

SCHWERPUNKTTHEMA

MOBILITÄT VON MORGEN

Das Magazin des Paul Scherrer Instituts

01 / 2020

2020



SCHWERPUNKTTHEMA: MOBILITÄT VON MORGEN



1

HINTERGRUND

Mit Röntgenlicht zu besseren Antrieben

Dank der Grossforschungsanlagen des PSI lassen sich die Vorgänge in Motoren genau anschauen. Das hilft, die Antriebe der Zukunft zu optimieren.

Seite 10



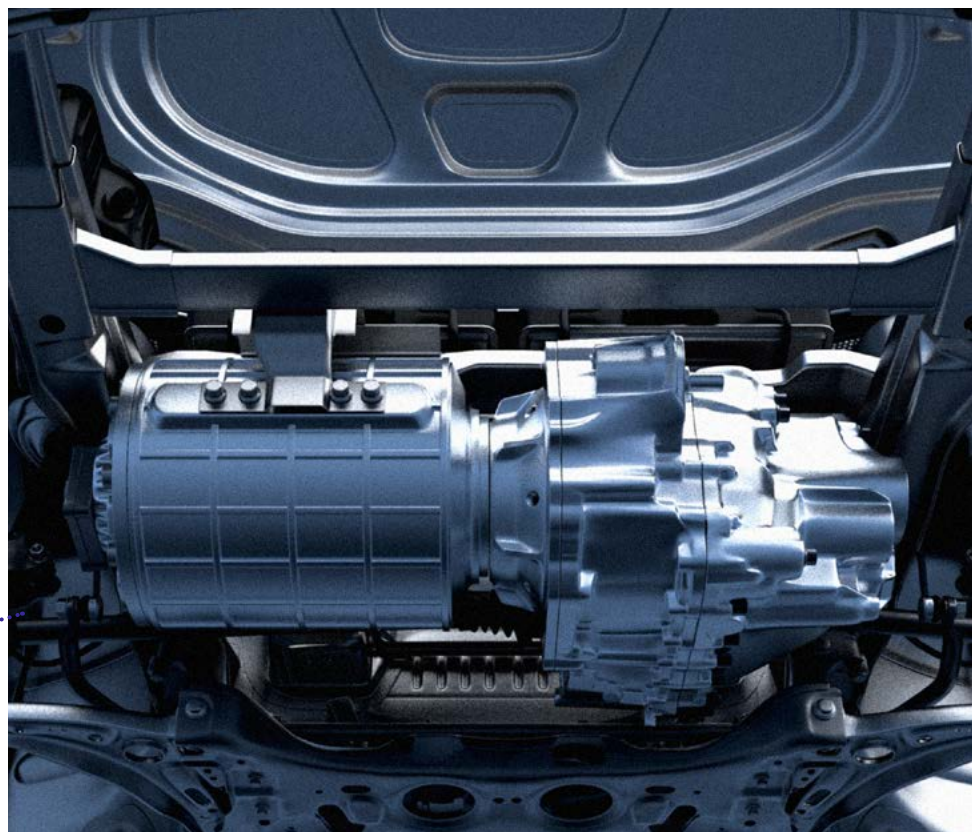
STUDIE

Vorfahrt für E-Autos

In einer aufwendigen Ökobilanzstudie haben PSI-Forschende ermittelt, welcher Antrieb von Personenwagen am klimafreundlichsten ist – heute und in 20 Jahren.

Seite 18

3





2

INFOGRAFIK

Der «ökologische Reifenabdruck» von Personenwagen

Benziner, Diesel, Brennstoffzelle oder Elektro – welches Auto hat Zukunft? Eine Infografik zeigt das Ergebnis der PSI-Ökobilanzstudie.

Seite 16

INHALT

NACHGEFRAGT

Was machen Sie da, Herr Strässle? 4

DAS PRODUKT

Arzneien 6

DAS HELFERLEIN

Klebefilm 7

SCHWERPUNKTTHEMA:

MOBILITÄT VON MORGEN 8

 HINTERGRUND

Mit Röntgenlicht zu besseren Antrieben 10

 INFOGRAFIK

Der «ökologische Reifenabdruck» von Personenwagen 16

 STUDIE

Vorfahrt für E-Autos 18

IM BILD

Masako Yamada 21

IN DER SCHWEIZ

Radioaktive Stoffe im Güterverkehr aufspüren 22

Regelmässig kontrolliert das PSI an Grenzübergängen und anderen Standorten, ob LKWs strahlende Ladung an Bord haben.

IN KÜRZE

Aktuelles aus der PSI-Forschung 26

1 Im Eis des Nordpols

2 Metastasierung von Tumoren verhindern

3 Intelligente Mikroroboter

 GALERIE

Mobil am PSI 28

ZUR PERSON

Der Blick aufs Ganze 34

Am PSI entwickelte Alexander Röder unter anderem Modelle für Ökobilanzen. Heute führt er das Institut Bauen und Umwelt (IBU) in Berlin.

WIR ÜBER UNS 38

IMPRESSUM 40

AUSBLICK 41

The background of the page is a blurred photograph of a modern building with a grid-like facade. On the right side, a red sign with the letters 'OHSB' and a bicycle icon is visible. In the bottom right corner, the front wheel and handlebars of a bicycle are partially visible.

1

Herr Strässle, geht das PSI mit gutem Beispiel voran, wenn es um umweltfreundliche Mobilität geht?

Ja. Das PSI hat sich ein Mobilitätskonzept gegeben. Dazu gehören beispielsweise eine gute Busanbindung und die Übernahme der Kosten für ein Halbtax-Abonnement der SBB für alle Mitarbeitenden. Ebenso stellen wir wegen der grossen Nachfrage immer mehr Veloständer auf. Wer dennoch mit dem Auto kommt, findet genug Ladestationen für Elektroautos vor. Wir haben vorgesorgt und zeigen so, dass der Anschaffung eines E-Personenwagens zumindest in dieser Hinsicht nichts im Wege steht. Und wir schaffen Anreize: Parkgebühren fallen nur für Autos mit Verbrennungsmotor an; wer mit Rad oder Bus fährt, bekommt einen Ökobonus ausbezahlt. Zudem wird die PSI-eigene Fahrzeugflotte derzeit auf E-Mobilität umgestellt.

2

Haben alle diese Massnahmen mit der Forschung in Sachen Mobilität zu tun, die am PSI betrieben wird?

Es hat vor allem damit zu tun, dass wir uns als Bundesinstitut in der gesellschaftlichen Verantwortung und in einer Vorbildfunktion sehen. Viele PSI-Forschende, die zum Beispiel im Bereich Energie und Umwelt tätig sind, haben ebenso den Ehrgeiz, ihren Alltag umweltbewusst zu gestalten. Während ihrer Arbeitszeit tüfteln viele von ihnen an Details, die dazu beitragen, die Zukunft der Energielandschaft und nicht zuletzt die Mobilität nachhaltiger zu machen.

3

Wird die PSI-Forschung die Mobilität in der Schweiz revolutionieren?

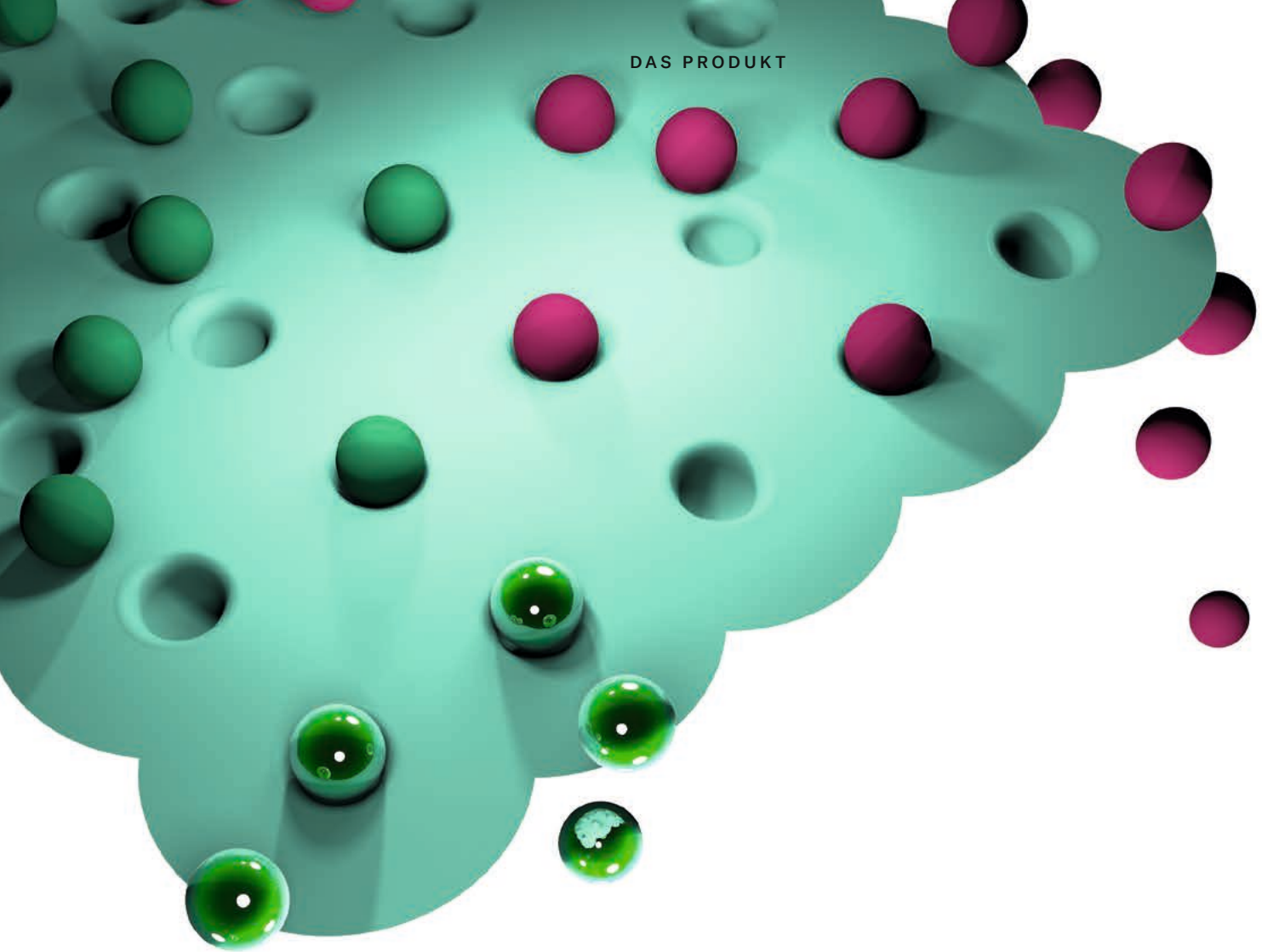
Revolutionieren vielleicht nicht, aber wir tragen dazu bei, dass wir auch in Zukunft mobil bleiben – und das umweltverträglich. Unser Fokus liegt meist auf der Erforschung von Grundlagen, beispielsweise im Bereich neue Materialien für eine nachhaltigere Mobilität. Dabei helfen uns unter anderem unsere schweizweit einmaligen Grossforschungsanlagen, mit denen wir diese Materialien erforschen. Hinzu kommen unsere vielen Kooperationen mit Hochschulen und anderen Forschungsinstituten der Schweiz, darunter die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa, die an konkreten Prototypen, zum Beispiel Elektrofahrzeugen im Einsatz, forscht. Das ist eine vorbildliche Zusammenarbeit unter dem Dach des ETH-Bereichs und es zeigt sich: Zusammen bewegen wir heute schon einiges.

Was machen Sie da, Herr Strässle?

NACHGEFRAGT

Eine umweltfreundliche Mobilität ist essenziell für eine erfolgreiche Klimapolitik. In der Schweiz verursacht der Verkehr rund ein Drittel der Treibhausgasemissionen. Forschende am PSI helfen mit, dass die Personenwagen der Zukunft sauberer werden. Thierry Strässle, Direktor ad interim, erzählt, was die Forschenden motiviert.





So manches, was am PSI untersucht wird, könnte eines Tages dazu beitragen, Alltagsprodukte zu verbessern. Zum Beispiel

Arzneien

Die medizinischen Wirkstoffe in Arzneien sind meistens grosse Moleküle. Diese kommen sehr häufig in zwei Varianten vor, die in ihrer Form Spiegelbilder voneinander sind. Problematisch ist, dass unser Körper auf diese beiden Varianten stark unterschiedlich reagieren kann: Während die eine Variante heilt oder lindert, kann die spiegelbildliche Variante gefährlich sein. Daher werden heutzutage Wirkstoffe, die in diesen beiden Formen vorkommen – Fachleute sprechen dann von Enantiomeren –, sorgfältig getrennt. Ein Prozess, der aufwendig und kostspielig ist.

Eine Zukunftsvision ist, dass dieser Vorgang mithilfe einer Art Sieb auf Nanometer-Ebene erfolgen könnte. Forschende am PSI untersuchen Zusammenschlüsse aus bestimmten Molekülen, die in ihrem flachen Netzwerk kleine Löcher lassen. Durch diese chemisch spezifischen Poren hindurch könnte nur die eine Variante des Wirkstoffs weiterverarbeitet werden, während die andere, spiegelbildliche Variante quasi ausgesiebt würde. So liessen sich die gute und die schädliche Variante von pharmazeutischen Wirkstoffen effizienter voneinander trennen.

