

5  
2  
3  
2

#2/2024



Das Magazin des Paul Scherrer Instituts PSI

# Klimaneutral Fliegen – Ist das möglich?

# Schwerpunktthema: Klimaneutral Fliegen – Ist das möglich?



Hintergrund

## Ein komplexes Versprechen

Zur klimaneutralen Luftfahrt gehört mehr als nur die Reduktion der Emissionen beim Fliegen selbst. Eine Studie des PSI analysiert, was zum Erreichen des Fernziels nötig ist.

Seite 8

Interview

## Massiv investieren

Emanuel Fleuti, Head of Sustainability and Environment der Flughafen Zürich AG, zu nachhaltigem Fliegen.

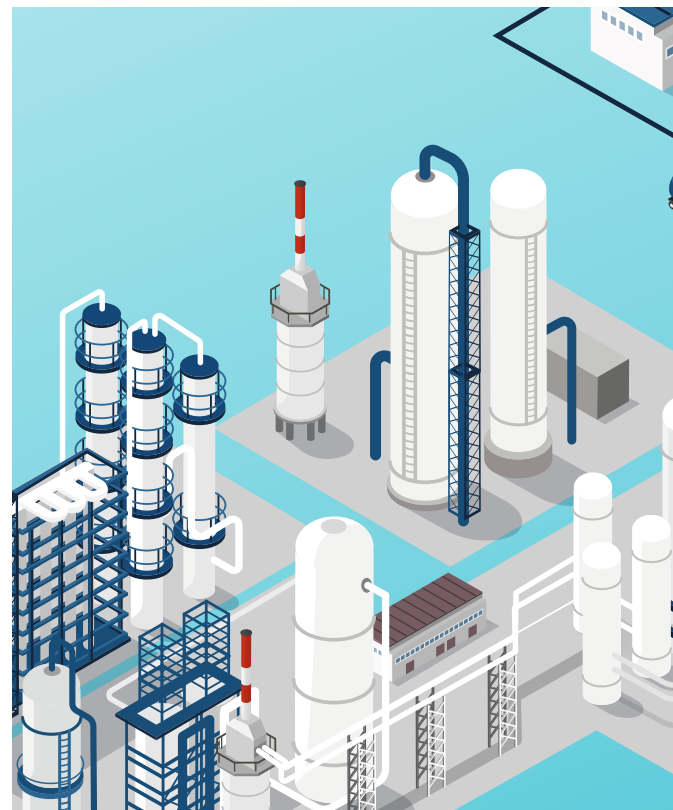
Seite 14

Infografik

## Herstellung von Sustainable Aviation Fuel

Eine Grafik zeigt die einzelnen Produktionsschritte für nachhaltiges Flugbenzin und wie sie zu einer funktionierenden Struktur zusammengefügt werden können.

Seite 14



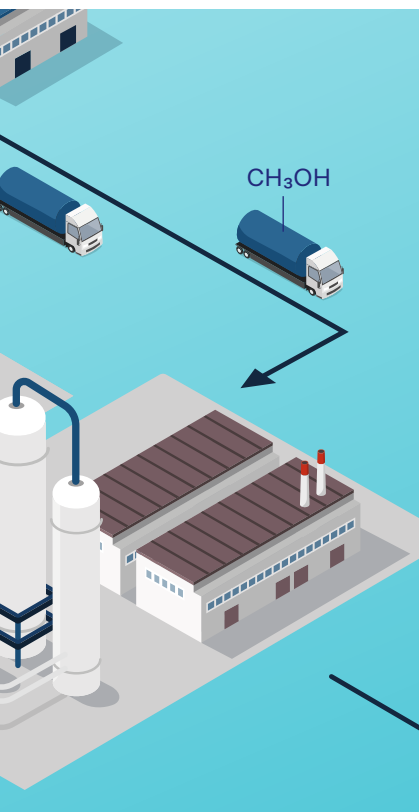


Reportage

## Mit nachhaltigem Kerosin abheben

Am PSI verfolgen Forschende gemeinsam mit der Industrie einen vielversprechenden Ansatz, um neue Produktionswege für klimaneutralen Flugtreibstoff zu entwickeln.

