

Empa Quarterly

Forschung & Innovation #56 | Mai 17



EM

Abgas – eine Recherche

OLEDs und Mikroschalter
aus Farbstoffen

Portrait: Ökoforscher
Patrick Wäger

Textilmembran für
künstliche Herzen



Empa

Materials Science and Technology



MICHAEL HAGMANN Leiter Kommunikation

Liebe Leserin, lieber Leser

Preisfrage: Warum ist die Luft im Autobahntunnel sauberer als in der Stadt? Motorenforscher wissen es: Im Tunnel sind die Autos mit warmgefahrenem Motor unterwegs, sie fahren gleichmässig Tempo 100, praktisch niemand gibt Vollgas. Optimale Bedingungen also für die Katalysatoren, Partikelfilter und AdBlue-Einspritzung.

Ganz anders sieht es in der Stadt aus. Dort wird kalt gestartet und ordentlich Gas gegeben. Die einen versuchen, an der Ampel verlorene Zeit reinzuholen. Andere möchten die teuer eingekauften Pferdestärken zur Geltung bringen. Willkommen in der Realität!

«Entscheidend ist,
was hinten rauskommt.»

Helmut Kohl, deutscher Bundeskanzler 1982–1998)

Die Abgasreinigung bei Dieseln und Benzinern kommt unter diesem Fahrverhalten an ihre Grenzen – doch genau hier hat der Gesetzgeber bislang weggesehen und sich auf realitätsferne Tests in Prüfständen verlassen, um Grenzwerte festzulegen und Autos einzustufen. Manche Schadstoffe rauschen (fast) ungehindert durch, andere entstehen erst im heissen Katalysator aus den chemisch reaktiven Zutaten, die der Motor liefert. Bald wird der Stadtverkehr von Feinstaubalarm, Fahrverboten und Umweltplaketten bestimmt. Was aber kommt wirklich aus dem Auspuff? Und wie viel davon genau? Die Empa hat nachgeschaut (s. S. 08 – 20).

Bei allem Gerede um Stickoxide und Feinstaub sollten wir eines nicht vergessen: Verbrennungsmotoren tun genau das, was sie sollen – sie verbrennen kohlenstoffhaltige Treibstoffe mitsamt ihren zahlreichen Verunreinigungen. Dabei entstehen (unter realen Bedingungen) leider nicht nur Wasserdampf und Kohlendioxid, die Endprodukte jeder vollständigen Verbrennung. Mit einer gewissen Umweltbelastung aus dem Verkehr werden wir also auf absehbare Zeit leben müssen, denn wir wollen ja auf den Komfort eines eigenen (oder geliehenen) Autos nicht verzichten.

Trotz des ernsten Themas wünsche ich Ihnen erhellende Einsichten und eine spannende Lektüre!



Fokus

Abgas – eine Recherche

- 10** Auf frischer Fahrt ertappt
In Messfahrten um den Greifensee fallen Diesel durch
- 12** Was beim Gasgeben rauskommt
Auf einen Blick: Gifte im Abgas und ihre Wirkung
- 14** Partikel-Alarm für Benzinern
Gefährlich grosse Russmengen aus Direkteinspritzern
- 16** Aufgewärmt am Start
Mikrowellen gegen die Kaltstartemissionen
- 18** Elektrisch ist meistens besser
So viel Treibhausgas enthält Strom aus der Steckdose



- 04** Leuchtgebiete
Empa-Forscher arbeiten an Leuchtfassaden der Zukunft
- 07** Lichtschalter aus der Spraydose
Farbtröpfchen als Mikrolinsen für die Optoelektronik
- 19** «Wir müssen erzählen, was auf uns zukommt»
Portrait: Umweltforscher Patrick Wäger
- 24** Bio-Tarnkappe für künstliche Herzpumpen
Eine mit Zellen tapezierte Membran rettet Patienten

Titelbild

Verzierte Abgasrohre werden von Autodesignern genutzt, um die Motorleistung des Fahrzeugs in Szene zu setzen. Was tatsächlich rauskommt, wenn der Fahrer Gas gibt, lesen Sie **ab Seite 8** Bild: BMW AG

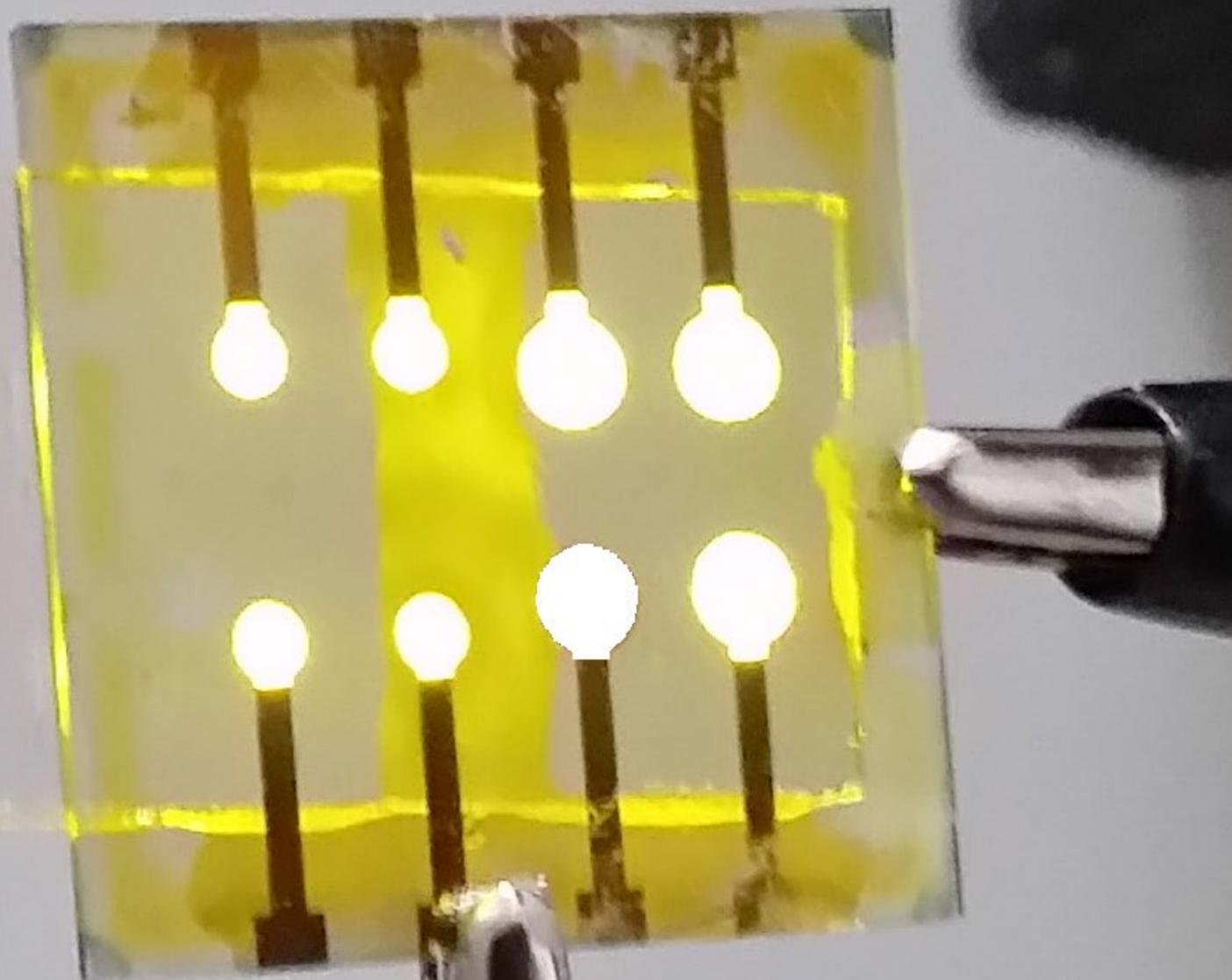
Impressum

Herausgeberin Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, Schweiz, www.empa.ch / **Redaktion & Gestaltung** Abteilung Kommunikation / Tel. +41 58 765 47 33 empaquarterly@empa.ch, www.empaquarterly.ch // Erscheint viermal jährlich **Anzeigenmarketing** rainer.klose@empa.ch **ISSN 2297-7406** EmpaQuarterly (deutsche Ausg.)



Leuchtgebiete

Organische Leuchtdioden, sogenannte OLEDs, werden unsere Welt bald anders aussehen lassen: Nicht mehr kleine Lichtquellen, wie Glühlampen oder LED spenden in Zukunft Licht, vielmehr leuchten Wände, Zimmerdecken, Fassaden und Autokarosserien. Die Empa erschliesst das Thema OLEDs als neues Forschungsgebiet.



OLED – organische Leuchtdioden

Eine organische Leuchtdiode (englisch, organic light emitting diode, OLED) ist ein leuchtendes Dünnschichtbauelement aus organischen halbleitenden Materialien. Weil nur Farbmoleküle, aber keine Siliziumchips nötig sind, lassen sich die Leuchten mit speziellen Tintenstrahl- oder Offsetdruckern herstellen. Sie sind günstiger, dünner und flexibler als LED-Leuchten, jedoch ist ihre Lebensdauer derzeit noch geringer als die von LEDs.

TEXT: Ramona Ronner / BILDER: Empa

Organische Leuchtdioden, sogenannte OLEDs, sind die Lichtspender der Zukunft. Leuchtende Lackschichten auf Autos, farbig illuminierte Wohnzimmerwände und Küchendecken, Fassadenwerbung ganz anderer Art – dies alles wird nun denkbar. Ganz klar, ist die Empa mit von der Partie: das internationale Forschungsprojekt Treasures, koordiniert an der Empa, schuf im letzten Jahr flexible, durchsichtige Elektroden, die Basis für biegsame, rollbare OLEDs. Nun kommt der nächste Schritt: Erfahrung sammeln mit dem Schichtaufbau der Leuchtkörper. Denn eine schön gleichmässig leuchtende Tapete zu fabrizieren, ist alles andere als einfach, dazu ist Expertise aus der Branche notwendig.

Anand Verma bringt genau diese Expertise mit. Nach einem Bachelor of Engineering in Printing and Media Technology in Indien startete er seine Karriere als Produktionsingenieur bei der Zeitung «India Today». Dann machte er Schluss mit Papier: im Masterstudium an der Technischen Universität Chemnitz (Deutschland) und am Holst Centre in Eindhoven (Niederlande) lernte Verma, wie man Elektronik druckt. Danach schaute er den OLED-Herstellern Novalled und Cynora auf die Finger, forschte für die Unternehmen an Farbstoffen, Rezepturen und neuen Drucktechnologien für OLEDs.

An der Empa erforscht Anand Verma vor allem den Druck flexibler anorganischer Perowskit-Solarzellen. Doch im Nebenjob

bleibt er den organischen Lichtquellen treu und leitet ein Projekt, in dem OLEDs auf drei verschiedene Substrate gedruckt werden sollen. «Ich kann einschätzen welche Schichtzusammensetzung bei OLEDs funktionieren wird und welche nicht», sagt Verma. «Dadurch sind mir auch die Parameter bekannt, die die verwendeten Materialien haben müssen.»

Hauchdünne Schichten

«Die meisten der uns bekannten Lichtquellen sind Punkt- oder Röhrenleuchten. OLEDs hingegen sind Flächenlichter. «Wenn man ihre Struktur ansieht, bestehen sie aus fünf sehr dünnen Schichten», erläutert der Empa-Forscher. Die positiv geladene Anode besteht meist aus transparentem Indiumzinnoxid, mit dem sich elektrisch leitfähige Fenster oder Folien herstellen lassen. Darauf folgt eine organische Halbleiterschicht (Poly(3,4-Ethylendioxythiophen-Polystyren-Sulfonat), PEDOT:PSS), eine Leuchtschicht aus Poly(p-phenylen-vinyl), auch Super Yellow genannt, eine Elektronen-Transportschicht (Kalzium, für negative Ladungsträger) und eine Kathode, meist aus Aluminium.