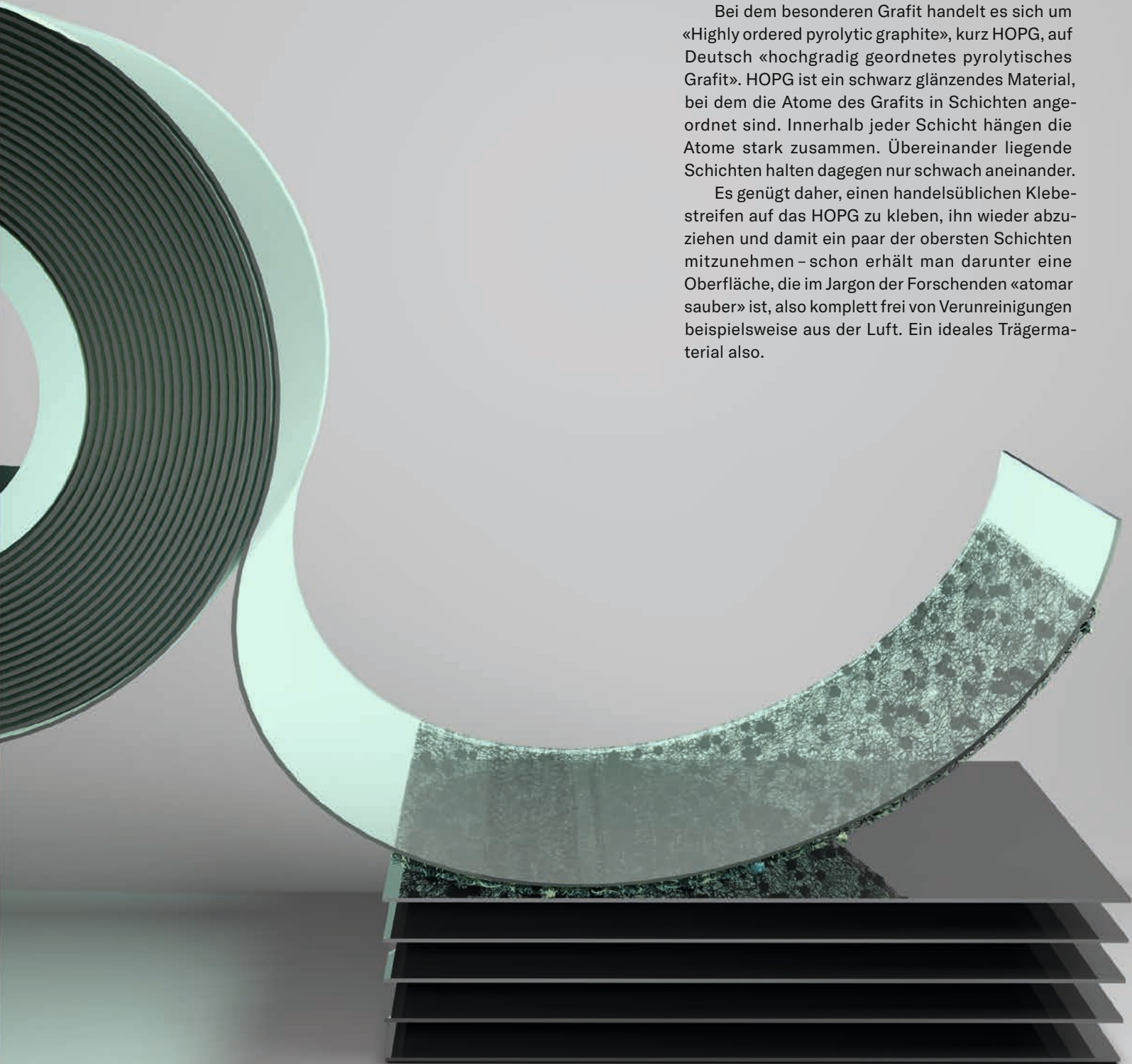
In der Spitzenforschung kommen manchmal überraschend alltägliche Hilfsmittel zum Einsatz. Zum Beispiel ein gewöhnlicher

Klebefilm

Für viele Untersuchungen braucht es zunächst ein extrem sauberes Trägermaterial, auf welches man die Probe aufbringt. Hohe Anforderungen bezüglich einer glatten und sauberen Oberfläche stellen auch Forschende am PSI, die darauf Moleküle untersuchen, die ein Nanosieb für medizinische Wirkstoffe bilden könnten. Sie erhalten diese Fläche dank zweier Zutaten: erstens durch das Mineral Grafit in einer besonderen Form und zweitens durch einen Klebefilm.

Bei dem besonderen Grafit handelt es sich um «Highly ordered pyrolytic graphite», kurz HOPG, auf Deutsch «hochgradig geordnetes pyrolytisches Grafit». HOPG ist ein schwarz glänzendes Material, bei dem die Atome des Grafits in Schichten angeordnet sind. Innerhalb jeder Schicht hängen die Atome stark zusammen. Übereinander liegende Schichten halten dagegen nur schwach aneinander.

Es genügt daher, einen handelsüblichen Klebestreifen auf das HOPG zu kleben, ihn wieder abzuheben und damit ein paar der obersten Schichten mitzunehmen – schon erhält man darunter eine Oberfläche, die im Jargon der Forschenden «atomar sauber» ist, also komplett frei von Verunreinigungen beispielsweise aus der Luft. Ein ideales Trägermaterial also.





1

HINTERGRUND
Mit Röntgenlicht zu
besseren Antrieben

Seite 10

2

INFOGRAFIK
Der «ökologische
Reifenabdruck»
von Personenwagen

Seite 16

Mobilität von morgen

Steigendes Verkehrsaufkommen, Umweltbelastung und Klimawandel haben eine technologische Revolution auf unseren Strassen notwendig gemacht. Diese Zukunft hat schon begonnen. Doch um Elektroantriebe, Brennstoffzellen und Erdgasmotoren wirklich konkurrenzfähig und gleichzeitig klimaneutral werden zu lassen, ist noch eine Menge Forschungsarbeit nötig. Mehrere Gruppen des PSI arbeiten daran.

3 STUDIE
Vorfahrt für E-Autos

Seite 18



Mit Röntgenlicht zu besseren Antrieben

Um den Strassenverkehr der Schweiz zukunftsfähig zu machen, ist vor allem Forschung gefragt. In den Grossforschungsanlagen des PSI untersuchen Chemiker und Ingenieure, wie Antriebe effizienter und abgasärmer werden.

Text: Jan Berndorff



Dieselfahrzeuge stehen wegen ihrer Abgaswerte in der Kritik. PSI-Forschende haben herausgefunden, wie Katalysatoren den Ausstoss gesundheitsschädlicher Gase besser senken können.

«Das Gesamtverkehrssystem der Schweiz 2040 ist in allen Aspekten effizient.» Das strategische Hauptziel des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) klingt gut. Der Verkehr soll die Umwelt weniger belasten, energieeffizienter und klimaschonender werden, präzisiert das untergeordnete Bundesamt für Energie (BFE). Dazu hat sich die Schweiz ein ehrgeiziges Ziel gesetzt: Bis 2050 will sie klimaneutral sein.

Die Herausforderung ist gross. Laut dem letzten Mikrozensus Mobilität aus dem Jahr 2015 legt im Schnitt jede in der Schweiz wohnende Person rund 24850 Kilometer pro Jahr zurück. Eine hohe Zahl, die auch die Auslandsreisen beinhaltet. Im Alltag und innerhalb der Schweiz sind es pro Person knapp 37 Kilometer pro Tag – Tendenz steigend.

Drei Viertel der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor, so das Bundesamt für Umwelt (BAFU), werden von Personenwagen, Lastwagen und Bussen verursacht. Daraus ergibt sich: Ob das Land seine

da sie besonders viele der gesundheitsschädlichen Stickoxide ausstossen. Die PSI-Forschungsgruppen um Davide Ferri und Maarten Nachtegaal haben herausgefunden, wie sich diese Emissionen erheblich mindern lassen. Schon heute fahren viele Dieselfahrzeuge mit dem Hilfsstoff AdBlue, der ins Abgas eingespritzt wird und dort zu Ammoniak zerfällt. Dieses reagiert unter Mithilfe eines Katalysators mit den Stickoxiden zu harmlosem Stickstoff und Wasser. Jedoch funktioniert das nur dann effektiv, wenn die Abgase eine Temperatur oberhalb von 200 Grad Celsius aufweisen. In den ersten Minuten nach Fahrtbeginn und an kalten Wintertagen bleibt daher viel Stickoxid übrig.

Mit dem konzentrierten Röntgenlicht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS haben die Forschenden das Katalysatormaterial (eine Kupfer-Zeolith-Verbindung) durchleuchtet und genau beobachtet, was da falsch läuft: Bei niedrigen Temperaturen mindert zu viel Ammoniak die Wirkung des Kupfers. Die Studie der PSI-Forschenden ergab schliesslich, dass je nach Temperatur und Betriebszustand verschiedene Mengen Ammoniak eingespritzt werden sollten, um die Wirkung zu optimieren. So lassen sich die Stickoxid-Emissionen um bis zu 90 Prozent senken.

Dennoch bleibt der Diesel – und, wegen seines höheren Spritverbrauchs, noch mehr der Benziner – ein Antrieb mit negativem Klimaeffekt. Um diesen drastisch zu verringern, braucht es neue Antriebstechnologien möglichst ganz ohne schädliche Abgase.

Nahe liegend sind in dieser Hinsicht Elektroantriebe. Am PSI wird intensiv daran geforscht, deren Technik und vor allem Reichweite zu verbessern, damit sie Diesel und Benziner bald adäquat ersetzen können. Zwei Fragen, auf die PSI-Forschende in diesem Zusammenhang Antworten suchen, beziehen sich auf den Energiespeicher der Elektrofahrzeuge: Welcher Elektrolyt im Akku überträgt die Ladungen am besten? Wie müssen die Elektroden des Akkus beschaffen sein, um eine maximale Energiedichte zu erreichen – ohne dass damit deren Explosionsgefahr steigt? Mit der Lösung dieser beiden Aufgaben liesse sich bereits mit herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkus eine deutliche Reichweitensteigerung der Elektroautos erzielen.

Eine Gruppe um die PSI-Chemikerin Sigita Trabesinger zum Beispiel widmet sich in einem Projekt mit dem Chemiekonzern BASF dem Mengenverhältnis der sogenannten Übergangsmetalle, die in der positiven Elektrode, also der Kathode, der Batterie stecken. Trabesinger möchte wissen, wie Änderungen der Zusammensetzung sich auf die Stabilität und Sicherheit der Batterie auswirken. Die gebräuchlichste Verbindung ist das sogenannte NCM, bestehend aus verschiedenen Anteilen Nickel, Kobalt und Mangan. «Das Ziel ist, den Anteil



Davide Ferri forscht an Katalysatoren, wie sie in Diesel- und Erdgasfahrzeugen eingesetzt werden.



Ziele erreicht, hängt ganz wesentlich von den Antrieben dieser Verkehrsträger ab. Deren CO₂-Emissionen müssen radikal reduziert werden. Und genau da setzen Forschende unter anderem am PSI an.

Christian Bauer und Brian Cox vom PSI-Labor für Energiesystemanalyse haben in einer Studie ermittelt, wie viel Abgas – insbesondere Treibhausgas – die verschiedenen Antriebsarten von Personenwagen aktuell produzieren – und wie viel sie nach derzeitigen Trends 2040 produzieren werden. Dabei haben sie den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge bedacht, also von der Produktion bis zur Entsorgung (siehe ab Seite 16). Vor allem Dieselfahrzeuge sind in den letzten Jahren in die Kritik geraten,

Elektroautos eignen sich derzeit vor allem für Fahrten in der Stadt, denn sie haben eine eingeschränkte Reichweite. Forschende am PSI arbeiten daran, diese zu erhöhen.



von Nickel zu erhöhen und den von Kobalt so weit wie möglich zu senken», sagt Trabesinger.

Denn Kobalt ist nicht nur toxisch, es ist auch selten und teuer und wird vor allem im Kongo unter sozial und ökologisch fragwürdigen Bedingungen abgebaut. Der technische Vorteil eines höheren Nickelanteils ist ausserdem, dass er die Kapazität der Kathode und damit die Reichweite des Elektroautos steigert. Idealerweise möchten die Forschenden in weiterer Zukunft sogar komplett auf Kobalt verzichten.

Allerdings neigt NCM mit mehr Nickel und weniger Kobalt dazu, an Luft instabil zu sein und sich in der Batterie chemisch reaktionsfreudiger zu verhalten als gewünscht.

Verschiedene Tricks könnten dennoch die neuen Materialien stabilisieren: Probiert wird derzeit die Beigabe extrem geringer Mengen weiterer Elemente oder eine gezielte Oberflächenbeschichtung. Mit den ultrapräzisen Lichtquellen an den Grossforschungsanlagen des PSI untersuchen Trabesinger

diesen Feststoffbatterien der Ladevorgang noch vergleichsweise lang, weil an sie nur eine relativ geringe Stromstärke angelegt werden kann.

