebäuden wirkt sich eine Sanierung der Heizanlage auf viele Quadratmeter bewohnter Fläche zugleich aus. Jeder technische Eingriff ist damit wirkungsvoller und kostengünstiger.

**TREIBHAUSGASE EINSPAREN**

Wichtig ist es, fossile Brennstoffe so rasch als möglich zu ersetzen – durch Photovoltaik auf dem Dach und auf Fassaden. Die Wärmeerzeugung kann dann etwa durch Luft-Wärmepumpen geschehen, die mit eigenem Solarstrom oder anderen erneuerbaren Energiequellen betrieben werden. Auch Biomasse-Heizungen – Biogas oder Holzpellets – verringern den CO<sub>2</sub>-Ausstoss wirkungsvoll.

Am Ende der Analyse zeigt sich Kristina Orehounig hoffnungsvoll: «Wenn die vorgeschlagenen Massnahmen ergriffen werden, können die Treibhausgasemissionen im bestehenden Gebäudepark der Schweiz um 60 bis 80 Prozent gesenkt werden.» ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: [www.empa.ch/web/empa/urban-energy-systems](http://www.empa.ch/web/empa/urban-energy-systems)

**VERNETZUNG UND SPEICHERUNG PLANEN**

Mit dem Umbau des Energiesystems wird die Planung und der Betrieb von Gebäuden und Quartieren immer komplexer. Solarenergie wird vor allem im Sommer zur Mittagszeit generiert, soll aber während des ganzen Tages, vielleicht sogar im Herbst und Winter verbraucht werden. Es sind also neue Energiespeicher für Stunden oder Tage, sowie Langzeitspeicher über Monate notwendig, um die Energienachfrage zu allen Zeiten zu decken. Die Empa erforscht Batteriespeicher für Elektrizität sowie verschiedene Wärmespeichertechnologien ebenso wie die Umwandlung von Solarstrom

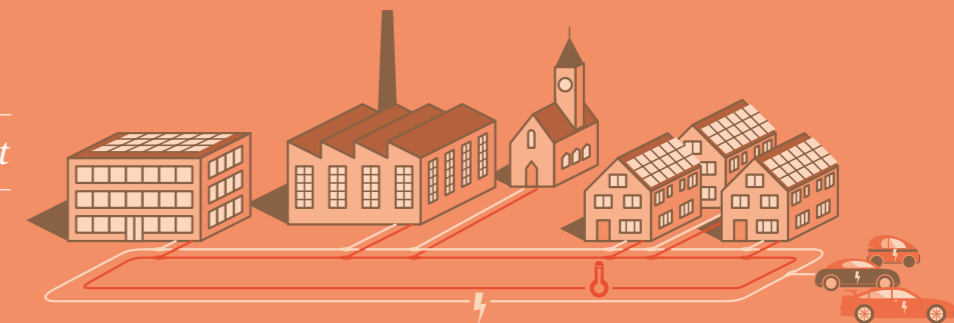
in Treibstoffe, um diese Herausforderung zu meistern. Die Speicherung nachhaltig erzeugter Energie sollte nicht nur auf nationaler Ebene, sondern auch auf Gebäude oder Nachbarschaftsebene geschehen. Zugleich müssen möglichst rasch fossile Heizsysteme, etwa Gasboiler, durch neue und nachhaltige Systeme ersetzt werden – etwa Wasserstoff-Brennstoffzellen, ein Fernwärme-Anschluss oder Wärmepumpen, gespeist aus erneuerbarem Strom. Der ganze Umbau soll zudem nach sozialen und ökonomischen Kriterien ausbalanciert sein. All diese Entscheidungen brauchen eine wissenschaftlich fundierte Basis. Den Forschenden, die Energiemodelle berechnen, wird die Arbeit so schnell nicht ausgehen.

*So bauen wir unser Energiesystem um – Forschung auf drei Ebenen*

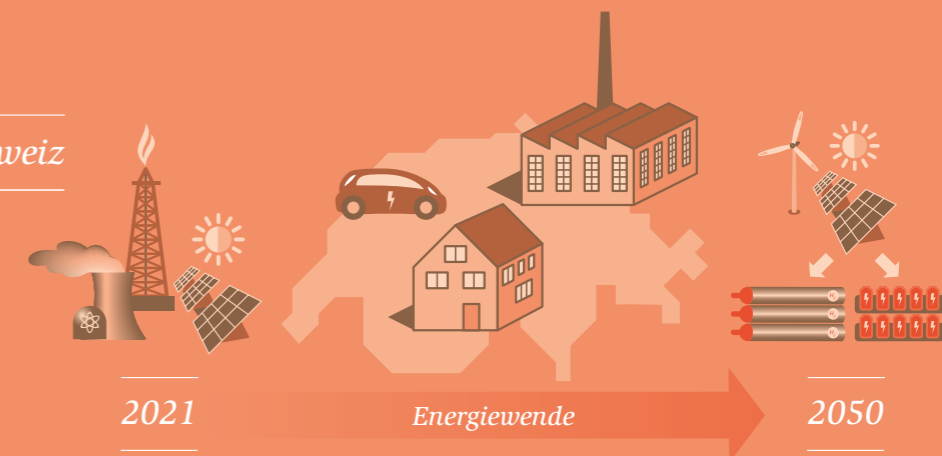
Gebäude



Stadt



Schweiz



Grafik: Empa



# WOHNEN IN DER KRISTALLKUGEL

Alain Aerni probt den Blick in die Zukunft: Die von ihm entworfene Energiesteuerung «Crystalball» verbindet Photovoltaik, Wärmepumpe und Ladestationen und schätzt den Energiebedarf mit Hilfe von Wetterberichten voraus. An der Empa-Akademie präsentierte er im Herbst 2020 sein System.

Interview: Rainer Klose

**Herr Aerni, Sie sind Ingenieur und haben Ihr eigenes Wohnhaus, das 20 Jahre alt ist, energetisch optimiert. Diese Dienstleistung bieten Sie mit Ihrer Firma Soleco auch anderen Hausbesitzern an. Mit welcher Idee sollte man anfangen, wenn man so ein Projekt starten möchte?**

Es fängt immer mit den Bedürfnissen des Kunden an. In einem ersten Schritt sollte man den Heizwärmebedarf des Hauses ermitteln. Was brauche ich, um übers ganze Jahr eine Raumtemperatur von 22 Grad Celsius zu erreichen? Wie hoch ist mein Warmwasserverbrauch? Möchte ich allenfalls bald ein oder zwei Elektroautos in der Garage laden, und wie viele Kilometer möchte ich damit täglich fahren?

**Brauche ich eine Speicherbatterie, wenn ich ein Elektroauto anschliessen will?**

Wenn Sie Solarenergie in ihrem Haus besonders wirtschaftlich nutzen wollen, sollten Sie gegenwärtig noch auf eine Speicherbatterie verzichten. Falls Sie also Tage mit Homeoffice haben, können Sie das Elektroauto an diesen Tagen laden und am nächsten Tag damit fahren. Nur wer tagsüber immer

unterwegs ist und zugleich mit eigenem Solarstrom laden will, kommt um eine Speicherbatterie nicht herum.

**Was muss der Kunde noch berücksichtigen?**

Wichtig ist die Frage, wie lange man noch in seinem Haus zu bleiben gedenkt. Der Zeithorizont beeinflusst die Auswahl der Komponenten. Es gibt langlebige Bauteile, wie etwa eine Erdwärmesonde – ein sehr effizientes System, um ein Haus zu heizen. Die sind für 50 Jahre Nutzungsdauer ausgelegt, aber sie amortisiert sich auch erst über Jahrzehnte. Kunden, die nur zehn bis 15 Jahre vorausplanen möchten, empfehle ich lieber eine Luft-Wasser-Wärmepumpe.

**Und wenn ich meinen Wärmebedarf kenne und meinen Zeithorizont, dann kann es losgehen?**

(lächelt) Nein, noch nicht ganz. Jetzt kommt der Faktor Lärm ins Spiel. Wenn Sie eine Luft-Wasser-Wärmepumpe nutzen und mit Solarstrom vom eigenen Dach betreiben, dann ist das sehr effizient. Aber so eine Anlage macht Lärm und kann die Nachbarn stören. Wenn Sie

ein Einfamilienhaus mit viel Umschwung haben, ist das kein Problem. Für ein grosses Mehrfamilienhaus brauchen Sie grössere Maschinen: grössere Lüfter, grössere Kompressoren. In einer eng bebauten Nachbarschaft wird das schwierig.