Für den Herstellungsprozess einer OLED benötige Verma zweieinhalb bis drei Tage. Zunächst ist es wichtig, das Indiumzinnoxid-Substrat sorgfältig zu reinigen. Denn jeden noch so kleinen Fleck kann man später, auf dem fertigen Objekt, erkennen – gerade weil die Schichten nur einige Nano-

meter dick sind. Die Schichtdicke bedeutet die erste Entscheidung zwischen guter und schlechter OLED: «Je dünner die Schicht desto höher die Gefahr, dass sich Löcher bilden. Je dicker die Schicht desto mehr Strom muss man durchschicken, um dieselbe Leuchtkraft zu erreichen», sagt Anand Verma.

Plasma macht die Farbe glatt

Nach der Reinigung behandelt er das Substrat mit Sauerstoffplasma: das Substrat wird mit Ionen bombardiert, damit man besser auf es drucken kann. Es ist wichtig, dass die Oberflächenenergie des Substrats höher ist als die der nächsten Schicht. Anand erklärte dies so: «Es ist, wie wenn man Wasser auf eine Fläche giesst. Es wird – je nach Material und dessen Energie – entweder ganz nass oder es bilden sich Tropfen darauf. Wir aber wollen eine gleichmässige Schicht und keine Tropfen, wenn wir etwas drucken oder beschichten.»

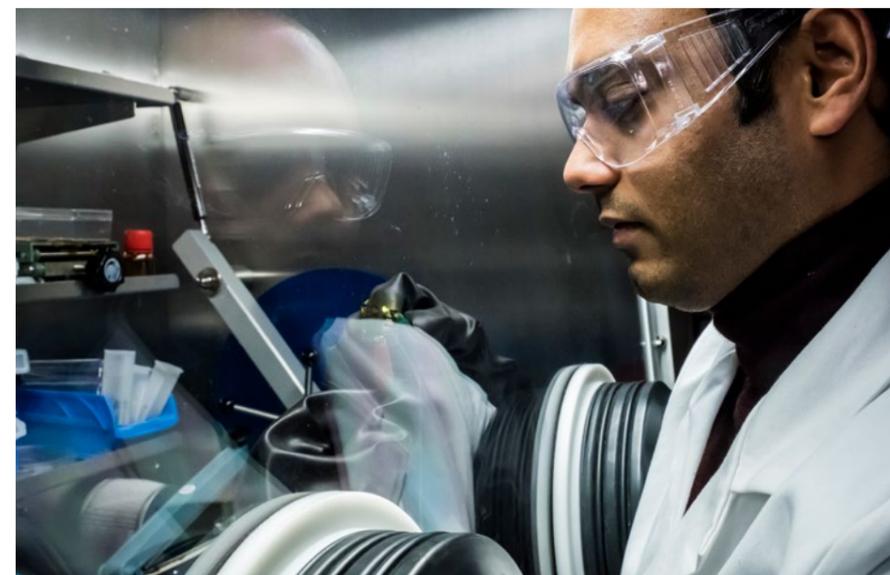
Mit der Behandlung des Substrats allein ist es aber nicht getan. Bei der Herstellung der Tinte – der nächsten Materialschicht – muss er das geeignete Lösungsmittel in der idealen Konzentration zuvor ermitteln, um den erwünschten Energiegehalt zu erreichen. Diese Energie muss jeweils mit der Schicht, auf die gedruckt wird, und der darauffolgenden harmonisieren. Beim Lösungsmittel sollte ausserdem darauf geachtet werden, dass ein möglichst umweltfreundliches

Bild links

Experiment gelungen: die OLED-Testkörper leuchten. Der Strom stammt aus einer 9-Volt-Batterie.

Bild rechts

Grosse Teile der Arbeit an OLEDs müssen unter Schutzgas stattfinden. Anand Verma braucht Geduld und Fingerspitzengefühl in der Glove Box.



verwendet wird. «Würde man zum Beispiel Chloroform verwenden, kann das in der Produktion sehr gesundheitsschädigend wirken, weil es eine so grosse Menge davon braucht», sagt Verma.

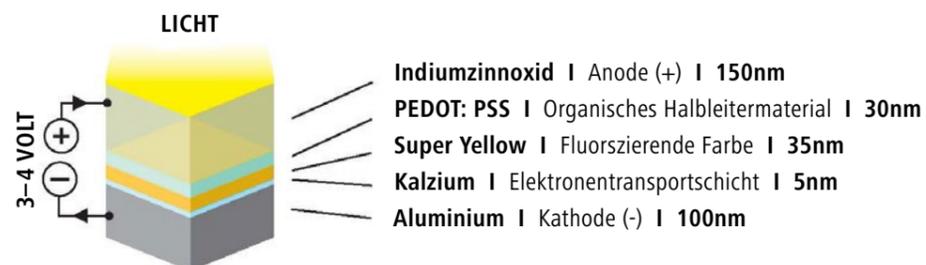
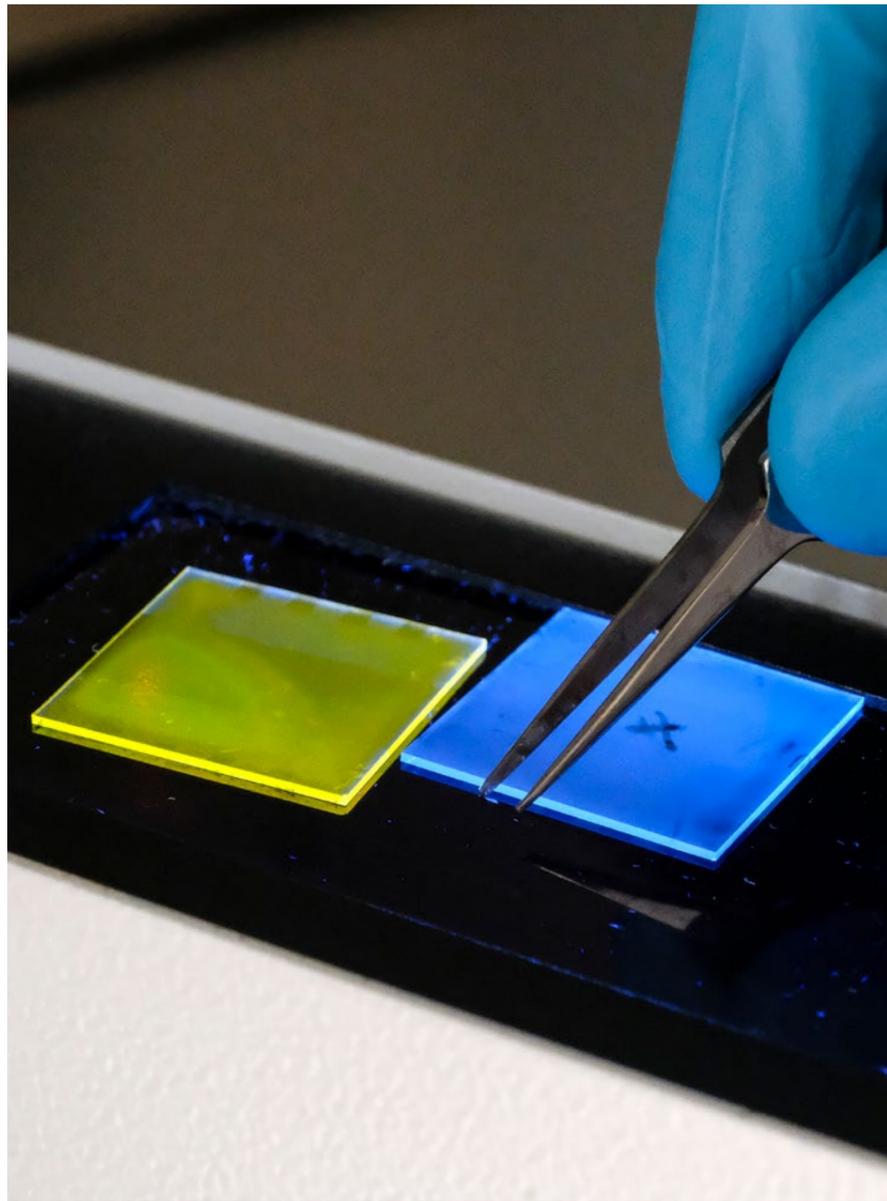
Drucken und beschichten

Eine der Tinten, die verwendet werden, heisst Super Yellow. Das ist die wichtigste Schicht: die Leuchtschicht. Es ist essenziell, dass Verma diese Tinte 24 Stunden vorher herstellt, denn so lange dauert es, bis sich die Farbe im Lösungsmittel aufgelöst hat.

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Schichten werden Kalzium und anschliessend Aluminium nicht gedruckt, sondern aufgedampft. Dafür muss der Druckspezialist eine Glove Box inklusive Vakuumbehälter verwenden, da Calcium nicht mit Sauerstoff in Kontakt kommen darf, weil es sonst sofort oxidiert und nicht mehr leitfähig ist. Warum nimmt man gerade ein so empfindliches Metall? «Man kann auch ein anderes nehmen. Aber alle, die dafür in Frage kommen, befinden sich in derselben Gruppe im Periodensystem. Sie oxidieren alle.»

Diese Empfindlichkeit von Kalzium gegenüber Sauerstoff macht es notwendig, dass er die fertige OLED einkapselt, um sie vor Oxidation und Feuchtigkeit zu schützen. Eine weitere Schicht aus transparenter Folie oder Glas und in UV-Licht aushärtendem Leim ist dazu nötig.

Die Tests mit den unterschiedlichen Substraten, den Trägern für diese flexiblen OLED, laufen, bis die OLED-Prototypen der Empa verlässlich leuchten. Anand Verma denkt bereits an den nächsten Schritt: «Drucker und Beschichtungsgeräte im neuen Coating Competence Center der Empa wären schon jetzt in der Lage, um OLED-Muster oder Flächen in grösserem Stil herzustellen.» Die Erleuchtung aus dem Labor ist zum Greifen nah. //

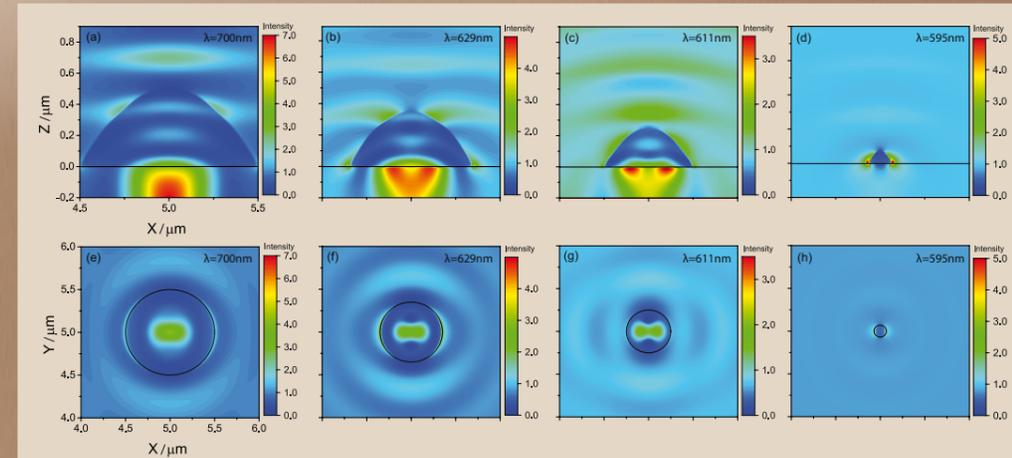


Grafik: Typischer Schichtaufbau einer organischen Leuchtdiode (OLED).

Damit sich die Farbe perfekt verteilt, muss der Farbtropfen eine niedrigere Oberflächenenergie haben als die zu benetzende Fläche.

Lichtschalter aus der Spraydose

Für die Optoelektronik der Zukunft sind schnelle, verlässliche und preisgünstige Schalter gesucht. Submikrometer kleine Farbstofftröpfchen können solche Aufgaben übernehmen.