PSI-Forschende sind dem mit der sogenannten Operando Röntgentomografischen Mikroskopie auf den Grund gegangen. «Diese funktioniert prinzipiell wie eine Computertomografie in einem Spital», sagt Strahllinienwissenschaftlerin Federica Marone. «Allerdings ist bei uns an der Grossforschungsanlage SLS der Photonenfluss um einige Grössenordnungen höher. So erreichen wir die erforderliche räumliche und zeitliche Auflösung.» Marone konnte präziser als je zuvor beobachten, wie sich in der Keramik, die in diesem Fall aus Lithium- und Phosphorsulfid besteht, beim Laden Risse bilden: Die Lithium-Ionen zwingen sich in das Molekülgerüst von Zinnkügelchen, die in die Keramik eingebettet sind, und vergrössern dadurch deren Volumen um bis zu 300 Prozent. Marone konnte verfolgen, wie sich die Risse ausbreiten und den Fluss der Ionen zwischen den Elektroden stören. Zwar schliessen sich die Risse beim Entladen wieder, da der feste Elektrolyt eine gewisse Elastizität aufweist. Doch die Einschränkung beim Laden bleibt. Mit diesem Verständnis lässt sich nun leichter nach anderen Elektrolytmaterialien suchen, die weniger stark auf die Ausdehnung der Zinnkügelchen reagieren. Trotzdem bleibt es bis zu einer fehlerfreien Massenproduktion von Feststoffbatterien noch ein weiter Weg.

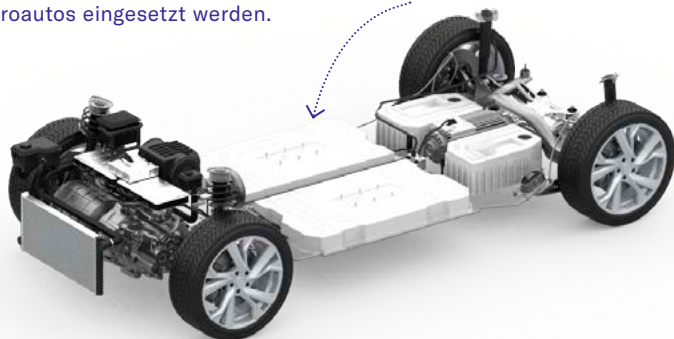
Anders sieht es bei den Brennstoffzellen aus. Diese Antriebe haben im Vergleich zur Batterie vor allem einen Reichweitenvorteil, allerdings eine geringere Energieeffizienz (siehe Interview auf Seite 19). «Die Technologie ist ausgereift, es gibt da eigentlich kein grosses Hindernis mehr», sagt Thomas J. Schmidt, Leiter des Forschungsbereichs Energie und Umwelt des PSI. «Es fehlt nur noch am politischen Willen.»

Derweil wird die Brennstoffzelle weiter optimiert. Auch hier nutzen die Forschenden die einzigartigen Bildgebungsverfahren, die das PSI mit seinen Grossforschungsanlagen ermöglicht. So waren bislang die Vorgänge innerhalb der Brennstoffzelle noch nicht im Detail verstanden. Nun aber lässt sich mithilfe der Neutronenradiografie und der Röntgentomografie per Synchrotronstrahlung während des Betriebs in die Zelle hineinschauen.

In einer Brennstoffzelle läuft eine Reaktion ab, die bereits Schulkinder im Chemieunterricht kennenlernen: Die Gase Wasserstoff und Sauerstoff verbinden sich zu Wasser und setzen dabei Energie frei. Dies spielt sich an den beiden porösen Katalysatorschichten der Elektroden ab, die durch eine Membran getrennt sind. Durch diese Schichten müssen einerseits die beiden Gase diffundieren und andererseits das entstehende Wasser entfernt werden. Vor allem Letzteres ist wichtig, damit eine



Die Forscherin Sigita Trabesinger arbeitet an Batterien, wie sie in Elektroautos eingesetzt werden.



und ihre Mitarbeitenden, warum genau die Elektroden ohne diese Tricks instabil werden und welche der Änderungen erfolgversprechend sind.

Vielleicht liegt die Zukunft des Elektroantriebs aber auch in der sogenannten Feststoffbatterie. Eine Feststoffbatterie enthält statt des typischen flüssigen Elektrolyts, der die Ladung zwischen den Elektroden transportiert, eine feste Keramik. Deren Vorteile: Sie ist weniger entzündlich als flüssige Elektrolyte. Diese Batterie widersteht auch ohne Kühlung hoher Spannung und hohen Temperaturen – kann also theoretisch schneller laden und spart den Platz für die Kühlvorrichtung. Und auch sie verspricht eine höhere Energiedichte als die derzeitigen Lithium-Ionen-Batterien. Jedoch dauert bei

Brennstoffzelle gut funktioniert. Andernfalls verstopft das Wasser die Poren der Elektroden und behindert so die Gase. Im Winter, wenn das Wasser friert und sich ausdehnt, drohen sogar mechanische Schäden. Die PSI-Forschenden testen deshalb, wie sich der Wasser- und Gasfluss etwa durch Veränderung der porösen Komponenten in der Zelle optimieren lässt.

Die nächste Generation Brennstoffzellen soll dank besseren Wassermanagements und optimierter Katalysatoren nicht nur haltbarer sein, sondern auch eine höhere Stromdichte bieten. «Die Stromdichte», so Thomas J. Schmidt, «ist vor allem für die Flexibilität des Antriebs wichtig. Und dies wirkt sich direkt auf die Grösse der Brennstoffzellensysteme und damit auf ihre Kosten aus.»

Anwendung finden solche Fortschritte nicht zuletzt in einer Kooperation mit der Firma Swiss Hydrogen (siehe 5232-Ausgabe 1/2018, Seite 18). Sie hat herkömmliche Elektroautos mit Brennstoffzellen aufgerüstet, die den Akku bei der Fahrt aufladen und so die Reichweite erhöhen. Und seit 2017 fährt in der Transportflotte von Coop testweise ein Lastwagen mit einem solchen Antrieb.

Ein grosses Thema hinsichtlich alternativer Antriebe ist auch Erdgas. Schon fossiles Erdgas, mit dem einige Autos heute bereits fahren, ist in Sachen Treibhausgase besser als Benzin oder Diesel. «Methan ist der Hauptbestandteil von Erdgas und hat chemisch ein günstigeres Verhältnis zwischen Wasserstoff und Kohlenstoff und eine höhere Klopfestigkeit als Benzin oder Diesel», erklärt Oliver Kröcher, Leiter des Labors für Bioenergie und Katalyse am PSI. Dadurch kann das Gas im Motor stärker komprimiert werden und effizienter verbrennen. Die CO₂-Emissionen sind zwar geringer, dafür muss aber unverbranntes Methan aus dem Abgas entfernt werden. Die dazu nötigen Katalysatoren werden in Kröchers Labor erforscht und entwickelt.

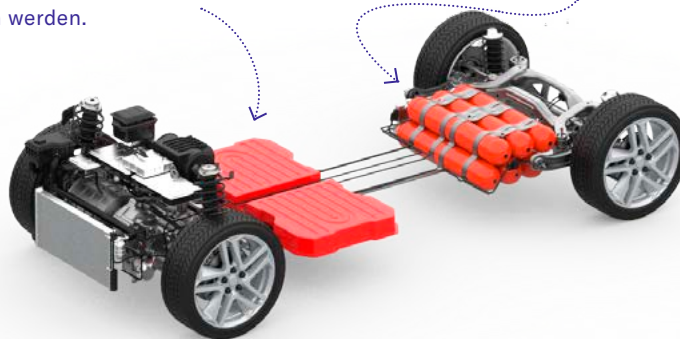
Interessant könnten auch Gasmotoren werden, die mit Biomethan laufen, das aus Biomasse gewonnen wird – auch «Synthetisches Erdgas» (SNG) genannt. Dessen Kohlenstoff wurde zuvor der Atmosphäre entzogen, wodurch zumindest die direkten Emissionen der Fahrzeuge so gut wie klimaneutral sind. Am PSI werden verschiedene Möglichkeiten erforscht, um Biomethan zu erzeugen.

Eine Möglichkeit dafür ist, in Biogasanlagen organische Abfälle zu vergären. Eine entsprechende PSI-Testanlage hat in einem Langzeittest bereits bewiesen, dass sie für den Einsatz im Alltag geeignet ist. Das dabei verwendete Verfahren ist besonders effizient, weil nicht nur Methan aus der Vergärung gewonnen wird, sondern auch noch Kohlendioxid in den Gärgasen mithilfe von zugesetztem Wasserstoff ebenfalls zu Methan umgewandelt wird (siehe 5232-Ausgabe 1/2018, Seite 16).

Ökologisch ergibt das gesamte Verfahren aber nur dann Sinn, wenn auch der zugesetzte Wasserstoff mit erneuerbarer Energie produziert wird – das gilt hier genauso wie bei Brennstoffzellen. Zum Beispiel per Elektrolyse. Auch daran forscht das PSI: «Wir entwickeln geeignete Materialien, die für eine effiziente Elektrolyse sorgen», sagt Felix Büchi, Leiter des Labors für Elektrochemie.



Thomas J. Schmidt leitet den Bereich Energie und Umwelt am PSI, wo unter anderem an [Brennstoffzellen](#) geforscht wird, die mit [Wasserstoff](#) betrieben werden.



In einigen dieser Bereiche teilen die PSI-Forschenden ihr Expertenwissen mit anderen Schweizer Instituten, darunter auch die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa. «Die Empa ist uns in vielen unserer Forschungsprojekte eine kompetente Partnerin», so PSI-Forschungsbereichsleiter Schmidt. Gemeinsam mit weiteren Schweizer Instituten und Hochschulen arbeiten das PSI und die Empa im Rahmen der Kompetenzzentren «Heat and Electricity Storage» sowie «Mobility» zusammen. Letzteres hat, wie der Name andeutet, das Thema «effiziente Mobilität».

«Effizienz» ist in der Tat das Zauberwort bei der Fortentwicklung vieler alternativer Antriebe. Wobei die Experten betonen, dass man stets das Gesamtverkehrssystem und die Wirtschaftlichkeit im Auge behalten müsse: «Schliesslich geht es darum, möglichst umweltschonend und bezahlbar von A nach B zu kommen», sagt Serge Biollaz, Forschungsgruppenleiter für thermochemische Prozesse am PSI. «Dafür müssen wir viele Lösungen sinnvoll verketteten. Und wir brauchen nicht nur eine Antriebstechnologie für die Mobilität der Zukunft, sondern eine ganze Fülle. Nur dann können wir die Schweizer Ziele für ein effizientes und CO₂-armes Verkehrssystem erreichen.» ♦



Personenwagen, die mit Wasserstoff-Brennstoffzellen angetrieben werden, haben zwar eine höhere Reichweite als Elektroautos, sind jedoch weniger effizient als diese. PSI-Forschende wollen das ändern.



Der «ökologische Reifenabdruck» von Personenwagen

Die Forscher Brian Cox und Christian Bauer haben in einer gross angelegten PSI-Studie die Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antrieben verglichen. Dies war anspruchsvoller, als es auf den ersten Blick scheinen mag. Denn zusätzlich zum Schadstoffausstoss im Betrieb mussten die Emissionen beachtet werden, die bei der Herstellung jedes einzelnen Fahrzeugs anfallen. Auf die Lebensdauer eines Personenwagens gerechnet machen diese nämlich rund die Hälfte der gesamten Umweltauswirkungen aus.