**Das wird dann von der Baubehörde möglicherweise nicht bewilligt?**

Stimmt. Sie müssen die Grenzwerte einhalten. Zum Glück gibt es auch sogenannte Split-Geräte: Dort sind nur der Verdampfer und der Ventilator aussen angebracht, der Kompressor ist im Haus verbaut. Diese Geräte sind leiser.

## ALAIN AERNI

GEBOREN: 3. Mai 1960 in Moudon / VD.  
AUSBILDUNG: Dipl. Ing. EPFL und Master in Science of Management MIT.  
BERUF: Gründer und CEO der Soleco AG, Maur / ZH.  
AUSZEICHNUNG: Digital Journey Award 2018 des Centre d'Electronique et de Microtechnique (CSEM). Verliehen für die Entwicklung einer Plattform zum Management erneuerbarer Energien in Gebäuden.

**Man muss also einen Berater haben, der einen durch die Angebote lotst, die es auf dem Markt gibt.**

Ja. Doch man sollte nicht nur über die Wärmepumpe nachdenken, sondern von Anfang an das gesamte System im Auge haben: die Wärmepumpe, die Grösse der Photovoltaikanlage, den Warmwasserspeicher, die Elektroauto-Ladestation, die Storen für die Beschattung und allenfalls noch die Speicherbatterie. Sie wollen ja alles gemeinsam steuern, damit alles optimal zusammenspielt. Die Komponenten, die Sie kaufen, müssen also mit der zentralen Steuerung kommunizieren können.

**Gibts da kein «Plug-and-Play», keinen gemeinsamen Standard?**

Wir sind da noch nicht weit genug. Es gibt etwa einen gemeinsamen Standard für die Steuerung von Wärmepumpen, das «SG Ready Label». Doch damit sind nicht alle Funktionalitäten abgedeckt, die man für ein gutes System haben muss. Das SG Ready Label muss weiterentwickelt werden. Wir sind mit Partnern dran, einen gemeinsamen Standard vorzuschlagen. Doch zugleich gibt es immer mehr Hersteller, die ihre Systeme nach aussen hin abschotten, um ihren Marktanteil auszubauen.

**Wieviel Vernetzung ist sinnvoll? Kann man da auch übertreiben?**

Wenn man effizient sein will, muss man vor allem die grossen Verbraucher im Auge haben: Heizung, Warmwasserbedarf, Elektromobilität und Speicherbatterie. Es ist nicht entscheidend, wann die Waschmaschine und der Tumbler laufen. Die kann man per Hand einschalten. Wichtig ist dagegen Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung. Unsere Steuerung «Crystalball» (siehe Box) kann mit Hilfe des Wetterberichts ▶



**ALAIN AERNI**  
Der Ingenieur hat sein 20 Jahre altes Wohnhaus energetisch saniert und vernetzt.

Fotos: privat





**GUT VERTEILT**  
In Alain Aernis Haus wird Solarenergie optimal eingesetzt.



**«CRYSTALBALL»  
PLANT IN DIE ZUKUNFT**

Alain Aerni hat mit zwei weiteren Partnerfirmen und dem CSEM das intelligente Gebäudesteuerung «Crystalball» entwickelt. Die Software regelt das Zusammenspiel zwischen Photovoltaikanlage, Wärmepumpe, Speicherbatterie und Elektroauto-Ladestation. Mit Hilfe des Wetterberichts plant sie die Energieflüsse drei Tage im Voraus, lädt die benötigte Reichweite ins Elektroauto, kühlt oder beheizt das Haus und sucht sich die günstigsten Stromtarife aus, um Elektrizität ins öffentliche Netz zu laden oder daraus zu beziehen. Durch die vorausschauende Planung können die massiven Decken und Wände des Hauses als Gratis-Wärmespeicher genutzt werden. <https://crystalball.solar/>

die Erwärmung an sonnigen Tagen und die Wärmeverluste an kalten Tagen voraussagen, und so die Wärmepumpe sparsamer und gezielter einsetzen.

**Sie kühlen Ihr Haus seit dem Umbau auch mit eigenem Solarstrom. Sie haben Ihre 20 Jahre alte Fussbodenheizung zu einer Fussbodenkühlung umgebaut. Geht das so einfach?**

Dazu muss man nicht einmal etwas umbauen. Wichtig ist nur, dass das Wasser, das durch den Boden läuft, nicht zu kühl ist. Sie brauchen also eine regulierbare Wärmepumpe, deren Leistung zur Fläche passt, die Sie kühlen möchten.

**Wie gross muss die Photovoltaikanlage auf dem Dach dimensioniert sein? Kann man da übertreiben?**

Es gibt sicher ein Optimum, das zum Energiesystem des Hauses passt. Wenn Sie ihre gesamte Dachfläche mit Fotovoltaik belegen, sind sie sicher darüber. Aber das ist nicht schlimm.

**Warum?**

Denken Sie an die Nachbarn. Sie können innerhalb des Quartiers Strom an andere liefern, die noch keine Photovoltaik haben. Und denken Sie an die gesamte Landesversorgung. Im Winter, wenn die Sonne flach steht, sind wir um jedes bisschen Solarstrom froh,

das wir ins Netz speisen können. Wir können in Zukunft aus Überschussstrom auch Wasserstoff herstellen. Das lohnt sich natürlich nicht in einem einzelnen Einfamilienhaus. Aber irgendwann wird es Anbieter geben, die uns Hausbesitzern im Sommer den Strom abkaufen und daraus Wasserstoff machen.

**Na, dann ist ja alles auf bestem Wege in Richtung Energiewende!**

Naja, es gibt da schon noch einen Konflikt: Einige Elektrizitätsversorger möchten mit Sperrzeiten Geräte mit grossem Energiebedarf – zum Beispiel Wärmepumpen und Ladestationen – so steuern, dass das Netz entlastet wird. Dies führt dazu, dass sie Ihre Wärmepumpe vielleicht gerade dann nicht in Betrieb nehmen können, wenn sie mit Ihrer Photovoltaik am meisten Strom produzieren. Sie müssten den Strom dann zu einem sehr niedrigen Tarif an den Elektrizitätsversorger verkaufen. Der optimiert seine Gewinnzone in diesem Fall auf Kosten der Hausbesitzer.

**Eine zentrale Steuerung ist aus Gründen der Netzstabilität aber nötig, oder?**

Ich möchte das als Hauseigentümer eindeutig nicht. Und das ist auch nicht nötig.

**Wie würden denn Sie das Problem lösen?**

Ich kann mit meinem Steuerungssystem zu einem stabilen Stromnetz beitragen, ohne dass jemand von aussen Zugriff hat. Mein System ist auf Kostenoptimierung eingestellt. Der Elektrizitätsversorger muss mir nur die variablen Tarife bekannt geben – möglichst acht oder sogar 24 Stunden im Voraus, dann wird «Crystalball» die Wärmepumpe und andere Stromverbraucher automatisch auf die richtige Weise einsetzen.

Dieses Gebäude, in dem wir hier sitzen, ist ein beträchtlicher Energiespeicher: Jedes Grad Temperatur in den Mauern bedeutet 74 Kilowattstunden Energie. Wenn heute Abend der Stromtarif hoch ist, und jetzt ist er niedrig, dann heize ich ein paar Stunden voraus und heute Abend nicht mehr – und habe damit das Stromnetz wirkungsvoll entlastet. Trotzdem ist es im Haus angenehm warm. Wir müssen also nur Tarife kommunizieren und den Markt spielen lassen, dann kann jeder Eigentümer auch die Hoheit über seine Hausinstallationen behalten. Und trotzdem wird die Energiewende gelingen. ■

Fotos: Empa

Foto: iStockfoto

# NEUE ENERGIESYSTEME KOMPONIEREN

Moderne, dezentrale Energiesysteme sind eine hochkomplexe Angelegenheit. Diese optimal und kosteneffizient zu planen, stellt eine grosse Herausforderung für Energieplanerinnen und -planer dar. Das Empa Spin-off «Symphony» bietet dazu eine Software, die Planern dabei hilft, das geeignete Energiekonzept für ein Gebäude, ein Quartier oder gar eine ganze Stadt zu finden und so deren Ziele hinsichtlich Nachhaltigkeit und Energieeffizienz zu erfüllen.

