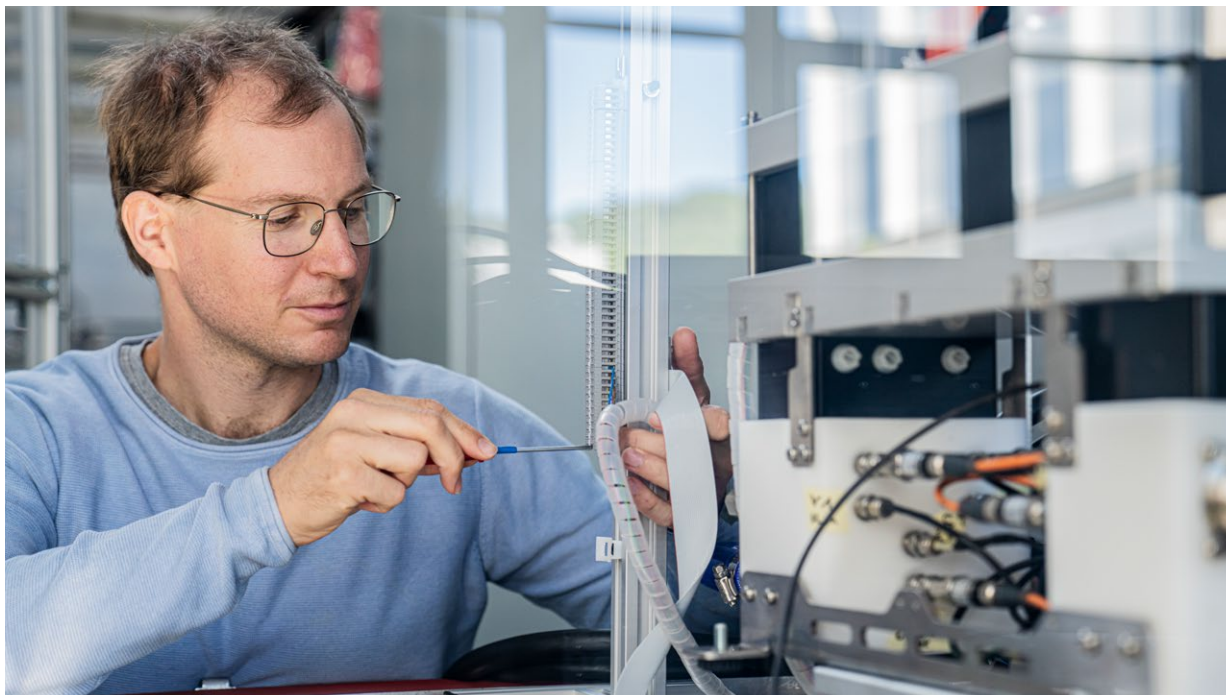


PAUL SCHERRER INSTITUT



# Energie und Umwelt

Forschung am Paul Scherrer Institut

Die Versuchsplattform ESI – kurz für Energy System Integration – des Paul Scherrer Instituts testet erneuerbare Energiealternativen in ihrem komplexen Zusammenspiel miteinander.



# Inhalt

4	Energie – Treibstoff des Lebens	19	Gut und lange geladen
6	«Wir arbeiten beide im Kontext der Energiestrategie 2050»	20	Die Atmosphäre im Blick
		20	Hoch oben
		22	Dicke Luft in Delhi
8	Eine Plattform – viele Energiesysteme	22	Vom Grossen zum Kleinen
		23	Umwelt mobil
10	Die Energy-System-Integration-Plattform ESI	24	Der Kern der Dinge
		24	Wie ein Schwamm für Wasserstoff
		25	Simulationen machen Kernanlagen sicherer
12	Energie in Gas speichern	25	Mit Sicherheit eingeschlossen
12	Gewinnung von Wasserstoff	25	Eine Zukunftsfrage
13	Methanisierung		
13	Weissbuch Power-to-X		
14	Wertvoller Wasserstoff	26	Hotlabor: Wissen aus den heissen Zellen
15	Saubere Energie dank Brennstoffzelle	28	Energiesysteme: Der Blick für das Ganze
		28	Energiemix der Zukunft
		29	Mobilität von morgen
16	Die Möglichmacher	31	Das PSI in Kürze
17	Saubere Abgase dank Schwammstruktur	31	Impressum
17	Weg vom «schmutzigen Diesel»	31	Kontakte
17	Wasser spalten		
18	Grüne Treibstoffe für den Flugverkehr		
18	Molekulare Helfer		



# Energie – Treibstoff des Lebens

**Wie man Energie nachhaltig gewinnt und speichert, ist eine entscheidende Zukunftsfrage für jede Gesellschaft. Die Forschung des PSI hilft dabei, heute Antworten auf diese Fragen von morgen zu finden.**

Jedes Lebewesen benötigt Energie in Form von Nahrung. Der Mensch konsumiert über Nahrung hinaus aber noch weitaus grössere Mengen an Energie: in privaten Haushalten, der Wirtschaft und für die Mobilität. Würde man den weltweiten Primärenergiebedarf ausschliesslich mit Erdöl decken, dann bräuchte man dafür mehr als 135 Billionen Tonnen. Die Schweiz benötigte davon über 26 Millionen Tonnen oder knapp 0,2 Prozent.

Energie tritt in unterschiedlichen Formen auf, zum Beispiel:

- als elektrische Energie in Form von Strom
- als thermische Energie in Form von Wärme
- als kinetische Energie in Form von Bewegung

Die verschiedenen Energieformen lassen sich ineinander umwandeln. PSI-Forschende arbeiten daran, möglichst effiziente Verfahren zu entwickeln, um Energie zu erzeugen, zu speichern und umzuwandeln.

Dabei konzentrieren sie sich auf folgende Bereiche:

- Erforschung nachhaltiger Energiequellen, zum Beispiel Biomasse
- Effiziente Umwandlung von Energieträgern zur Speicherung und Wiedergewinnung von Energie für Wärme, Strom, Mobilität

- Sichere Nutzung der Kernenergie
- Sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle
- Ganzheitliche Bewertung von Energiesystemen
- Auswirkungen von Energienutzung auf Klima und Atmosphäre

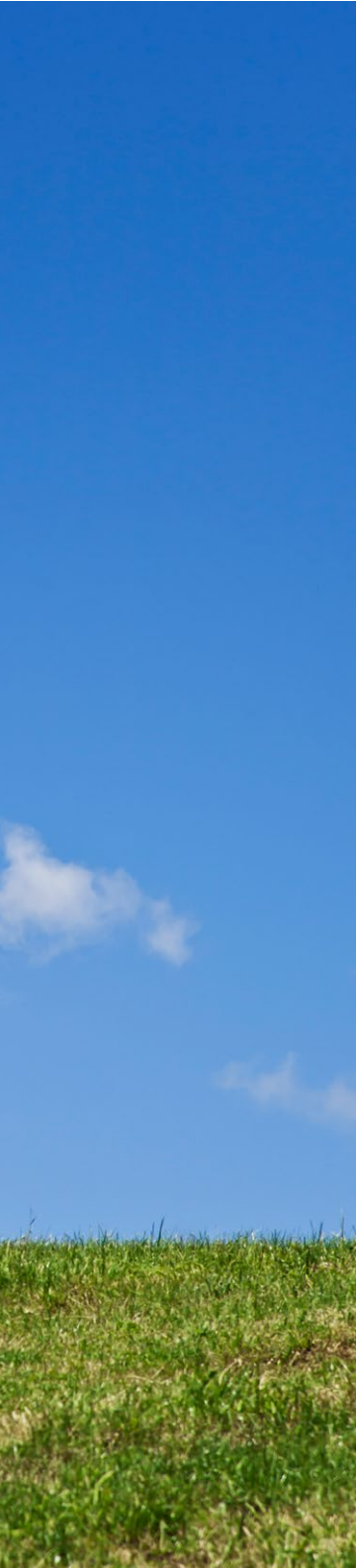
Ziel der PSI-Forschenden ist es, bei Energiegewinnung, Energienutzung, Energiespeicherung und bei deren Umweltauswirkungen eine möglichst hohe Effizienz bei gleichzeitiger Schonung der Ressourcen zu erreichen. Dazu ist es notwendig, die eingesetzten Materialien und ihr Verhalten unter den verschiedenen Einsatzbedingungen genau zu kennen.

Die Forschungsinfrastruktur des PSI bietet dafür ideale Voraussetzungen. Die Grossforschungseinrichtungen wie die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS, der Freie-Elektronen-Röntgenlaser SwissFEL, die Schweizer Spallations-Neutronenquelle SINQ, die Schweizer Forschungsinfrastruktur für Teilchenphysik CHRISP und die Schweizer Myonenquelle  $S\mu S$  erlauben tiefe Einblicke in die aller kleinsten Strukturen von Materialien. Auch die Energy-System-Integration-Plattform, kurz ESI, das Hotlabor und neue leistungsfähige Grossrechner helfen den Forschenden des PSI dabei, entscheidende Fortschritte bei der Sicherung einer nachhaltigen Energieversorgung zu erzielen. Neben der physikalischen und chemischen Erforschung von Stoffen und Verfahren hat die Modellierung von neuen Materialien und die Simulation von Energiesystemen grosse Bedeutung.





Energie nachhaltig gewinnen, umwandeln  
und speichern – ein Forschungsziel für heute  
und morgen



# «Wir arbeiten beide im Kontext der Energiestrategie 2050»



## Zur Person

**Andreas Pautz** (links, Jahrgang 1969) leitet seit 2016 den Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES) am PSI und ist Professor für Kerntechnik an der EPFL in Lausanne. Er studierte Physik an den Universitäten Hannover und Manchester und promovierte in Kerntechnik an der TU München.

**Thomas Justus Schmidt** (Jahrgang 1970) ist seit Januar 2018 Leiter des Forschungsbereichs Energie und Umwelt (ENE) des PSI. Er studierte Chemie an der Universität Ulm, wo er auf dem Gebiet der Elektrokatalyse von Brennstoffzellenreaktionen promovierte. Er ist zudem Professor für Elektrochemie an der ETH Zürich.

**Herr Schmidt, Sie leiten am PSI den Forschungsbereich «Energie und Umwelt», Herr Pautz, Sie stehen dem Bereich «Nukleare Energie und Sicherheit» vor. Was unterscheidet Ihre Forschung, was hat sie gemein?**

*Schmidt:* Der Bereich «Energie und Umwelt» erforscht die Gewinnung von Energie aus erneuerbaren Quellen, deren Umwandlung, Speicherung und die Frage, welche Konsequenzen die Nutzung der Energie durch den Menschen auf Umwelt und Atmosphäre hat. Mit der Nuklearenergie beschäftigen wir uns hingegen nicht.

*Pautz:* Das ist unser Spezialgebiet. Gemeinsamkeit ist, dass wir beide immer im Kontext zur Energiestrategie 2050 der Schweiz arbeiten. Wir haben beide in dieser Übergangsphase wichtige Aufgaben zu erfüllen, der Bereich «Energie und Umwelt» auf der Seite der

Erneuerbaren und wir bei der Frage, wie man die Kernkraftwerke in der Schweiz sicher bis in die 2040er-Jahre – und möglicherweise sogar weit darüber hinaus – betreibt und wie man schliesslich die radioaktiven Abfälle entsorgt. Wir leisten unseren Beitrag dazu, dass das unter maximaler Sicherheit geschieht und wir unserer Nachwelt möglichst wenige Altlasten hinterlassen.

**Das heisst, Sie beide sehen sich nicht als Gegenspieler, indem Sie unterschiedliche Energiequellen vertreten?**

*Schmidt:* Nein. Wir arbeiten eng zusammen und müssen dabei die Zeitskalen im Auge behalten, wenn eine Technologie potenziell durch eine andere abgelöst wird.

*Pautz:* Richtig, es geht um das optimale Zusammenspiel mit dem Ziel, mögliche Umweltbelastungen weitest-

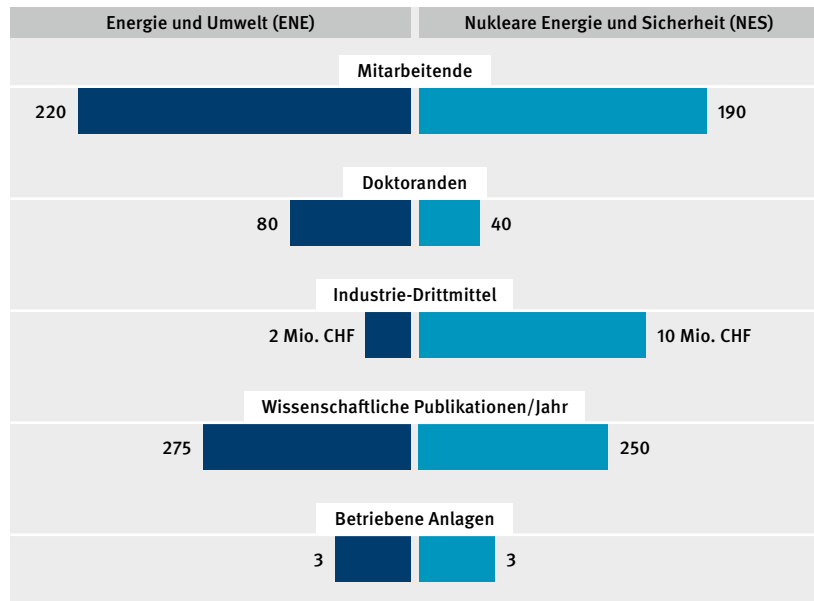
gehend zu vermeiden und Kosten zu minimieren. Wir sehen das aus wissenschaftlicher Perspektive; das ist keine politische Diskussion, die wir führen. Mit dem Beschluss, die Laufzeit der bestehenden Kernkraftwerke nicht zu begrenzen, sind diese zu einem Teil der Energiestrategie geworden. Es gibt in der Schweiz übrigens keinen anderen Forschungsstandort, an dem so viel Energieforschung betrieben wird wie am PSI, also mit so vielen Mitarbeitenden auf einem so engen räumlichen Umfeld.