Der Physiker Jakob Heier entdeckte an der Empa die speziellen optischen Eigenschaften von Farbstofftröpfchen.

TEXT: Rainer Klose / BILDER: Empa, Wiley-VCH

Für die Herstellung von OLEDs (siehe Seite 4) suchen Wissenschaftler nach Flüssigkeiten, die sich möglichst glatt auf der Oberfläche verteilen. Die gleiche Forschungsabteilung an der Empa arbeitet auch an dem genauen Gegenteil: Eine auf eine Oberfläche aufgebraachte Flüssigkeit soll sich in möglichst viele Tröpfchen zerteilen. Jedes dieser Tröpfchen formt beim Eintrocknen eine Mikrolinse. Ein Feld solcher Mikrolinsen beeinflusst Lichtstrahlen, das ist für die optische Signalverarbeitung in Computern und Glasfasernetzen äusserst interessant.

Preisgünstige Produktion

«Wir nutzen den Vorteil, dass sich die Tröpfchen selbst organisieren», sagt Jakob Heier, der die optischen Eigenschaften der Mikrolinsen untersucht. «Das bringt vor allem einen riesigen ökonomischen Vorteil: Wir brauchen keine Maschinen, um die Mikrolinsen herzustellen – eine Sprühanlage genügt.» Im Laborversuch wird die Farbe allerdings zurzeit noch nicht aufgesprüht; Heier und seine Kollegen beschichten die Mikrolinsen mittels Rotation. Die Farbe wird auf einem Drehteller mittig platziert und verteilt sich durch die Fliehkraft auf der Fläche.

Wer genau verstehen möchte, was solche Felder von Mikrolinsen im Licht tun, muss tief in die Mathematik einsteigen. Heier erzählt von Fourier-Transformationen

und Kramers-Kronig-Relationen, die helfen, die Eigenschaft Tausender Tröpfchen in einer einzigen mathematischen Formel abzubilden. «Die Mathematik, die dahinter steckt, ist hundert Jahre alt – aber die Erkenntnisse, die wir gewinnen, sind höchst aktuell.»

Elektronische Bauteile aus Farbstoff

Ihm und seinen Kollegen gelang es nachzuweisen, dass man aus Tröpfchen von Cyanin-Farbstoff eine ganze Reihe von optischen Schaltelementen bauen kann. Die Veröffentlichung erschien im Februar 2017 im Fachblatt «Advanced Optical Materials». Die Schaltelemente können bestimmte Wellenlängen spezifisch ausblenden oder durchlassen. Heier nutzt dabei die Änderung des Brechungsindex im Farbstoff. Was die Sache spannend macht: Durch die Wahl verschiedener Farbstoffe und durch die Variation der Tröpfchengrösse lassen sich die Eigenschaften des Schaltelements auf die gewünschte Anwendung zuschneiden.

Aus den Mikrolinsen lassen sich zum Beispiel sogenannte Phasengitter bauen, ein in der Optoelektronik beliebtes Werkzeug. Es kann Lichtstrahlen in einzelne Frequenzen aufteilen, ohne die Intensität des Lichts zu verringern. Die Signalverluste bleiben gering, es ist weniger Lichtenergie nötig und das Bauteil erhitzt sich nicht so stark. «Wir haben mit unseren Beobachtungen und Berechnungen nun die physikalische Grund-

lage für solche Schalter gelegt», sagt Heier. «Nun bin ich gespannt, wer dieses Know-how für reale Anwendungen nutzt.» //



Abgas – eine Recherche



4 524 029 Personenwagen (PW) waren in der Schweiz Ende 2016 eingelöst – mehr als 500 PW auf 1000 Einwohnende. Jedes Jahr nimmt der Bestand um rund zwei Prozent zu – von 1990 bis 2015 ist darum der Schweizer Fuhrpark um 56 Prozent gewachsen. Unter den 4,5 Millionen Schweizer PW waren Ende 2016 genau 10 727 Elektrofahrzeuge. Das entspricht einem Anteil von 0,2 Prozent. Alle anderen Fahrzeuge, also 99,8 Prozent, stossen Abgase aus.

Auf frischer Fahrt ertappt

Ab Oktober müssen neu auf den Markt kommende Diesel-Autos strengeren Abgasnormen entsprechen als bislang. Das neue Zulassungsverfahren verlangt Messfahrten im echten Strassenverkehr. Die Empa hat einige aktuelle Modelle schon jetzt mit der neuen Methode gemessen – die Ergebnisse sind beunruhigend.

TEXT: Rainer Klose / BILDER: Empa

Mittlerweile ist klar: Die Zulassungsvorschriften für Personenwagen (PW) in der EU und in der Schweiz haben mit den realen Abgasemissionen der Autos im Strassenverkehr wenig zu tun. Die «echten» Abgasemissionen werden daher in gesonderten Studien ermittelt. Die Empa misst im Auftrag des Bundes etwa ein Dutzend Fahrzeuge jährlich detailliert aus, sie werden von zufällig ausgewählten Privatpersonen gegen ein kleines Entgelt zur Verfügung gestellt. Die Daten landen in der europäischen Datenbank HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) und werden unter anderem von internationalen Forschungsinstituten und vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) als Grundlage für Expertisen genutzt.

Hohe Stickoxidemissionen

Was bei den Messungen passieren kann, zeigte sich im Januar dieses Jahres: Der Testkandidat, ein Renault Mégane Diesel des Modelljahrs 2016, zeigte bereits auf dem Empa-Prüfstand hohe Stickoxid-Emissionen. Dies deshalb, weil die Empa-Forscher den Wagen nicht nach dem bisherigen Typengenehmigungsverfahren, sondern nach dem neuen WLTP (Worldwide Light-Duty

Vehicles Test Procedure) testeten, welches ab Oktober für alle neuen Modelle gilt. So war das Fahrzeug beispielsweise fast 300 kg schwerer, als es die Typenprüfvorschriften vorsehen – nicht aus bösem Willen, sondern weil der Renault Mégane tatsächlich so viel wiegt. Später, beim so genannten RDE-Test (Real-Driving-Emissions) auf der Strasse, wurden bis 1300 mg Stickoxide pro Kilometer am Auspuff gemessen. Das heisst, dieses aktuelle Euro-6-Fahrzeug emittiert in etwa gleich viel wie ein 10 bis 15 Jahre alter Diesel. Neue Fahrzeugmodelle dürfen ab Oktober 2017 dagegen nur noch 170 mg/km ausstossen.

Von Autojournalisten preisgekrönt

Noch ein Jahr zuvor war der Renault Mégane von europäischen Autojournalisten zum «Car of the Year» gekrönt worden. Wie ist es möglich, dass ein modernes Fahrzeug auf der Strasse so hohe Emissionen aufweist? Ein Problem sind die bisherigen Abgasvorschriften. Unrealistische Bestimmungen der Leergewichte und Fahrwiderstände sowie vorgegebene, hochtourige Schaltpunkte, die

nichts mit der Realität zu tun haben, prägen diese Vorschriften. Diese Erkenntnis ist nicht neu; bereits 2010 wurde beschlossen, ein realistischeres Abgasmessverfahren zu entwickeln. Warum das so lange dauert? Das Thema ist komplex und wird durch eine internationale Arbeitsgruppe bearbeitet, die vielen, teilweise divergierenden Ansprüchen genügen musste.

Bei Renault Mégane schaltete sich bei der Messfahrt im letzten Januar offenbar die Abgasrückführung ab, vielleicht, weil die Aussentemperatur unterhalb der Minimaltemperatur für den Labortest lag. Auch andere Hersteller müssen die Motoren ihrer Fahrzeuge «schonen» und schalten daher die Abgasreinigung ab, wenn der Motor ausserhalb des Prüfstandzyklus genutzt wird. Dies ist nach EU-Emissionsverordnung 715/2007/EG legal. Die Abschaltung geschieht zum Beispiel bei Audi und Fiat nach 22 Minuten, wie das «Handelsblatt» berichtete (der Prüfstandzyklus dauert 20 Minuten), bei Daimler unter 10 Grad Celsius, bei Opel sogar schon unter 17 Grad, wie ebenfalls das «Handelsblatt» berichtete (der Prüfstandzyklus



Ein Opel Astra 1.6 CDTI auf dem Rollenprüfstand der Empa. Die Schläuche verbinden den Auspufftrakt mit einem mobilen PEMS-Messgerät im Inneren des Autos. In der gleichen Konfiguration geht es dann auf die Strecke rund um den Greifensee.

lus verlangt Temperaturen über 20 Grad). Opel fährt zudem bei einem Luftdruck unter 915 Millibar die Abgasreinigung zurück, wie das Nachrichtenmagazin «Der Spiegel» berichtete. Die Abschaltung geschieht also oberhalb von 850 Metern über Meer (das höchste Prüflabor Europas liegt bei Madrid auf 700 Meter).

Im Februar 2017 haben sich Opel, Daimler und VW zu einem freiwilligen Rückruf von europaweit rund 500 000 Fahrzeugen bereit erklärt, um deren Abgasreinigungssoftware nachzubessern, obwohl sie legal war.

Die Empa forscht für alle

Damit Abgasreinigungssysteme auch bei niedrigen Temperaturen und sonstigen widrigen Umständen dauernd im Einsatz sein können, müssen sie technisch im Detail verstanden, richtig ausgelegt und darüber hinaus optimal betrieben werden. Der aktuelle Skandal zeigt es deutlich: hier gibt es grossen Nachholbedarf. Die Empa leistet mit einem Hochtemperatur-Strömungslabor einige wertvolle Beiträge, indem beispielsweise das Einspritzverhalten von AdBlue, einer wässrigen Harnstofflösung, die bei neuen Dieselfahrzeugen ins Abgas eingespritzt wird, im Detail untersucht wird. Dabei wird der Spraykegel mit Lasermessgeräten bis auf Einzeltröpfchen hin vermessen, die Bildung und Verdampfung flüssiger AdBlue-Wandfilme im Abgasrohr untersucht und die Zersetzung von verdampftem Ad-

Blue gemessen. Diese Forschungsergebnisse sind öffentlich – sämtliche Hersteller dürfen sie nutzen.

Zurück auf die Strasse. Bei den Abgasuntersuchungen der Empa fahren die Spezialisten der Abteilung Fahrzeugantriebssysteme eine definierte Strecke von Dübendorf aus um den Greifensee herum und zurück auf der Autobahn von Uster über das Brüttli-Kreuz (siehe Karte links). Dabei werden die NO_x-Emissionen im Fahrzeug von einem sogenannten PEMS (Portables Emissionsmess-System) aufgezeichnet.

Der Mégane ist nicht allein

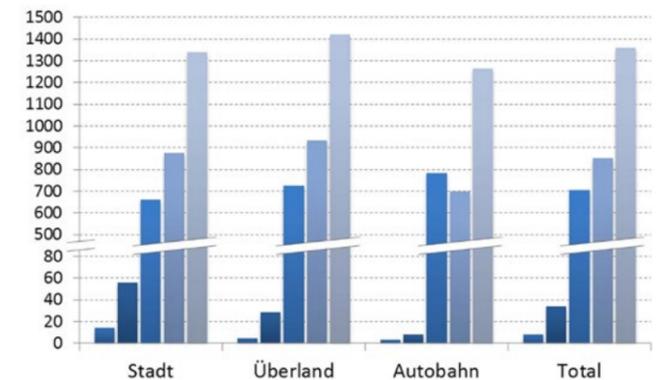
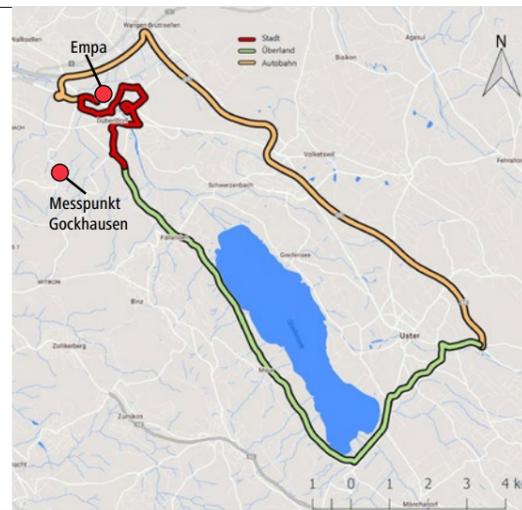
Drei neue Dieselfahrzeuge der unteren Mittelklasse mit aktuellem Abgasstandard Euro 6b hat die Empa bereits nach dem neuen RDE-Verfahren untersucht: Einen Opel Astra 1.6 CDTI, einen Ford S-MAX 2.0 TDCi und den Renault Mégane Grandtour 1.5dCi. Bei allen lag der NO_x-Ausstoss in jeder Phase der Fahrt zwischen 600 und 1400 mg/km; Abgasuntersuchungen anderer Labors zeigen ein ähnliches Bild. Der Renault Mégane ist also nicht allein.