Text: Loris Pandiani



**PROJEKT CHUR**  
Symphony sucht mit dem Churer Versorgungsunternehmen IBC neue Energielösungen für Stadtquartiere.



**E**in nachhaltiges Energiesystem ist vergleichbar mit einer Symphonie. Damit die verschiedenen Komponenten untereinander harmonieren, genügt es nicht, einfach ein paar Noten auf ein Blatt Papier zu schreiben. Vielmehr bedarf es erfahrener Komponisten, die die ideale Komposition und die geeigneten Instrumente dafür finden sowie einen Dirigenten, der dafür sorgt, dass die Musiker perfekt miteinander harmonieren. Erst wenn alles perfekt zusammenspielt, entsteht eine wohlklingende Symphonie. Im Energiesystem nehmen die Rolle des Komponisten Energieplanerinnen und Energieplaner ein. Deren Aufgabe wird allerdings zunehmend komplex, da laufend neue Technologien auf den Markt kommen und die Anforderungen – beispielsweise im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Zuverlässigkeit – sich konstant verändern.

#### ENERGIESYSTEME NEU DENKEN

Die steigende Komplexität ist vor allem der Umstellung von zentralen auf dezentrale Energiesysteme geschuldet. Getrieben wird diese Veränderung durch den Wandel hin zu einer klimafreundlichen Gesellschaft. In dezentralen Energiesystemen werden mehrere Gebäude in einem Quartier oder Areal zusammengeschlossen, die erneuerbare Energien und verschiedene Umwandlungs- sowie Speichertechnologien gemeinsam nutzen. Die Gebäude sind nicht nur Energieverbraucher, sondern auch Energieproduzenten, indem sie überschüssige Energie, beispielsweise aus ihrer Photovoltaik-Anlage, sowohl speichern wie auch zurück ins Netz speisen. Damit werden sie selbst zu einem wichtigen Bestandteil des Systems. Ein wesentlicher Vorteil von dezentralen gegenüber traditionellen, zentral organisierten Energiesystemen ist, dass die Energie dort bereitgestellt werden kann, wo sie auch verbraucht wird. Transportwege werden dadurch mini-

miert, was wiederum ein effizienteres Zusammenspiel der einzelnen Energie- und Speichertechnologien ermöglicht.

Für die Planer bedeutet dies, dass sie die Energiesysteme zwingend in ihrer Ganzheit betrachten und aus einer grossen Zahl an Technologien und deren möglichen Kombinationen die optimalen Lösungen finden müssen. Durch Innovation nimmt zudem das Angebot an verfügbaren Lösungen stetig zu. Gleichzeitig müssen die Energieplaner die Netzstabilität gewährleisten und immer auch die Wirtschaftlichkeit im Auge behalten. Eine wohlklingende Symphonie zu kreieren und nicht einfach auf gängige Standard-Stücke zurückzugreifen, die Dutzende von Orchestern bereits gespielt haben, wird damit zu einer hochkomplexen Aufgabe. Ein Unternehmen, das dieses Problem erkannt hat und Abhilfe schafft, ist das Empa Spin-off «Symphony». Der Name ist nicht zufällig gewählt. Ziel des Start-ups ist es nämlich, die unterschiedlichen Energieflüsse eines Standorts miteinander in Harmonie zu bringen – und so maximale Energieeffizienz und Nachhaltigkeit zu erreichen.

#### EIN WEB-TOOL FÜR DIE PLANUNG

Symphony bietet Planerinnen und Planern ein cloudbasiertes Tool, mit dessen Hilfe sie einfach und kosteneffizient das optimale Energiesystem für ein Gebäude, Quartier oder gar eine Stadt planen können. «Unsere Plattform berücksichtigt eine Vielzahl an Faktoren wie die verfügbaren erneuerbaren Energien und Lieferanten an einem bestimmten Standort, die unterschiedlichen Energiebedürfnisse oder die relevanten Technologien. Gleichzeitig werden auch die verschiedenen Ziele der Planerinnen und Planer miteinbezogen, etwa die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, der Ausbau von erneuerbaren Energien oder die Kostensenkung», erklärt Andrew Bollinger, CEO von Symphony. Anhand

dieser Vielzahl von Angaben hilft das Online-Tool den Planern, das optimale Energiesystem für den Standort zu finden. Es beantwortet dabei zentrale Fragen, beispielsweise, ob und welche Photovoltaik-Anlagen auf dem Dach oder an der Fassade angebracht werden sollen, welche saisonalen Speicher man einbauen sollte oder wie die thermischen Netzwerke aufgebaut sein sollten. Vor allem aber kann die Plattform Energieplanern helfen, diese unterschiedlichen Fragen im Gesamtkontext zu betrachten und Antworten darauf zu liefern, die die zahlreichen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Technologien und Energieflüssen an einem bestimmten Standort mitberücksichtigen.

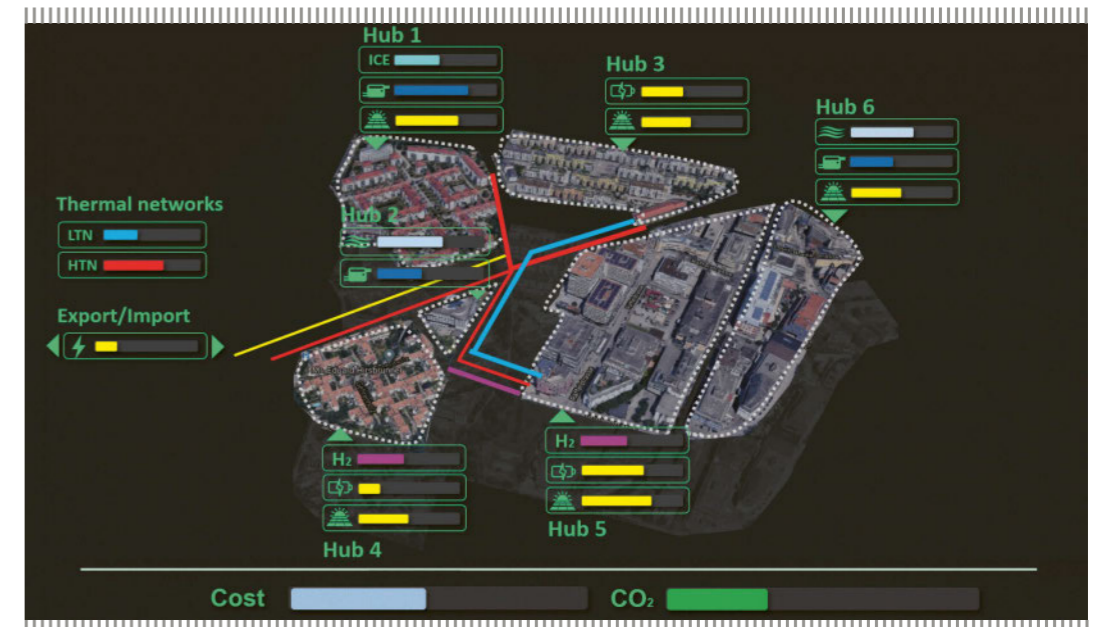
#### KNOWHOW AUS DER FORSCHUNG

Die Grundlagen für die Software liefern langjährige Forschungsarbeiten. Das «Urban Energy Systems Lab» der Empa forscht bereits seit mehreren Jahren an neuen Methoden zur Optimierung von dezentralen Energiesystemen. Aus der Forschung ging schliesslich das Tool hervor, das in Zusammenarbeit mit Industriepartnern stetig weiterentwickelt wurde. Im letzten Jahr entschloss sich das Team schliesslich dazu, den Sprung auf den Markt zu wagen. So wurde im April 2020 das Spin-off «Urban Symphony AG» gegründet.

«Wir sehen ein grosses Marktpotenzial für unsere Lösung, denn die Energieplanung wird zunehmend komplexer. Für Energieplanerinnen und Energieplaner spielt zudem der Zeitfaktor eine zentrale Rolle. Es ist deshalb wichtig, ihnen dabei zu helfen, die optimale Lösung so schnell wie möglich zu finden. Durch unsere leistungsstarken Algorithmen und unsere Cloud-basierte, nutzerfreundliche Anwendung wird die Komplexität für Planer stark reduziert. Sie sind so in der Lage, schnellere und bessere Planungsentscheidungen zu treffen», so Bollinger.