**Arbeiten Sie auch an gemeinsamen Projekten?**

*Pautz:* Sicher, beispielsweise im Projekt SURE. Dabei untersuchen wir, wie wir in den nächsten Jahren eine sichere und resiliente Energieversorgung für die Schweiz aufbauen können.



## Die Forschungsbereiche im Vergleich



Das umfasst viel mehr als nur eine CO<sub>2</sub>-Minimierung, sondern auch Aspekte wie Versorgungssicherheit, Netzstabilität, Abwehr von externen und internen Gefahren.

*Schmidt:* Wir betreiben diese Forschung in einem gemeinsamen PSI-Labor, dem Labor für Energiesystemanalysen. Das ist spezialisiert auf solche ganzheitlichen Betrachtungen des kompletten Energiesystems. Transport, Industrie, Privathaushalte, Stromerzeugung, das fließt dort alles zusammen.

### Brauchen Diskussionen über die Energiewende und darüber, wie wir sie bewerkstelligen können, mehr wissenschaftliche Objektivität?

*Pautz:* Versachlichung der Energie-debatte würde extrem helfen. Man sollte einfach klug abwägen, angesichts der Tatsachen, die wir heute haben, beispielsweise bezüglich Klima oder Versorgungssicherheit. Es muss ein evaluierender Denkprozess zustande kommen.

*Schmidt:* Das zeigt auch, wie wichtig der holistische Ansatz ist, den wir am PSI verfolgen, um das Energiesystem als Ganzes zu verstehen. Dieser Ansatz wird nicht an vielen Orten auf der Welt verfolgt.

### Haben Sie Schwierigkeiten, in Ihrem Bereich Nachwuchs zu finden?

*Schmidt:* Nein. Es hilft, dass wir sehr international aufgestellt sind. In dem Bereich «Energie und Umwelt» arbeiten Menschen aus etwa 45 Nationen.

*Pautz:* Das kann ich auch für meinen Bereich bestätigen, auch wenn es tatsächlich immer weniger Schweize-

rinnen und Schweizer werden. Aber wir haben international einen sehr guten Ruf, und daher genug Nachfrage. Gemeinsam mit der EPF Lausanne und der ETH Zürich bieten wir zum Beispiel den Masterstudiengang Nuclear Engineering an. Den beginnen jedes Jahr zwischen 10 und 15 neue Studierende, aktuell sogar über 20. Das zeigt, dass Kernenergie international kein Auslaufmodell ist.

### Hören Sie oft den Vorwurf: «Die Schweiz will doch aus der Kernenergie aussteigen, warum forscht das PSI dann noch daran?»

*Pautz:* Kaum. Dass man Fachleute für mindestens die nächsten 25 Jahre benötigt, ist unbestritten, alleine schon für die Entsorgungsproblematik. Die Notwendigkeit, die nuklearen Kompetenzen in der Schweiz zu erhalten, wird auch politisch kaum noch in Frage gestellt. Die Schweiz soll in puncto Kerntechnik auch weiterhin international mitreden können und über tiefgehendes kerntechnisches Know-how verfügen.

### Was hat sich in den letzten Jahren in Ihrem Forschungsbereich verändert und was erwarten Sie für die Zukunft?

*Schmidt:* Wir haben unter anderem unsere Aktivitäten bei der Verbrennungsforschung reduziert. Das war zwar ein wichtiges Thema, ist aber nicht mehr zukunftsorientiert. Dafür haben wir andere Themen aufgenommen, etwa die Wasserstoffherzeugung. Wichtiger geworden ist auch die Frage, wie sich die Energienutzung auf unsere Umgebung auswirkt. Zum Beispiel: Welchen Einfluss haben Aerosole auf die menschliche Gesundheit?

*Pautz:* Bei uns steht der Langzeitbetrieb der Kernanlagen auf der Agenda sowie die Endlagerung und der Rückbau der Anlagen. Seit klar ist, dass die Schweiz aus der Kernenergie aussteigen wird, haben wir Aktivitäten eingestellt, die für Anlagenneubauten in der Schweiz nötig gewesen wären, zum Beispiel die Entwicklung von neuen Brennstoffen. Untersuchungen zu neuen Sicherheitssystemen beobachten wir nur noch am Rande. Was ich in Zukunft gerne vorantreiben würde, ist eine verstärkte Internationalisierung bei den Industrie- und Forschungs-k Kooperationen. Die internationale Ausstrahlung, die die Kernenergieforschung am PSI hat, wollen wir weiter ausspielen.



# Eine Plattform – viele Energiesysteme

Weltweit befinden sich die Energiesysteme im Umbau. Vermehrt wird dabei auf die sogenannten neuen erneuerbaren Energieträger gesetzt: Das sind Sonne, Wind und Biomasse. Auch in der Schweiz steigt ihr Anteil an der Energieversorgung und soll dies auch weiterhin tun. Um die Effizienz zu steigern, ist die Erforschung und Entwicklung neuer Materialien und Verfahren notwendig – sowohl bei der Gewinnung von Energie aus erneuerbaren Quellen als auch bei deren Verteilung und Nutzung.

Das PSI bietet mit seiner Energy-System-Integration-Plattform eine einmalige Kombination verschiedener Energiesysteme an einem Ort und dadurch exzellente Möglichkeiten, Verfahren zu erforschen, um Energie effizient zu gewinnen, zu speichern und umzuwandeln. Ziel ist es, in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus Forschung und Industrie verschiedene Varianten der Energiespeicherung (siehe auch Energie in Gas speichern, Seite 12f.) und der energieeffizienten Nutzung von Biomasse auf ihre technische und wirtschaftliche Machbarkeit hin zu untersuchen und weiterzuentwickeln.

So wurde mithilfe der ESI-Plattform ein Verfahren entwickelt, mit dem sich wesentlich mehr Methan aus Biomasse, zum Beispiel aus Bioabfällen von Haushalten, erzeugen lässt. Methan ist der Hauptbestandteil von herkömmlichem Erdgas und somit ein bewährter Energieträger. Üblicherweise entsteht Methan aus Bioabfällen durch mikrobielle Prozesse, durch sogenannte Vergärung. Dabei entwickeln sich aber auch grosse Mengen Kohlendioxid. Das Gemisch



Die ESI-Plattform erforscht, wie überschüssige erneuerbare Energie aus Wind und Sonne gespeichert und bei Bedarf wieder verfügbar gemacht werden kann. Die einzelnen Elemente der ESI-Plattform sind in Containern untergebracht, damit man sie flexibel vor Ort einsetzen kann.

aus beiden Gasen, das Rohbiogas, besteht zu 60 Prozent aus Methan und zu 40 Prozent aus Kohlendioxid. Letzteres wird in der Regel aufwendig vom Methan getrennt und nicht weiter verwertet.

Den Forschenden des PSI ist es gelungen, dieses Kohlendioxid durch Zugabe von Wasserstoff direkt in das Rohbiogas nun auch noch in Methan umzuwandeln. Dazu benötigen sie unter anderem sogenannte Katalysatoren – Substanzen, die die Umwandlung von einer chemischen Verbindung in eine andere erst möglich machen, sodass sich Wasserstoff und Kohlendioxid miteinander zu Methan verbinden (siehe:

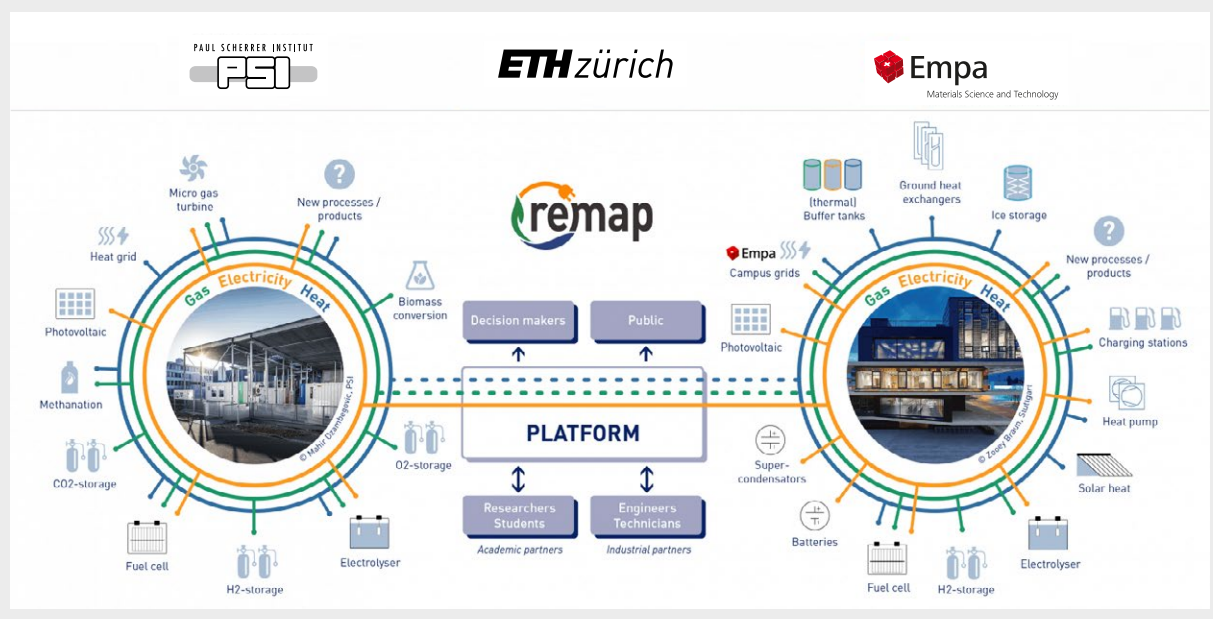
Die Möglichmacher, Seite 16f.). Das im Rohbiogas enthaltene Kohlendioxid wird nahezu vollständig zu Methan umgewandelt. Das resultierende Endprodukt ist so hochwertig und gleicht handelsüblichem Erdgas so sehr, dass es direkt in das Gasnetz eingespeist werden kann.

In einem Gemeinschaftsprojekt mit dem Zürcher Versorgungsunternehmen Energie 360° testeten die PSI-Forschenden ihre Entwicklung unter realen Bedingungen. Mit der mobilen Anlage Cosyma, in der die Umwandlung von Wasserstoff und Kohlendioxid zu Methan abläuft, zeigten sie, dass das neue Verfahren sich für den Einsatz im in-