All diese Fahrzeuge nach aktuellem Standard Euro 6b dürfen bis Herbst 2019 unverändert weiter als Neuwagen verkauft werden. Erst die nächste Modellreihe muss Euro 6c entsprechen und die schärferen WLTP- und RDE-Tests bestehen.

Wer heute schon sauberer fahren möchte, als es das Gesetz verlangt, kann das tun: Entweder bereits jetzt beim Kauf eines Neuwagens fragen, ob er Euro 6c entspricht. Oder ein Erdgasfahrzeug kaufen. Das ebenfalls vermessene Gasfahrzeug war mit NO_x-Emissionen von durchwegs unter 10 mg/km 60- bis 140-mal sauberer unterwegs als die gemessenen Dieselfahrzeuge. //

En passant: Abgasfahrten in Gockhausen

Dass Diesel-PW im realen Fahrbetrieb deutlich höhere NO_x-Emissionen aufweisen als auf dem Prüfstand, bestätigt ein anderes Forscherteam, mit einer völlig anderen Messmethode – ganz in der Nähe der Empa-Teststrecke. Jens Borken-Kleefeld vom österreichischen IIASA und Yuche Chen von der University of California, Davis, werteten Abgasmessungen an vorbeifahrenden Autos aus, auf der Bergstrasse von Dübendorf nach Gockhausen. Das Abgas der vorbeifahrenden Autos wird mit einem Infrarot-Lichtstrahl durchleuchtet. Zugleich lesen die Forscher die Kennzeichen und rufen bei allen im Kanton Zürich eingelösten Fahrzeugen die Fahrzeugdaten aus einer Datenbank ab: Modelljahr, Treibstoffart, Motorleistung, Emissionsklasse, Fahrzeuggewicht. In den 13 Jahren, in denen die Messung lief, fuhren 110 000 Benzin-PW und 18 000 Diesel-PW durch die Mess-Schranke und hinterliessen ihren «Abgas-Fingerabdruck». Die Forscher schreiben: «NO_x-Emissionen von Diesel-Autos sind jeweils 10- bis 20-mal höher als diejenigen von Benzinautos aus dem gleichen Modelljahr.» Die Schlussfolgerung: «Die NO_x-Grenzwerte für Diesel-Fahrzeuge haben im realen Fahrbetrieb nicht den Effekt, den der Gesetzgeber erzielen wollte.»



NO_x Emissionen bei der Testfahrt um den Greifensee im Vergleich: links ein Erdgasfahrzeug (CNG) und ein Benzinier. Rechts drei aktuelle Euro-6-Dieselfahrzeuge (Opel Astra, Ford S-MAX, Renault Mégane).

Was beim Gasgeben rauskommt

Im Rahmen des GasOMeP-Projekts untersuchten Empa-Forscher Abgase von sieben Benzin-Autos und einem Diesel, sechs davon aus den Baujahren 2012 bis 2016. Im Gaschromatografen, einem feinen, analytischen Instrument, tauchten beunruhigende Substanzen auf. Auf dem Rollenprüfstand zeigt sich: die meisten entstehen dann, wenn der Wagen beschleunigt.

Russpartikel

Die Nanopartikel mit zunächst 15–20 Nanometer (Millionstel Millimeter) Durchmesser agglomerieren zu Partikeln mit 80–100 Nanometer Durchmesser. Sie gelangen in die Lungenbläschen und verbleiben dort für immer. (Der Lunge kann nur Partikel grösser als 200 Nanometer entfernen). Auf der Oberfläche der Russpartikel sind chemische Schadstoffe angelagert, die mit ihnen in die Lunge und damit in den Blutkreislauf transportiert werden – wie auf einem Trojanischen Pferd.

→ Euro 6 erlaubt für Benzin-Direkteinspritzer 6 Billionen Partikel pro km, für Diesel 600 Milliarden Partikel pro km. Für Benziner mit Saugrohreinspritzung ist die Emission nicht limitiert.

Kohlenmonoxid (CO)

Das Gas ist giftig, da es an Hämoglobin bindet und so den Sauerstofftransport im Blut stoppt. Kohlenmonoxidvergiftungen sind innerhalb kurzer Zeit tödlich.

→ Euro 6 erlaubt für Benziner 1000 mg CO/km, für Diesel 500 mg/km.

Stickoxide (NO und NO₂)

NO wird an der Luft rasch zu zu NO₂ oxidiert. NO₂ ist ein giftiges, hustenreizendes Gas mit stechendem Geruch. Es ist leicht in Wasser löslich und bildet dann Salpetersäure. Oberhalb von 21 °C entsteht daraus N₂O₄, ein ätzendes und stark oxidierend wirkendes Gas.

→ Euro 6 erlaubt für Benziner 60 mg NO + NO₂ / km, für Diesel 80 mg / km.

Formaldehyd (CH₂O)

kann Allergien, Haut-, Atemwegs- oder Augenreizungen verursachen. Akute Lebensgefahr besteht ab einer Konzentration von 30 ml/m³. Bei chronischer Exposition ist es krebserregend und beeinträchtigt Gedächtnis, Konzentrationsfähigkeit und den Schlaf.

→ Euro 6 gibt keine Grenzwerte vor.

Benzol (C₆H₆)

Der Abbau im Körper erzeugt Gifte, die Zellmutationen (Krebs) auslösen können. Eine langzeitige Aufnahme führt zu Schädigungen der inneren Organe und des Knochenmarks. Dies führt zu Blutarmut. Benzol wird im Gehirn, Knochenmark und Fettgewebe von Menschen und Tieren gespeichert.

→ Euro 6 gibt keine Grenzwerte vor.

Dinitropyrene (C₁₆H₁₈N₂O₆)

entsteht im heissen Abgastrakt von Dieselmotoren durch die Reaktion von Pyren mit NO₂. Insbesondere 1,3-, 1,6- und 1,8-Dinitropyren sind stark mutagen und lösen bei unterschiedlichen Versuchstieren bösartige Tumore an vielen Orten im Körper aus.

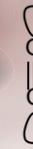
→ Euro 6 gibt keine Grenzwerte vor.

Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂)

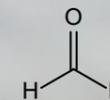
ist eine der am längsten bekannten krebserregenden Substanzen. Kommt im Zigarettenrauch vor und führt zu Lungenkrebs. Benzo(a)pyren wird im Körper chemisch umgewandelt. Das Abbauprodukt reagiert mit der DNA, was Zellteilungen verhindern oder Mutationen begünstigen kann.

→ Euro 6 gibt keine Grenzwerte vor.

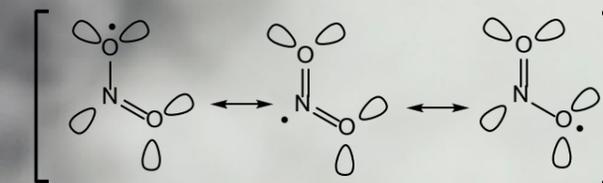
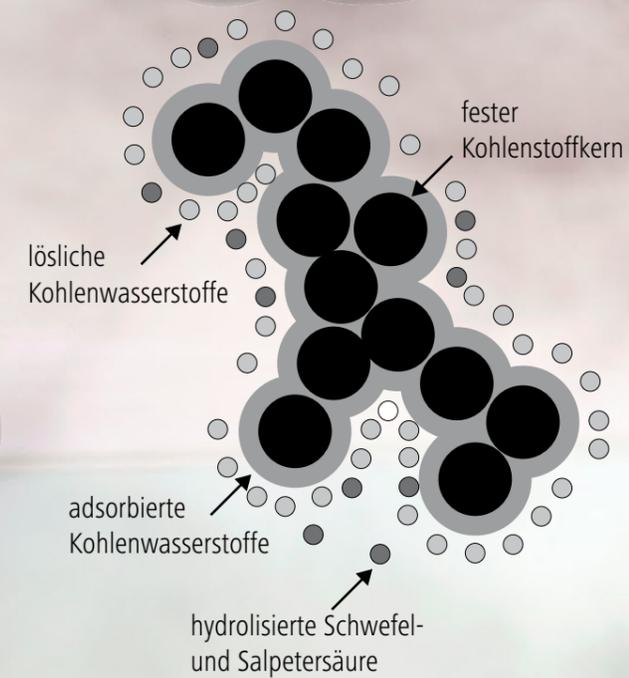
Kohlenmonoxid



Formaldehyd

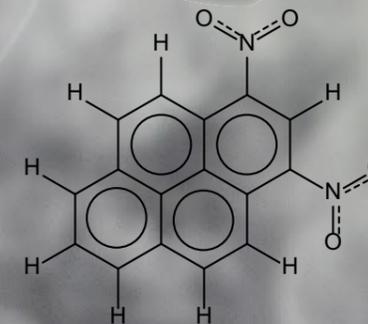


Russpartikel

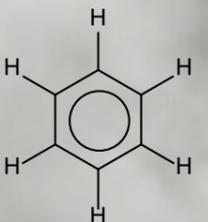


Stickoxid

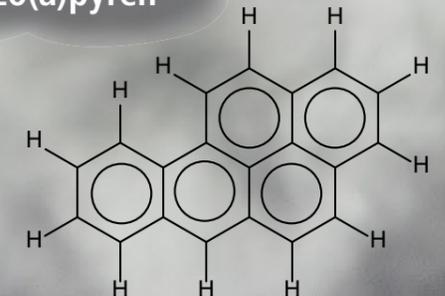
Dinitropyrene



Benzol



Benzo(a)pyren



TEXT: Rainer Klose / BILDER: Empa

Weltweit laufen pro Sekunde drei neue Autos vom Band – insgesamt 73 Millionen Personenwagen und 18 Millionen Nutzfahrzeuge pro Jahr. Die meisten sind Benziner. In den Industriestaaten geht der Trend zu so genannten Downsizing-Motoren: Motoren mit weniger Hubraum, dafür mit Benzin-Direkteinspritzung und Turboaufladung. Diese Technik schone die Umwelt und spare Sprit, sagen die Hersteller. Im Jahr 2020, so schätzen Fachleute, werden europaweit 50 Millionen solcher Benzin-Direkteinspritzer unterwegs sein. Da wurde es höchste Zeit, den Abgascocktail solcher Motoren genau zu untersuchen.

Im Frühjahr 2014 startete das Forschungsprojekt GasOMeP (Gasoline Vehicle Emission Control for Organic, Metallic and Particulate Non-Legislative Pollutants). Mit dabei: Das Paul-Scherrer-Institut (PSI), die Berner Fachhochschule, die Fachhochschule Nordwestschweiz, mehrere Industriepartner und die Empa. Finanziert wurde das Projekt durch das Kompetenzzentrum für Energie und Mobilität des ETH-Bereichs (CCEM). Die Koordination des Projekts übernahm der Empa-Chemiker Norbert Heeb, der sich in den letzten 25 Jahren mit der Analyse von Dieselemissionen und der Untersuchung von Filtersystemen einen Namen gemacht hat.