#### AUF DEM BILDSCHIRM

Symphony hilft Planerinnen und Planern dabei, nachhaltige Energiekonzepte zu entwickeln und die Energieflüsse eines Standorts in Harmonie zu bringen.



Gleichzeitig fördert die Software auch die Einbindung von nachhaltigen und erneuerbaren Energiequellen. Damit will das Symphony-Team einen wertvollen Beitrag zur Energiewende leisten.

#### EIN STÜCK AUS DER PRAXIS

Gemeinsame Projekte mit Industriepartnern zeigen, dass das Tool von Symphony ein enormes Potenzial birgt. Ein Beispiel: Gemeinsam mit der Empa half Symphony dem Versorgungsunternehmen IBC Energie Wasser Chur dabei, neue Energiekonzepte für Quartiere der Bündner Hauptstadt zu finden, mit denen diese die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2040 auf netto Null senken können. Das Team erstellte zunächst mit der Symphony-Software ein digitales Modell für die Stadt. Um die optimalen Lösungen zu finden, wurden im nächsten Schritt mithilfe der Algorithmen von Symphony verschiedene mögliche Energiekonzepte bewertet und deren Kosten sowie CO<sub>2</sub>-Bilanz berechnet. Mit dieser Auswahl an möglichen Konzepten kann das Versorgungsunternehmen nun einfacher diejenige Lösung finden, die ihm dabei hilft, sein «Netto-Null»-Ziel mit minimalen Kosten zu erreichen.

In der Detailanalyse hat das Projektteam zudem für jede Lösung definiert, welche Massnahmen für den Umbau des bestehenden Energiesystems nötig sind. Für IBC Energie Wasser Chur dürfte dabei vor allem interessant sein, dass ein Umbau ihres heutigen Energiesystems in ein CO<sub>2</sub>-freies System möglich ist, ohne die Lebenszykluskosten zu erhöhen – und dies obwohl hohe Investitionen für den Umbau benötigt werden. Im Transformationsprozess hat das Unternehmen zudem die Möglichkeit, die bevorstehenden Umbauschritte auf Basis der neuesten Daten, beispielsweise neue Technologien, erneut zu berechnen und allfällige Anpassungen vorzunehmen. Dadurch lässt sich das Risiko für den Umbau des Energiesystems erheblich senken. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: <https://www.symphony.com/>

#### URBAN SYMPHENY AG

Symphony bietet eine Software (Web-Tool) an, um lokale Energieplaner dabei zu unterstützen, optimale Energieversorgungs-lösungen für Areale, Quartiere, Stadtteile und Gemeinden zu identifizieren. Die Dienstleistung von Symphony stützt sich auf neuartige Berechnungsmethoden und Algorithmen ab, die an der Empa und an der ETH Zürich entwickelt wurden. Das Tool ermöglicht die schnelle Bewertung einer Vielzahl konventioneller und neuartiger Energieversorgungs-lösungen – unter Berücksichtigung des Zusammenspiels zwischen verschiedenen Ressourcen, Energieströmen und Technologien – und das Finden optimaler, standortspezifischer Lösungen. [www.symphony.com](http://www.symphony.com)



**PILOTPROJEKT**  
Die Anlage der RAG Austria pumpt Wasserstoff in die Erde.



# SONNENENERGIE AUS DEM TIEFENLAGER

Im Winterhalbjahr fehlt es in ganz Europa an erneuerbarer Energie. Ein internationales Projekt fasst nun eine unkonventionelle Lösung ins Auge: Erneuerbarer Wasserstoff und Kohlendioxid werden zusammen in den Boden gepumpt, wo natürlich vorkommende Mikroorganismen die beiden Stoffe in Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas, umwandeln.

Text: Stephan Kälin

**U**nderground Sun Conversion: Die vom österreichischen Energieunternehmen RAG Austria AG patentierte Technologie mit dem spannenden Namen bietet einen Weg, um erneuerbare Energie saisonal und in grossem Massstab zu speichern und ganzjährig verfügbar zu machen. Im Sommer wird dabei überschüssige erneuerbare Energie – beispielsweise Solarstrom – in Wasserstoff (H<sub>2</sub>) umgewandelt. Dieser wird dann zusammen mit Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in natürlichen

Untergrundspeichern – zum Beispiel ehemaligen Erdgaslagerstätten – in über 1000 Metern Tiefe eingelagert.

Dort kommen dann die kleinen Helferchen ins Spiel: Mikroorganismen aus der Urzeit, sogenannte Archaeen, wandeln über ihren Stoffwechsel Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zu erneuerbarem Methan (CH<sub>4</sub>) um. Archaeen sind auf der ganzen Welt verbreitet, vorwiegend in anaeroben, also sauerstoffarmen Umgebungen, und sie waren vor Millionen von Jahren bereits für die Umwandlung von Biomasse in Erdgas verantwortlich. Durch die Zuführung von Wasserstoff und CO<sub>2</sub> in geeignete poröse Sandsteinlagerstätten wird dieser Prozess quasi von neuem gestartet. Das dort unten «hergestellte» Methan kann dann im Winter den Speichern wieder entzogen und als CO<sub>2</sub>-neutrales Erdgas vielfältig genutzt werden.

## SUCHE NACH GEEIGNETEN STANDORTEN

Zur Weiterentwicklung der Technologie haben sich nun österreichische und Schweizer Energieunternehmen und Forschungseinrichtungen zusammenschlossen. In einem vom europäischen Forschungsrahmenprogramm ERA-Net und hierzulande vom Bundesamt für Energie (BFE) geförderten Projekt werden in den nächsten zwei Jahren die technischen und wirtschaftlichen Potenziale in der Schweiz und Österreich ausgelotet. In der Schweiz sind das Energieunternehmen Energie 360°, die Empa, die Universität Bern und die Ostschweizer Fachhochschule OST beteiligt. Die Empa entwickelt dabei eine Perspektive auf das gesamte Energiesystem: «Wir schauen uns an, wann und wo Überschussstrom anfällt, wo geeignete CO<sub>2</sub>-Quellen wären und wo letztlich auch die Nachfrage nach erneuerbarem Erdgas vorhanden ist», erklärt Martin Rüdüsüli von der Empa-Abteilung «Urban Energy Systems». Zusammen mit den geologischen Voraussetzungen, die von

Foto: RAG

Grafik: RAG

der Universität Bern untersucht werden, und den ökonomischen Randbedingungen, die von der OST erarbeitet werden, soll daraus eine Landkarte mit möglichen Standorten für die Anwendung der «Underground Sun Conversion»-Technologie entstehen.

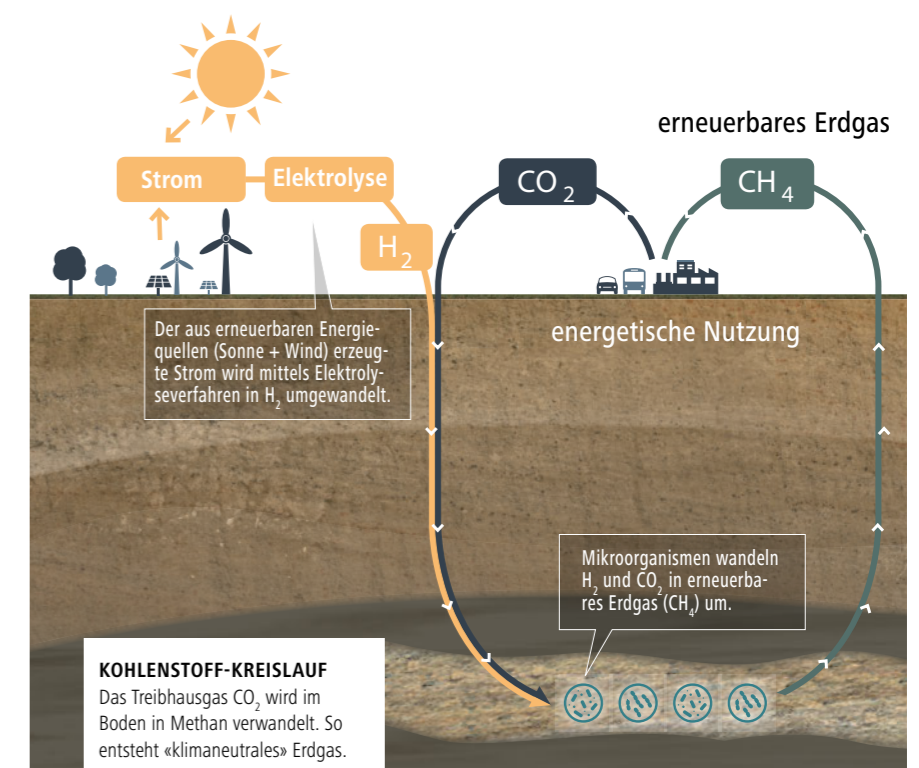
Martin Rüdüsüli hält die Technologie für vielversprechend. Insbesondere deshalb, weil sie neben der biologischen Methanisierung auch gleich eine Antwort auf das saisonale Speicherproblem liefert: «Auch bei einem grossen Anstieg der Methangasproduktion bräuchte es dank der natürlichen Speicher im Erdinnern keinen Ausbau der oberirdischen Speicherinfrastruktur», sagt er.