Seite 16



Editorial

**Die Zukunft des Fliegens** 4



Schwerpunktthema

**Klimaneutral Fliegen – Ist das möglich?** 6

Hintergrund

**Ein komplexes Versprechen** 8

Interview

**Massiv investieren** 14

Infografik

**Herstellung von Sustainable Aviation Fuel** 14

Reportage

**Mit nachhaltigem Kerosin abheben** 16

Im Bild

**Mathematisches Modellieren mit KI** 19

In der Schweiz

**Im fliegenden Labor** 20

Die Nationale Alarmzentrale NAZ führt jährlich mit Unterstützung des PSI Messflüge durch, um die radiologische Lage der Schweiz zu bestimmen.

In Kürze

**Aktuelles aus der PSI-Forschung** 24

- 1 Bionanomaschine für grüne Chemie
- 2 Medizinische Praxis und Forschung zusammenbringen
- 3 Park Innovaare eröffnet
- 4 Röntgenlicht rettet Musik

Galerie

**Lieblingsbücher am PSI** 26

In dieser Galerie haben wir Lieblingsbücher von PSI-Mitarbeitenden in Szene gesetzt.

Zur Person

**Eine Teilchenphysikerin im Klassenzimmer** 32

Giada Rutar ist Gymnasiallehrerin in Luzern und vermittelt dort unter anderem ihre Begeisterung für die Physik.

Alltag

**Tempolimit für Delfine** 36

Forschung

**Schonend Zellen knacken** 37

Wir über uns

38

Impressum

40

Ausblick

41



# Die Zukunft des Fliegens



Der Mensch will mobil sein. Seit den frühesten Tagen der Menschheitsgeschichte haben wir stets nach neuen Wegen gesucht, um weiter, schneller und effizienter von einem Ort zum anderen zu gelangen. Dieser Drang hat uns vor mehr als 100 Jahren das Fliegen ermöglicht. Heute ist die Luftfahrt das Rückgrat der globalen Mobilität und damit auch der Wirtschaft. Doch dieser Fortschritt hat seinen Preis: Emissionen aus dem Luftverkehr tragen erheblich zum Klimawandel bei.

Eine vielversprechende Lösung für dieses Problem ist nachhaltiges Flugbenzin, sogenanntes Sustainable Aviation Fuel (SAF). Es wird aus erneuerbaren Quellen wie Biomasse oder durch chemische Prozesse hergestellt, die Kohlenstoff aus der Atmosphäre binden, und die Herstellung benötigt viel Energie. Im Gegensatz zu herkömmlichem Kerosin, das aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird und bei der Verbrennung viel zusätzliches Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) freisetzt, kann SAF den CO<sub>2</sub>-Fussabdruck der Luftfahrt deutlich reduzieren. Das macht SAF zu einer Schlüsseltechnologie auf dem Weg zu einer klimafreundlicheren Luftfahrt.

Die Herstellung von SAF ist derzeit noch sehr kostenintensiv. Die Umwandlung von Biomasse oder Abfallstoffen in flüssigen Treibstoff erfordert komplexe chemische Prozesse, die sowohl technologisch anspruchsvoll als auch energieintensiv sind. Diese Prozesse müssen weiter optimiert und skaliert werden, um eine Massenproduktion zu ermöglichen.

Die technischen Herausforderungen sind jedenfalls lösbar und am PSI arbeiten wir mit Hochdruck daran, diese zu meistern. Dabei nutzen wir die Expertise unserer Forschenden gemeinsam mit Partnern aus der Industrie. Ziel dieser Kooperationen ist es, die Herstellungsprozesse effizienter und die Produktion gleichzeitig wirtschaftlicher zu machen.

Ein grosser Vorteil von SAF ist, dass diese Kraftstoffe relativ einfach in das bestehende System integriert werden können. Dennoch bedeutet die Umstellung auf Klimaneutralität auch für Unternehmen wie Flughäfen eine enorme Kraftanstrengung. Ein Beispiel dafür ist der Flughafen Zürich, auf dessen Besucherterrasse ich stehe, denn zur Luftfahrt gehört weit mehr als der technische Antrieb von Flugzeugen. Auch für diese Bereiche der Luftfahrt haben PSI-Forschende Berechnungen und Modelle entwickelt, die Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen.

Das Fazit unserer bisherigen Forschung ist ermutigend: Die Zukunft des Fliegens kann nachhaltig sein. Mehr über den Weg zu diesem ehrgeizigen Ziel erfahren Sie in dieser Ausgabe.