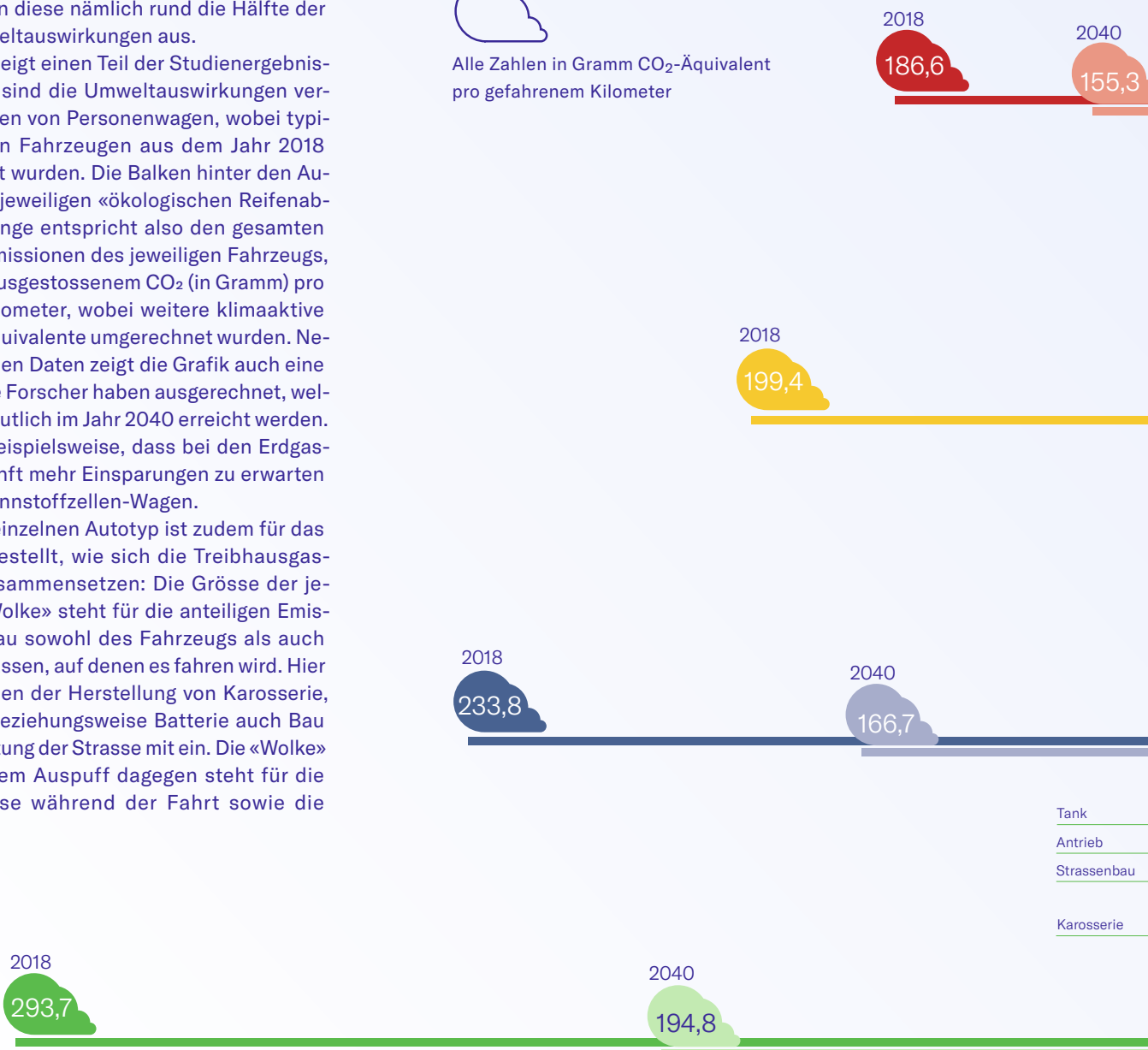
Die Grafik zeigt einen Teil der Studienergebnisse. Dargestellt sind die Umweltauswirkungen verschiedener Typen von Personenwagen, wobei typische Daten von Fahrzeugen aus dem Jahr 2018 zugrunde gelegt wurden. Die Balken hinter den Autos zeigen den jeweiligen «ökologischen Reifenabdruck», ihre Länge entspricht also den gesamten Treibhausgasemissionen des jeweiligen Fahrzeugs, angegeben in ausgestossenem CO₂ (in Gramm) pro gefahrenem Kilometer, wobei weitere klimaaktive Gase in CO₂-Äquivalente umgerechnet wurden. Neben den aktuellen Daten zeigt die Grafik auch eine Vorhersage: Die Forscher haben ausgerechnet, welche Werte vermutlich im Jahr 2040 erreicht werden. So zeigt sich beispielsweise, dass bei den Erdgasautos der Zukunft mehr Einsparungen zu erwarten sind als bei Brennstoffzellen-Wagen.

Bei jedem einzelnen Autotyp ist zudem für das Jahr 2018 dargestellt, wie sich die Treibhausgasemissionen zusammensetzen: Die Grösse der jeweils linken «Wolke» steht für die anteiligen Emissionen beim Bau sowohl des Fahrzeugs als auch anteilig der Strassen, auf denen es fahren wird. Hier gehen also neben der Herstellung von Karosserie, Antrieb, Tank beziehungsweise Batterie auch Bau und Instandhaltung der Strasse mit ein. Die «Wolke» gleich hinter dem Auspuff dagegen steht für die direkten Abgase während der Fahrt sowie die

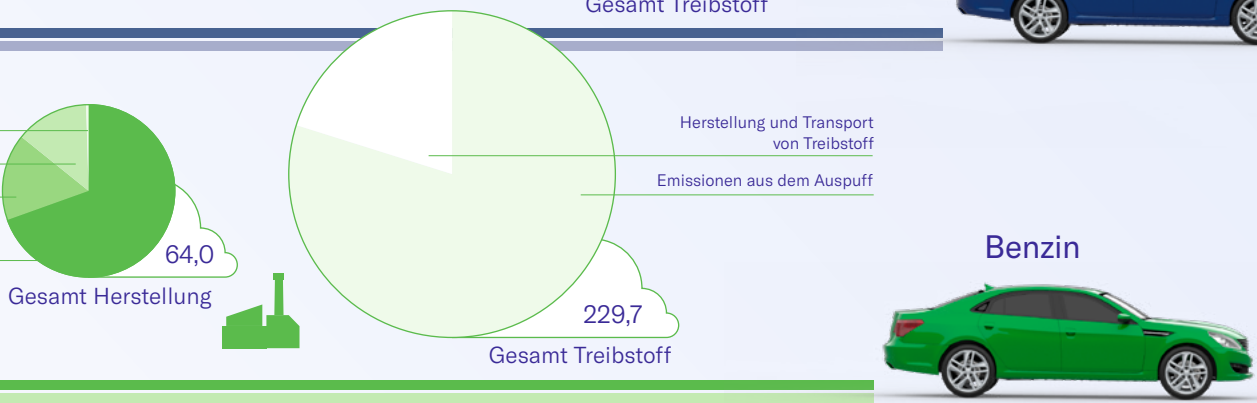
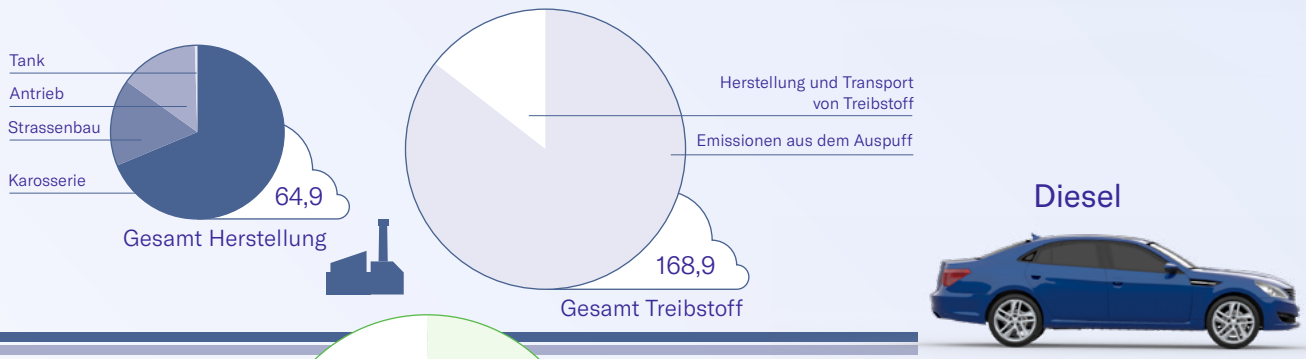
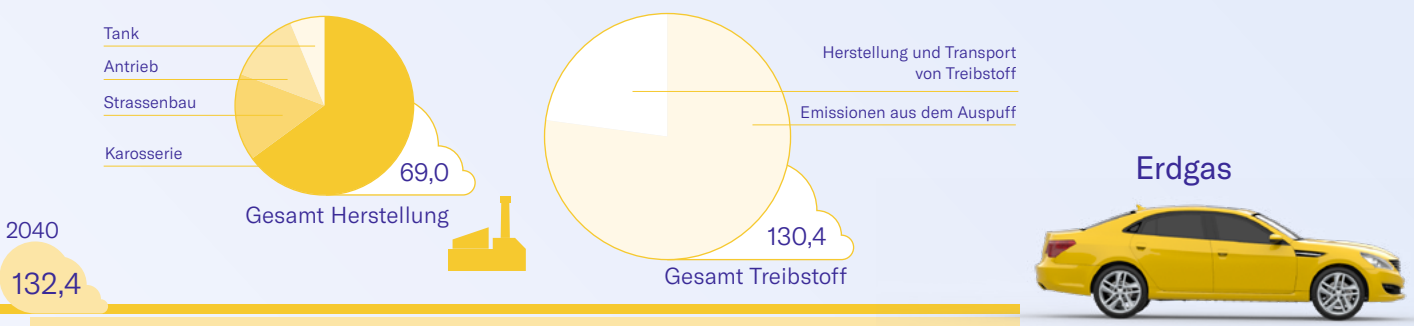
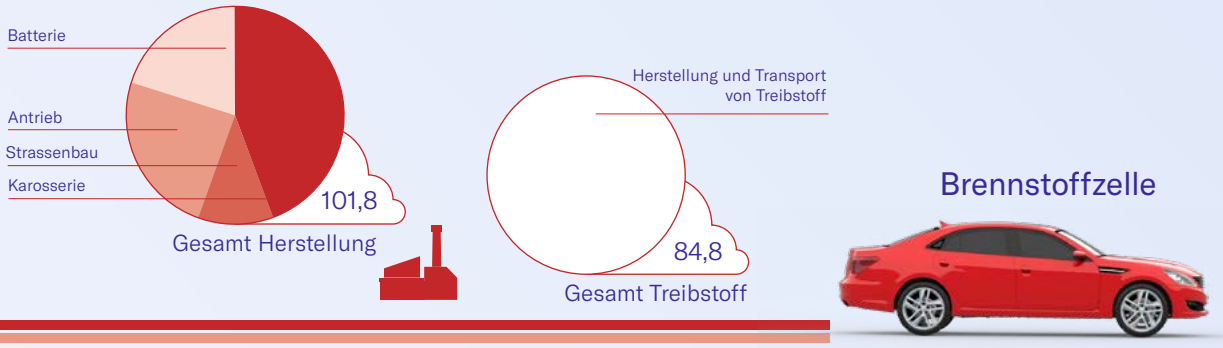
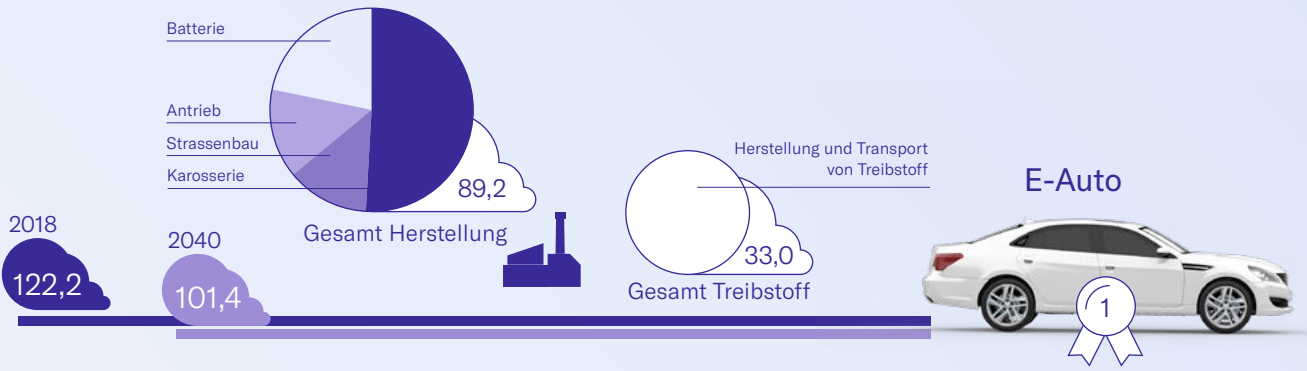
Emissionen, die für Herstellung und Transport des jeweiligen Treibstoffs anfallen – sei dies Benzin, Diesel oder der Strom für das E-Auto. So zeigt sich, dass Elektrofahrzeuge in der Herstellung zwar weniger umweltfreundlich sind als Benziner – dass dies aber im Betrieb durch die nicht vorhandenen direkten Abgase mehr als wettgemacht wird.



Alle Zahlen in Gramm CO₂-Äquivalent pro gefahrenem Kilometer



Tank
Antrieb
Strassenbau
Karosserie





In der Herstellung ist ein E-Auto zunächst weniger umweltfreundlich als ein Verbrenner. Das gleicht sich aber zwischen 50 000 und 100 000 gefahrenen Kilometern wieder aus.

Vorfahrt für E-Autos

Benziner, Diesel, Brennstoffzelle oder Elektro – welches Auto hat Zukunft? Eine PSI-Studie hat die Klimabilanz verschiedener heutiger Antriebe untersucht und zudem ins Jahr 2040 projiziert.

Text: Jan Berndorff

Wer sich dieser Tage ein neues Auto anschaffen möchte, steht vor einer schweren Entscheidung. Denn längst stellen sich mehr Fragen als nur die nach Modell und finanzieller Leistbarkeit: Die Umweltaspekte sowohl bei der Herstellung als auch im Betrieb eines Fahrzeugs gewinnen zusehends an Gewicht – vornehmlich im Hinblick auf den Ausstoss klimaschädlicher Gase wie CO₂. Ganz besonders gilt das in der Schweiz, denn hier hat der Verkehr für den Klimaschutz grosse Bedeutung: Er

verursacht rund ein Drittel aller Treibhausgasemissionen – mehr als die Industrie und auch mehr als der Wohnsektor. Die Rahmenbedingungen für möglichst umweltverträgliche Produktion und Betrieb der Autos schafft die Politik beispielsweise durch Gesetze, Grenzwerte oder Steuern.