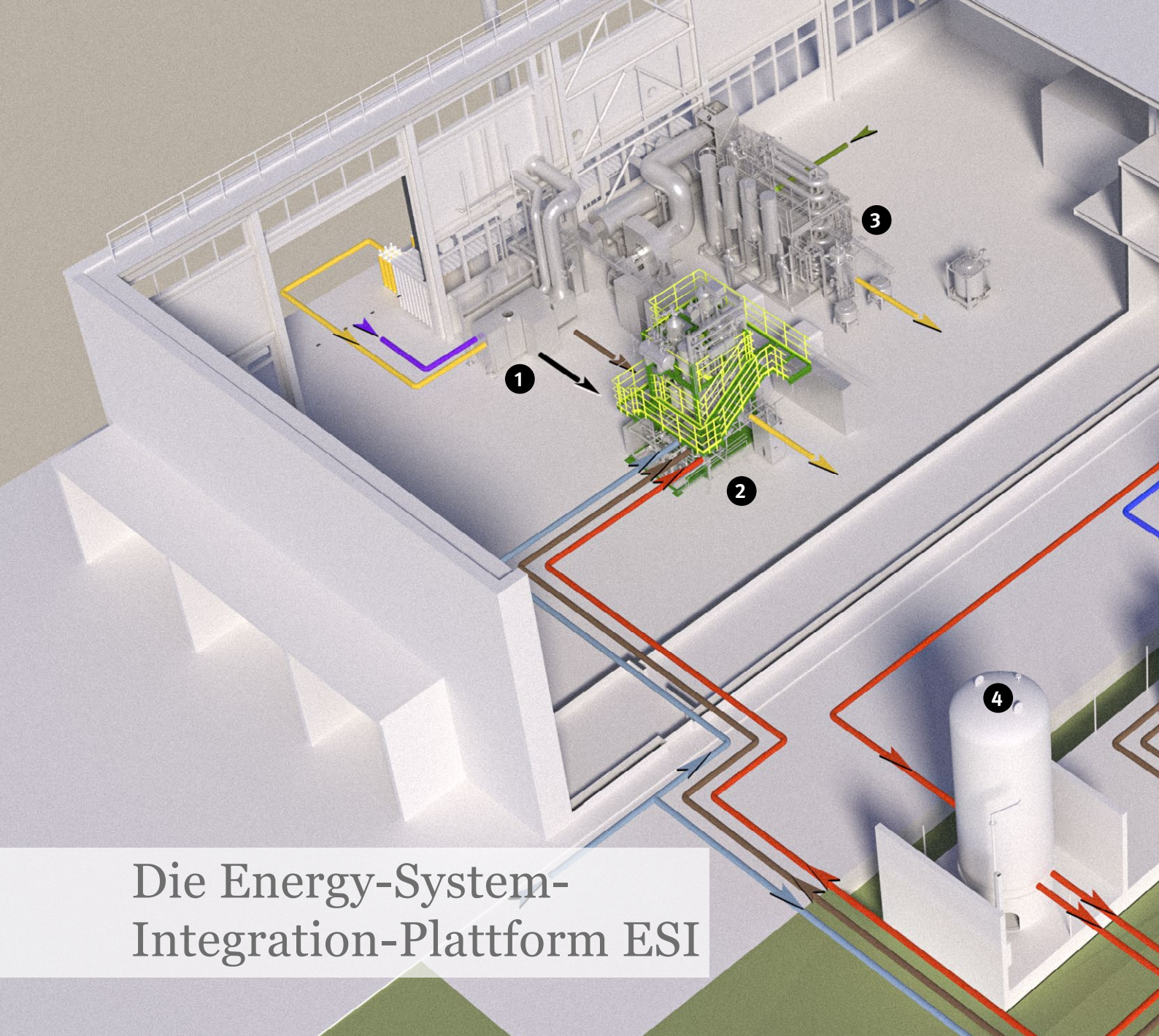
dustriellen Massstab sehr gut eignet. Das neue Verfahren zur effizienten Methangewinnung aus Biomasse beeindruckte selbst die Experten des Bundesamts für Energie. Sie zeichneten das PSI und Energie 360° für diesen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung mit dem Schweizer Energiepreis Watt d'Or aus und kürten beide gemeinsam zum Sieger in der Sparte Erneuerbare Energien.

## Vereint im Dienste der Energieforschung

Im Projekt ReMaP unter Federführung der ETH Zürich wird die ESI-Plattform mit den Demonstratoren der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) virtuell zusammengeschaltet. Gemeinsam mit den Plattformen NEST (zukünftige Gebäude), move (zukünftige Mobilität) und ehub (Energienetze auf Quartierebene) der Empa bietet die ESI-Plattform eine einmalige Versuchsanordnung für Forschung und Industrie, um das Wissen und die technischen Grundlagen für die Energiesysteme der Zukunft zu entwickeln.







# Die Energy-System-Integration-Plattform ESI

## 1 Minigasturbine

Die Gasturbine im Miniformat wandelt Methan in Strom und Wärme um. Das ermöglicht es, Strom zu gewinnen, wenn der Wind gerade nicht weht und die Sonne gerade nicht scheint. An der Minigasturbine untersuchen die Forschenden, wie viel Wasserstoff sie dem Methan beisetzen können, damit die Umwandlung noch sicher und effizient geschieht. Denn Wasserstoff lässt sich leicht gewinnen, verbrennt schnell und könnte dabei helfen, auf schnelle Laständerungen zu reagieren.

## 2 GanyMeth

In diesem Reaktor entsteht Methan aus Wasserstoff und Kohlendioxid. Das Produkt wird auch Synthetic Natural Gas (SNG) genannt. Die Reaktion findet in einem Wirbelschichtreaktor mithilfe von Katalysatoren statt (siehe: Die Möglichmacher, Seite 16f.). In dem Reaktor werden Feststoffpartikel, bestückt mit einem Katalysator, durch eine aufwärtsgerichtete Gasströmung ständig durcheinandergewirbelt, sodass eine gute Durchmischung entsteht, an der die Reaktion stattfinden kann.

## 3 HydroPilot

In einer Pilotanlage erforscht das PSI die hydrothermale Vergasung von nasser Biomasse mit überkritischem Wasser. Dabei werden Abfälle mit hohem Wasseranteil wie Klärschlamm, Kaffeesatz und Gülle einem hohen Druck und einer hohen Temperatur ausgesetzt. Dadurch entsteht aus den Abfällen ein hochwertiges Gas, ähnlich dem Biogas. In dem Projekt werden ähnliche Vorgänge untersucht wie an Konti-C, allerdings in grösserem Massstab, um industrieähnlichere Bedingungen zu simulieren.

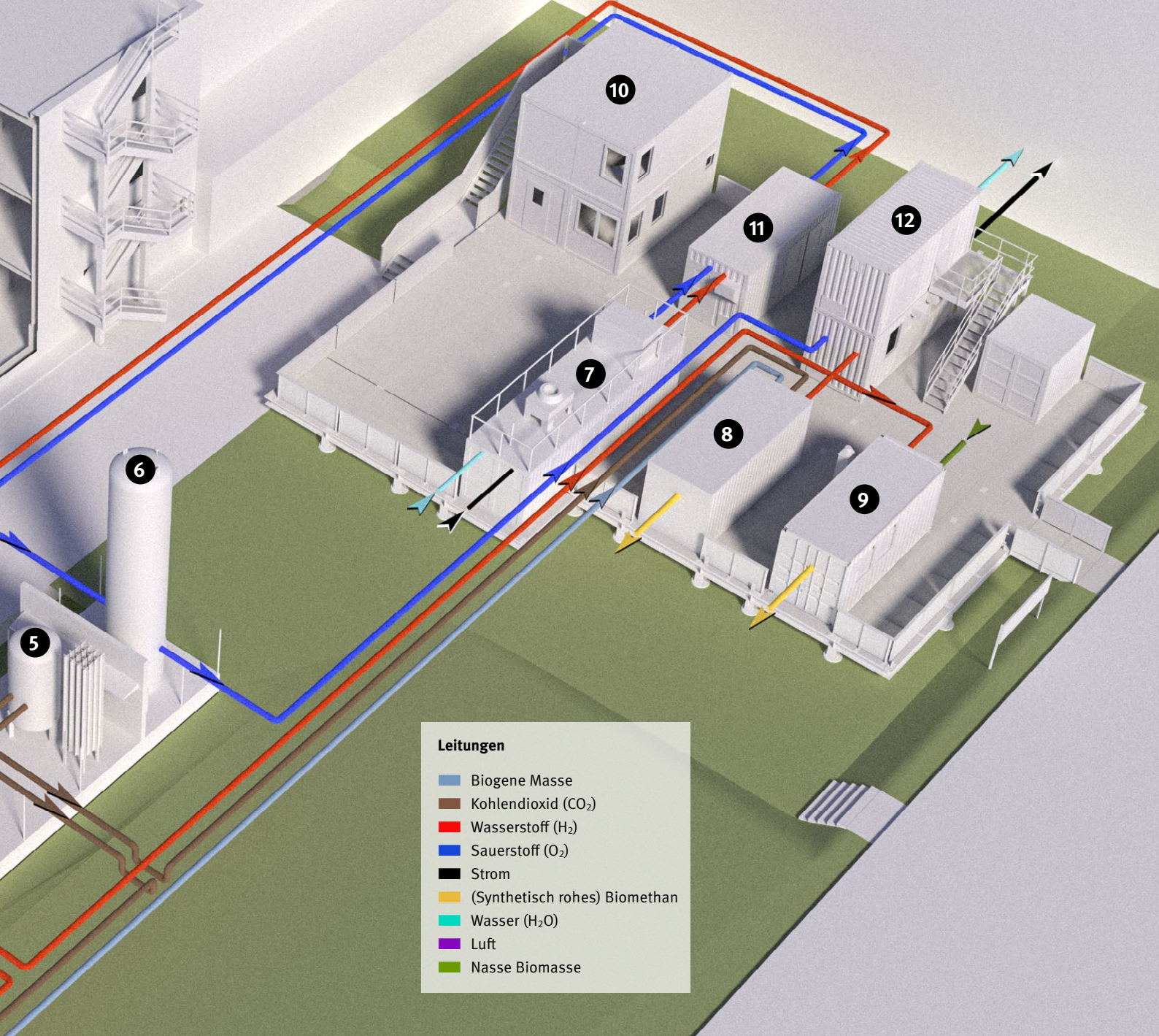
## 4 5 6 Gas-Tanks

Wasserstofftank (4)  
Kohlendioxidtank (5)  
Sauerstofftank (6)

## 7 Elektrolyseur

Aus Wasser entsteht mithilfe von Strom Wasserstoff und Sauerstoff.





**8 Cosyma**

Rohbiogas aus einer Biogasanlage enthält nur etwa 60 Prozent Methan, der Rest ist Kohlendioxid. Die Testanlage Cosyma (Container-based System for Methanation) verarbeitet das Rohbiogas weiter, indem sie Wasserstoff zuführt, das mit dem Kohlendioxid reagiert. So erhöht sich die Methanausbeute. Der Prozess nennt sich Direktmethanisierung.

**9 Konti-C**

Die Versuchsanlage untersucht, wie sich aus nasser Biomasse – Gülle, Klärschlamm oder Algen – Energie gewinnen lässt. Bei hohen Temperaturen und Drücken wird die Biomasse in synthetisches Biogas, also Methan, umgewandelt. Das hat den Vorteil, dass die Biomasse zuvor nicht getrocknet werden muss, denn dieser Vorgang benötigt viel Energie und macht eine Verarbeitung wirtschaftlich oft unrentabel.

**10 Kontrollraum und Besucherplattform**

**11 Gasreinigung/Gastrocknung**

Hier werden Wasserstoff und Sauerstoff aus dem Elektrolyseur getrocknet und gereinigt, um dann in Speichertanks gepumpt zu werden.

**12 Brennstoffzelle**

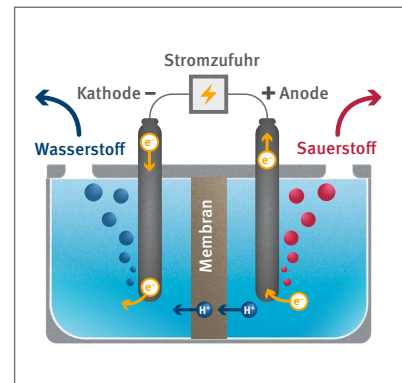
Die Brennstoffzelle erzeugt Strom aus Wasserstoff und Sauerstoff. Dabei entsteht Wasser. Da ein Brennstoffzellensystem alleine zu wenig Strom erzeugt, sind in diesem Container vier Systeme aus je 236 Einzelzellen zusammengeschaltet. So wird eine industrielle Umgebung simuliert.

# Energie in Gas speichern

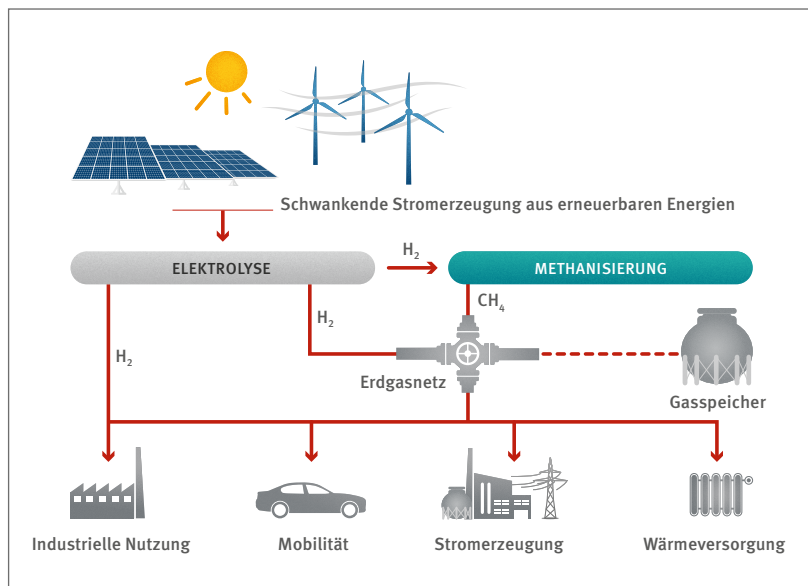
Die Schweiz hat sich das Ziel gesetzt, ihre direkten Treibhausgasemissionen drastisch zu reduzieren. Gemäss der Energiestrategie 2050 will sie den Ausstoss von Treibhausgasen bis 2030 im Vergleich zu 1990 um 50 Prozent verringern, bis 2050 bis zu 85 Prozent. Nach 2050 soll die Energieversorgung in der Schweiz vollkommen klimaneutral erfolgen. Um dieses Ziel zu erreichen, kommt den neuen erneuerbaren Energien, also Biomasse, Wind- und Solarkraft, eine entscheidende Bedeutung zu – und der Frage, wie man die produzierte Energie speichern kann.