## DEKARBONISIERUNG DES ENERGIESYSTEMS

Die Volatilität der erneuerbaren Energiequellen stellt eine der grossen Herausforderung der Energiewende dar. Im Winter haben wir grundsätzlich zu wenig erneuerbaren Strom, im Sommer

zu viel. In einer Analyse zum Potenzial der «Power-to-Gas»-Technologie – also der Umwandlung von erneuerbarem Strom in chemische Energieträger wie Wasserstoff oder Methan – in der Schweiz prognostizierte Empa-Forscher Rüdüsüli einen Überschuss von gut 10 TWh Solarstrom in der Schweiz in den nächsten Jahrzehnten – vorausgesetzt rund die Hälfte der geeigneten Dachflächen würde mit Photovoltaik ausgebaut, was wiederum nötig ist, wenn damit der wegfallende Atomstrom ersetzt werden soll. Wandelt man den Überschussstrom im Sommer in Methan um, liessen sich damit rund eine Million Gasfahrzeuge ganzjährig erneuerbar betreiben. «Die Umwandlung von erneuerbarer Elektrizität in saisonal speicherbare Energieträger ist ein wichtiger Pfeiler eines dekarbonisierten Energiesystems», so Rüdüsüli. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: <https://www.underground-sun-conversion.at/>

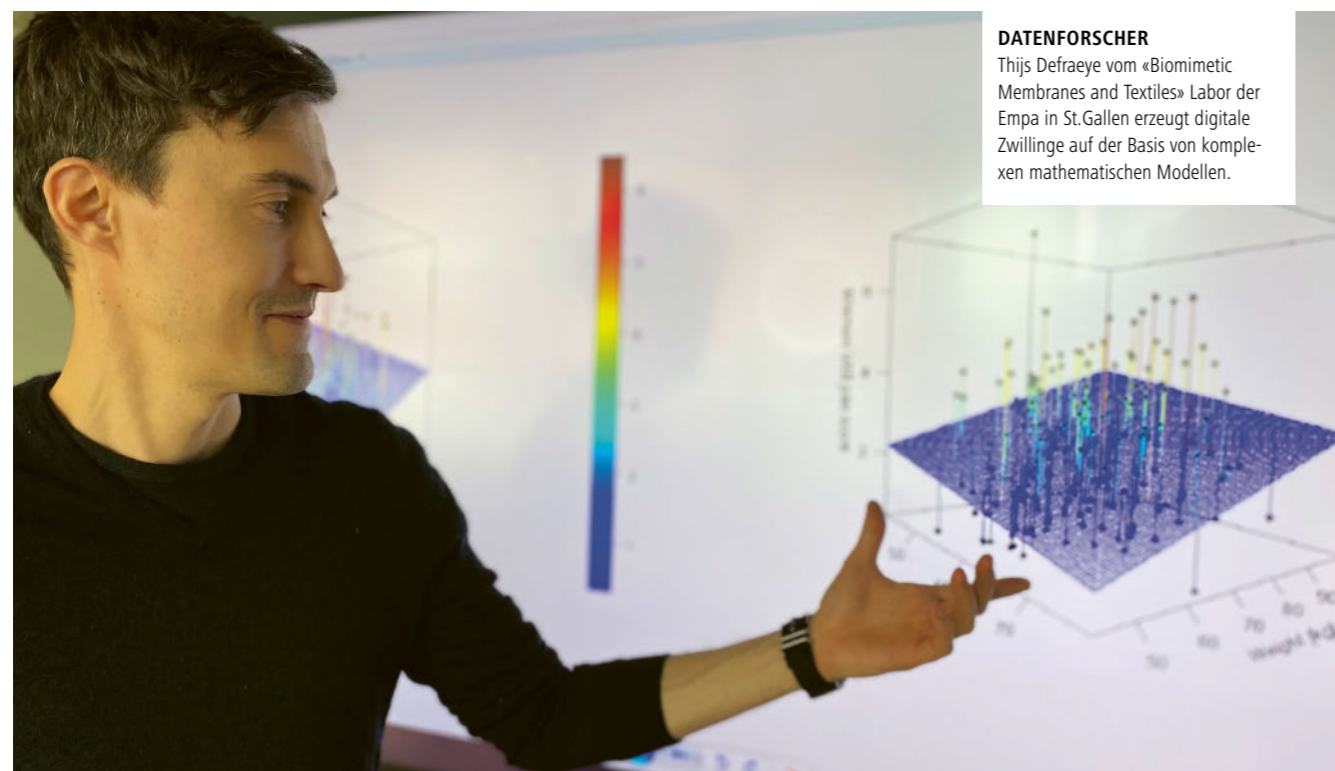




# DER SIMULIERTE PATIENT

Digitale Zwillinge ermöglichen massgeschneiderte medizinische Therapien. Empa-Forschende haben nun mehrere hundert solcher Avatare auf der Basis von realen Menschen modelliert und experimentell behandelt. Erstmals erhielten die digitalen Zwillinge dabei Rückmeldungen von echten Patientinnen und Patienten.

Text: Andrea Six



**DATENFORSCHER**  
Thijs Defraeye vom «Biomimetic Membranes and Textiles» Labor der Empa in St.Gallen erzeugt digitale Zwillinge auf der Basis von komplexen mathematischen Modellen.

Die enormen Fortschritte in der modernen Medizin erlauben uns, Patientinnen und Patienten selbst während schwerer Erkrankungen eine verbesserte Lebensqualität zu ermöglichen. Mit synthetischen Opiaten beispielsweise lassen sich selbst starke Schmerzen während einer Krebskran-

kung kontrollieren. Die exakte Dosierung stellt allerdings noch immer eine Herausforderung dar. Die Schmerzmittel, etwa Fentanyl, müssen präzise verabreicht werden, damit sie wirksam sind, ohne die Betroffenen mit teils lebensgefährlichen Nebenwirkungen zu schaden. Derzeit werden derartige Schmerzmittel unter anderem durch ein Medikamen-

tenpflaster über die Haut verabreicht – eine schonende Methode, die dabei hilft, den Patienten die Rückkehr in den Alltag zu ermöglichen. Allerdings lässt sich die passende Dosierung lediglich ausprobieren. So sind die Reaktionen auf eine Unter- oder Überdosierung immer erst im Nachhinein feststellbar, wenn das Medikament das Pflaster längst verlassen hat.

Das soll nun anders werden: Damit die Schmerzmitteldosierung im Sinne einer personalisierten Medizin für jeden einzelnen Patienten ermittelt und konstant gehalten werden kann, nutzen Empa-Forschende zusammen mit einem Team der Universität Bern das innovative Forschungsfeld der Computer- und Datenwissenschaften. Das Team um Thijs Defraeye vom «Biomimetic Membranes and Textiles» Labor der Empa in St. Gallen entwickelt mit multiphysikalischen Modellierungen einen digitalen Zwilling des menschlichen Körpers, der die Steuerung und Vorhersage des Therapieverlaufs erlaubt.