Eine PSI-Studie kann beiden – Politikerinnen und Politikern wie auch Konsumenten – helfen. Im Auftrag des Bundesamts für Energie haben der ehemalige Doktorand Brian Cox und Projektleiter

Christian Bauer die Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antrieben untersucht. Zur Vergleichbarkeit haben sie ihre Ergebnisse jeweils in CO₂-Äquivalenten angegeben. Seit 2010 sammelten sie Daten, durchforsteten Literatur und Datenbanken, befragten Herstellerfirmen und baten Sachverständige in der Forschung um Informationen, darunter auch die Kollegen und Kolleginnen am PSI. Heraus kam ein sehr differenziertes Bild, wie die verschiedenen Antriebe heute in

Sachen Ökobilanz dastehen – und wie sie aller Voraussicht nach in 20 Jahren dastehen werden. Die Studie wagt nämlich zusätzlich erstmals eine Prognose der voraussichtlichen Umweltauswirkungen der Antriebe im Jahr 2040.

«Wichtig ist bei solchen Analysen, den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs zu betrachten», sagt Brian Cox, der inzwischen beim Beratungsunternehmen Infrac tätig ist. Für die Klimabilanz zählt nicht nur der CO₂-Ausstoss im Betrieb. Sondern



«Schon heute ist Elektro die richtige Wahl»

Christian Bauer ist Wissenschaftler am Labor für Energiesystemanalyse des PSI und spezialisiert auf Lebenszyklus- und Nachhaltigkeitsanalysen.

Herr Bauer, wenn Sie sich aktuell ein Auto kaufen müssten, welche Art Antrieb hätte es?

Bauer: Ich hoffe, dass mein derzeitiger Diesel noch drei bis fünf Jahre hält. Dann gibt es hoffentlich ein für mich passendes Elektromodell. Unsere Studie zeigt deutlich, dass Elektroautos auf lange Sicht die nachhaltigste Option sind, insbesondere wenn sie mit Ökostrom betrieben werden. Viele zögern da noch, befürchten, die Reichweite könnte sich im Alltag als zu gering erweisen, die Lade-Infrastruktur reiche nicht aus oder der Preis für solche Autos sei zu hoch. Doch für viele wäre Elektro unterm Strich schon heute die richtige Wahl. Wer vor allem kurze Strecken fährt und zuverlässig an einem Ort aufladen kann, sollte das für sich mal durchrechnen. Wenn wir davon ausgehen, dass sich Batterietechnik und Ladedauer weiter verbessern, bleiben nur zwei bis fünf Prozent der Autofahrenden, für die die Reichweite nicht ausreicht. Und für die sollte es in absehbarer Zeit genügend Schnellladestationen geben, um auch weite Strecken zu überwinden.

Aber Elektroautos sind teurer.

Ja. Beim Kauf muss man heute noch um einiges mehr ausgeben. Allerdings spart man laufend Spritkosten. Bei Taxis lohnt sich das unterm Strich sicher schon heute. Und ich gehe davon aus, dass sich dieser Kostenvergleich generell bald zugunsten der

Elektroautos ändern wird: Die Autos werden bestimmt rasch billiger, während Benzin- und Dieselpreise weiter steigen.

Ist die Brennstoffzelle auch eine gute Option?

Nur wenn die Strecken lang sind und viel Nutzlast gefordert ist. Das heisst also vor allem für Schwertransporte und Fernbusse. Bei den Personenwagen wird die Brennstoffzelle meines Erachtens langfristig keine grosse Rolle spielen.

Inwieweit fördert die Schweizer Regierung alternative Antriebe? Wie ehrgeizig sind die Ziele?

Es gibt eine «Roadmap Elektromobilität 2022» von den Bundesämtern für Energie und Strassen. Ziel ist, dass in drei Jahren fünfzehn Prozent der Neuzulassungen von Personenwagen Elektrofahrzeuge sind. Im ersten Halbjahr 2019 machten die reinen Elektroautos knapp vier Prozent der Neuzulassungen aus – man ist also noch ein Stück weit weg vom Ziel.

Fahren trotzdem in 20 Jahren alle Schweizer Elektroauto?

Zumindest sehr viele. Die Schweiz kann sich nicht vom Rest Europas abkoppeln. Wenn die grossen Autohersteller jetzt konsequent auf Batterieantriebe umstellen, um den immer strengeren Regulierungen zu folgen, dürfte es auch für uns schwierig werden, an Benzin und Diesel festzuhalten. Gut möglich, dass wir in 20 oder 30 Jahren ganz ohne auskommen.

auch der, der bei der Produktion des Autos und seiner Komponenten anfällt sowie bei der Entsorgung. Ausserdem müssen die Emissionen beim Bau der Strassen und diejenigen aus der Produktion des jeweiligen Treibstoffs einfließen. Bei Benzinern fallen letztere etwa durch die Erdölförderung und -raffinerie an, bei Brennstoffzellenfahrzeugen durch die Wasserstoff- und bei Elektroautos durch die Stromproduktion. Insgesamt also ein riesiger Rechercheaufwand. «Zumal manche Daten schwierig zu bekommen sind», berichtet Christian Bauer. «Wie so ein E-Auto produziert wird, sagt Ihnen erst mal niemand. Das behandeln die Unternehmen streng geheim.»

Letztlich konnten die Forschenden dennoch alles Notwendige zusammentragen und kamen zu einem klaren Ergebnis: Im Bereich der Personenwagen sollten wir im Sinne des Klimaschutzes auf den batterieelektrischen Antrieb setzen. In der Summe aller Faktoren bringt dieser die geringste Klimabelastung mit sich. Das gilt in der Schweiz schon heute, da der Strom hier vor allem per Wasser- und Atomkraft produziert wird. Der Schweizer Strommix verursacht dadurch nur wenig mehr als 100 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde, die Energieimporte bereits mitberücksichtigt.

«Wie so ein E-Auto produziert wird, sagt Ihnen erstmal niemand. Das behandeln die Unternehmen streng geheim.»

Christian Bauer, Wissenschaftler am Labor für Energiesystemanalyse am PSI.

Bezeichnend für die Bilanz des E-Autos ist im Übrigen, dass sie vor den ersten gefahrenen Kilometern noch schlechter ist als die anderer Fahrzeuge – aber mit CO₂-armem Strom im Vergleich immer besser wird, je mehr man damit fährt. Das liegt daran, dass die Herstellung der Batterie viele Emissionen verursacht, unter anderem weil sie spezielle Metalle enthält, die weit entfernt abgebaut und herantransportiert werden. Doch dieses Manko macht das E-Auto durch die geringen Emissionen im laufenden Betrieb mehr als wett (siehe Infografik Seite 16).

Als klimatisch zweitgünstigster Antrieb zeigt sich in der Studie derzeit die Brennstoffzelle – wenn die Voraussetzungen stimmen. Auch hier werden in der klassischen Version die Räder per Elektromotor angetrieben. Allerdings kommt der Strom dafür nicht aus der Steckdose, sondern er wird von einer

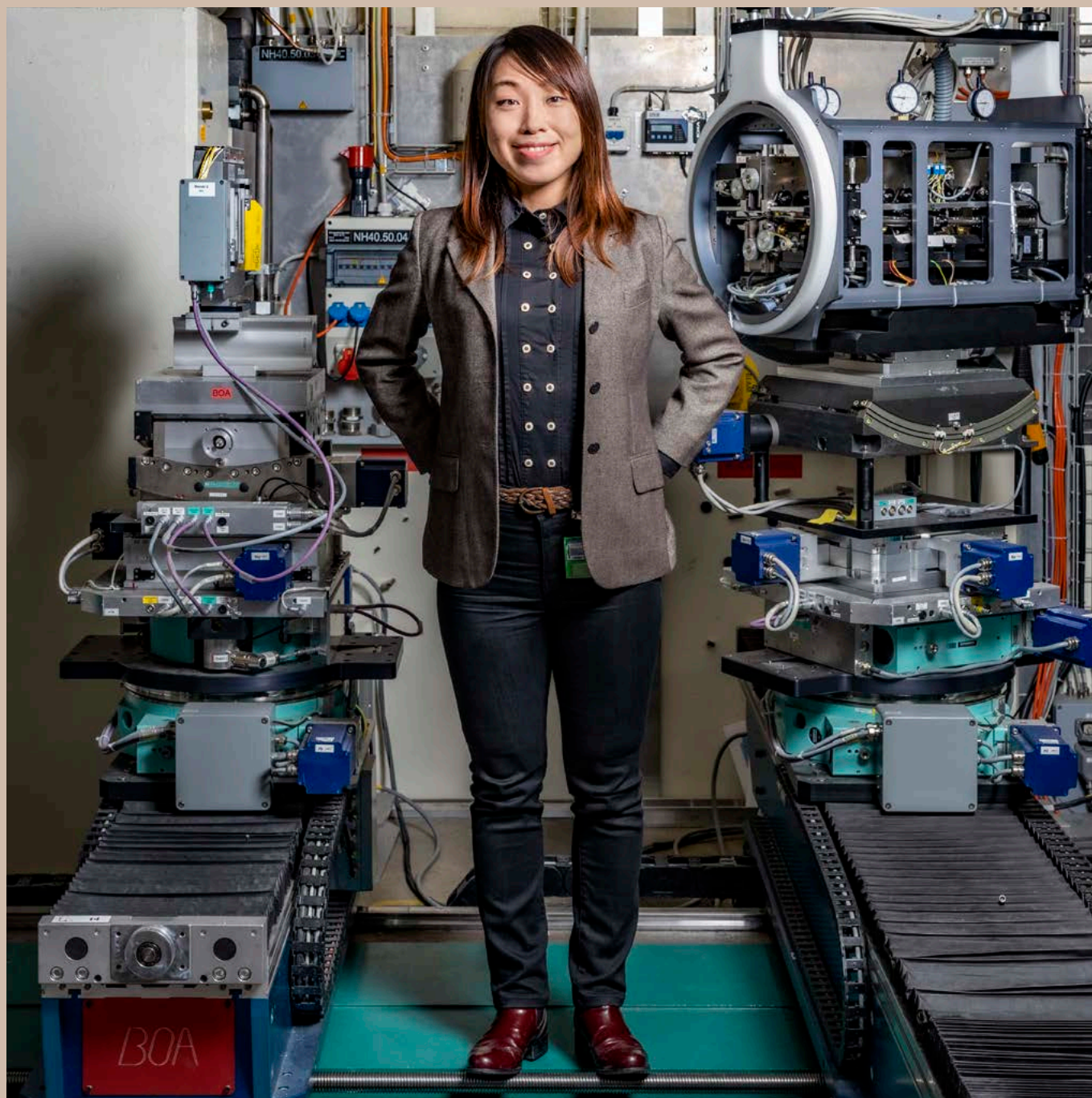
Brennstoffzelle produziert, die Wasserstoff aus einem Hochdrucktank an Bord mit Sauerstoff aus der Luft in Wasser umwandelt, wobei Energie frei wird. Entscheidend ist, wie der Wasserstoff hergestellt wurde: Stammt er aus Elektrolyse – also der Aufspaltung von Wasser mittels Strom in Sauerstoff und Wasserstoff – und wird diese mit Solarstrom durchgeführt, so ist das sehr klimagünstig. Wird er mit dem Schweizer Strommix hergestellt, ist das etwas weniger günstig. Und regelrecht ungünstig wird die Bilanz, wenn der Wasserstoff aus Erdgas gewonnen wird, also einem fossilen Energieträger.

Autos, die gleich mit Erdgas betrieben werden, sind in ihrer Klimabilanz in etwa vergleichbar mit dem Diesel. Eine Sonderrolle nimmt das sogenannte Synthetic Natural Gas (SNG) ein. Dieser künstliche Erdgas-Ersatz wird erzeugt, indem man zunächst wie bei der Brennstoffzelle per Elektrolyse Wasserstoff aus Wasser gewinnt. Dieser wird dann mit Kohlendioxid versetzt, das man etwa in einer Biogas-, einer Kehrlichtverbrennungsanlage, einem Kohlekraftwerk oder direkt aus der Luft abscheiden kann. Heraus kommt ein Kohlenwasserstoff, der natürlichem Erdgas so sehr ähnelt (beide bestehen hauptsächlich aus Methan), dass er sich ins normale Erdgas-Netz einspeisen lässt. «Erdgas-Autos, die mit SNG fahren, verbrauchen in der Gesamtbilanz allerdings fünf bis sechs Mal so viel Strom wie E-Autos», sagt Bauer. «Denn entlang der Produktionskette von SNG gibt es jede Menge Energieverluste und der Verbrennungsmotor ist ineffizient.»

Warum also überhaupt ein solcher Antrieb? Die Idee bei SNG ist, dass es mit überschüssigem Ökostrom hergestellt wird. Wenn also im Sommer mehr Energie aus Solar- und Windkraftanlagen zur Verfügung steht, als wir nutzen können, muss sie irgendwie gespeichert werden. Dann stünde sie zum Beispiel im Winter zur Verfügung, wenn die erneuerbaren Energieträger schwächeln und der Strombedarf hoch ist. Der Clou ist, dass SNG sich leicht speichern lässt. Kleine Überschüsse speist man einfach ins existierende Erdgasnetz ein, wo es sich jederzeit wieder abzapfen lässt. Und für grosse Überschüsse gibt es günstige und weitgehend verlustfreie Tanks. «Wenn wir in Zukunft tatsächlich viel Ökostrom übrig haben, ergibt SNG daher auch als Personenwagen-Antrieb durchaus Sinn», so Bauer.