Ein Problem bei Wind- und Solarkraft ist, dass ihre Quellen nicht immer gleichmässig zur Verfügung stehen. Wenn genügend Wind weht, produzieren Windkraftanlagen ausreichend Strom; bei Flaute versiegt diese Quelle. Auch die Einstrahlung des Sonnenlichts ändert sich nicht nur im Tag-Nacht-Rhythmus, sondern auch wetterabhängig und saisonal.

Eine zuverlässige Energieversorgung braucht deshalb effektive Energiespeicher: Sie konservieren die Energie, die in produktionsstarken Phasen gewonnen wurde, und geben sie ab, wenn gerade Windstille herrscht oder die



Bei der Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse (PEMEL) führt elektrischer Strom dazu, dass sich Wasser an der sogenannten Anode in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Zunächst entstehen Sauerstoff und positiv geladene Wasserstoff-Ionen (Protonen). Diese wandern durch die nur für sie durchlässige Membran und vereinigen sich an der Kathode mit Elektronen zu gasförmigem Wasserstoff.



Mit Wasserstoff lassen sich beispielsweise Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle betreiben (siehe Seite 15). Das Gas lässt sich auch in das Erdgasnetz einspeisen. Die Industrie wiederum kann es verwenden, um ihre Produktionsprozesse aufrechtzuerhalten: Wasserstoff ist ein wichtiger Rohstoff, etwa bei der Herstellung von Stickstoffdünger in der chemischen Industrie oder beim «Aufbrechen» (Cracken) von Kohlenwasserstoffen in Erdölraffinerien.

Sonne nicht ausreichend scheint. Ein Verfahren, das dabei zum Einsatz kommt, heisst Power-to-Gas. Dabei werden mit elektrischem Strom, zum Beispiel aus Wind- oder Sonnenenergie, Gase wie Wasserstoff oder Methan erzeugt. Diese Gase dienen als Energiespeicher und speisen bei Bedarf ihren Energieinhalt wieder in die Energieversorgung zurück.

## Gewinnung von Wasserstoff

Wasserstoff entsteht unter anderem durch die Elektrolyse von Wasser. Im Prinzip wird dabei Strom in Wasser



geleitet, das sich daraufhin in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Für die Elektrolyse existieren unterschiedliche Verfahren. Das PSI wendet die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse an (Proton Exchange Membrane Electrolysis, PEMEL, siehe Seite 12).

## Methanisierung

Eine weitere Möglichkeit, Energie in Gas zwischenzulagern, ist die sogenannte Methanisierung. Dabei wird aus Wasserstoff und Kohlendioxid das Gas

Methan erzeugt, der Hauptbestandteil von herkömmlichem Erdgas.

Ein Spezialfall der Methanisierung ist die sogenannte Direktmethanisierung. Dabei wird der Wasserstoff nicht mit reinem Kohlendioxid zusammengebracht, sondern mit Biogas, das bereits zu einem guten Teil aus Methan besteht, aber noch einen vergleichsweise hohen Anteil an Kohlendioxid enthält. Auch direkt in diesem Gasgemisch lässt sich aus Kohlendioxid mit Wasserstoffzugabe zusätzliches Methan erzeugen und so der Methangehalt im Biogas deutlich erhöhen, bis zur Erdgasqualität. PSI-Forschende haben ein

neues Verfahren dafür entwickelt und so erreicht, dass sich aus Biogas aus Bioabfällen bis zu 60 Prozent mehr Bio-Methan gewinnen lässt (siehe: Eine Plattform – viele Energiesysteme, Seite 8f). Die höhere Methanausbeute schon damit Ressourcen und die Umwelt.

Sowohl bei der Gewinnung von Wasserstoff als auch bei der Methanisierung kommen Hilfssubstanzen zum Einsatz, die die Reaktionen überhaupt erst ermöglichen. Es handelt sich um sogenannte Katalysatoren, die am PSI ebenfalls intensiv erforscht werden (siehe Seite 16f.).

## Weissbuch Power-to-X



Wissenschaftler des PSI haben gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen von sechs Schweizer Hochschulen und Forschungsinstitutionen umfangreiche Informationen zu verschiedenen Aspekten von Power-to-X-Technologien zusammengetragen. So werden Technologien bezeichnet, mit denen Energie in Zeiten eines Überangebots von elektrischem Strom in anderen Energieformen, zum Beispiel chemischen Energieträgern, gespeichert werden. Unter anderem haben die Forschenden in einem Weissbuch zusammengefasst, welches Potenzial Power-to-X-Verfahren für die Energiestrategie 2050 haben, vor welchen Herausforderungen die Technologie steht und welche Schlüsselfaktoren eine Verbreitung begünstigen. In Auftrag gegeben hat das Weissbuch die Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE), erstellt haben es die Partner des Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER) Heat and Electricity Storage, Biosweet, Crest, Furies und Mobility,

und finanziert haben es die Schweizerische Agentur für Innovationsförderung Innosuisse sowie das Bundesamt für Energie (BFE). Ein Fazit: Die Beiträge, die Power-to-X in einzelnen Energiesektoren wie Verkehr, Heizung oder durch die Rückverstromung leisten kann, sind sehr unterschiedlich. So ist die erneute Gewinnung von Strom aus Energieträgern wie Wasserstoff oder Methan, die mit Power-to-X-Verfahren erzeugt wurden, derzeit noch sehr teuer. Die Kosten für solche – auch Power-to-Power genannten – Verfahren könnten aber durch Technikfortschritte und durch zunehmende Erfahrung im Umgang mit diesen Technologien bis 2030 um bis zu zwei Drittel sinken. Kraft- und Brennstoffe, die mit Strom aus erneuerbaren Energien in Power-to-X-Verfahren entstehen, können fossile Energieträger wie Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel ersetzen und somit helfen, Kohlendioxid-Emissionen zu reduzieren. Wirtschaftlich wird dies aber nur sein, wenn entsprechende umweltpolitische Anreizmechanismen zum Tragen kommen.

Download «Power-to-X: Perspektiven in der Schweiz»  
unter <https://bit.ly/3gHAjWu>





# Wertvoller Wasserstoff

**Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum. Auf der Erde spielt er eine bedeutende Rolle für das Leben und den Energiekreislauf in der Natur. Im Energiesystem der Zukunft entsteht er in Power-to-Gas-Verfahren, treibt Brennstoffzellen an oder lässt sich in das vorhandene Erdgasnetz einspeisen.**

Ins Erdgasnetz eingespeist wird Wasserstoff bereits jetzt, allerdings in einem sehr geringen Anteil. Über einen weiteren Schritt kann Wasserstoff auch zu Methan – dem Hauptbestandteil von Erdgas – umgewandelt werden.

PSI-Forschende prüfen jetzt an einer Minigasturbine, wie sich der Wasserstoffanteil im Erdgasgemisch erhöhen lässt. Die Anlage ist in ihrem Gehäuse nicht grösser als ein Kleiderschrank und liefert eine elektrische Leistung von 100 Kilowatt. Damit könnte man den Leistungsbedarf eines kleinen Quartiers mit etwa fünf bis sieben Einfamilienhäusern abdecken – passend zum Trend, die Stromversorgung zu dezentralisieren. Die Minigasturbine ist ein kommerzielles Produkt und eine typische Anlage zur Wärme-Kraft-Kopplung, wie sie in Hotelanlagen, Wohnsiedlungen und auf Campingplätzen zum Einsatz kommen kann, um die dortige Infrastruktur mit Strom und Wärme zu versorgen.

Wasserstoff lässt sich in Zukunft umweltfreundlich mithilfe der Elektrolyse gewinnen (siehe Seite 12), wenn genügend Strom aus neuen erneuerbaren Energien zur Verfügung steht. Wenn sich mehr Wasserstoff im Erdgas verwenden lässt, entfällt der Umwandlungsschritt von Wasserstoff zu Me-

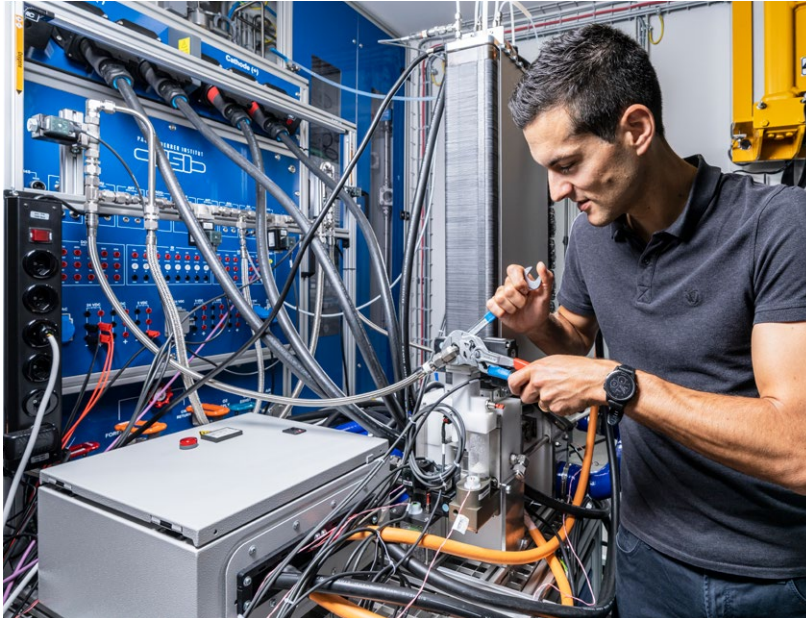
than, was die Effizienz der gesamten Umwandlungskette steigert und vielfältige Speicheroptionen eröffnet. Untersuchungen mit Gasbrennern haben gezeigt, dass man Methan bis zu 20 oder gar 30 Prozent Wasserstoff zusetzen kann, ohne dass die Gasbrenner durch lokale Überhitzung Schaden nehmen. Deshalb wollen die PSI-Forschenden herausfinden, ob auch die kleine Gasturbine so viel Wasserstoff verträgt und wie sie bei einem höheren Wasserstoffanteil auf kurzfristig nachgefragte Lastspitzen reagiert. Da Wasserstoff sehr reaktionsfreudig ist und

sehr schnell verbrennt, könnte die Turbine mit mehr Wasserstoff im Brenngasgemisch vielleicht sogar besser auf schnelle Laständerungen ansprechen, hoffen die Wissenschaftler. Dass Gasnetze für hohe Wasserstoffanteile fit gemacht werden können, zeigt ein Blick in die Vergangenheit: Noch bis vor rund 50 Jahren war Stadtgas in der Schweiz weit verbreitet und enthielt bis zu 50 Prozent Wasserstoff.

Die Minigasturbine ist Teil der ESI-Plattform und wandelt Methan in Strom und Wärme um. PSI-Forschende prüfen an ihr, wie sich der Wasserstoffanteil im Erdgasgemisch erhöhen lässt.



# Saubere Energie dank Brennstoffzelle

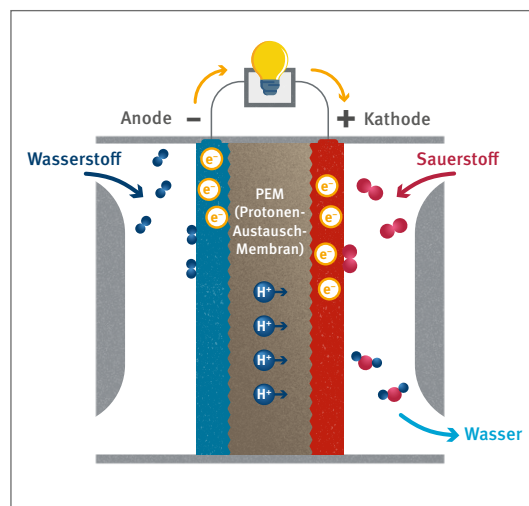


So kann beispielsweise Wasser, das Abfallprodukt aus der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff, für Brennstoffzellenantriebe in der Praxis ein Problem darstellen. In kälteren Klimaregionen kann das Wasser nämlich bei abgeschaltetem Antrieb gefrieren und die Funktion der Brennstoffzellen beeinträchtigen. PSI-Forschende haben deshalb mithilfe der Spallations-Neutronenquelle SINQ die Verteilung von Eis und Wasser in einer Brennstoffzelle direkt abgebildet. Ebenso überprüften sie, wie ein speziell entwickeltes Material das entstehende Wasser besser ableitet. Mithilfe der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS untersuchten PSI-Forschende ausserdem, wie die Polymer-elektrolytmembran einer Brennstoffzelle verschleisst. Das bessere Verständnis dieser Vorgänge in einer Brennstoffzelle wird dabei helfen, bessere Materialien und Verfahren für deren Einsatz im Energiesystem zu entwickeln.

**Wenn wir atmen, nehmen wir Sauerstoff in unseren Körper auf. Das lebenswichtige Gas benötigen wir, um Energie zu gewinnen. Eine Reaktion dabei ist die Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Genau das geschieht auch in einer Brennstoffzelle.**

-beschleuniger – durchführen, welche einzigartige Einblicke in das Innere der Brennstoffzellen und der genutzten Materialien ermöglichen. Dadurch gewinnen die Forschenden ein grundlegendes Verständnis der Vorgänge in der Brennstoffzelle und können sie sehr gezielt verbessern.