**MEHRERE HUNDERT AVATARE BEHANDELT**  
Schmerzmittel in einem Pflaster gelangen über die Haut in den Körper. Je nach Alter, Geschlecht und körperlicher Verfassung ist die Wirksamkeit jedoch unterschiedlich. Mit Hilfe des digitalen Zwillinges und der Erfolgskontrolle des menschlichen Patienten kann die Behandlung in Echtzeit optimiert werden.

In den mathematischen Modellen, auf denen der komplexe digitale Doppeltgänger basiert, haben die Forschenden eine Vielzahl von Variablen von realen Menschen wie etwa Alter und Lebensstil berücksichtigt. Denn die Wirkung eines Medikaments wird von einer Fülle an körperlichen Parametern beeinflusst, die individuell sehr unterschiedlich sein können. «Wir berücksichtigen bei der Erstellung eines Avatars beispielsweise, wie das Medikament bei der Behandlung im lebenden Körper verstoffwechselt wird und wieviel letztlich im Schmerzzentrum im Gehirn des Menschen eintrifft», erklärt Empa-Forscher Defraeye.

Thijs Defraeye vom «Biomimetic Membranes and Textiles» erzeugt digitale Zwillinge auf der Basis von komplexen mathematischen Modellen.

Damit die Dosierung aber nicht nur sicher ist, sondern auch den gewünschten Effekt erzielt, kann der in silico-Zwilling zudem physiologische und psychologische Rückmeldungen von realen Patienten erhalten. Hierzu gibt der Mensch beispielsweise Auskunft, ob und in welcher Intensität er den Schmerz weiterhin wahrnimmt. Von besonderem Interesse ist hierbei die Länge der schmerzfreien Zeit. Und weil nicht jeder Tag ein guter Tag ist, und das Leben voll von unvorhergesehenen Ereignissen, variiert auch die effektive Schmerzempfindung der Betroffenen viel stärker, als dass ein Arztbesuch alle zwei Wochen darauf eingehen könnte. «Mit diesem Feedback des Menschen kann der Avatar die Therapie dynamisch anpassen und den Verlauf sogar vorhersagen», sagt Empa-Forscherin Flora Bahrami. Künftig sollen Sensoren auch weitere physiologische Parameter wie Herzschlag oder Atmungsfrequenz in Echtzeit messen und an den Avatar zurückmelden.

In Testphasen wurden bisher mehrere Hundert derartig personalisierte Avatare geschaffen und individuelle Therapieabläufe gemeinsam mit dem Kantonsspital St.Gallen virtuell getestet. «Wir konnten bereits zeigen, dass sich die optimalen Behandlungsprogramme für Frauen und Männer sowie für jüngere und ältere Menschen deutlich voneinander unterscheiden», so Bahrami.

Die Schmerztherapie durch transdermal wirkende Pflaster ist hierbei erst der Anfang der Avatar-assistierte Behandlung: In Zusammenarbeit mit Kliniken und Spitälern wollen die Empa-Forschenden nun weitere Therapien wie die Insulingabe bei Diabetes durch digitale Zwillinge optimieren. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: <https://www.empa.ch/web/multiphysics>

## DIGITALISIERUNG GEGEN FOOD-WASTE

Digitalisierung kann nicht nur in der Medizin grosse Fortschritte ermöglichen, sondern auch in anderen Bereichen – etwa in der Lebensmitteltechnologie. Erst kürzlich wurde das Empa-Team um Thijs Defraeye mit einem Preis der «Inclusive Growth and Recovery Challenge» von data.org ausgezeichnet. Die hochdotierte Auszeichnung wird von der «Rockefeller Foundation», und dem «Mastercard Center for Inclusive Growth» gestiftet.

Ziel des gemeinsamen Projekts mit der Stiftung BASE («Basel Agency for Sustainable Energy»): Über Computermodelle und mobile Apps eine nachhaltige Landwirtschaft fördern und die ökologische und ökonomische Situation für landwirtschaftliche Kleinbetriebe in Entwicklungsländern verbessern. Entscheidend ist hier die Datenverarbeitung und -modellierung von Parametern aus der Landwirtschaft, Technik und den aktuellen ökonomischen Gegebenheiten, um Kleinbetriebe in Echtzeit zu einem vorausschauenden Umgang mit ihren Produkten zu befähigen. Denn derzeit müssen in Entwicklungsländern bis zu 60% der Ernten derartiger Betriebe entsorgt werden, da Früchte und Gemüse verderben, bevor sie den Markt erreicht haben. Diesem immensen Food-Waste wollen die Forschenden entgegenzutreten.

«Am Ende dieser Technologieentwicklung soll eine Anwendung für Mobiltelefone stehen, die einen nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen während der Lagerung, Kühlung und dem Verkauf der Ware unterstützt», sagt Empa-Forscherin Seraina Schudel. Das Grossprojekt stellt für die Empa-Forschenden auch eine exzellente Grundlage dar, um das Gebiet der Computer- und Datenwissenschaften und besonders der digitalen Zwillinge für diverse Anwendungen weiterzuentwickeln.



# MOLEKÜLE IN KOLLEKTIVER EKSTASE

Wenn sich fluoreszierende Farbstoffmoleküle perfekt aneinanderschmiegen, entsteht etwas völlig Neues: Ein über viele Moleküle verteilter angeregter Zustand. Solche «kollektiven Anregungen» lassen sich vielfältig nutzen – etwa für organische Solarpanels, in Sensoren, für ultraschnelle Datenübertragung oder in der Mikroskopie. Empa-Forschern ist es gemeinsam mit Kollegen der ETH Zürich, der EPFL, des Paul Scherrer Instituts (PSI) und der IBM Research Zürich gelungen, solche chemischen Lichtverstärker zehnfach effizienter zu machen als bisher.

Text: Rainer Klose



#### REVOLUTION DURCH FARBSTOFFE:

Was die Künstlerin Katharina Grosse im Hamburger Bahnhof in Berlin zeigte, gelingt bisweilen auch in der Chemie.

Was wir hier sehen, ist eine Energieübertragung, die wesentlich schneller abläuft als in jedem Halbleiter», schwärmt Jakob Heier. Der Physiker arbeitet in der Empa-Abteilung «Functional Polymers», und die Entdeckung, die er mit seinem Team gemacht hat, könnte Bewegung in vielerlei Bereiche bringen – etwa die Sensorik, die optische Datenübertragung oder die Fabrikation organischer Solarzellen. Die Rede ist von Inseln aus Farbstoffmolekülen mit perfekter, innerer Struktur. In der Fachwelt werden solche Gebilde

J-Aggregate genannt. Sie sind zwar schon seit mehr als 80 Jahren bekannt, erfreuen sich aber jüngst einer besonderen Aufmerksamkeit in der Forschung. Das liegt am besonderen elektronischen Innenleben dieser Farbstoffinseln.

Um zu verstehen, was Heier und seine Kolleginnen und Kollegen gefunden haben, hilft eine kurze Exkursion in die Welt der Farbstoffe: Wenn ein Farbstoff leuchten soll, muss das Molekül vorher aktiviert werden – ebenfalls mit Licht. Optische Aufheller in Waschmitteln absorbieren zum Beispiel UV-Licht und geben bläuliches (sichtbares) Licht

ab – daher leuchten weisse Kleidungsstücke im UV-Licht einer Diskothek so kräftig blau. Das abgegebene Licht ist dabei energieärmer als das eingestrahlte, denn ein Teil der Energie wird im Farbstoffmolekül in Schwingungen, also Wärme, umgewandelt.

#### MOLEKÜLE ALS ENERGIE-ANTENNEN

Die von Heier und dem Empa-Doktoranden Surendra Anantharaman untersuchten J-Aggregate verhalten sich anders als einzelne Farbmoleküle. In diesen Molekülinseln liegen die Farbstoffmoleküle gut sortiert, eng aneinander, ähnlich wie Streichhölzer in einer Schachtel.

Das Farbstoffmolekül «muss» in dieser Konstellation nicht leuchten, sondern «kann» seine Energie auch an ein Nachbarmolekül weitergeben. Doch im Vergleich zu «klassischen» Halbleitern aus Silizium gibt es einen entscheidenden Unterschied: In einem Silizium-Halbleiter, etwa einer Solarzelle, wird die Anregungsenergie über Ladungsträger, zum Beispiel Elektronen, transportiert, die gewissermassen durchs Material «hüpfen». In J-Aggregaten dagegen schwingen die Elektronen nur im Farbstoffmolekül hin und her und verlassen dieses nie. Statt ganzer Elektronen werden also nur Schwingungen übertragen – ähnlich wie

bei Sende- und Empfangsantennen in der makroskopischen Welt. Tatsächlich können J-Aggregate Energie in kleinstem Massstab «senden» – extrem schnell und über viele hundert Moleküle hinweg.