Die grosse Frage für die Klimabilanz aller Antriebe bleibt also, wie das europäische Stromnetz der Zukunft aussehen wird. Haben Politik und Gesellschaft den Mut, das System zügig auf erneuerbare Energien umzustellen? Dann könnten die alternativen Motoren ihre Stärken voll ausspielen. ♦





Masako Yamada

An der Grossforschungsanlage SINQ, der Schweizer Spallations-Neutronenquelle, entwickelt Masako Yamada eine neuartige Optik, die mehr Neutronen und so einen insgesamt intensiveren Neutronenstrahl auf zu untersuchende Proben lenkt. Die Physikerin nutzt dafür die wellenartigen Eigenschaften der Neutronen und konstruiert die Optik mit neuen Materialien. Dadurch können nun auch extrem kleine Proben – im Bereich von 1 Kubikmillimeter – analysiert und die Messdaten ausserordentlich verbessert werden. Die Eigenschaften von Neutronen verändern sich in der Probe. Aus diesen Veränderungen können Forschende auf den inneren Aufbau der Probe schliessen.



Radioaktive Stoffe im Güterverkehr aufspüren

Mit einem mobilen Messportal führt das PSI regelmässig Radioaktivitätskontrollen bei Lastwagen durch. Im Auftrag des Bundesamts für Gesundheit sollen so herrenlose Strahlenquellen entdeckt werden. Aber auch natürlich vorkommendes radioaktives Material kann Alarm auslösen und das PSI-Team überraschen.

Text: Barbara Vonarburg

Wenn bei Kontrollen auf Radioaktivität auffällige Werte auftreten, dann misst Udo Strauch von der Eichstelle des PSI genau nach.

Soeben fährt ein Lastwagen mit Zement durch das Portal, das Udo Strauch und Rouven Philipp vom PSI in dreistündiger Arbeit im Schwerverkehrszentrum in Erstfeld installiert haben. Im mitgebrachten Transportcontainer, der nun als Büro dient, können sie auf dem Computerbildschirm verfolgen, was die Detektoren in den sechs weissen Säulen links und rechts des LKWs messen: Gammastrahlen, die von radioaktivem Material ausgehen. Weil auch die natürliche Umgebung ständig leicht strahlt, kann es durchaus sein, dass der Strahlenpegel fällt, wenn ein Lastwagen das Messportal passiert, da er die Untergrundstrahlung teilweise abschirmt. Nicht so im Fall des Zementlasters. Dieser löst Alarm aus.

«Das kommt relativ häufig vor», erklärt Udo Strauch: «Zement kann wie alle Stoffe, die aus unserer Erdkruste gewonnen werden, geringe Anteile von natürlichen, sogenannten Radionukliden enthalten, die Gammastrahlung aussenden.» Zu solchen Transportgütern zählen beispielsweise auch Gesteine wie Granit, Schotter, Mineralsand oder Düngemittel, in denen es je nach Herkunft, Verarbeitungsprozess und Menge mehr oder weniger radioaktives Material gibt. Oft sind das nur verschwindend geringe Anteile, sodass sie nicht nachweisbar wären, wäre eine Ladung nur so gross wie der Inhalt eines herkömmlichen Turnbeutel. «Wenn aber ein LKW 22 Tonnen geladen hat, wird das bei unserem Portal dann messbar», erklärt Strauch.

Weil der Portalmonitor im Container einen Alarm meldet, wird der Zementwagen gestoppt. Mit einem Handmessgerät geht der PSI-Experte ums Fahrzeug herum und kontrolliert die Ladefläche. Der Strahlungspegel ist überall gleichmässig leicht erhöht. Würde Strauch irgendwo ein deutliches Strahlungsmaximum feststellen, nähme er ein weiteres Messgerät zur Hand. Damit lässt sich feststellen, welche Radionuklide die Gammastrahlung verursachen. Der Zementlaster überschreitet die Limite für natürlich vorkommende radioaktive Materialien aber nicht. Deshalb kann der Chauffeur seine Fahrt fortsetzen. «Die Alarmmeldungen zeigen, dass unsere Messgeräte funktionieren, auch wenn die Grenzwerte für natürliche Radionuklide bei der Kontrolle solcher Ladungen bisher noch nie überschritten wurden», sagt Strauch.

Strahlender Schrott

Doch es gibt durchaus erschreckende Beispiele für bedrohliche Warentransporte. So wurden in den Häfen von Hamburg und Rotterdam seit November 2018 viermal radioaktive Quellen entdeckt, wie sie in der Medizin oder der Lebensmittelindustrie für Bestrahlungen verwendet werden. Diese Kobalt-60-Quellen sind hoch radioaktiv. Sie steckten in Containern mit Altmetall und wurden dank Mess-

portalen aufgespürt, wie die Internationale Atomenergie-Organisation IAEA berichtet. In Hamburg war der strahlende, zehn Zentimeter lange Metallzylinder in einem Stoffsack verpackt. Die Altmetall-Lieferung stammte aus Westafrika. Woher die Kobalt-60-Quellen in den Niederlanden kamen, liess sich nicht eruieren. Das extrem gefährliche Material konnte glücklicherweise sicher geborgen und eingelagert werden, ohne dass jemand zu Schaden kam.

Mit Kobalt-60 kontaminierte Edelstahlprodukte tauchten Ende 2008 auch in der Schweiz auf. Offenbar war eine entsprechende Quelle in Recycling-Material geraten, das ein Schmelzwerk in Indien verarbeitet hatte. Aus dem Stahl wurden unter anderem Liftknöpfe gefertigt. «Diese musste man als radioaktiven Abfall entsorgen, da die zulässige Freigrenze überschritten wurde», erzählt Reto Linder vom Bundesamt für Gesundheit (BAG): «Dieses und weitere Ereignisse, wie mögliche Importe kontaminierter Waren nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima, gaben den Anlass zur Einführung periodischer Schwerpunktmessungen.» Seit 2015 werden regelmässig Kontrollen auf Radioaktivität durchgeführt. Mit der Revision der Strahlenschutzverordnung 2018 wurde das BAG mit der Organisation periodischer Schwerpunktkontrollen bei der Ein-, Aus- und Durchfuhr von Waren beauftragt.

«Die Forderung basiert unter anderem auf Empfehlungen der IAEA und Richtlinien der EU», erklärt Linder. Vor allem die USA hatten wegen der Terrorgefahr darauf bestanden. Schmutzige Bomben, die radioaktives Material enthalten, könnten eine verheerende Wirkung haben. Aber auch verloren gegangene Strahlenquellen, die durch den globalen Schrotthandel irgendwo auftauchen können, bedeuten eine Gefahr für Mensch und Umwelt. «Die Wahrscheinlichkeit, dass herrenloses radioaktives Material entdeckt wird, ist sicher höher; aber auch der Schmuggel von radioaktivem Material kann nicht ausgeschlossen werden, und dessen Entdeckung ist ebenfalls ein Ziel dieser Kontrollen», sagt Linder.

Mehrmals pro Jahr installieren Udo Strauch und Rouven Philipp im Auftrag des BAG das mobile Portal an verschiedenen Standorten, wie einem Grenzübergang oder in einem Kontrollzentrum für Schwerverkehr, und führen dort während einer Woche Radioaktivitätsmessungen durch, oft unterstützt durch einen Vertreter des BAG und mit der Hilfe der Eidgenössischen Zollverwaltung (EVZ) sowie der Polizei. «Wir führen eine Risikoanalyse durch, die zeigt, wo Kontrollen am sinnvollsten sind», erklärt David Marquis von der EVZ: «Gestützt auf diese Risikoanalyse koordinieren wir die Zusammenarbeit von unserem Personal auf den Zollstellen und

Unter anderem am Schwerverkehrszentrum in Erstfeld führt das PSI Kontrollen mit einem mobilen Portal an LKWs durch.



Grenzwachtposten mit den Partnerorganisationen PSI und BAG, und wir unterstützen die Fachleute vor Ort bei den Kontrollen, beispielsweise durch das Anhalten von Fahrzeugen.» Insgesamt beteiligte sich das PSI bisher schweizweit bei Kontrollen an fünfzehn verschiedenen Stellen, unter anderem im Schwerverkehrszentrum Erstfeld oder an den Grenzübergängen in Basel, Chiasso und Kreuzlingen.

Tabak löste Alarm aus

Udo Strauch freut sich jeweils über die Hilfsbereitschaft und das grosse Interesse der Zoll- und Polizeibeamten. Auch mancher Lastwagenchauffeur will wissen, warum er kontrolliert und was gemessen wird. «Das ist mitunter sogar für uns überraschend», sagt Strauch. So staunte das Team, als es bei einem Alarm einen LKW kontrollierte und dabei feststellte, dass dieser Tabak geladen hatte. Das Handmessgerät zeigte an, dass Kalium-40 den Alarm ausgelöst hatte. Das Element Kalium, das für alle Organismen lebenswichtig ist, enthält dieses radioaktive Isotop von Natur aus. Die grosse Menge an getrocknetem, pflanzlichem Material, die der Tabaklaster transportierte, machte den Kalium-40-Anteil deutlich messbar. «Gefährlich ist dies

allerdings nicht, jedenfalls für Nichtraucher», versichert Strauch.

Radioaktive Altlasten wie Radium, das früher vor allem in der Uhrenindustrie für Leuchtfarben verwendet wurde, sind aber durchaus eine Bedrohung. Deshalb wird nicht nur der Gütertransport auf der Strasse kontrolliert. Ab 2021 müssen zudem alle Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) und Recyclingbetriebe in der Schweiz Eingangskontrollen durchführen. Was dabei zu erwarten ist, testete das PSI-Team bei einer KVA. Rouven Philipp erinnert sich noch gut an jenen Tag im Hochsommer, als ein Kehrichtfahrzeug mit zehn Tonnen Hausmüll bei der Durchfahrt durch das mobile Messportal Alarm auslöste. «Es war unser erster Fund mit einer Überschreitung des Grenzwerts», erzählt Philipp. «Die Ladung musste abgekippt und separiert werden, um die Quelle zu lokalisieren.» Nach einer Dreiviertelstunde hatte das Team den gesuchten Abfallsack entdeckt. Das Handmessgerät zeigte an, dass die Gammastrahlung von einem radioaktiven Stoff aus der Medizintechnik stammt. Vermutlich hatte ein Patient nach einer nuklearmedizinischen Behandlung zu Hause Hygieneartikel weggeworfen, die immer noch Rückstände des Radionuklids enthielten und eine fachgerechte Entsorgung notwendig machten. ♦

Aktuelles aus der PSI-Forschung

1 Im Eis des Nordpols

Seit Ende September 2019 ist die bislang grösste Polarexpedition in Gang: Für rund 13 Monate reisen Forschende aus 20 Nationen auf dem Eisbrecher «Polarstern» an den Nordpol. An einem Punkt nördlich von Russland lässt die Crew das Schiff vom Polareis einschliessen. Ab dort wird es von der natürlichen Eisdrift mitgetragen bis nordöstlich von Grönland. Diese Idee hatte bereits Fridtjof Nansen bei seiner Polarexpedition in den Jahren von 1893 bis 1896 verfolgt. Im Rahmen der jetzigen Expedition «Mosaic» führen die Forschenden verschiedenste Projekte durch, beispielsweise zur Untersuchung von Wasser, Eis oder der Atmosphäre und wie diese sich in Zeiten des menschengemachten Klimawandels verändern. Ein PSI-Projekt zu Atmosphärenchemie ist mit an Bord.

Weitere Informationen:
<http://psi.ch/de/node/30512>

Rund **13** Monate soll die Polarexpedition namens «Mosaic» dauern. Davon wird 5 Monate lang Polarnacht herrschen, die Sonne also nicht über den Horizont hinaus kommen.

Etwa **7** Kilometer pro Tag wird das Packeis das Expeditionsschiff «Polarstern» mit sich vorwärts durch die eisige Finsternis tragen.

Auf bis zu **-45** Grad Celsius wird die Temperatur voraussichtlich fallen.





2 Metastasierung von Tumoren verhindern

Die Bildung von Metastasen ist die häufigste Todesursache bei Krebs. Sie breiten sich im Körper unter anderem über das Lymphgefäßsystem aus. Eine wichtige Rolle bei der Wanderung von Krebszellen spielt ein Membranprotein, der Chemokinrezeptor 7. Mithilfe der Röntgenkristallografie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS konnten Forschende des PSI die genaue Struktur dieses Rezeptors entschlüsseln. Mit diesen Informationen konnten sie ein passendes Molekül identifizieren, das den Rezeptor blockiert und somit verhindert, dass ein Signal in die Zelle weitergegeben wird, welches die Bewegung der Zelle steuert. Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts mit dem Pharmaunternehmen F. Hoffmann-La Roche AG konnten die Forschenden somit den Grundstein für die Entwicklung eines Medikaments legen, das die Metastasierung bestimmter häufiger Krebsarten wie Darmkrebs verhindern könnte.

Weitere Informationen:
<http://psi.ch/de/node/30041>

3 Intelligente Mikroroboter

Forschende des Paul Scherrer Instituts PSI und der ETH Zürich haben eine Mikromaschine entwickelt, die unterschiedliche Aktionen ausführen kann. Dafür werden zuerst Nanomagnete in Bauteilen des Mikroroboters magnetisch programmiert und die verschiedenen Bewegungen dann durch Magnetfelder gesteuert. Dieses neuartige Konzept ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu Mikro- und Nanorobotern, die nicht nur Informationen für eine einzelne bestimmte Aktion speichern, sondern immer wieder neu programmiert werden können, um verschiedene Aufgaben zu erfüllen. Einer der Roboter hat beispielsweise die Gestalt eines Vogels. Diesen kann man mittels verschiedener Magnetfelder zunächst flattern, anschliessend zur Seite gleiten und dann wieder flattern lassen. Solche nur wenige Mikrometer messende Maschinen könnten beispielsweise im menschlichen Körper eingesetzt werden, um kleine Operationen durchzuführen.