Eine Brennstoffzelle erzeugt elektrischen Strom aus einem Brennstoff und Sauerstoff. Der Brennstoff ist meist Wasserstoff, kann aber auch Methanol, Butan oder Erdgas sein. Bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff wird Energie frei und es entsteht Wasser. Auf diese Weise liefert eine Brennstoffzelle Kohlendioxid-freie, saubere Energie. Das PSI engagiert sich seit vielen Jahren auf verschiedenen Stufen der Brennstoffzellenforschung: von der Optimierung einzelner Komponenten bis zur Untersuchung vollständiger Brennstoffzellensysteme. Am PSI können Forschende Untersuchungen mithilfe von Grossanlagen – Teilchenerzeuger und



Prinzip der PEM-Brennstoffzelle: An der Anode wird Wasserstoff unter Abgabe von Elektronen zu Protonen ( $H^+$ ) oxidiert, die durch die Membran wandern. An der Kathode wird Sauerstoff durch Elektronen ( $e^-$ ) reduziert; es entsteht Wasser. Anode und Kathode sind an einen elektrischen Verbraucher angeschlossen; es fließt Strom.



# Die Möglichmacher



Am PSI entwickeln Forscher effizientere Katalysatoren sowie die dafür notwendigen Trägermaterialien.

**Katalysatoren sind Substanzen, die eine chemische Reaktion beschleunigen, effizienter machen oder gar erst ermöglichen. Die Rolle von Katalysatoren übernehmen in der Biologie Enzyme. Das sind natürliche Eiweissmoleküle, die es dem Menschen beispielsweise ermöglichen, Stärke in Zucker umzuwandeln. Auch in der Industrie sind Katalysatoren von unschätzbarem Wert.**

Kohlendioxid ist als Endprodukt vieler Verbrennungen ein vergleichsweise träges Gas, das nicht gerne mit anderen Substanzen reagiert. Um Kohlendioxid bei moderaten Temperaturen zum ener-

giereichen Methan umzuwandeln, benötigt man Katalysatoren. Für die Reaktion von Kohlendioxid mit Wasserstoff zu Methan ist das Element Nickel besonders geeignet. Es kommt bei der Direktmethanisierung zum Einsatz, einer am PSI entwickelten Technologie, um die Methanausbeute bei der Vergärung von Bioabfällen deutlich zu erhöhen (siehe die Seiten 8, 9 und 13). Der Katalysator sorgt dafür, dass sich Kohlendioxid und Wasserstoff zu Methan und Wasser verbinden. Bei der Untersuchung und Optimierung von Katalysatoren profitieren PSI-Forschende von der Möglichkeit, mit zeit-

aufgelöster Spektroskopie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS den Verlauf von chemischen Reaktionen zu beobachten. Das hat gegenüber konventionellen Verfahren einen entscheidenden Vorteil: Statt nur Momentaufnahmen lässt sich der Verlauf der Reaktionen darstellen. Es ist wichtig, genau zu verstehen, wie sich die Abläufe mit der Zeit verändern, denn während einer chemischen Reaktion variieren unter Umständen Temperaturen und die Mengen der Ausgangsstoffe.



## Saubere Abgase dank Schwammstruktur

Katalysatoren leisten wertvolle Dienste beim Filtern von Abgasen. So arbeiten Forschende des PSI daran, leistungsfähigere Katalysatoren für Gasautos zu entwickeln.

In einem Fahrzeugkatalysator wird das Abgas durch eine Vielzahl paralleler Kanäle aus Keramik geleitet. Deren Oberfläche ist mit dem eigentlichen Katalysator beschichtet. Meist besteht er aus fein verteilten Edelmetallpartikeln, häufig Palladium auf einer Träger-substanz. Je nach Motortyp bleiben beim Verbrennen von Erd- oder Biogas aber recht grosse Mengen des Hauptbestandteils Methan übrig. Dieses lässt sich mit üblichen Katalysatoren nicht so einfach zersetzen.

In Tests, die die PSI-Forschenden durchführten, erwiesen sich für diesen Zweck Zeolithe als am besten geeignet. Das sind hochporöse Substanzen auf Basis von Siliziumdioxid. Unter dem Mikroskop sehen sie aus wie ein Schwamm: durchzogen von vielen winzigen Löchern, die über Kanäle miteinander verbunden sind. Eine solche

Struktur bietet enorm viel Oberfläche. Wenn sich darin das Palladium fein verteilt, kann es noch besser mit den Abgasen reagieren – der Schadstoffausstoss verringert sich deutlich.

## Weg vom «schmutzigen Diesel»

In Dieselmotoren entstehen bei der Verbrennung des Kraftstoffs gesundheitsschädliche Stickoxide. Um diese zu reduzieren, wird dem Abgas gasförmiges Ammoniak zugegeben, das, angeregt durch einen Katalysator, mit den Stickoxiden zu harmlosem Stickstoff und Wasser reagiert. Katalysator ist in diesem Fall Kupfer auf einem Zeolith-Gerüst. Bei niedrigen Temperaturen funktioniert der Prozess jedoch noch nicht optimal.

Die Forschenden untersuchten Struktur und Funktion eines Kupfer-Zeolith-Katalysators unter realistischen Betriebsbedingungen an der SLS. Das wichtigste Ergebnis: Eine stufenweise Dosierung des Ammoniaks erlaubt eine schnellere Reaktion als eine bei konstanter Ammoniakzugabe. Daraus las-

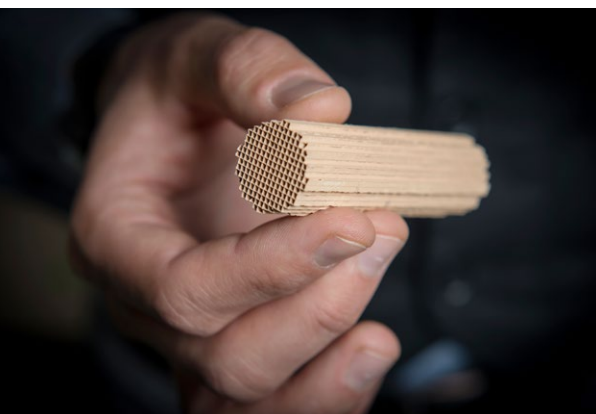
sen sich Empfehlungen ableiten, wann dem Katalysator wie viel Ammoniak zugeführt werden sollte, um die Stickoxide im Abgas zu jeder Zeit so gering wie möglich zu halten.

## Wasser spalten

Ein Energieträger der Zukunft ist Wasserstoff: Er lässt sich in Tanks speichern und später, zum Beispiel in Brennstoffzellen, wieder in elektrische Energie umwandeln. Gewonnen wird Wasserstoff aus Wasser in sogenannten Elektrolyseuren mit Strom (siehe Seite 12). Forschende des PSI haben ein neues Material entwickelt, das dort als Katalysator die Aufspaltung der Wassermoleküle beschleunigt.

Ziel der Forschenden am PSI ist ein Katalysator, der gleichzeitig effizient und günstig ist, weil er ohne Edelmetalle auskommt. Dafür greifen sie auf ein bekanntes Material zurück: Perowskit, eine komplexe Verbindung der Elemente Barium, Strontium, Kobalt, Eisen und Sauerstoff.

Sie entwickelten als Erste ein Verfahren, das Perowskit in Form von winzigen Nanopartikeln erzeugt. Nur so kann es effizient wirken, denn ein Katalysator benötigt eine möglichst grosse Oberfläche. Macht man die Partikel des Katalysators möglichst klein, addieren sich deren Oberflächen zu einer umso grösseren Gesamtoberfläche. Das neue Herstellungsverfahren liefert grosse Mengen des Katalysatorpulvers und dürfte sich leicht an einen industriellen Massstab anpassen lassen.



Zeolithe sind aufgrund ihrer Schwammstruktur hervorragende Trägermaterialien für Katalysatoren. In ihrem Gerüst fein verteilte Metalle können besonders effektiv mit den Abgasen reagieren.

# Grüne Treibstoffe für den Flugverkehr

In der Initiative «SynFuels» entwickeln Forschende des PSI und des Partnerinstituts Empa gemeinsam einen Prozess, um Kerosin aus erneuerbaren Ressourcen herzustellen. Es sollen flüssige Treibstoffgemische von höchster Qualität entstehen, die möglichst rückstandsfrei verbrennen und sich damit für den Antrieb von Flugzeugen eignen.

Die beiden Schweizer Forschungsinstitute suchen zusammen nach Wegen, um Kohlendioxid und Wasserstoff zu längererkettigen Molekülen zu verknüpfen und so synthetische Treibstoffe zu produzieren. Dass sich diese Treibstoffe auch für ein Flugzeugtriebwerk eignen, ist ein ehrgeiziges, aber lohnendes Ziel: Flugzeugtreibstoffe sind die Treibstoffe mit der höchsten Qualität. Gelingt es, sie aus erneuerbaren Ressourcen herzustellen, wird man mit dem Prozess auch alle anderen Kraftstoffe synthetisieren können.

Kerosin ist ein Gemisch aus Kohlenwasserstoffen mit sehr genau spezifizierten chemischen und physikalischen Eigenschaften, die für die Ökonomie und Sicherheit des Flugbetriebes unbedingt einzuhalten sind. Ein synthetischer Treibstoff muss selbstverständlich dieselben Eigenschaften aufweisen.

Ausgangsstoffe für den zu entwickelnden Herstellungsprozess sind Kohlendioxid und Wasserstoff. Das Kohlendioxid kommt dabei aus verschiedenen Quellen, etwa aus Biomasse, direkt aus der Umgebungsluft oder aus industriellen Produktionsprozessen, beispielsweise der Zementherstellung. Der benötigte Wasserstoff wird mithilfe von erneuerbarem Strom aus Wasser gewonnen. Die Synthese des flüssigen



Treibstoffs erfolgt über ein oder mehrere Zwischenprodukte wie Methan, Kohlenstoffmonoxid, Methanol, Ethylen oder Dimethylether.

## Molekulare Helfer

Schlüssel zum Erfolg des Projekts sind Katalysatoren (siehe Seite 16, Die Möglichmacher). Sie sollen die schrittweise Umwandlung von Kohlendioxid und Wasserstoff zu flüssigen Kohlenwasserstoffen auf molekularer Ebene ermöglichen.

Ein unentbehrliches Hilfsmittel im «SynFuels»-Programm ist die Synchro-

tron Lichtquelle Schweiz SLS. Mit der Grossforschungsanlage lassen sich Einblicke in die Reaktionsmechanismen gewinnen oder Forschende können mit ihrer Hilfe untersuchen, wie sich die Katalysatoren während des Einsatzes verändern und wie die Veränderungen das Produktspektrum beeinflussen.

Wichtiger Teil des Projekts sind auch Analysen dazu, wie hoch der ökologische Fussabdruck der hergestellten Treibstoffe ist, welchen Beitrag diese zur Treibhausgasreduktion in der Schweiz leisten können und wie wirtschaftlich ihre Herstellung ist.



# Gut und lange geladen

**Strom sorgt für Licht und Wärme, treibt die meisten Haushaltsgeräte an und versorgt unsere Unterhaltungsgeräte mit Energie. Durch den Mobilitätswandel und neue Verkehrskonzepte wird elektrische Energie auch hier an Bedeutung gewinnen. Strom lässt sich in Batterien, auch Akkumulatoren genannt, speichern und so auch mobil einsetzen. Das stellt Stromspeicher vor Herausforderungen, die PSI-Forschende lösen.**

Ob in Smartphones, Tablets, Laptops oder Elektrofahrzeugen – ein Problem, das sich bei allen mobilen Stromspeichern stellt, ist ihre Haltbarkeit. Mit anderen Worten: Nicht nur wie schnell, sondern auch wie oft und wie zuverlässig kann ich wie viel Energie darin speichern und abrufen? Forschende des PSI-Labors für Elektrochemie arbeiten daran, bestehende Systeme zu verbessern, zum Beispiel solche auf Basis von Lithium, aber auch neue Speichersysteme zu entwickeln, zum Beispiel auf Basis anderer Elemente wie Natrium. Mithilfe der Grossforschungsanlagen des PSI blicken die Forschenden in die Materialien, um die Vorgänge beispielsweise beim Auf- und Entladen teilweise bis auf die Ebene einzelner Atome hinab zu verfolgen. Dabei berücksichtigen sie alle Komponenten einer Batterie, von den Kontakten, über die Strom zu- oder abfließt, bis zum eigentlichen Speichermaterial, das die elektrische Energie vorhält.