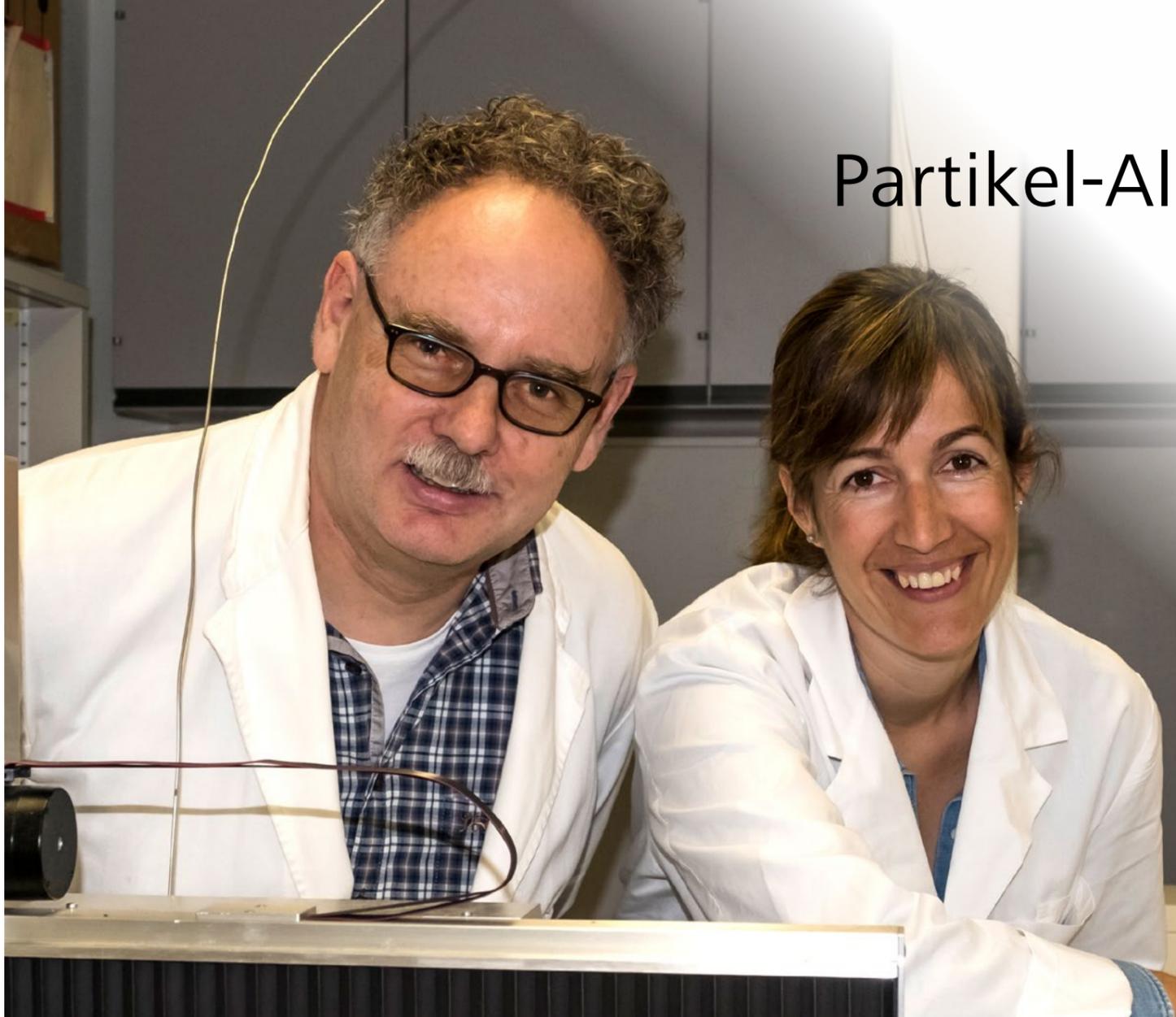
Die Forschungsgruppe wählte sieben Benzin-Direkteinspritzer aus, darunter einen Mitsubishi Carisma (Baujahr 2001, Abgasnorm Euro 3). Die anderen Fahrzeuge stammten aus den Jahren 2010 (VW Golf, Euro 4) bis 2016 (Citroën C4, Euro 6b). Zum Vergleich wurde ein aktueller Peugeot 4008 mit Dieselmotor und Partikelfilter mitgemessen (Baujahr 2013, Euro 5b). Alle Fahrzeuge wurden nach dem Zyklus WLTP (Worldwide Light-Duty Vehicles Test Procedure) gemessen, der ab September 2017 für neu zugelassene Modelle Pflicht wird (siehe S.10).

Russpartikel als Trojaner

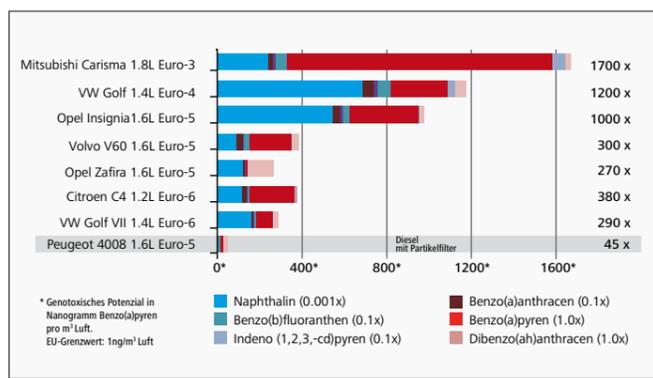
Die Resultate waren ernüchternd: Jeder der getesteten Benziner stiess 10- bis 100-mal mehr feine Russpartikel aus als der zum Vergleich gemessene Diesel-Peugeot mit Partikelfilter. Die Partikel aus den Benzinmotoren sind im Mikroskop ähnlich klein wie Russpartikel, die den Diesel einst in Verruf brachten: Es sind Primärpartikel mit 10 bis 20 Nanometer Grösse, die sich zu 80 bis 100 nm grossen Partikelagglomeraten zusammenlagern, bevor sie den Auspuff verlassen. «Einmal eingeatmet, bleiben solch kleine Partikel für immer im Körper», erläutert Empa-Forscher Heeb. Sie können erwiesenermassen die Membran menschlicher Lungenbläschen passieren und so in den Blutkreislauf gelangen.

Benzo(a)pyren – ein bekannter Rauchertod

Die Partikel sind allerdings nicht das einzige Problem, wie Norbert Heeb weiss: «Auf der Oberfläche der Partikel lagern sich flüssige oder feste chemische Gifte aus dem Verbrennungsprozess ab, unter anderem polyzyklische Aromaten. Diese Substanzen können mit den Partikeln in den Blutkreislauf geschleust werden wie in einem Trojanischen Pferd.» Maria Munoz, Heeb's Kollegin in der Empa-Abteilung «Advanced Analytical Technologies», schaute sich die Abgase der einzelnen Probanden aus dem Projekt GasOMeP genauer an. Sie fand das Verbrennungsprodukt Benzo(a)pyren, eine bekanntermassen Krebs erregende Substanz, die auch im Zigarettenrauch vorkommt. Die Weltgesundheitsorganisation WHO hält bei Benzo(a)pyren jede Dosis, auch die kleinste, für wirksam. Die EU hat sich



Erfolgreiche chemische Spurensuche: Die Empa-Forscher Norbert Heeb und Maria Munoz entdeckten im Abgas von Benzin-Direkteinspritzern grosse Mengen von Benzo(a)pyren (rote Balken in der Tabelle) – ein Verbrennungsprodukt, das für den frühen Tod von Zigarettenrauchern verantwortlich ist. Krebs erregend ist auch das Dibenzo(ah)anthracen (rosa).



Das Krebspotenzial in einem Kubikmeter Abgas aus Benzin-Direkteinspritzern liegt bis zu 1700-fach über dem EU-Grenzwert für saubere Luft. Der Diesel mit Partikelfilter überschreitet den Grenzwert dagegen nur um 45-fache.

Partikel-Alarm für Benziner

Krebs erregende Russpartikel waren bislang bei Dieseln gefürchtet. Fahren Benzin-Autos also umweltfreundlich? Nein, sagt eine neue Untersuchung unter der Leitung von Empa-Forschern: Benzin-Direkteinspritzer stossen gleich viele Russpartikel aus wie ungefilterte Diesel vor 15 Jahren.

Hohe Motorleistung, viel Russ

Das Problem mit erhöhten Partikelemissionen ist nicht allein auf Benzin-Direkteinspritzer beschränkt. Ein Empa-Team um Motorenforscher Potis Dimopoulos Eggenschwiler untersuchte in den vergangenen Monaten sechs aktuelle Euro-6b-Dieselfahrzeuge und sechs aktuelle Euro-6b-Benziner, darunter etwa einen VW Golf R mit Direkteinspritzung und einen Fiat 500 twin air mit Saugrohreinspritzung. Zwar hielten alle Benzinfahrzeuge die aktuellen Partikelgrenzwerte ein, dennoch lagen die Emissionen der Direkteinspritzer um den Faktor 10 höher als bei Dieselfahrzeugen mit Filter. Überraschend: Turbo-Benziner mit besonders hoher Leistung pro Hubraum emittierten besonders viele Partikel – unabhängig von der Einspritztechnik. Nur schwächere Motoren mit wenig Leistung pro Liter Hubraum waren wirklich sauber (siehe Liste). Dieses Problem bleibt bis auf Weiteres ungelöst: Während ab Herbst 2017 die verschärften Euro-6c-Grenzwerte für Direkteinspritzer gelten (und Partikelfilter oft notwendig machen werden), dürfen Benziner mit Saugrohreinspritzung weiterhin beliebig viele Partikel ausstossen. Motorenforscher wie Christian Bach plädieren deshalb für technologieneutrale Grenzwerte für alle Arten von Motoren.

Getestete Benzinfahrzeuge

Mit auffälligen Partikelemissionen: VW Golf R | BMW 428i | Fiat 500 twin air | Alfa Romeo Giulietta 1.4

Ohne auffällige Partikelemissionen: Škoda Octavia 1.8 | Suzuki SX4 Cross

auf einen Luftgrenzwert von einem Nanogramm pro Kubikmeter Luft geeinigt. Die Abgase der gemessenen Autos liegen bis zu 1700-fach darüber. Anders herum gerechnet: Ein Kubikmeter Abgas macht aus bis zu 1700 Kubikmetern sauberer Luft eine nach EU-Standard Krebs erregende Mischung.

Auch hier schnitt das zum Vergleich getestete Euro-5-Dieselfahrzeug mit Partikelfilter besser ab: Der Peugeot emittierte im Test nur 45 Nanogramm krebserregende Substanzen – sechsmal weniger als der Beste der getesteten Benzin-Direkteinspritzer.

Forscher drängen zum Handeln

Ende März wurden auf einer Tagung in der Empa-Akademie die Ergebnisse des Projekts GasOMeP vorgestellt. Das Fazit der beteiligten Forscher: Partikelfilter seien bei Dieselfahrzeugen etabliert und böten eine seit Jahren ausgereifte Technik. Auf Grund der aktuellen Messdaten sollten sie nun auch bei Benzinern zur Pflicht werden. «Im Moment wird nicht die beste verfügbare Technologie eingebaut», bemängelt Norbert Heeb und mahnt zur Eile: «Neu im Markt eingeführte Abgastechnologien brauchen in der Regel 13 Jahre, bis sie ihre Wirkung vollständig entfalten, erst danach sind neun von zehn Autos aus dem Fahrzeugbestand ersetzt. Je früher also Partikelfilter für Benziner zur Pflicht werden, desto besser für unser aller Gesundheit.» //

Aufgewärmt am Start

Beim Kaltstart eines Motors entstehen weit mehr Schadstoffe als während der Fahrt; denn ein kalter Kat ist weit weniger effizient bei der Abgasreinigung. Was tun? Man könnte den Katalysator vorheizen, etwa mit Mikrowellen. Empa-Forscher versuchen, dies in die Praxis umzusetzen.

TEXT: Rainer Klose / BILDER: BAFU, PSI

Neunzig Prozent der Schadstoffe eines modernen Benzinmotors entstehen in der ersten Minute nach dem Kaltstart. Die ersten 500 Meter Fahrt an einem kalten Wintertag belasten die Luft also wie die nächsten 5000 Kilometer, falls man nonstop so weit fahren würde.