#### HOHE VERLUSTE SEIT 80 JAHREN

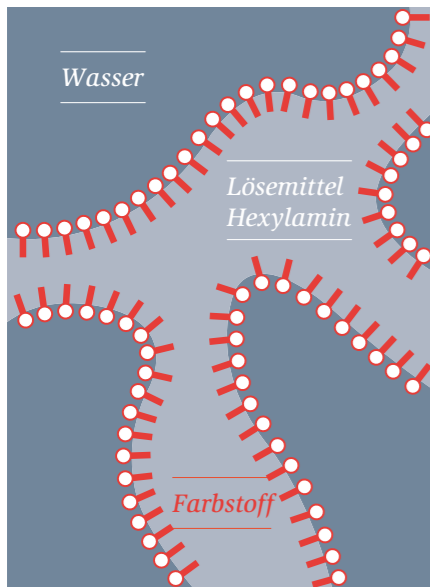
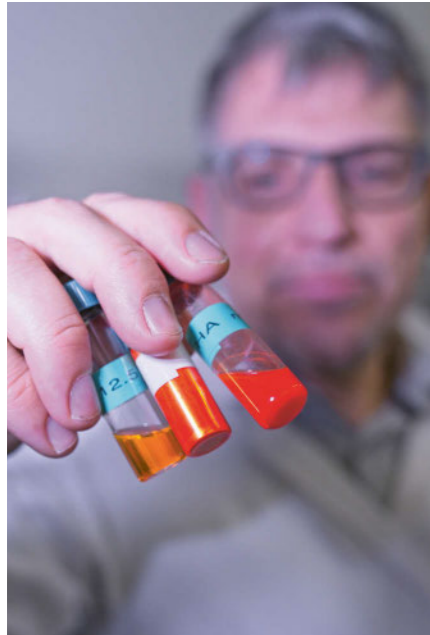
Das Phänomen der J-Aggregate und ihrer besonderen Energieübertragung ist bereits 1936 von Edwin E. Jelley in den USA und Günter Scheibe in Deutschland unabhängig voneinander entdeckt worden. Doch bislang gingen rund 95 Prozent der eingestrahnten Energie verloren und konnten nicht weitergeleitet werden. Schuld waren «Baufehler» im Sys-

tem. Die Moleküle waren in der Realität doch nicht so perfekt aneinandergereiht. Und immer wenn der Energieimpuls bei seiner Reise durch das J-Aggregat auf eine dieser Defektstellen traf, wurde der Transportprozess unterbrochen. Eine ordinäre Molekülschwingung beendete die Übertragung, ein bisschen Wärme entstand, und das Spiel war vorbei.

#### DER PERFEKTE ANTENNENWALD

Dem Empa-Team gelang es nun, unterstützt von Forschenden der ETH Zürich, der EPF Lausanne, dem PSI und der IBM Research Zürich, ein Farbstoffsystem zu entwickeln in welchem bis zu ▶





**ENERGIE-VIBRATION**

Oben: Jakob Heier mit Proben seines «Antennen-Farbstoffs». Unten: Ähnlich wie Streichhölzer in einer Schachtel reihen sich Farbstoffmoleküle an den Phasengrenzen einer bikontinuierlichen Emulsion aneinander. Nur so gelingt die Signalübertragung.

60 Prozent des eingestrahnten Lichtes auch wieder als Licht abgestrahlt wird. Das heisst aber auch, dass bis zu 60 Prozent der Energie verlustfrei weitergeleitet werden können – im Vergleich zu den bisher möglichen fünf Prozent gleicht das einer Sensation. Der Schlüssel zum Erfolg waren perfekt gebaute Farbstoffinseln, die in einer feinen Emulsion aus

Wasser und Hexylamin entstanden waren. Eine Emulsion ist ein Gemisch von Flüssigkeitströpfchen in einer anderen Flüssigkeit – Milch oder Mayonnaise sind Emulsionen, die jeder kennt.

Die Empa-Forscher beobachteten, dass nicht jede Emulsion funktionierte: Es musste eine sogenannte bikontinuierliche Emulsion sein, das heisst, die Tröpfchen, die in der äusseren Flüssigkeit schweben, dürfen nicht voneinander entfernt sein, sondern müssen sich zu schlierenförmigen Gebilden vereinigt haben. Erst dann bildet der untersuchte Farbstoff die gewünscht fehlerfreien J-Aggregate und kann die aufgenommene Energie verlustfrei über weite Strecken «senden».

**FEHLSCHLÄGE GEHÖREN DAZU**

Das nun veröffentlichte Studie erwähnt – in guter wissenschaftlicher Tradition – auch die Fehlversuche und die Vorgeschichte des erfolgreichen Experiments. Schliesslich sollen Chemiker und Physiker in aller Welt auf den Erfahrungen der Empa-Forscher aufbauen können. So führte es etwa nicht zum Ziel, den Farbstoff in Form von Dünnschichten auf einer festen Oberfläche zu kristallisieren. Zu viele Fehler in den Kristallen machten die Übertragung zunichte. Auch wässrige Lösungen, in denen sich der Farbstoff zu winzigen Tröpfchen zusammenlagert, funktionieren nicht. Einzig die bikontinuierlichen Emulsionen führen zu einer Signalübertragung – und auch nur dann, wenn in einer Flüssigkeitsphase einzelne Farbstoffmoleküle übrig sind, die in den J-Aggregaten Löcher füllen und Lücken schliessen – also Fehlstellen «reparieren» können.

**WELCHE ANWENDUNGEN SIND DENKBAR?**

Ganz sicher liegt noch ein langer Weg vor den Forschern, bis das, was nun in einer Emulsion gelingt, technisch nutzbar gemacht werden kann. Doch

dann könnte die Signalübertragung durch Farbstoffe in viele Alltagsbereiche eindringen. So ist es etwa möglich, schwaches Infrarotlicht mit Hilfe dieser Farbstoffe einzufangen und es mit Hilfe von Quantenpunkten in digitale Signale zu verwandeln – ein Vorteil für die Sensorik oder für Solarzellen, die auch bei sehr schwachem Licht Elektrizität liefern sollen. Aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften bieten sich J-Aggregate auch für Anwendungen in Quantencomputern und in der optischen Datenübertragung an.

Schliesslich könnten die signalleitenden Farbstoff-Aggregate bei der Diagnostik in lebendem Gewebe, nützlich werden: Infrarotlicht, also Wärmestrahlung, dringt tief in menschliches Gewebe ein, ohne die Zellen zu schädigen. J-Aggregate könnten diese Strahlung sichtbar machen und digitalisieren. Dies könnte hochauflösende Mikroskopaufnahmen in lebendem Gewebe deutlich erleichtern und verbessern. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: <https://www.empa.ch/web/s209>

Foto und Grafik: Empa



**Wasserstoff in der Mobilität**  
Jetzt im Verkehrshaus der Schweiz in der Halle Strassenverkehr erleben

**POWERFUEL**  
Entdecke die Treibstoffe der Zukunft.





# ENTGIFTER AUS DER DEPONIE

Bakterien aus einer indischen Mülldeponie könnten helfen, chemische Altlasten zu beseitigen. Im Fokus stehen Pestizide wie Lindan oder bromierte Flammschutzmittel, die sich in der Natur und in Nahrungsketten anreichern. Forscher der Empa und der Eawag erzeugten mit Hilfe dieser Bakterien Enzyme, die solche Chemikalien zerlegen können.

Text: Rainer Klose



## MÜLLDEPONIE IN INDIEN

Hier entstand ein äusserst nützliches Bakterium.

Foto: Empa

Die Produktion von Chemikalien ist eine umständliche Sache. Oft entsteht in der Fabrik nur zu einem kleinen Teil das, was man eigentlich möchte. Der grosse Rest ist unbrauchbar – oder gar schlimmer. Beispiele? Das Entlaubungsmittel «Agent Orange», das die USA im Vietnamkrieg einsetzten, war in grosser Eile produziert. Es enthielt als Verunreinigung Dioxin. So verloren nicht nur Bäume in der Kampfzone ihr Laub, auch US-Soldaten und vietnamesische Zivilisten erkrankten Jahre später an Krebs.