So gelang es einer Forschergruppe des PSI in Kooperation mit Forschenden der ETH Zürich, ein neues Verfahren zu entwickeln, um deutlich leistungsfähigere Elektroden aus Graphit herzustellen,

dem gängigen Material für die Elektroden handelsüblicher Akkus. Durch ausgeklügelte Optimierung der Graphitanode – der negativen Elektrode – bei einer herkömmlichen Lithiumionen-Batterie erhöhten die Forschenden die bei hohen Strömen nutzbare Speicherkapazität unter Laborbedingungen auf das Dreifache. Eine Zugabe von Silizium erhöhte die nutzbare Speicherkapazität weiter. Auch bei einem anderen Batterietyp auf Lithiumbasis erzielten PSI-Forschende eine deutliche Leistungssteigerung. Lithium-Schwefel-Akkus können theoretisch deutlich mehr Energie liefern als die üblichen Lithiumionen-Akkus, die heutigen Prototypen verlieren aber schon nach wenigen Ladezyklen merklich an Kapazität. Durch die Optimierung der Elektrodenstruktur liess sich die Zahl der Ladezyklen deutlich steigern.

Ein tiefer Blick in einen völlig anderen Typ von Batterien offenbarte Verbesserungspotenzial bei den sogenannten Feststoffbatterien. Diese Art Akku kommt völlig ohne Flüssigkeiten aus, die in herkömmlichen Akkus für den Ladungstransport zuständig sind. Da diese Flüssigkeiten brennbar sind, würden Feststoffbatterien die Elektromobilität deutlich sicherer machen. Röntgenaufnahmen an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS des PSI lieferten Forschenden bislang einmalige Einblicke in die Abläufe einer Feststoffbatterie sowohl beim Auf- als auch beim Entladen. Das verbessert das Verständnis von den Schädigungen, die der Akku dabei erleidet, und hilft, bessere Energiespeicher für die Zukunft zu entwickeln.



Die Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS ermöglicht direkten Einblick in die Vorgänge innerhalb einer Batterie.

# Die Atmosphäre im Blick

**Wenn wir Energie gewinnen oder nutzen, beeinflussen wir auch immer unsere Umwelt, vor allem die Erdatmosphäre. Das PSI erforscht darum Vorgänge in der Luft – sowohl nahe an der Erdoberfläche als auch in mehreren Tausend Metern Höhe. Das Wissen darüber hilft, richtige Entscheidungen in Sachen Luftreinhaltung zu treffen.**

Was haben die Arktis und Antarktis, Grossstädte wie Peking oder Neu-Delhi und das Schweizer Jungfrauoch gemein? An allen diesen Orten arbeiten PSI-Forschende. Sie messen Umweltfaktoren und sammeln Daten, um sich ein besseres Bild von den Vorgängen in der Atmosphäre zu machen.

In den Alpen gewinnen PSI-Forschende Eisbohrkerne aus Gletschern. In ihnen sind Spurenstoffe aus der Atmosphäre längst vergangener Zeiten eingeschlossen. Durch die Analyse ihrer Zusammensetzung lassen sich Trends in der Klimageschichte ermitteln. Diese ermöglichen es wiederum, Prognosen für die künftige Entwicklung unseres Klimas aufzustellen. Um dieses kalte Gedächtnis der Erde als einmaliges Klima-

archiv zu bewahren, beteiligen sich PSI-Forschende am internationalen Ice-Memory-Projekt. Im Rahmen dieses Projektes werden weltweit Eisbohrkerne gewonnen, die dann geschützt vor Klimawandel und steigenden Temperaturen in einem Lager in der Antarktis aufbewahrt werden sollen.

Mithilfe von Eisbohrkernen aus den Alpen zeigten PSI-Forschende beispielsweise erstmals, dass industrieller Russkaum verantwortlich sein kann für die Schmelze der Alpengletscher, die sich vor allem zwischen 1850 und 1875 vollzog. Erst ab etwa 1875 übersteigt der Russgehalt der Luft den natürlichen Wert und lässt sich somit auf menschliche Aktivitäten zurückführen. Zuvor stammte der Russ vorwiegend aus natürlichen Quellen, vor allem aus Waldbränden.

## Hoch oben

Auf rund 3500 Metern Höhe, in der Forschungsstation auf dem Jungfrauoch, untersuchen PSI-Forschende unter anderem Aerosole, die landläufig besser als Feinstaub bekannt sind.

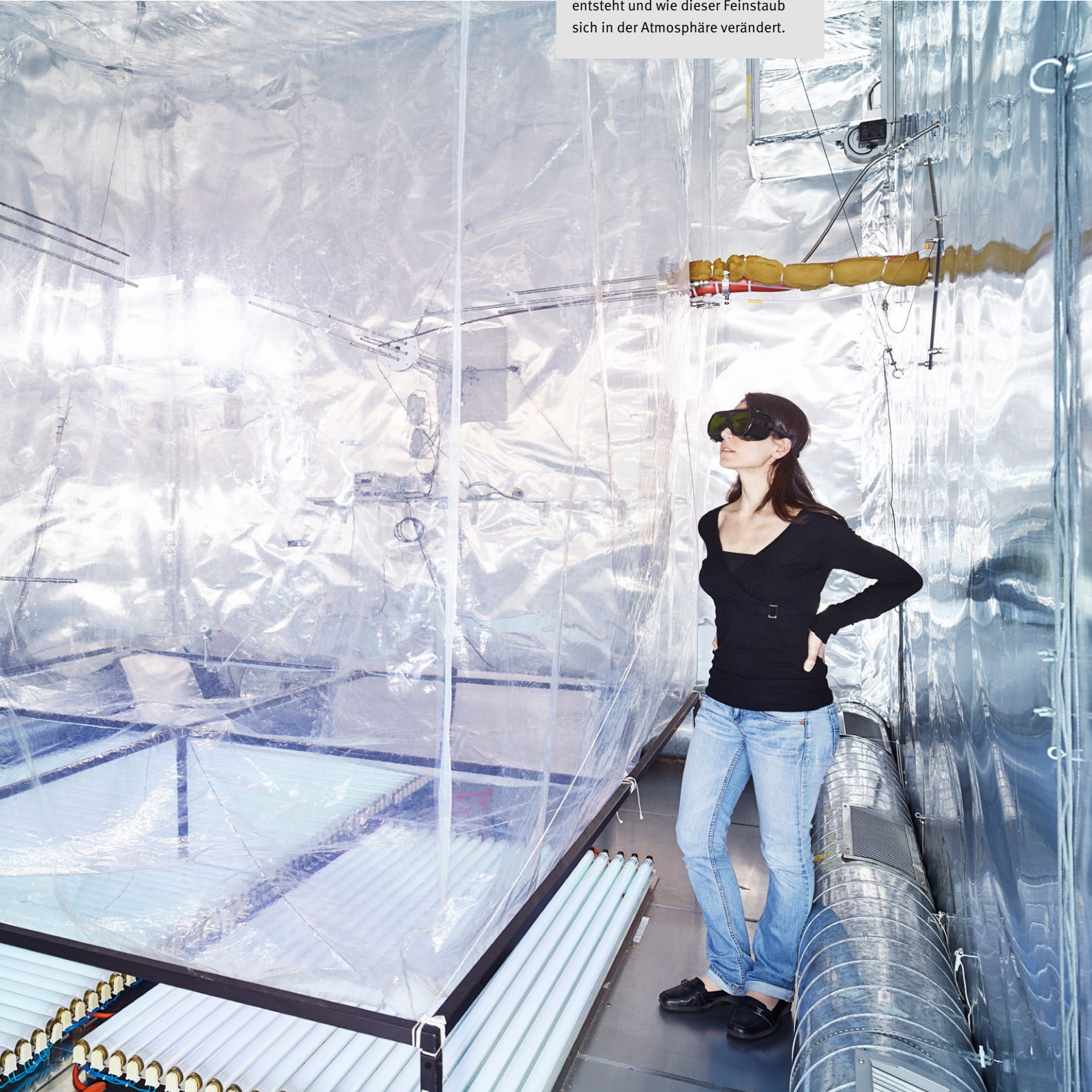
Die Smogkammer des PSI ist ein Partner innerhalb des Infrastrukturprogramms EUROCHAMP-2020, einem internationalen Programm zur Integration von europäischen Simulationskammern, um atmosphärische Prozesse zu untersuchen. Dieses Programm unterstützt Forscher beim Zugang zu hochmodernen Smogkammeranlagen in Europa, einschliesslich der PSI-Smogkammer. EUROCHAMP-2020 bietet Forschern die Möglichkeit, ihre Instrumente und ihr Fachwissen in verschiedene Simulationskammern für Messkampagnen und Instrumentenprüfungen einzubringen.

[www.eurochamp.org](http://www.eurochamp.org)





In der Smogkammer des PSI kann man studieren, wie aus Gasen und festen Partikeln Feinstaub entsteht und wie dieser Feinstaub sich in der Atmosphäre verändert.







Aerosolforschung auf dem Jungfrauoch hilft unter anderem dabei, besser zu verstehen, wie in den verschiedenen Jahreszeiten Russteilchen zu Wolkentropfen werden.

Auch sie beeinflussen das Klima. Anders als die Treibhausgase Kohlendioxid und Methan tragen sie aber nicht immer zur Erwärmung bei, sondern können das Klima auch abkühlen. Manche absorbieren Sonnenlicht, erhitzen sich dadurch und tragen so zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Andere streuen das Licht zurück ins All, haben also einen kühlenden Effekt. Zudem bilden sich an Aerosolpartikeln Wolkentropfen. Dank der Höhenlage des Jungfrauochs lässt sich dort sehr gut erforschen, wie sich die kurzlebigen Partikel auf dem Weg von der Erdoberfläche in die höheren Schichten der Atmosphäre verändern und dort schließlich die Wolkenbildung beeinflussen.

### Dicke Luft in Delhi

An einem Standort mit weitaus höheren Temperaturen als an den Polen der Erde oder in den alpinen Lagen der Alpen arbeiten PSI-Forschende, wenn sie die

Luft in gigantischen Metropolen wie dem indischen Delhi untersuchen. Dort messen sie zwanzig bis dreissig Mal höhere Konzentrationen von Schadstoffen als in der Schweiz – vornehmlich aus menschlichen Quellen. Mit ihren Geräten und Analysen decken die Wissenschaftler auf, welche Quellen und Prozesse wie viel Feinstaub produzieren und welche Massnahmen daher die Situation verbessern können.

In China ist das bereits gelungen: Dort haben PSI-Forschende gezeigt, dass der Smog in Peking zu einem wesentlichen Teil aus sekundär gebildetem Feinstaub besteht, zu dem auch weit entfernte Quellen beitragen. Neben Messungen vor Ort führten sie dafür auch Experimente in der Smogkammer am PSI durch und importierten dafür einen chinesischen Ofen samt Kohle. Die Erkenntnisse trugen dazu bei, die Luftqualität in Peking durch Massnahmen der Regierung zu verbessern. Das Herz der Smogkammer des PSI ist ein 27 Kubikmeter fassender Kubus aus

dünner Teflonfolie. In diesen Raum lassen sich gezielt Gase leiten. Um die natürliche Umgebung möglichst gut nachzustellen, lässt sich die Kammer mit UV-Licht bestrahlen, das dem UV-Anteil des Sonnenlichts entspricht. So können Wissenschaftler Vorgänge in der Atmosphäre unter kontrollierten Bedingungen beobachten und analysieren.

### Vom Grossen zum Kleinen

Energieproduktion geht einher mit Emissionen in Form von Feinstaub und Gasen. Die daraus resultierenden Klima- und Gesundheitseffekte sind das Resultat einer enormen Zahl komplexer Prozesse in der Atmosphäre. Um Auswirkungen der Energieproduktion bestimmten Quellen oder Prozessen zuzuordnen oder Auswirkungen in die Zukunft zu projizieren, benötigen wir



nebst der Diagnose in der Atmosphäre auch Experimente im Labor, die es erlauben, einzelne physikalische und chemische Phänomene im Detail zu verstehen. Dazu gehören die Smogkammern, aber auch mit modernsten analytischen Methoden ausgerüstete Reaktoren im Labor.

Hier kommen auch die Grossforschungsanlagen des PSI zum Zuge. PSI-Forschende haben an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS Infrastrukturen aufgebaut, um Vorgänge an Oberflächen von Feinstaub, Eis oder Wasser auf molekularer Ebene zu untersuchen. So lernen sie zu verstehen, wie sich Wassermoleküle auf der Oberfläche

eines Eiskeims organisieren. Oder sie bekommen Einblick in das Schicksal von Nitrat, einem Abbauprodukt von Stickoxiden, an der Eisoberfläche, bevor es in einem Gletscher archiviert wird. Schliesslich lernen sie das Zusammenspiel von gelösten Stoffen an der Wasseroberfläche verstehen, zum Beispiel wenn sich ein Wolkentröpfchen bildet. Ein anderes Experiment erlaubt es, mit Röntgenblick in Feinstaubteilchen hineinzuschauen, um zu sehen, wie sie aufgebaut sind oder wie sie unter dem Einfluss einer chemischen Reaktion oder unter veränderten Umweltbedingungen ihre Struktur ändern. Diese experimentellen Anlagen

stehen auch externen Nutzern für Fragen an der Schnittstelle von Umweltforschung und physikalischer Chemie zur Verfügung.

## Umwelt mobil

Um nicht nur an einzelnen Orten die Umwelt zu erforschen, können Forschende das sogenannte Smogmobil nutzen. Das Fahrzeug kann mit vielen verschiedenen Messinstrumenten ausgestattet werden. Bei Messfahrten können sie damit sowohl die räumliche als auch die zeitliche Verteilung von Schadstoffen in der Luft untersuchen.