Um die Luftqualität weiter zu verbessern, sind also Auto-Katalysatoren erforderlich, die möglichst schnell warm werden – oder, noch besser, bereits bei der ersten Motorumdrehung das Abgas effizient reinigen. Potis Dimopoulos Eggenschwiler ist Spezialist für Abgasnachbehandlung im Motorenlabor der Empa. Seit knapp zwei Jahren forscht er an einer Lösung des Kaltstartproblems, das die Luft vor allem in Städten stark belastet (siehe Kasten). Das Projekt wird vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) gefördert.

Damit der Katalysator von der Stromversorgung des Autos mit möglichst wenig Energie auf 250 Grad Celsius aufgeheizt werden kann, bevor der Motor anspringt, muss er klein sein und möglichst gut wärmeleitend. Dimopoulos Eggenschwiler schlägt eine offenporige Struktur mit einer Spezialbeschichtung vor, die von einem kleinen Mikrowellensender innert 10 Sekunden aufgeheizt werden kann – ähnlich wie beim Mikrowellenherd zu Hause. Schon 2012 hat der Empa-Forscher einen besonders effizienten Katalysator entwickelt – einen Keramik-Abguss eines Polyurethanschaums, der die Abgase besser verwirbelt und weniger Gegendruck erzeugt als ein Katalysator mit herkömmlicher, wabenförmiger Struktur.

Keramik aus dem 3-D-Drucker

Aus dem Schaum-Kat entstand nun die nächste Idee: eine geometrische Gitterstruktur aus dünnen Keramikstreben, die mit einer geringeren Beschichtung auskommt und das darin verwirbelte Abgas trotzdem effizient reinigt. «Zunächst haben wir am Computer nach einer optimalen Struktur gesucht», sagt Dimopoulos Eggenschwiler. «Eine Struktur, die sich schnell aufheizt, die chemische Reaktionen fördert und dabei die Durchströmung so wenig wie möglich behindert. Dann galt es, die Struktur in Keramik nachzubauen.» Spezialisten an der «Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana» (SUPSI) in Lugano fertigten das am Computer entworfene Gitter mittels Stereolithografie, einer Art 3-D-Druck aus Flüssigkeiten und UV-Licht. Fachleute der Empa beschichteten die Keramik danach mit Siliziumkarbid, Zirkoniumoxid und Aluminiumoxid – und der aktiven Katalysatorsubstanzen aus Platin, Rhodium und Palladium.

Erwartungen erfüllt

Der wahrscheinlich weltweit erste Abgaskatalysator aus dem 3-D-Drucker erfüllte im Praxis-Test die Erwartungen: Im künstlich erzeugten Abgasstrom des Modellgasreaktors der Empa reinigte die Polyeder-Geometrie die Schadstoffe tatsächlich noch besser als der Schaum-Kat aus dem Jahr 2012. In einem nächsten Schritt soll nun die Mikrowellenheizung integriert werden. «Wichtig ist, dass wir nicht die ganze Keramikstruktur aufheizen», sagt Dimopoulos Eggenschwiler. «Wir wollen die mit wertvollem Batteriestrom erzeugten Mikrowellen nur auf die

hauchdünne, katalytische Beschichtung wirken lassen.» Ein bis zwei Kilowatt Leistung für 10 bis 20 Sekunden können aus der Batterie eines Fahrzeugs leicht abgezweigt werden, sagt der Abgasspezialist. «Das müsste reichen.» Sobald der Motor läuft, erzeugt die chemische Reaktion der Abgasreinigung selbst genügend Hitze, um den Katalysator warm zu halten. Dann kann die Mikrowelle abgeschaltet werden.

Nachdem erste Laborversuche mit kleinen Modell-Kats erfolgreich verlaufen sind, suchen die Forscher nun nach einem Industriepartner, der einen Kat in Originalgrösse in ein Prototypenfahrzeug einbaut. Die Kaltstartemissionen könnten damit bald Geschichte werden. //



Bild links

Potis Dimopoulos Eggenschwiler (rechts) leitet das vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) initiierte Projekt, das einen neuartigen Abgaskatalysator für Benzinfahrzeuge entwickelt. Alberto Ortona (links) von der Fachhochschule SUPSI fertigte die Keramikstruktur im 3-D-Druck.

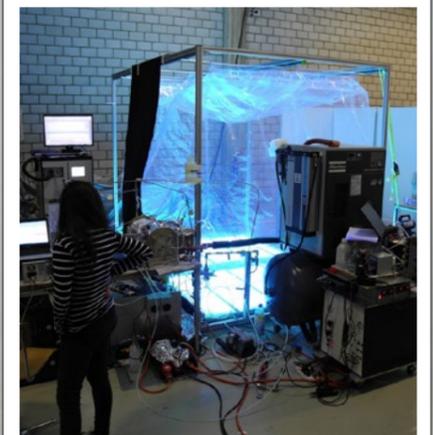
Grosses Bild unten

Die am Computer entworfene geometrische Keramikstruktur des Versuchskatalysators. Spezialisten der Empa beschichteten sie mit der aktiven Schicht und testeten die Reinigungswirkung in einem künstlichen Abgasstrom.

Partikel zum Frühstück

Für die Feinstaubbelastung in Innenstädten sind nicht nur Dieselfahrzeuge ohne Filter verantwortlich. Auch Benzinler tragen dazu bei – und zwar ausgerechnet dann, wenn sie mit kaltem Motor vom Parkplatz oder aus der Tiefgarage starten.

Ein Forscherteam um André Prévôt vom PSI konnte in einer sogenannten Smog-Kammer nachweisen, wie diese Feinstaubpartikel entstehen. Die Forscher sammelten im Rahmen des Projekts GasOMeP (siehe Seite 14) die Abgase der Testfahrzeuge in einer 12 Kubikmeter grossen, aufblasbaren Kammer, deren Wände aus transparenter Teflon-Folie bestehen. Darin werden die Autoabgase mit angefeuchteter Luft und einigen typischen Spurengasen vermischt und mehrere Stunden lang mit UV-Lampen bestrahlt, um einen sonnigen Tag zu simulieren. Aus dem «frischen» Auspuffgas, das zunächst gasförmige Stoffe wie Benzol, Toluol, Stickoxide und Ammoniak enthält, wird nun etwas völlig anderes: Es entstehen Salzpartikel wie Ammoniumnitrat. Auch die unverbrannten Kohlenwasserstoffe oxidieren an der Luft und gehen in flüssigen oder festen Zustand über. So entsteht ein giftiger Nebel, der sich an die neu entstandenen Salzpartikel und an die Russpartikel aus



dem Motor anlagert. An manchen Tagen können bis zu 90 Prozent der Feinstaubbelastung auf diese Weise entstehen. Untersuchungen der Universität Bern ergaben 2015, dass Sekundär-Feinstaub aus einem Euro-5-Benzinmotor das Lungengewebe direkt schädigen und die Abwehrkräfte der Lunge gegen Infektionen herabsetzen kann.



Elektrisch ist meistens besser

Auch Elektroautos lösen nicht alle Fragen. Denn auch im Stromnetz steckt CO₂. Wer auf Elektromobilität umstellt und so fossile Brennstoffe einspart, sollte sicher sein, dass der Strom, den er/sie «tankt», aus erneuerbaren Quellen stammt.



TEXT: Rainer Klose / GRAFIK+BILD: Empa

Wenn Verbrennungsmotoren etliche schädliche Substanzen ausstossen (wie ab Seite 8 zu lesen ist), sollten wir dann nicht einfach auf Elektroautos umsteigen? Sind Autos ohne Auspuff die Lösung? Urs Elber, Leiter des Forschungsschwerpunkts «Energie» an der Empa, meint dazu: «Elektrizität ist nie ganz CO₂-frei, auch in der Schweiz nicht.» Denn auch in erneuerbaren Energien steckt «graue» Energie.

Obwohl durch Wasser-, Wind-, Solar- und Biomassekraftwerke immer mehr erneuerbarer Strom erzeugt werden kann, wird in weiten Teilen Europas Strom auch aus fossilen Quellen erzeugt. Durch den internationalen Stromhandel gelangt der oft hoch CO₂-belastete Strom auch in die Schweiz – je nach Tages- und Jahreszeit einmal mehr, einmal weniger.

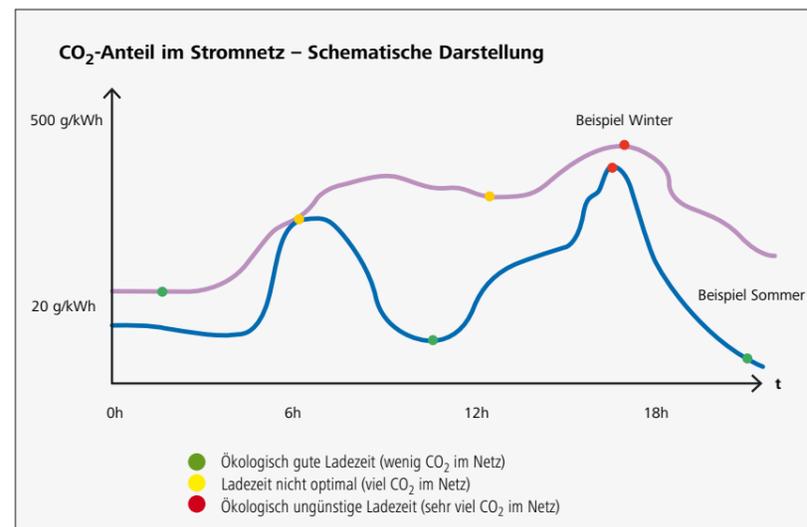
In seinen Vorträgen zeigt Elber eine aktuelle europäische Stromkarte (www.electricitymap.org). Demnach enthielt am Dienstag, den 4. April, vormittags um 11 Uhr Schweizer Strom zum Beispiel 111 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde (kWh). Im Nachbarland Deutschland waren es zur gleichen Zeit 506 Gramm. Eine vereinfachte Rechnung zeigt: Wer ein Tesla Model S fährt und nach Herstellerangaben 22 kWh Strom auf 100 km verbraucht, stösst also mit Strom aus dem deutschen Netz 111 g CO₂/km aus; mit Schweizer Strom sind es noch knapp 25 g CO₂/km.

Gute Zeiten, schlechte Zeiten

Je mehr Strom gleichzeitig verbraucht wird, desto grösser wird der CO₂-Anteil im Strom, weil dann zusätzliche fossile Kraftwerke die Lücken füllen. Dies ist oft abends der Fall, wenn die Leute zuhause ankommen, kochen, heizen und das Elektroauto ans Netz hängen. Vor allem im Winter ist dann der aus dem Netz geladene Strom nicht zwingend ökologischer als ein effizientes fossil betriebenes Auto. «Das Elektroauto zu laden, wenn die Netzlast klein und der

CO₂-Anteil im Strom gering ist oder der Strom dezentral direkt erneuerbar produziert wird, macht sowohl ökologisch als auch ökonomisch Sinn», meint Elber, «weil dann das Stromnetz für die Elektromobilität nicht ausgebaut werden muss.»

Um im Sommer die Solarenergie voll nutzen zu können, sind in Zukunft bedeutend mehr saisonale Speicher nötig. Solar- und Windstrom lässt sich auch in Form von Wasserstoff oder Erdgas speichern (in «Power-to-Gas»-Anlagen wie etwa an der Empa). Mit derart gespeicherter Energie können dann auch Brennstoffzellenfahrzeuge oder Erdgasautos CO₂-arm fahren. //



Elektroautos aufladen ist nicht zu jeder Zeit gleich umweltfreundlich. Gerade in den Abendstunden, wenn Pendler nach Hause kommen, wird mehr Elektrizität mit hohem CO₂-Ausstoss erzeugt. Im Sommer könnte zur Mittagszeit Solarstrom in die Pendler-Autos fliessen. Dazu bräuchte es jedoch mehr Ladesäulen an den Arbeitsstellen.