Auch aus der Landwirtschaft gibt es Beispiele: Bei der Herstellung des Insektizids Lindan, einem Hexachlorocyclohexan (HCH), entsteht nur zu maximal 15 Prozent der gewünschte Stoff. 85 Prozent der Reaktionsbrühe ist dagegen Sondermüll. In den 1950er-Jahren wurde diese giftige Mixtur noch komplett auf Felder und Obstplantagen verspritzt, danach trennte man das wirksame Lindan ab und verkaufte es rein, den Rest verbrachte man auf Mülldeponien. Dort liegen die Chemikalien oft heute noch. Seit 2007 ist Lindan in der EU verboten, in der Schweiz wird es schon länger nicht mehr eingesetzt.

Auch das Flammschutzmittel Hexabromocyclodekan (HBCD) ist eine Mixtur aus mehreren Stoffen. Es wurde in den 1970er-Jahren erfunden, im Massstab von mehreren 10 000 Tonnen pro Jahr produziert und in Polystyrol-Dämmplatten für Hausfassaden, in Textilien und in Plastik von Elektrogeräten verwendet. Seit 2014 ist es weltweit verboten. In der Schweiz wird HBCD-haltiger Kunststoff nicht recycelt, sondern muss in der Kehrichtverbrennung vernichtet werden.

## INTERNATIONAL GEÄCHTET

Seit 2004 regelt das «Stockholmer Abkommen über persistente organische Schadstoffe» den Umgang mit solch

langlebigen Umweltgiften (<https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2004/347/de>). Die Schweiz ratifizierte die Vereinbarung 2003. Doch all diese Stoffe sind bereits in der Umwelt – und zwar fein verteilt. HBCD kommt in Klärschlamm, in Fischen, in Luft, Wasser und Boden vor. Der WWF nahm 2004 Blutproben von elf europäischen Umweltministern und drei Gesundheitsministern und konnte HBCD und Lindan im Blut jedes Amtsträgers nachweisen.

## BAKTERIEN, DIE RETTER AUS DEM BODEN

Es fragt sich: Können wir den Chemie-Müll der vergangenen Generationen wieder einsammeln oder unschädlich machen? Zum Glück schrecken Wissenschaftler auf ihrer Suche nach Lösungen auch vor ekligen Orten nicht zurück: 1991 entdeckten sie fast zeitgleich in Chemiemülldeponien in Frankreich, Japan und Indien drei Bakterienstämme, die Lindan und seine nutzlosen chemischen Geschwister verzehren konnten: *Sphingobium francense*, *Sphingobium japonicum* und *Sphingobium indicum*. Könnten diese Bio-Saubermacher vielleicht auch das Flammschutzmittel HBCD und andere Gifte verdauen?

Der Empa-Chemiker Norbert Heeb und der Eawag-Mikrobiologe Hans-Peter Kohler machten gemeinsam mit Forschenden der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) und zweier indischer Institute die Probe aufs Exempel. Gemeinsam modifizierten sie die Gene der indischen Bakterien und produzierten HCH-abbauende Enzyme in Reinform. Ein Enzym ist ein Eiweiss-Molekül, sozusagen ein Bio-Katalysator, mit dem Bakterien, aber auch andere lebende Zellen, chemische Stoffe aufbauen bzw. zerlegen können. Das Schadstoffmolekül HCH fügt sich in das Enzym ein, wie ein Schlüssel in ein Schloss. Dann wird ein Teil des Moleküls abgespalten. Die Bruchstücke werden

wieder freigegeben, und das Enzym ist dann wieder bereit zur Aufnahme des nächsten Schadstoffmoleküls.

## MUTATIONEN ERÖFFNEN CHANCEN

Zusammen mit der Bachelor-Studentin Jasmin Hubeli untersuchte Norbert Heeb nicht nur die in den Deponien vorkommenden Enzym-Varianten, sondern auch ein Enzym, das aus einem genetisch veränderten Bakterienstamm gewonnen worden war. Hier hatten die Forscher das «Schlüsselloch» absichtlich vergrössert, damit die grösseren HBCD-Moleküle besser zerlegt werden können. Das Ergebnis: Die genetische Modifikation an den Bakterien beeinflusste tatsächlich die Geschwindigkeit, mit der der Schadstoff abgebaut wurde.

Empa-Forscher Heeb stimmen diese Ergebnisse hoffnungsvoll: «Damit haben wir nun tatsächlich eine Chance, diese von der Menschheit produzierten und grossflächig verteilten, langlebigen Gifte mit biologischen Methoden unschädlich zu machen.» Doch bis dahin ist es noch ein weiter Weg. Das Schlüssel-Schloss-Prinzip der hilfreichen Enzyme muss noch genauer durchschaut werden, bevor es in Zukunft massgeschneiderte Enzyme für Chemiegifte geben kann. ■

Mehr Informationen zum Thema finden Sie unter: <https://www.empa.ch/web/s502>



## DIE MAUS IM NEST

Am Sonntag, 7. März, feierte die «Sendung mit der Maus» ihren 50. Geburtstag. Für die Jubiläumsausgabe der erfolgreichsten Kindersendung im deutschen Fernsehen war Armin Maiwald, Moderator der ersten Stunde, zu Besuch im NEST an der Empa in Dübendorf. Das Thema: Wie bauen wir in Zukunft kreislaufgerecht?

<https://www.wdrmaus.de/>



**MITTENDRIN**  
Armin Maiwald am Raumteiler aus wiederverwertetem Bauschutt in der Unit «Urban Mining & Recycling».

## TREIBSTOFFE DER ZUKUNFT ENTDECKEN



**INTERAKTIV**  
Die neue Dauerausstellung der Empa und der Avenergy Suisse informiert über klimaneutrale Treibstoffe.

Gemeinsam mit den Partnern Avenergy Suisse und Hyundai präsentiert die Empa seit März 2021 eine neue Dauerausstellung über nachhaltige Treibstoffe der Zukunft im Verkehrshaus der Schweiz. Im Fokus steht unter anderem die Frage: Wie kommt Ökostrom in den Tank? Und: Welcher Treibstoff ist für welche Zweck sinnvoll? In einem interaktiven Spiel können die Besucherinnen und Besucher sogar selbst virtuell Wasserstoff herstellen.

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

Fotos: Empa, Verkehrshaus der Schweiz

Foto: Empa

## SCHWEIZER IDEEN FÜR DEN «GREEN DEAL»



**ZUGESCHALTET**  
Peter Richner in der Online-Diskussion.

Zukunftsfähiges Bauen braucht radikale Innovationen – wie sie beispielsweise im NEST an der Empa erforscht und umgesetzt werden.

Vom Schweizer Beispiel inspiriert, lud die internationale Forschungsplattform ReConstruct am 22. März zu einer Online-Diskussion über Lösungen für klimaneutrales Bauen ein. Neben der österreichischen Klimaministerin Leonore Gewessler sass Peter Richner, stv. Direktor der Empa, mit am virtuellen Tisch.

<https://www.rethinkconstruction.net/>

## VERANSTALTUNGEN DER EMPA-AKADEMIE

28. MAI 2021

**Kurs:** Elektrochemische Charakterisierung und Korrosion

**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
<http://www.empa-akademie.ch/korrosion>  
Empa, Dübendorf

13. – 15. JULI 2021

**Kurs:** Aerogel Industry – Academia Forum

**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
<http://www.empa-akademie.ch/aerogel>  
Empa, Dübendorf und online

09. – 10. SEPTEMBER 2021

**Kurs:** 3D Drucken in der Medizintechnik

**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
<http://www.empa-akademie.ch/medizintech>  
Swiss m4m Center, Bettlach

09. SEPTEMBER 2021

**Kurs:** Alkali-Silica Reaction – a Multidisciplinary Approach / Webinar via Zoom

**Zielpublikum:** Forschung und Industrie  
<https://www.ch/asr>

15. SEPTEMBER 2021

**Kurs:** Additive Fertigung von Metallen

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

08. OKTOBER 2021

**Kurs:** Energy Harvesting (in Englisch)

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

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



THE PLACE WHERE INNOVATION STARTS.



Materials Science and Technology