Das Smogmobil des PSI. Darin installieren lässt sich unter anderem eine Apparatur, die Luft durch die Poren eines Filters zieht. Die Ablagerungen können Forschende dann analysieren.



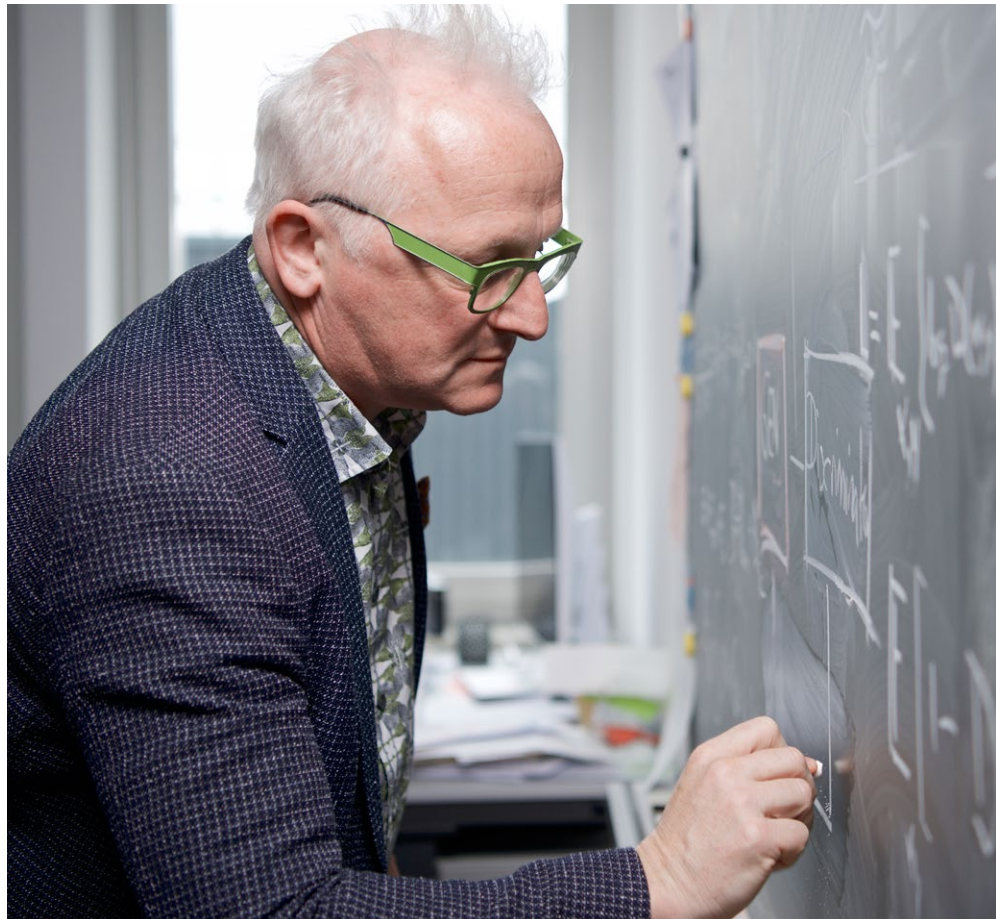
# Der Kern der Dinge

Die Schweiz wird aus der Kernenergie aussteigen – das sieht die Energiestrategie 2050 vor. Aber auch nachdem das letzte Kernkraftwerk vom Netz gegangen ist, soll das Wissen zum Umgang mit Kernenergie und allen sicherheitsrelevanten Aspekten erhalten und durch Forschung verbessert werden. Nur so lassen sich auch in Zukunft valide Fakten vorhalten, damit die Schweiz in Bezug auf die Kernenergie weiterhin national und international gute Entscheidungen treffen und als kompetenter Gesprächspartner mitreden kann.

Die Forschenden im PSI-Bereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES) arbeiten an folgenden Aufgaben:

- Erwerb neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse über nukleare Sicherheit
- Weiterentwicklung modernster Simulationsmethoden für Sicherheitsbewertungen
- Bewertung und/oder Aktualisierung der Kriterien für die nukleare Sicherheit, um Änderungen der Strategien für die Stromerzeugung, die technologische Entwicklung, Modernisierungen und den langfristigen Betrieb zu berücksichtigen
- Entwicklung von experimentellen Einrichtungen zusammen mit modernsten Instrumentierungstechniken für das Design, die Durchführung und die Interpretation von Messungen an realen physikalischen Phänomenen von hoher Sicherheitsrelevanz, die für die Verifizierung, Validierung und Qualifizierung von Berechnungsmethoden erforderlich sind.

Konkrete Fragen lauten beispielsweise: Wie alt ist das Material, das in Kern-



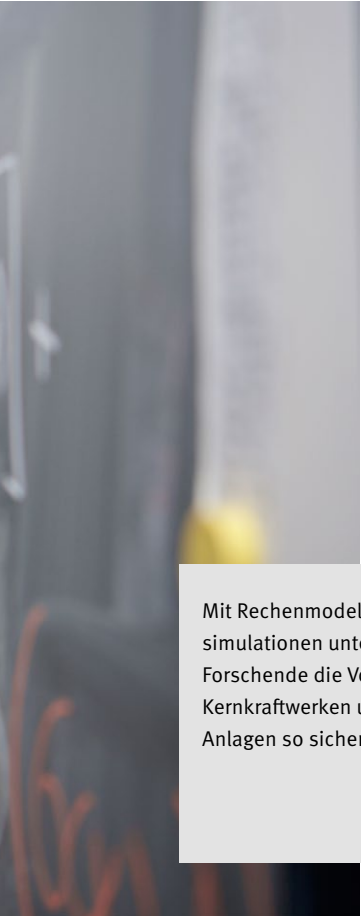
kraftwerken verwendet wird? Wie verhalten sich die Brennstäbe, insbesondere die Hüllrohre, die den eigentlichen Brennstoff, das Uranoxid, einschliessen, während des Betriebs und nach ihrem Einsatz? Was würde im Falle eines schweren Reaktorunglücks passieren und wie lässt sich sicherstellen, dass radioaktive Substanzen nicht in die Umwelt gelangen?

## Wie ein Schwamm für Wasserstoff

So fand beispielsweise die Gruppe Nuklearbrennstoffe heraus, wie die Inte-

grität der Hüllrohre von Kernbrennstäben beeinflusst werden könnte. Dafür nutzen die Forschenden bildgebende Verfahren mit Neutronen. Das Neutronen-Imaging ist ein am PSI perfektioniertes Verfahren, das eine eigene PSI-Arbeitsgruppe an der hiesigen Grossforschungsanlage SINQ, der Schweizer Spallations-Neutronenquelle, mit einem der weltweit besten Neutronenmikroskope regelmässig durchführt. Bei ihren Untersuchungen konzentrieren sich die Forschenden auf Wasserstoff, der in das Metall der Hüllrohre eindringt und dort sogenannte Hydride mit den Metallen bildet, was die Stabilität der Rohre beeinträchtigt.





Mit Rechenmodellen und Computersimulationen untersuchen Forschende die Vorgänge in Kernkraftwerken und machen die Anlagen so sicherer.

Die Arbeitsgruppe untersuchte, wie sich eine zusätzliche Schutzschicht bei Hüllrohren auswirkt, die sogenannten Liner. Diese sind weltweit und insbesondere in der Schweiz im Einsatz. Sie schützen die Hüllrohre gegen mechanische Beschädigungen. Liner haben, so fanden die Forschenden heraus, einen positiven Effekt: Hüllrohre, die über eine solche Schutzschicht verfügen, weisen darunter weniger Hydride auf. Der Wasserstoff dringt vermehrt in diese Beschichtung ein und wird schon dort gestoppt. Der Liner wirkt wie ein Schwamm für den Wasserstoff. Als würde eine Person im Bademantel in den Nieselregen gehen: Das Frottee

saugt das Wasser auf, die Haut bleibt trocken. Die Beschichtungen, die ursprünglich zum mechanischen Schutz eingeführt wurden, stabilisieren so vermutlich die Hüllrohre auf lange Sicht zusätzlich.

## Simulationen machen Kernanlagen sicherer

Computersimulationen helfen entscheidend dabei, Kernkraftwerke sicher zu betreiben. Auch Aufsichtsbehörden überprüfen damit die Sicherheit der Anlagen. Ob es um den Einbau neuer Komponenten oder um Tests und Versuche zur Wahrung der Sicherheit geht, fast alles muss vorher am Computer berechnet und analysiert werden. Forschende am PSI entwickeln dazu Rechenmodelle und Computerprogramme, die Komponenten und Teilsysteme sowie deren Zusammenspiel im Kernreaktor immer genauer modellieren. Sie fungieren damit als unabhängige Forschungspartner der Schweizer Aufsichtsbehörde, des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI, und tragen dadurch dazu bei, die Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke zu gewährleisten und fortwährend zu verbessern.

Schon seit einigen Jahren geht der Trend hin zu sogenannten Best-Estimate-Modellen, das heisst realistischen Rechenmodellen. Man versucht dabei, die Vorgänge in einem Reaktor auf Grundlage physikalischer Gesetze möglichst genau zu beschreiben und zu quantifizieren. Hypothetische Ereignisse, die zwar extrem unwahrscheinlich sind, die man aus Sicherheitsgrün-

den aber trotzdem untersuchen will, kann man damit erforschen, beispielsweise Störfälle in komplexen Nuklearanlagen. Die Forschenden am Labor für Simulationen und Modellierung (LSM) am PSI profitieren dabei von der rasanten Entwicklung der Computertechnologie.

## Mit Sicherheit eingeschlossen

In der Schweiz schreibt das Kernenergiegesetz eine geologische Tiefenlagerung der hochaktiven sowie der schwach- und mittelaktiven Abfälle aus Kernkraftwerken und anderen Quellen vor. Forschende des PSI wirken an diesem wichtigen gesellschaftlichen Unterfangen mit, indem sie die Naturvorgänge erforschen, die für die Sicherheit eines Tiefenlagers von Bedeutung sind.

## Eine Zukunftsfrage

Mit der Betreuung von Studierenden, Doktorierenden und jungen Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen trägt das PSI zusammen mit der ETH Zürich und der ETH Lausanne dazu bei, die Fachkompetenz in Sachen Nuklearenergie in der Schweiz langfristig zu erhalten: Im standortübergreifenden Masterstudiengang Nuclear Engineering lernen Ingenieure, wie man Kernkraftwerke effizient und sicher betreibt, wie man sie stilllegt und radioaktive Abfälle entsorgt.

# Hotlabor: Wissen aus den heissen Zellen

Die gesamte wissenschaftliche Expertise der Schweiz zum Materialverhalten und der Alterung von Kernkraftwerken ist am PSI konzentriert. Vom nuklearen Brennstoff selbst, über die Hüllrohre von Brennstäben bis hin zu den Reaktor-druckbehältern und Kühlmittleitungen – Forschende des PSI untersuchen, wie sich die Materialien unter den harschen Bedingungen während des Betriebs eines Kernkraftwerks verändern.

Bestrahlte und daher radioaktive Materialien, sei es aus Kernkraftwerken oder aus Forschungsanlagen, dürfen

nur unter strengen Sicherheitsvorkehrungen untersucht werden. Solche Untersuchungen geschehen im PSI-Hotlabor, einer schweizweit einzigartigen Anlage. In den sogenannten „heissen Zellen“, hinter bis zu einem Meter dicken Betonwänden und Bleiglasfenstern, ist die Radioaktivität hermetisch eingeschlossen und abgeschirmt – das schützt die Mitarbeitenden und vermeidet eine Kontamination der Umwelt. Mit von aussen gesteuerten Greifarmen können die Forschenden Experimente mit dem radioaktiven Material im Inneren der Kammern sicher durchführen.

Rund 35 Mitarbeitende betreuen die sicherheitstechnische und analytische Infrastruktur des Hotlabors – und arbeiten zudem an weiteren Forschungsthemen, zum Beispiel für die Medizin. So produzieren Wissenschaftler des PSI in den heissen Zellen einen Teil ihrer Radiopharmaka – radioaktive Medikamente gegen Krebs, die Tumore direkt im Körper bestrahlen. Das dafür benötigte radioaktive Isotop Terbium-161 soll in Zukunft an der Spallations-Neutro-

Das Hotlabor des PSI untersucht in seinen abgeschirmten Hotzellen seit vielen Jahren verbrauchte Brennstäbe aus den Schweizer Kernkraftwerken, um Schäden frühzeitig zu erkennen.