«Wir müssen erzählen, was auf uns zukommt»

Im Mai 2016 hat Patrick Wäger die Leitung der Empa-Abteilung «Technologie & Gesellschaft» übernommen. Die Schliessung von Stoffkreisläufen, die Ökobilanzierung und die Technologiefolgenabschätzung sind nur einige der Themen, die neu in sein Hoheitsgebiet fallen.

TEXT: Patrick Wäger / BILD: Empa

Den grössten Teil seiner Kindheit und Jugend verbrachte Patrick Wäger als Auslandschweizer in Mailand, Paris, Strassburg und Königstein im Taunus (Deutschland). Die vielen, manchmal kurzfristigen Wohnortwechsel waren mit Abschieden und Neuanfängen verbunden. Wäger lernte früh, sich in wechselnden Umgebungen zurechtzufinden, seine eigene Sichtweise zu entwickeln und nicht alles als gegeben hinzunehmen. Und Sprachen lerne man ja auch am besten als Kind und dort, wo sie gesprochen werden. Das Nomadische seiner Kindheit zeigt sich bei ihm heute noch. Er geniesst es, sich immer wieder im Dazwischen aufzuhalten, um schliesslich ganz woanders aufzutauchen. Mal liest er ein Buch, mal ist er wirklich auf Reisen.

Nach Abschluss des Gymnasiums kehrte er in die Schweiz zurück, studierte Chemie an der ETH Zürich und promovierte am Institut für Toxikologie der ETH und Universität Zürich zum Thema Wohngifte. Ein Job als Umweltberater bei der Ingenieurunternehmung Elektrowatt im Zürcher Seefeld folgte. An die Empa kam er 1993 für ein Forschungsprojekt zur Entsorgung von Filterstäuben aus der Kehrlichtverbrennung.

«Wir Forscher können der Gesellschaft nicht sagen, was sie zu tun hat, dazu braucht es den politischen Prozess.»

Einige Jahre später zog es ihn zurück an die Universität: für ein Studium der Philosophie und Soziologie. Für Wissenschaftler, die sich mit Nachhaltigkeit beschäftigen, sei wichtig, dass sie eine gewisse Sensibilität für Fragestellungen und Konzepte aus den jeweils anderen Wissenschaftsbereichen entwickeln, sagt Wäger. Technik sei schliesslich nicht ohne den Menschen, der sie entwickle und für bestimmte Zwecke nutze, zu denken, und umgekehrt.

Das Ziel «seiner» Abteilung formuliert Wäger so: Wissen für die Transition zu einer nachhaltigeren Gesellschaft schaffen und weitergeben. Der Fokus liege dabei auf der Analyse von Stoff- und Energieflüssen, die mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung neuer Materialien und technologischer Anwendungen einhergehen, sowie deren Beurteilung bezüglich natürlicher (ökologischer) und gesellschaftlicher (ethischer) Rahmenbedingungen.

Seltene Metalle – Plastik im Überfluss

Eine der Stoffkategorien, mit der sich die Abteilung beschäftigt, sind seltene Metalle, die für zahlreiche technologische Anwendungen essentiell sind – etwa bei Informations- und Kommunikationstechnologien oder der Energiewandlung und -speicherung. Viele seltene Metalle, etwa Indium, Platinmetalle oder Seltenerdmetalle wie Neodym und Dysprosium, gelten als «versorgungskritisch». Im Hinblick auf ihre Rückgewinnung aus der «urbanen Mine» untersucht die Abteilung deshalb beispielsweise, wie diese Stoffe in der vom Menschen geschaffenen Welt, der Anthroposphäre, verteilt sind.

Eine andere wichtige Materialkategorie im Fokus der Abteilung ist Mikroplastik, also Kunststoff-Teilchen mit einem Durchmesser unter fünf Millimetern, die eine potentielle Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Deren Verhalten in der Umwelt wird in der Forschungsgruppe von Bernd Nowack, einem der wenigen «Distinguished Senior Researcher» der Empa, untersucht.

«Mein Fokus liegt darauf, Wissen zu schaffen, das für die Gestaltung der Gesellschaft von Nutzen sein kann», so formuliert Patrick Wäger das Ziel seiner Arbeit. Vor allem in seinem Fachgebiet – der Nachhaltigkeit – ist eine solche «Transition» von grosser Bedeutung. Das Wissen aus seiner Forschung soll dabei helfen, die Gesellschaft zu gestalten und zu verändern. Doch dazu genügen Daten alleine nicht, es müssen auch die Verhaltensmuster der Gesellschaft miteinbezogen werden. «Wir versuchen das Verhalten der Menschen an die Daten der klassischen Ökobilanz anzuknüpfen», erklärt Wäger. «Wir können der Gesellschaft nicht sagen, was sie zu tun hat, dazu braucht es den politischen Prozess. Aber wir können diesen Prozess unterstützen, indem wir die tatsächlichen oder möglichen Konsequenzen unseres Tuns, das untrennbar mit dem Einsatz neuer Materialien und Technologien verwoben ist, aus wissenschaftlicher Sicht aufzeigen.» Aufgabe von Umweltforschern sei es, mögliche zukünftige Entwicklungen und die damit einhergehenden Auswirkungen auf Natur und Gesellschaft zu zeigen und zu erzählen, so Wäger.

Das in der Abteilung erarbeitete Wissen und die langjährige Erfahrung zum Beispiel im Bereich der Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten fliessen deshalb in bestehende oder neue Normen und Verordnungen ein. Als Beispiele nennt Wäger die laufende Revision der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) und die Norm Cenelec zur Sammlung, Logistik und Behandlung von Altgeräten.

Fundamentalismus ist keine Lösung

Für Wäger ist das Thema auch persönlich ein Anliegen, allerdings so, wie er es auch in seiner Forschung erarbeitet: umsetzbar und in einem zumutbaren Rahmen. So nutzt er wenn immer möglich den öffentlichen Verkehr, geht aber dennoch mit den Kindern auch mal mit dem Flugzeug in die Ferien.

«Ein Fundamentalist zu werden, ist auch nicht die Lösung», erklärt er. «Aber es ist notwendig und ein guter Anfang, den Dingen und der Umwelt Sorge zu tragen. //

Bio-Tarnkappe für künstliche Herzpumpen

Zehn Millionen Menschen in Europa leiden an einer Herzschwäche – viele von ihnen benötigen ein Spenderherz. Künstliche Herzpumpen können die Wartezeit bis zur Transplantation überbrücken. Doch das Immunsystem des Menschen erkennt diese Pumpen und wehrt sich. Die Empa arbeitet im Forscherverbund Zürich Heart an einer Lösung.

TEXT: Martina Peter / BILDER: Empa

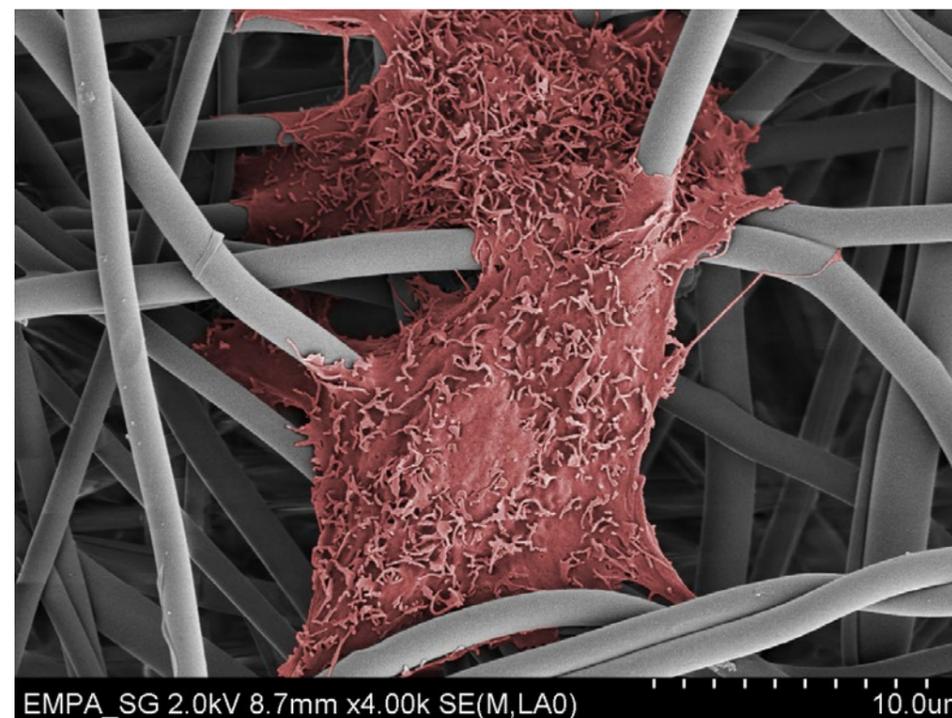
Künstliche Herzpumpen erweisen sich als tückisch: Es können sich Blutgerinnsel bilden, die zu einem Schlaganfall führen, und Immunreaktionen erfolgen, weil der Körper das für ihn fremde Material abstösst. Um diesen und anderen Problemen mit künstlichen Herzen beizukommen, lancierte das Universitätsspital Zürich gemeinsam mit der Universität und der ETH Zürich 2011 unter dem Dach der Hochschulmedizin Zürich das Projekt Zurich Heart. Im Konsortium haben sich mittlerweile mehr als 75 Medizinerinnen, Ingenieure, Biologinnen und Materialwissenschaftler zusammengefunden. Zurich Heart soll gängige Herzpumpen weiterentwickeln und andererseits völlig neue, originelle Lösungen erarbeiten. Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines voll implantierbaren Kunstherzens. Rund 20 Forschungsgruppen in der Schweiz sowie am Deutschen Herzzentrum Berlin bündeln ihre herausragenden Kompetenzen zur Verwirklichung dieses ambitionierten Ziels.

Als Materialforschungsinstitut ist die Empa prädestiniert, innovative Lösungen beizusteuern. «Wir möchten eine künstliche Herzpumpe herstellen, die ähnlich funktioniert wie das menschliche Herz, deren innere Fläche aber mit patienteneigenen Zellen bedeckt ist», erklärt Edoardo Mazza, Leiter der Empa-Abteilung für Mechanische Integrität von Energiesystemen, Professor an der ETH Zürich und Co-Projektleiter von Zurich Heart.

An dieser für Blutgerinnungs- und Immunsystem «unsichtbaren» Herzpumpe arbeiten zwei Teams der Empa mit, eines aus dem Bereich Biotechnologie/Biointerfaces, das andere aus dem Textilbereich.

Textilien und menschliches Gewebe

Doch was haben Textilien mit menschlichen Organen zu tun? Mehr, als man auf den ersten Blick vermuten könnte. Spricht man nicht von menschlichem Gewebe, von Muskelfasern, die reissen können? Sind Venen und Arterien doch eigentlich Hohlfasern,



Eine menschliche Muskelzelle wächst auf einem Vlies aus Mikrometerdünnen Polymerfasern. Auf diese Weise kann die Kunstmembran biologisch getarnt werden und wirkt fürs Immunsystem wie ein normales Blutgefäss.

durch die unser Blut fließt? «Textilentwicklung hat heutzutage nichts mehr mit Baumwoll-T-Shirts und dergleichen zu tun», sagt denn auch René Rossi, Leiter der Empa-Abteilung «Biomimetic Membranes and Textiles». Ein Textil ist für ihn, wenn aus einem eindimensionalen Material – einer Faser – ein zweidimensionales Gebilde entsteht. Das kann ein Gewirke, Gewebe, Gestricke sein. «Den Materialien und Eigenschaften sind theoretisch keine Grenzen gesetzt», so Rossi. «Die Fasern können etwa aus Metall, Holz und Kunststoff sein. Daraus entstehen dann Textilien beziehungsweise Gebilde, die formbar, dehnbar, leicht und so weiter sind.»