Weitere Informationen:
<http://psi.ch/de/node/30590>



Mobil am PSI

GALERIE

Das Paul Scherrer Institut PSI erstreckt sich zwischen Villigen und Würenlingen links und rechts der Aare über eine Fläche von rund 350 000 Quadratmetern. So gross wie ein Dorf und doch eigentlich eine einzige Fussgängerzone. Wie man trotzdem rasch von A nach B kommt, zeigen wir hier.

Text: Christian Heid



Trottinett

Wenn nicht zu Fuss, dann mit dem Velo oder gerne auch schwungvoll mit dem Trottinett überwinden PSI-Mitarbeitende, wie die Forscherin Federica Marone, weitere Distanzen. So auch in den Gebäuden der Forschungsanlagen, zum Beispiel der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS.

Leistung: fast 1 PS

Traglast: 100 kg (inkl. Korbzuladung: 3kg)

Gewicht: 8,5 kg

Antrieb: Schuhwerk



E-Auto

Bequemer kommt man mit dem Elektro-Auto voran. Mirjam van Daalen, Stabsleiterin Photonenforschung, entfernt noch das Ladekabel und transportiert dann flusterleise schwere Materialien über das Gelände.

Länge x Breite x Höhe:

3,48 x 1,48 x 1,61 m

Nutzlast (inkl. Fahrer): 385 kg

Energieeffizienz-Kategorie: A

CO₂-Ausstoss: 0 g/km





Hebebühne

Hoch hinaus kommt man auch mit dem Hubmobil. In der Grossforschungsanlage SINQ, der Spallations-Neutronenquelle, kann Roger Schwarz vom Hallendienst aus dem Korb heraus das Poster flugs im Rahmen befestigen.

- Arbeitshöhe: 10 m
- Reichweite: 3,5 m
- Eigengewicht: 2760 kg
- Korblast: bis 230 kg



Buggy

Ein Herkules unter den Fahrzeugen ist der Elektroschlepper, der im SwissFEL zum Einsatz kommt. Er erlaubt es dem Arealkoordinator Lars Binder, grosse Lasten an die richtigen Stellen im 740 Meter langen Gebäude zu platzieren.

Zuglast: bis 20'000 kg

Ladezeit: rund 13 h

Geschwindigkeit mit Last: 7 km/h

Fahrersitz: ergonomischer Komfortsitz

Der Blick aufs Ganze

Am PSI entwickelte Alexander Röder unter anderem Modelle für Ökobilanzen. Heute führt er das Institut Bauen und Umwelt (IBU) in Berlin – und nutzt sein Wissen, um dabei zu helfen, Gebäude ökologisch verträglicher zu bauen.

Text: Joel Bedetti

Der Blick von Alexander Röders neuem Büro geht raus auf den Berliner Fernsehturm und den S-Bahnhof Alexanderplatz. «Berlin ist toll, aber die Winter werden wohl deutlich kälter als in Madrid», meint der 48-jährige Physiker. Das ist der einzige Wermutstropfen des Umzugs von Spanien in die deutsche Hauptstadt im vergangenen Frühjahr. Frau und Kind haben sich eingelebt, und Röder selbst geht einer Arbeit nach, die sein Flair für Zahlenmodelle und seinen Sinn für Ökologie zusammenbringt.

Das Institut Bauen und Umwelt IBU verifiziert und veröffentlicht Deklarationen für Baumaterialien und stellt damit die Datengrundlagen für die Ökobilanz eines Gebäudes bereit. «Ich merke heute mehr denn je, wie mich mein Studium geprägt hat», sagt Röder. «Physiker gehen Probleme an, indem sie diese mithilfe von Modellen abstrahieren.» Damit liessen sich gerade in einem emotionalen Thema wie dem Umweltschutz Trugschlüsse vermeiden. Notwendig dafür sei eine möglichst breite Zahlenbasis.

Das Entwickeln von Modellen und den Umgang mit grossen Datenmengen lernte Röder bereits während seines Studiums an verschiedenen Universitäten und seines Doktorats am Paul Scherrer Institut. Eigentlich hatte er sich für Maschinenbau entschieden, aber auf Anraten eines Verwandten wählte er als Studienfach dann doch Physik, weil diese ein breiteres Fundament für viele verschiedene Anwendungen und Berufe liefere.

Röder beherzigte den Rat und absolvierte an der Universität Freiburg im Breisgau das Grundstudium und wechselte 1994 fürs Hauptstudium an die ETH Zürich. Noch heute erinnert er sich an die Begrüssung eines Professors zur Quantenmechanik-

Vorlesung: «Sie werden stöhnen, aber unser Ziel ist, dass Sie dereinst mit Absolventen der Ivy League auf Augenhöhe diskutieren.» Im akademischen Jargon steht «Ivy League» für acht Elitehochschulen in den USA, darunter die Universitäten von Harvard, Princeton und Yale.

Energietechnik statt Quantenmechanik

Packender fand Röder aber die Vorlesung des damaligen Direktors der Aargauer Elektrizitätswerke über Energietechnik. «Dabei verknüpfte sich Physik mit ökologischen Fragen», erinnert er sich. «Unsere Eltern haben uns dazu erzogen, die Schöpfung zu achten, deshalb interessiere ich mich schon immer für das Thema Ökologie», sagt Röder. Der Dozent aus dem Aargau war es denn auch, der ihm eine Liste mit möglichen Themen für eine Diplomarbeit aus einer Forschungseinrichtung seines Kantons – dem Paul Scherrer Institut – präsentierte, in der sich eine passende Aufgabe fand.

Röder erhielt also für vier Monate einen Arbeitsplatz im Labor für Energiesystemanalysen am PSI. Sein Thema: «sauberer» Wasserstoff. Die Ökobilanz dieses Energieträgers fällt nämlich unterschiedlich aus, je nachdem, wie er produziert wird. «Bei der Gewinnung aus Erdgas sieht diese beispielsweise deutlich schlechter aus als bei der Elektrolyse, also der Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff mithilfe von Strom aus erneuerbaren Energien», weiss Röder.

Die Atmosphäre am PSI, insbesondere die gegenseitige Inspiration durch die vielen engagierten Forschenden, gefiel dem Physiker schliesslich so sehr, dass er 1997 auch für seine Promotion in





**«Ich merke heute mehr
denn je, wie mich mein Studium
geprägt hat.»**

Alexander Röder, Geschäftsführer des Instituts Bauen
und Umwelt in Berlin

Villigen blieb. Weil das PSI zusammen mit Volkswagen eine Brennstoffzelle für ein wasserstoffbetriebenes Auto entwickelte, sollte Röder dessen Ökobilanz im Vergleich mit anderen Fahrzeugen, etwa mit dem klassischen Benzinmotor, vergleichen. «Es existierte bereits ein Computermodell, mit dem man den Kraftstoffverbrauch verschiedener Fahrzeuge simulieren konnte», erzählt Röder. Das bildete aber nur den Betrieb des Fahrzeugs und nicht seinen ganzen Lebenszyklus ab. Röder sollte deshalb die Emissionen von der Produktion bis zur Entsorgung in das Modell integrieren. Das beinhaltet auch die Kraftstoffproduktion, das Thema von Röders Diplomarbeit: «Zwar stösst eine Brennstoffzelle selbst kaum Schadstoffe aus», erklärt er. «Aber wenn der Wasserstoff für ihren Betrieb eben aus Erdgas gewonnen wurde, ist die Gesamtbilanz dann doch negativ.»

Job beim mexikanischen Zementriesen

Neben dem Programmieren mehrerer computergestützter Modelle bedeutete das für Röder: Recherche. «Ende der 90er waren die wenigsten Daten digitalisiert», erinnert er sich. «Ich durchforstete Bibliotheken und ganze Jahrgänge technischer Zeitschriften, um dann nach stundenlanger Arbeit ein paar neue Kennzahlen für die Herstellung eines bestimmten Energieträgers zu haben.» Die Mühe wurde 2001 mit dem Dokortitel belohnt.

Nach seiner Dissertation arbeitete Röder projektgebunden am PSI weiter, berechnete etwa für das Bundesamt für Energie BFE eine Prognose des europäischen Strommixes bis 2050, indem er die Entwicklung neuer Technologien wie Fotovoltaik und Windkraft extrapolierte. Dann erhielt er über einen Headhunter eine attraktive Offerte: Der mexikanische Zementriese Cemex suchte einen Energiespezialisten für seinen Forschungsstandort nahe Biel im Kanton Bern.

Anfang der 2000er-Jahre drang das Thema Ökologie von Forschungsinstituten in die Wirtschaft und Röders Expertise war deshalb sehr gefragt. Er half Cemex bei der Planung eines firmeneigenen Kraftwerks mit 167 Windturbinen in Südmexiko und erreichte dafür die Zulassung, um innerhalb der UN-Klimarahmenkonvention UNFCCC Emissionszertifikate zu generieren. Diese Zertifikate kaufen andere Unternehmen und kompensieren damit den CO₂-Ausstoss ihrer eigenen Anlagen.

Durch seine Arbeit, für die er oft auch in den Cemex-Hauptsitz in Monterrey reiste, lernte Röder 2005 seine heutige Frau, eine Panamaerin, kennen. Als er drei Jahre später zum «Manager Climate Change» befördert wurde, zog Röder mit seiner Frau

nach Madrid, wo Cemex das Hauptquartier unter anderem für Europa und Asien hatte.

Produktdaten aufbereiten

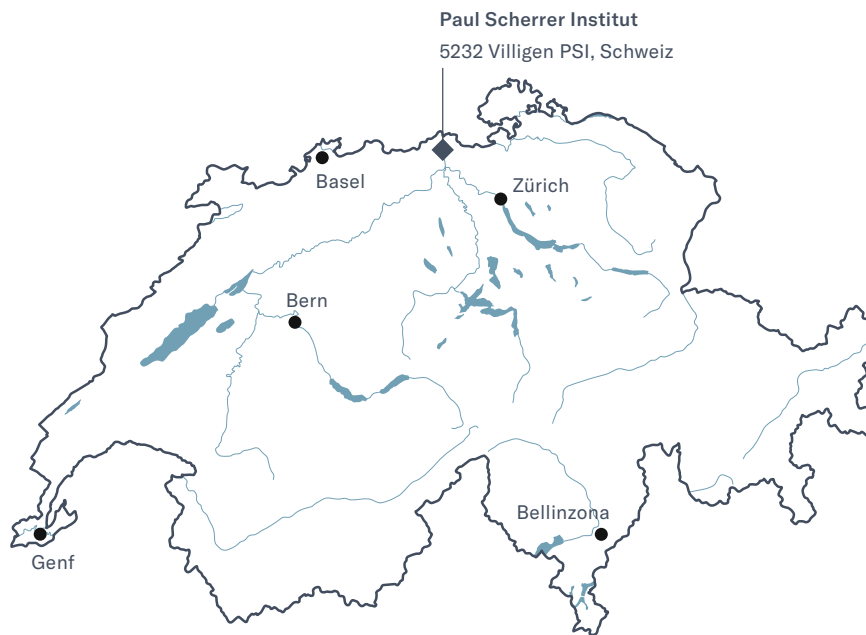
In dieser Zeit trieb ihn sein Engagement für ökologische Themen dazu, neben seinem Job federführend den Concrete Sustainability Council aufzubauen, einen internationalen Verband, der Betonherstellern einen verantwortungsvollen Umgang mit Menschen und der Umwelt zertifiziert. Da war es ein nahe liegender Schritt, sich im Herbst 2018 um die Position des Geschäftsführers am Institut Bauen und Umwelt zu bewerben. Röder erhielt den Zuschlag.

Heute führt er am IBU ein Team aus acht Mitarbeitenden, hält Vorträge und betreut die Mitglieder, vor allem Hersteller aus der Baubranche. Diesen stellt das IBU unter anderem die Grundlagen zur Verfügung, mit denen die Umweltauswirkungen einzelner Produkte kalkuliert werden. Bauherren wiederum können auf diese aufbereiteten Produktdaten zurückgreifen und damit die Ökobilanz ihres Gebäudes berechnen. «Die Daten eines Produkts sind allerdings noch keine Bewertung», betont Röder. Erst über den ganzen Lebenszyklus eines Gebäudes – von der Konstruktion bis zum Rückbau – sehe man, wie ökologisch ein Baustoff sei.

Röder erklärt das anhand des Beispiels Dämmstoffe. «Betrachtet man nur das Errichten eines Hauses, müsste man komplett darauf verzichten», erklärt er – die Produktion des Materials verschlinge nämlich auch Energie. Berücksichtige man hingegen nur den Gebäudebetrieb, müsste man das Haus damit extrem dick einhüllen – schliesslich spart Dämmstoff Heizenergie. «Nur das Zusammenspiel aller Elemente im Rechenmodell ergibt letztlich ein schlüssiges Bild davon, welche Menge Dämmstoff sinnvoll ist», sagt Alexander Röder. Dieses Denken, fügt er an, habe er am PSI gelernt. Es ist die Perspektive, die der Physiker noch lieber mag als die Aussicht auf den Berliner Fernsehturm: der Blick aufs Ganze. ♦

Im Aargau zu Hause
forschen wir für die Schweiz
in weltweiter Zusammenarbeit.