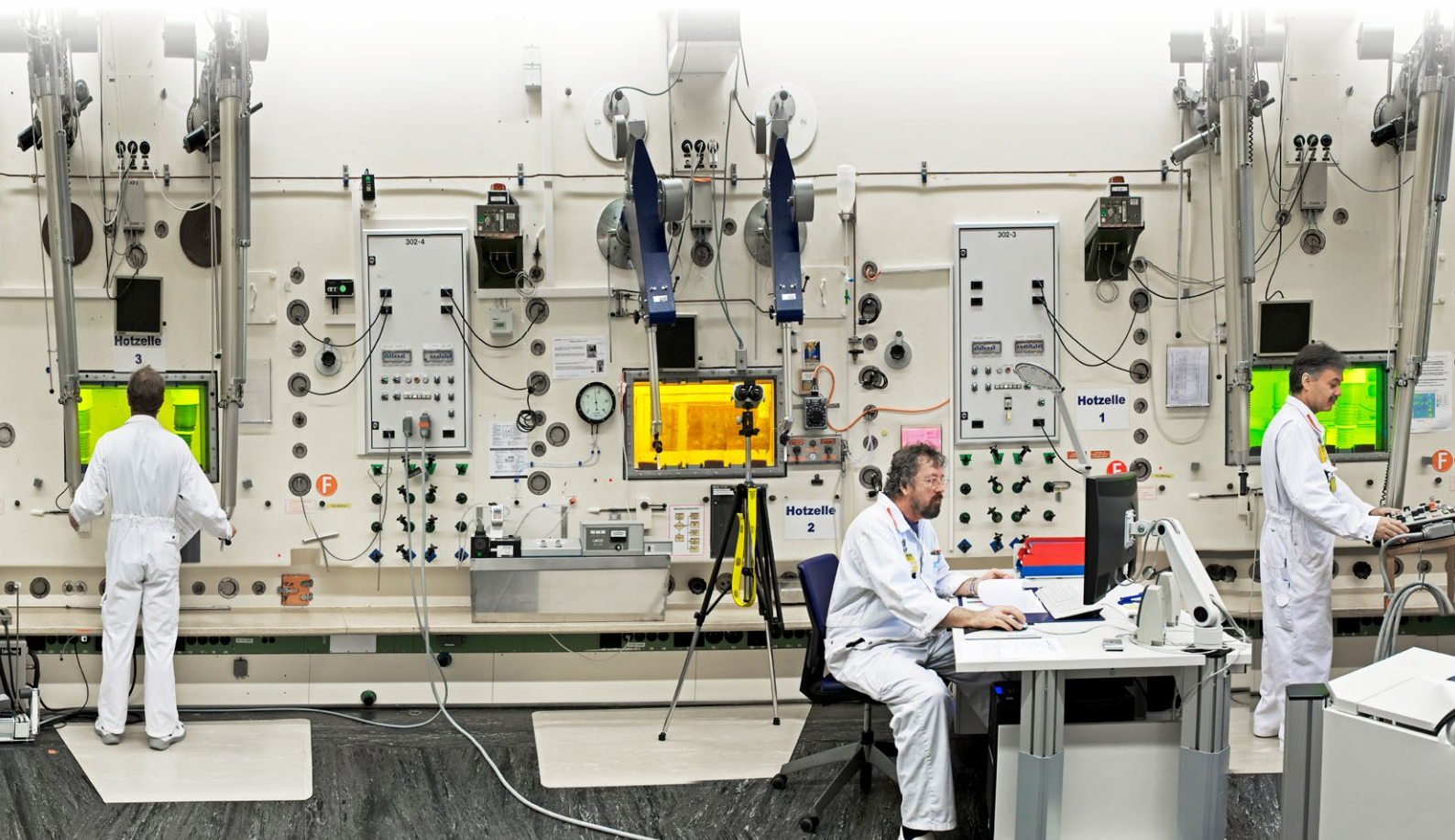




nenquelle SINQ des PSI erzeugt und dann in den abgeschirmten Zellen des Hotlabors von dem Element, aus dem es entsteht, abgetrennt werden. Kernaufgabe des PSI-Hotlabors sind ausführliche Untersuchungen an bestrahlten Brennstäben, um zu verstehen, wie sie sich während des Betriebs oder in der Phase der Zwischenlagerung verändern. Forschende im Hotlabor untersuchen regelmässig materialwissenschaftlich die abgebrannten Brennstäbe aus den Schweizer Kernkraftwerken mit modernen Analysemethoden. Sie nehmen die mögliche Versprödung

und Oxidation der Brennstabhüllen genauestens unter die Lupe. Im Mittelpunkt steht dabei, das Design der Brennstäbe kontinuierlich zu verbessern, sodass aus dem sicher eingeschlossenen Brennstoff möglichst viel Energie gewonnen werden kann. Die Erkenntnisse helfen den Kernkraftwerksbetreibern, ihre Kraftwerke effizienter und sicherer zu machen. Dem Hüllrohr der Brennstäbe gilt ein besonderes Augenmerk. Diese erste Schutzhülle gegen das Austreten von Radioaktivität aus einem Kernreaktor ist im Betrieb sehr hohen Belastungen

ausgesetzt, etwa Korrosion oder dem Eindringen von Wasserstoff. Dringt zu viel Wasserstoff ins Hüllrohr, bilden sich Hydride, Verbindungen von Wasserstoff und den Metallen des Hüllrohrmaterials, die das Hüllrohr spröder machen und das Wachstum bestehender Risse begünstigen. PSI-Wissenschaftler nutzen die hauseigenen Grossforschungsanlagen und die heissen Zellen des Hotlabors, um besser zu verstehen, wie der Wasserstoff aufgenommen wird, sich dann im Hüllrohr verteilt und dieses dadurch mechanisch schwächt.





# Energiesysteme: Der Blick für das Ganze



Am PSI erforschen Wissenschaftler Energiesysteme in ihrer ganzen Komplexität, auf nationaler wie globaler Ebene. Dazu nehmen die Forschenden sowohl die einzelnen Bereiche – Strom- und Wärmeversorgung sowie den Verkehr – als auch ihr Zusammenspiel unter die Lupe. Ausserdem prüfen sie diese vernetzten Systeme darauf, ob sie wirtschaftlich nachhaltig sind.

Dazu entwickeln die Forschenden Szenarien und treffen Annahmen darüber,

welche politischen Vorgaben, gesellschaftlichen Trends oder technologischen Entwicklungen das Umfeld bestimmen könnten. Ihre Ergebnisse sind keine in Stein gemeisselte Prognosen, sondern vielmehr fundierte Antworten auf die Frage: «Was wäre, wenn?»

## Energiemix der Zukunft

Das erwiesene wirtschaftsökonomische Fachwissen am PSI hat unter an-

derem zu einer Partnerschaft mit dem Weltenergieerat (WEC) geführt, in dessen Rahmen Szenarioanalysen über die globale Stromversorgung entstehen. Alle drei Jahre werden die Weltenergieszenarien in einer aktuellen Version veröffentlicht. In drei unterschiedlichen Szenarien beschreiben Forschende das globale Energiesystem und liefern eine Vorstellung davon, wie es sich unter bestimmten Rahmenbedingungen bis 2040 und darüber hinaus weiterentwickeln könnte.





Forschende am PSI vergleichen im Detail die Umweltauswirkungen von Personenwagen mit unterschiedlichen Antriebsarten und ermitteln deren Ökobilanz.

Die Szenarien tragen musikalische Bezeichnungen, die eine gewisse Grundstimmung ausdrücken. «Modern Jazz» geht davon aus, dass sich die Märkte vergleichsweise frei entwickeln und sich das Verbraucherverhalten sprunghaft und durchgreifend ändert, also beispielsweise sehr schnell sehr viele Elektroautos gekauft werden. In

«Unfinished Symphony» nehmen Regierungen deutlich grösseren Einfluss darauf, wie sich das Energiesystem entwickelt, beispielsweise durch Gesetze, langfristig stabile Rahmenbedingungen und Subventionen. In diesem Szenario kommen klimapolitische Entscheidungen und andere Nachhaltigkeitsaspekte viel stärker zum Tragen. «Hard Rock» wiederum geht von einem geringeren Wirtschaftswachstum aus als die beiden anderen Szenarien; die einzelnen Staaten kooperieren weniger und es gibt weniger Innovationen. Das Labor für Energiesystemanalysen des PSI hat über die vergangenen Jahre ein computergestütztes Modell des weltweiten Energiesystems aufgebaut und kontinuierlich weiterentwickelt. Das wendet es für die Weltenergieszenarien an. Dieses Modell – das Global MARKAL Model, kurz GMM – bildet die heutigen Strukturen des Energiesystems mit seinen Wechselwirkungen ab und integriert viele mögliche zukünftige Optionen für die Energieversorgung. So berechnen die Forschenden, wie sich Entwicklungsziele und Rahmenbedingungen auswirken werden, etwa auf den Energiemix, den Zugang zu Energie, auf die Kohlendioxid-Emissionen und das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum. Ein Ergebnis, das für alle drei Szenarien gilt: Elektrizität wird zunehmend wichtiger. Auch erreicht der durchschnittliche Pro-Kopf-Energieverbrauch in den kommenden zehn Jahren ein Maximum und sinkt danach wieder ab. Der Gesamtenergieverbrauch wird allerdings in keinem der drei Szenarien geringer, sondern wird sich in zwei der drei Szenarien sogar noch mehr als verdoppeln.

## Mobilität von morgen

Benzin, Diesel, Erdgas, E-Auto, Hybrid oder Brennstoffzelle – welche Technologien und Treibstoffe sind die umweltfreundlichsten? In einer Ökobilanz im Auftrag des Bundesamts für Energie analysierte das Labor für Energiesystemanalysen am PSI, wie sich die verschiedenen Arten von Personenwagen auf die Umwelt auswirken. Dabei berücksichtigten die Forschenden den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge, also Produktion, Betrieb und Entsorgung. Ihre Ergebnisse umfassten beispielsweise Treibhausgasemissionen, Primärenergiebedarf sowie die Bildung von bodennahem Ozon oder von Feinstaub. Ein Ergebnis: Aus Klimaschutzperspektive sind alternative Fahrzeuge und Treibstoffe – Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie synthetisches Methan – nur dann sinnvoll, wenn die Elektrizität zum Betrieb des Elektromotors beziehungsweise zur Produktion von Wasserstoff und Methan aus Kohlendioxid-armen Quellen stammt. Dies gilt heute und in Zukunft. Mit Strom aus annähernd Kohlendioxid-freier Produktion (Wasser-, Wind- und Kernkraftwerk) ermöglichen es Batteriefahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge und Antriebe auf Basis von synthetischem Methan, die Treibhausgasemissionen auf etwa die Hälfte gegenüber herkömmlichen Benzin- und Dieselaautos zu reduzieren. Falls jedoch Erdgaskraftwerke den zusätzlichen Strombedarf der Elektromobilität decken, dann sinken die Treibhausgasemissionen nicht. Parallel zum Ausbau der Elektromobilität muss also immer auch die erneuerbare Stromproduktion ausgebaut werden.



Das Paul Scherrer Institut aus der  
Vogelperspektive





# Das PSI in Kürze

Das Paul Scherrer Institut PSI ist ein Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Am PSI betreiben wir Spitzenforschung in den Bereichen Zukunftstechnologien, Energie und Klima, Health Innovation und Grundlagen der Natur. Durch Grundlagen- und angewandte Forschung arbeiten wir an nachhaltigen Lösungen für zentrale Fragen aus Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft. Das PSI entwickelt, baut und betreibt komplexe Grossforschungsanlagen. Jährlich kommen mehr als 2500 Gastwissenschaftler aus der Schweiz, aber auch aus der ganzen Welt zu uns. Genauso wie die Forscherinnen und Forscher des PSI führen sie an unseren einzigartigen Anlagen Experimente durch, die so woanders nicht möglich sind. Die Ausbildung von jungen Menschen ist ein zentrales Anliegen des PSI. Deshalb sind etwa ein Viertel unserer Mitarbeitenden Postdoktorierende, Doktorierende oder Lernende. Insgesamt beschäftigt das PSI 2200 Mitarbeitende. Damit sind wir das grösste Forschungsinstitut der Schweiz.

## Impressum

### **Konzeption/Texte/Redaktion**

Sebastian Jutzi,  
Brigitte Osterath

### **Fotos**

Scanderbeg Sauer Photography,  
Markus Fischer,  
Mahir Dzambegovic

### **Gestaltung und Layout**

Monika Blétry

### **Druck**

Paul Scherrer Institut

### **Zu beziehen bei**

Paul Scherrer Institut  
Events und Marketing  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI, Schweiz  
Telefon +41 56 310 21 11

Villigen PSI, Oktober 2021

## Kontakte

### **Forschungsbereichsleiter**

#### **Energie und Umwelt**

Prof. Dr. Thomas J. Schmidt  
Tel. +41 56 310 57 65  
thomasjustus.schmidt@psi.ch

### **Forschungsbereichsleiter**

#### **Nukleare Energie und Sicherheit**

Prof. Dr. Andreas Pautz  
Tel. +41 56 310 34 97  
andreas.pautz@psi.ch

### **Leiterin Abteilung Kommunikation**

Mirjam van Daalen  
Tel. +41 56 310 56 74  
mirjam.vandaalen@psi.ch

Paul Scherrer Institut :: 5232 Villigen PSI :: Schweiz :: Tel. +41 56 310 21 11 :: [www.psi.ch](http://www.psi.ch)