Elektrospinnen und lebende Zellen

Hier kommt die Elektrospinn-Anlage der Empa zum Zug. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, mit dem sich Polymere, also rein organische und Hybridfasern mit Durchmessern von weniger als einem Mikrometer herstellen lassen. Damit werden neuartige Membranen für den Einsatz in der Medizintechnik, in der Katalyse und in der Filtertechnik möglich. Zwischen einer Kanüle, aus der eine Polymerlösung gedrückt wird, und einer Gegenelektrode ist eine elektrische Spannung angelegt – und sie zieht Fäden. Dank des elektrischen Felds verwirbeln sich die Fäden, bis sie eine gewebeartige

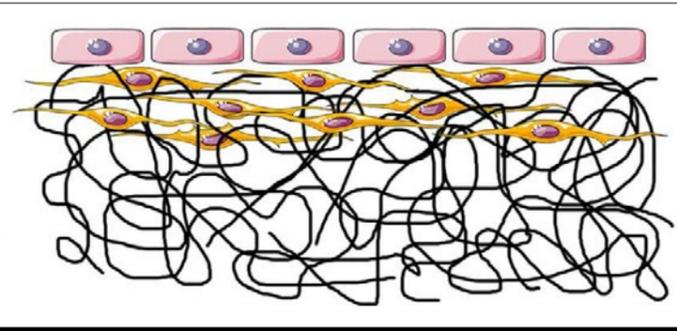
ebenfalls den Effekt, dass die Endothelzellen auf der Oberfläche stabilisiert werden und bereitwillig ihre natürlichen Aufgaben übernehmen», sagt Maniura. Um die durch das Elektrospinnen hergestellten Fasern für die Zellen besonders attraktiv zu machen, sollen die Polymerfasern mit Zellhaftungspeptiden funktionalisiert werden. Sowohl den Endothel- als auch den Muskelfaserzellen soll die ihnen typische natürliche Umgebung «präsentiert» werden – damit das Gesamtkonstrukt möglichst lange lebt.

Materialsystem im Bioreaktor

Ob das Ganze in der Praxis funktioniert, wird in einem Bioreaktor untersucht. Darin wird das Materialsystem, also die von allen Zurich-Heart-Teams entwickelte synthetische Elastomer-Pumpenwand zusammen mit dem Zell-Textilmaterial der Empa «realen» Bedingungen ausgesetzt. Der Reaktor bildet die Situation im menschlichen Körper nach, lässt anstelle von Blut eine Zellkulturflüssigkeit vorbei pulsieren simuliert also Pulsschläge, die die Bewegungen des Herzmuskels imitieren. Dies soll den Forschern zeigen, ob die «getarnten» Materialien der hohen Belastung im menschlichen Körper standhalten.

«Wir werden eine Studie mit den ersten Prototypen der biomimetischen Herzpumpen noch in diesem Jahr durchführen. Für eine klinische Anwendung braucht es aber noch viele Jahre», glaubt Mazza. Die Pumpe muss jeweils individuell mit körpereigenen Zellen des Patienten «bewachsen» werden. Dazu werden den Patienten dereinst im Spital Zellen aus dem Blut, aus Gefäßen oder dem Fettgewebe entnommen werden. Diese lässt man während zwei bis drei Wochen im Labor wachsen und bringt dann die Herzpumpe mit der Endothelschicht als Implantat ein. «Für Notoperationen wäre dieses Prinzip zu langsam», erläutert Mazza. Aber bei Patientinnen und Patienten mit einer Herzmuskelschwäche könnte der Herzmuskel durch die biomimetische Pumpe derart entlastet werden, dass sich das Herz sogar von alleine regenerieren kann. Hilfe zur Selbsthilfe sozusagen. //

www.zurichheart.ethz.ch/hybridmembrane/



Um die Pumpenmembran perfekt zu tarnen, braucht es zwei Schichten von Zellen: Im Vlies selbst nisten sich Muskelfasern ein. Sie bilden die Tragstruktur für die Endothelzellen auf der Oberfläche. Diese simulieren die Innenwand von Blutgefäßen.

Eines der Hauptprobleme der gängigen Herzpumpen ist, dass Blut beim Kontakt mit ihnen zu koagulieren beginnen kann. Es bilden sich manchmal Blutgerinnsel, die durch den Körper wandern und Schlaganfälle oder Embolien verursachen können. Wenn nun die Wand der künstlichen Herzpumpe eine Art Beschichtung erhält, die vom Blut als «natürliche» Umgebung wahrgenommen würde, könnte man – so zumindest die Hypothese – Blutgerinnseln vorbeugen.

Natürliche Blutgefäße sind auf der Innenseite mit einer Schicht Endothelzellen ausgekleidet. Sie regulieren den Austausch zwischen Blut und Körpergewebe. Deshalb arbeiten die Empa-Wissenschaftler nun an einem hauchdünnen Vlies aus aneinanderhaftenden Polymerfasern, die weniger als ein Mikrometer dünn sind. Auf diesem «Stoff» werden lebende Endothelzellen angesiedelt, die eine Schicht bilden, wie es sie in allen Lymph- und Blutgefäßen gibt. Eine solche Gewebeoberfläche könnte dem Blut vorgaukeln, dass es sich bei der Pumpe um ein körpereigenes Organ handelt. Damit sich die Endothelzellen in dem künstlichen Gewebe sozusagen rundum wohl fühlen, müssen sie sich an dem Vlies gut festhalten können; ein einfaches Vlies aus Polymerfasern ist dafür kaum geeignet.

Membran bilden. Hält man sie in der Hand, fühlt sie sich an wie ein hauchdünner, elastischer Lappen. «Die Membran für die Herzpumpe muss stabil und beständig sein und in alle Richtungen gedehnt werden können», sagt Giuseppino Fortunato von der Abteilung «Biomimetic Membranes and Textiles». «Sie muss richtig was aushalten.» Schliesslich schlägt das Herz etwa 100 000 Mal am Tag.

Im Inkubator können auch Mischgewebe aus Fasern und Zellen entstehen. Um die Zellen kümmert sich dabei das Biointerface-Team von Katharina Maniura. Sie verwenden dazu glatte Muskelzellen, welche auf der hybriden Membran eine Zellstruktur bilden, wie sie auch in natürlichen Blutgefäßen zu finden ist. Auf diesem «Unterbau» sollen dann Endothelzellen angesiedelt werden. Ganz besonders wohl fühlen sich die Zellen, wenn sie einen Unterbau vorfinden, der sie an körpereigene Strukturen erinnert, genauer gesagt an Kollagenfasern etwa aus dem Bindegewebe. «Wir müssen Muskelzellen dazu bringen, Kollagen zu produzieren, dort haften die Endothelzellen dann dauerhaft», erklärt Maniura. Sie führt weiter aus: «Wenn das Gewebe aus zwei Typen von Zellen besteht, senden sie Signale aus und tauschen sich so untereinander aus. Das hat

7th International EATA Conference

The 7th Conference EATA 2017

(European Asphalt Technology Association) is organized in Switzerland for the first time. It focuses on actual hot topics in the field of bituminous road materials and construction. Most recent progress in characterizing, modelling, application and development of bituminous materials and structures are presented and discussed by widely recognized international experts in their field from all over the world.

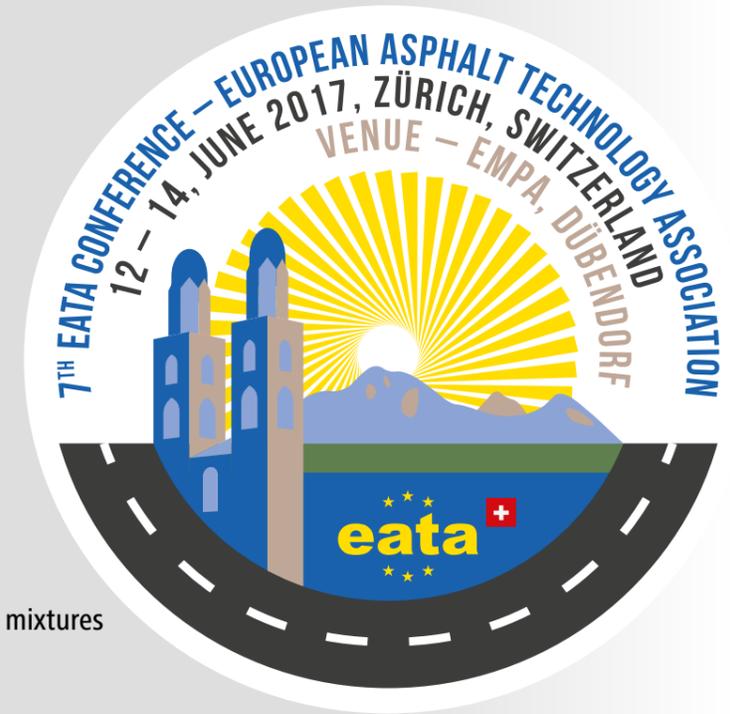
Conference Topics

- Durability and aging of binders and asphalt mixtures
- New mixtures and mixture components
- Modelling and testing
- Asphalt mixture design, modelling and testing
- Environmental aspects
- Asphalt recycling
- Advances in construction and asphalt production technologies
- Structural design
- Innovative asphalt pavements
- Damage, aging and performance of pavements
- Pavement rehabilitation

For further information and registration, please check our website <http://eata2017.empa.ch/>

See you in Dübendorf in June!

Prof. Dr. Manfred N. Partl, Chair; Prof. Dr. Hervé di Benedetto, Co-Chair



SPONSORED BY:

AMMANN



VSS



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Bundesamt für Strassen ASTRA
Office fédéral des routes OFROU
Ufficio federale delle strade USTRA
Uffizi federal da vias UVIAS
Federal Roads Office FEDRO

Cargill

ADFOR
SAINT-GOBAIN

KRATON



Kanton Zürich
Regierungsrat

FPREISIGAG

BAUINGENIEURE UND PLANER SIA USIC

EIFFAGE

SUPPORTED BY:



3. FACHKONGRESS

Energie + Bauen



Olma Messen, St. Gallen
Freitag, 12. Mai 2017, 9–18 Uhr

Online-Anmeldung unter www.empa-akademie.ch/eub



**Energie-Tage
St. Gallen**
11.–12. Mai 2017

Die Energie-Tage sind eine Wissens- und Community-Plattform rund um die Energiewende. Auf dem Gelände der Olma Messen St. Gallen treffen sich Fachleute aus dem In- und Ausland.

www.energie-tage.ch

**5. Energiekonzept-Kongress
«Mit Innovationen in die Zukunft»**

Donnerstag, 11. Mai 2017
www.energiekonzeptkongress.ch



**#REMforum 2017 – 8. St. Galler Forum für
Management Erneuerbarer Energien**

Donnerstag/Freitag, 11./12. Mai 2017
www.REMforum.ch

Good Energies Chair for
Management of Renewable Energies



University of St. Gallen

3. Fachkongress Energie + Bauen

Freitag, 12. Mai 2017
www.empa-akademie.ch/eub




Veranstaltungen

9. Mai 2017

Kurs: Die Welt der Stähle

Zielpublikum: Industrie und Wirtschaft
www.empa-akademie.ch/staehle
Empa, Dübendorf

10. Mai 2017

Laser – das perfekte Werkzeug?

Zielpublikum: Industrie und Wirtschaft
www.empa-akademie.ch/tblaser
Empa, Thun

18. Mai 2017

Kurs: Die Wärmebehandlung

Zielpublikum: Industrie und Wirtschaft
www.empa-akademie.ch/waerme
Empa, Dübendorf

1. Juni 2017

**Kurs: Elektrochemische Charakterisierung
und Korrosion**

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

1. Juni 2017

**Workshop: Massgeschneiderte Oberflächen an
der Grenze zwischen Nass und Trocken**

Zielpublikum: Industrie und Wirtschaft
www.empa-akademie.ch/plasma
Empa, St. Gallen

Details und weitere Veranstaltungen unter
www.empa-akademie.ch

Ihr Zugang zur Empa:




portal@empa.ch
Telefon +41 58 765 44 44
www.empa.ch/portal