4

schweizweit einzigartige
Grossforschungsanlagen

800

Fachartikel jährlich, die auf
Experimenten an den
Grossforschungsanlagen beruhen

5000

Besuche jährlich von Wissen-
schaftlern aus der ganzen Welt, die
an diesen Grossforschungs-
anlagen Experimente durchführen

5232 ist die Adresse für Forschung an Grossforschungsanlagen in der Schweiz. Denn das Paul Scherrer Institut PSI hat eine eigene Postleitzahl. Nicht unge-rechtfertigt, finden wir, bei einem Insti-tut, das sich über 352 643 Quadratmeter erstreckt, eine eigene Brücke über die Aare besitzt und mit 2000 Beschäftigten mehr Mitarbeitende hat als so manches Dorf in der Umgebung Einwohner.

Das PSI liegt im Kanton Aargau auf beiden Seiten der Aare zwischen den Gemeinden Villigen und Würenlingen. Es ist ein Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften des Bun-des und gehört zum Eidgenössischen Technischen Hochschul-Bereich (ETH-Bereich), dem auch die ETH Zürich und die ETH Lausanne angehören sowie die Forschungsinstitute Eawag, Empa und WSL. Wir betreiben Grundlagen- und angewandte Forschung und arbeiten so an nachhaltigen Lösungen für zentrale Fragen aus Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft.

Komplexe Grossforschungsanlagen

Von der Schweizerischen Eidgenossen-schaft haben wir den Auftrag erhalten, komplexe Grossforschungsanlagen zu entwickeln, zu bauen und zu betreiben. Unsere Anlagen sind in der Schweiz ein-zigartig, manche Geräte gibt es auch weltweit nur am PSI.

Zahlreiche Forschende, die auf den un-terschiedlichsten Fachgebieten arbeiten, können durch Experimente an solchen Grossforschungsanlagen wesentliche Erkenntnisse für ihre Arbeit gewinnen. Gleichzeitig sind Bau und Betrieb derar-tiger Anlagen mit einem so grossen Auf-wand verbunden, dass Forschergruppen an den Hochschulen und in der Industrie an der eigenen Einrichtung solche Mess-geräte nicht vorfinden werden. Deshalb stehen unsere Anlagen allen Forschenden offen.

Um Messzeit für Experimente zu er-halten, müssen sich die Forschenden aus dem In- und Ausland jedoch beim PSI bewerben. Mit Experten aus aller Welt besetzte Auswahlkomitees bewerten diese Anträge auf ihre wissenschaft-liche Qualität hin und empfehlen dem PSI, wer tatsächlich Messzeit bekom-men soll. Denn obwohl es rund 40 Mess-plätze gibt, an denen gleichzeitig Ex-perimente durchgeführt werden können, reicht die Zeit nie für alle eingegan-genen Bewerbungen. Rund die Hälfte bis zwei Drittel der Anträge müssen abgelehnt werden.

Etwa 1900 Experimente werden an den Grossforschungsanlagen des PSI jährlich durchgeführt. Die Messzeit ist am PSI für alle akademischen Forschenden kostenlos. Nutzer aus der Industrie können für ihre proprietäre Forschung in einem besonderen Verfahren Messzeit kaufen und die Anlagen des PSI für ihre

angewandte Forschung verwenden. Das PSI bietet dafür spezielle Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen an.

Insgesamt unterhält das PSI vier Grossforschungsanlagen, an denen man in Materialien, Biomoleküle oder technische Geräte blicken kann, um die Vorgänge in deren Innerem zu erkunden. Dort «leuchten» die Forschenden bei ihren Experimenten mit unterschiedlichen Strahlen in die Proben, die sie untersuchen wollen. Dafür stehen Strahlen von Teilchen – Neutronen bzw. Myonen – oder intensivem Röntgenlicht – Synchrotronlicht bzw. Röntgenlaserlicht – zur Verfügung. Mit den verschiedenen Strahlenarten lässt sich am PSI eine grosse Vielfalt an Materialeigenschaften erforschen. Der grosse Aufwand hinter den Anlagen ergibt sich vor allem daraus, dass man grosse Beschleuniger braucht, um die verschiedenen Strahlen zu erzeugen.

Drei eigene Schwerpunkte

Das PSI ist aber nicht nur Dienstleister für externe Forschende, sondern hat auch ein ehrgeiziges eigenes Forschungsprogramm. Die von PSI-Forschenden gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, dass wir die Welt um uns besser verstehen, und schaffen die Grundlagen für die Entwicklung neuartiger Geräte und medizinischer Behandlungsverfahren.

Gleichzeitig ist die eigene Forschung eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg des Nutzer-Programms an den Grossanlagen. Denn nur Forschende, die selbst an den aktuellen Entwicklungen der Wissenschaft beteiligt sind, können die externen Nutzer bei ihrer Arbeit unterstützen und die Anlagen so weiterentwickeln, dass diese auch in Zukunft den Bedürfnissen der aktuellen Forschung entsprechen.

Unsere eigene Forschung konzentriert sich auf drei Schwerpunkte. Im Schwerpunkt Materie und Material untersuchen wir den inneren Aufbau verschiedener Stoffe. Die Ergebnisse helfen, Vorgänge in der Natur besser zu verstehen und liefern die Grundlagen für neue Materialien in technischen und medizinischen Anwendungen.

Ziel der Arbeiten im Schwerpunkt Energie und Umwelt ist die Entwicklung neuer Technologien für eine nachhaltige

und sichere Energieversorgung sowie für eine saubere Umwelt.

Im Schwerpunkt Mensch und Gesundheit suchen Forschende nach den Ursachen von Krankheiten und nach möglichen Behandlungsmethoden. Im Rahmen der Grundlagenforschung klären sie allgemein Vorgänge in lebenden Organismen auf. Zudem betreiben wir in der Schweiz die einzige Anlage zur Behandlung von spezifischen Krebserkrankungen mit Protonen. Dieses besondere Verfahren macht es möglich, Tumore gezielt zu zerstören und dabei das umliegende Gewebe weitgehend unbeschädigt zu lassen.

Die Köpfe hinter den Maschinen

Die Arbeit an den Grossforschungsanlagen des PSI ist anspruchsvoll. Unsere Forscherinnen, Ingenieure und Berufsleute sind hoch spezialisierte Experten. Uns ist es wichtig, dieses Wissen zu erhalten. Daher sollen unsere Mitarbeitenden ihr Wissen an junge Menschen weitergeben, die es dann in verschiedenen beruflichen Positionen – nicht nur am PSI – einsetzen. Deshalb sind etwa ein Viertel unserer Mitarbeitenden Lernende, Doktorierende oder Postdoktorierende.

IMPRESSUM

5232 – Das Magazin des Paul Scherrer Instituts

Erscheint dreimal jährlich.
Ausgabe 1/2020 (Januar 2020)
ISSN 2504-2262

Herausgeber
Paul Scherrer Institut
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI
Telefon +41 56 310 21 11
www.psi.ch

Redaktionsteam
Dagmar Baroke, Monika Blétry,
Monika Gimmel, Christian Heid,
Dr. Laura Hennemann,
Sebastian Jutzi (Ltg.),
Dr. Brigitte Osterath

Design und Art Direction
Studio HübnerBraun

Fotos
Scanderbeg Sauer Photography, ausser:
Cover, Seiten 2, 3, 11, 12, 17, 20
(Hintergrundbilder): Adobe Stock;
Seite 14: Mauritius Images;
Seite 21, 38: Paul Scherrer Institut/
Markus Fischer;
Seite 27: Paul Scherrer Institut;
Seiten 37–39: Thomas Meyer;
Seite 41: Paul Scherrer Institut/
Frank Reiser.

Grafiken
Studio HübnerBraun, ausser:
Cover, Seiten 2, 3, 11–17, 18, 19:
Stefan Schulze-Henrichs;
Seiten 6, 7: Daniela Leitner;
Seiten 28, 29: Alfred Wegener
Institut/Martin Künsting (CC-BY 4.0).

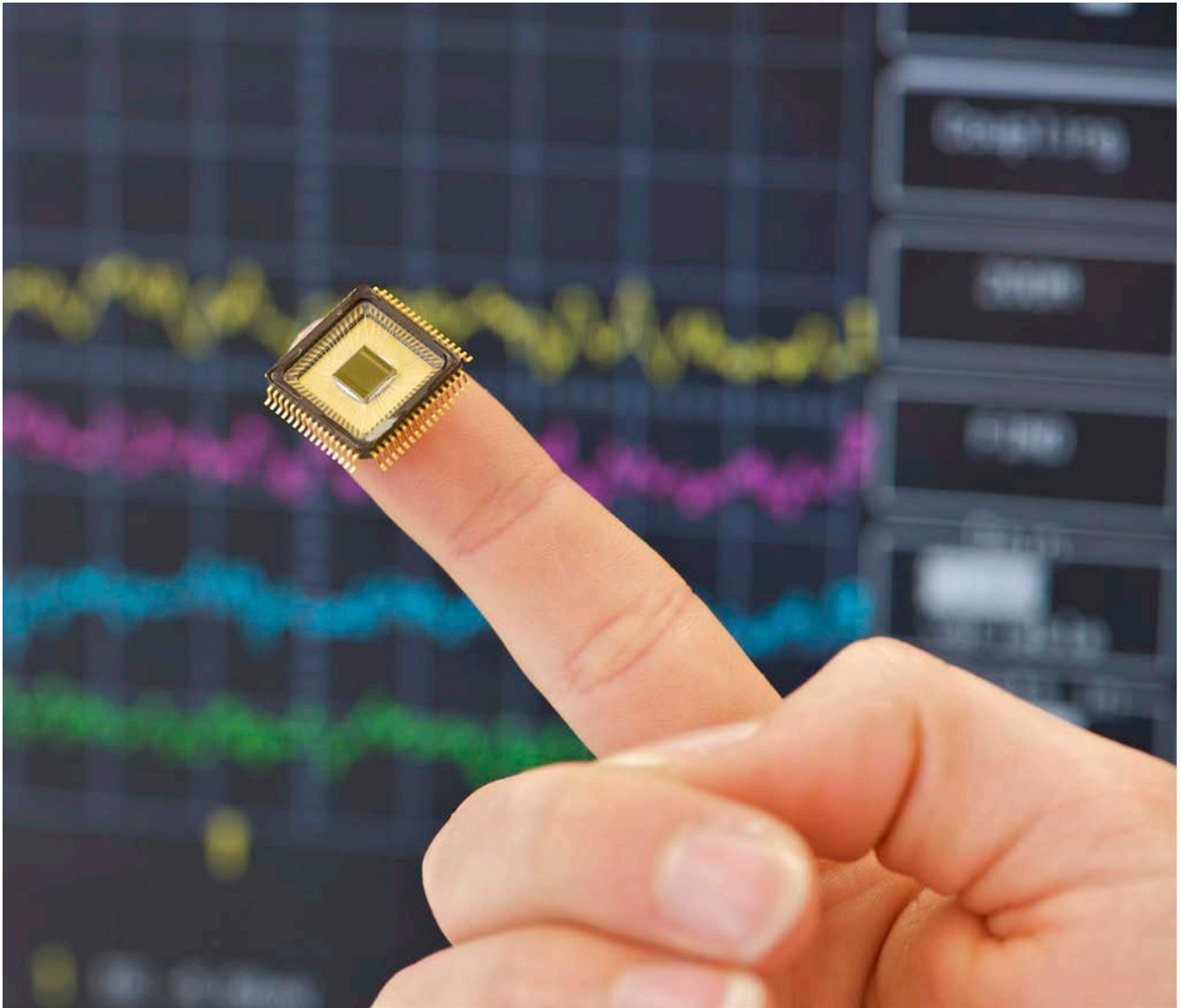
Mehr über das PSI lesen Sie auf
www.psi.ch

Im Internet finden Sie 5232 unter
www.psi.ch/5232/magazin-5232

Sie können das Magazin kostenlos abonnieren unter
www.psi.ch/5232/5232-abonnieren

5232 ist auch auf Französisch erhältlich
www.psi.ch/5232/le-magazine-5232

PAUL SCHERRER INSTITUT

Das erwartet Sie in der nächsten Ausgabe

Patenter Einfallsreichtum

Forschende des PSI entlocken nicht nur der Natur ihre Geheimnisse, sie schaffen damit auch ganz praktischen Nutzen für die Schweiz. Das belegen unter anderem die mehr als 100 Patente, die auf Erfindungen aus allen Forschungsbereichen des PSI zurückgehen, wie neue Behandlungsverfahren für die Medizin, umweltfreundliche Technik oder hochempfindliche Detektoren für die Spitzenforschung. Doch wie lange dauert es eigentlich von der ersten Idee bis zu einem Patent? Wofür ist ein Patent überhaupt gut? Wir stellen einfallsreiche Forschende mit ihren patentierten Erfindungen vor und zeigen, wie ein Patent zum Sprungbrett für neue Produkte werden kann.



Paul Scherrer Institut
Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI, Schweiz
www.psi.ch | +41 56 310 21 11