Ihr Christian Rüegg, PSI-Direktor

# Klimaneutral Fliegen – Ist das möglich?

Wenn die Schweiz das Versprechen einhalten will, bis 2050 klimaneutral zu sein, dann betrifft das auch die Luftfahrt. Ein wichtiger Baustein für dieses Vorhaben ist nachhaltiger Flugtreibstoff. Doch das alleine wird nicht genügen, denn der Luftverkehr umfasst viel mehr klimarelevante Faktoren als nur das Verbrennen von Kerosin während eines Fluges.

1

Hintergrund

Ein komplexes Versprechen

Seite 8



4

Reportage

Mit nachhaltigem Kerosin abheben

Seite 16

2

Interview

Massiv investieren

Seite 14

3

Infografik

Herstellung von Sustainable  
Aviation Fuel

Seite 14

# Ein komplexes Versprechen

Zur klimaneutralen Luftfahrt gehört mehr als nur die Reduktion der Emissionen beim Fliegen selbst. Eine Studie des PSI analysiert, was zum Erreichen des Fernziels nötig ist.

Text: Jan Berndorff

Als die Brüder Wright im Jahr 1903 an einem Strand unweit der Kleinstadt Kitty Hawk im US-Bundesstaat North Carolina ihre ersten Flugversuche mit einem steuerbaren Motorfluggerät unternahmen, war noch nicht absehbar, wie sich die Luftfahrt in den folgenden gut 120 Jahren entwickeln würde. Heute ist Fliegen alltäglich, ein umfassendes Netz an Flugrouten umspannt die Erde und beinahe jede Region auf unserem Globus – ob nah oder fern – ist in höchstens ein oder zwei Tagen per Flugzeug erreichbar. Ein Angebot, das den Bedürfnissen vieler Menschen entgegenkommt. Bezifferte der internationale Dachverband der Fluglinien IATA die Passagierzahlen im Jahr 2023 noch auf 4.35 Milliarden, sollen sich diese bis 2050 auf über 10 Milliarden Fluggäste pro Jahr mehr als verdoppeln.

Dass dies nicht ohne Folgen bleibt, liegt auf der Hand. Bedenklich sind vor allem die Auswirkungen auf das Klima, denn bezogen auf die Personenkilometer belastet der Luftverkehr das Klima deutlich stärker als andere Verkehrsmittel. Auf den ersten Blick denkt man dabei vor allem an das Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), das Flugzeuge aus ihren Triebwerken ausstossen. Doch wie so oft ist die Sache in Wahrheit komplexer.

Eine Flugreise beginnt mit der Buchung. Schon dabei können klimawirksame Überlegungen eine Rolle spielen: Der Luftverkehr trägt laut der Internationalen Energieagentur (IEA) über drei Prozent zu den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei, der Anteil am Treibhauseffekt insgesamt ist noch grösser – nicht zuletzt, weil die Atmosphäre in höheren Schichten, wo Flugzeuge fliegen, viel empfindlicher reagiert als am Boden. Wer einmal Economy-Klasse nach New York und zurück fliegt, emittiert damit rechnerisch an die drei Tonnen CO<sub>2</sub> – in der Businessclass wegen des entsprechend höheren Platzbedarfs etwa das Doppelte und in der First Class das Dreifache. Drei Tonnen sind schon ein Viertel der durchschnittlichen Emissionen, die ein Schweizer oder eine Schweizerin sonst im ganzen Jahr verursachen. Dabei nutzen Bürgerinnen und Bürger unseres Landes besonders häufig den Flieger: Im Schnitt 1,6 Mal pro Kopf und Jahr. Das ist doppelt bis dreimal so häufig wie die

Menschen in unseren Nachbarländern Deutschland, Österreich, Frankreich und Italien.

Viele Airlines bieten deshalb «grüne» Buchungsoptionen an: So lassen sich zum Beispiel bei einem Flug nach New York durch einen Zuschlag von 90 Franken auf das 800-Franken-Ticket die verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgleichen. 80 Prozent des Extrageldes, so versprechen einige Airlines, sollen in Klimaschutzprojekte investiert werden, 20 Prozent in den Kauf von sogenanntem Sustainable Aviation Fuel (SAF). Das ist nachhaltiges Kerosin, welches ohne Erdöl hergestellt wird.

Ist damit alles gut? Liesse sich das Fliegen also durch Kompensationszahlungen in dieser Grössenordnung klimaneutral organisieren?

«Leider nicht», sagt Thomas J. Schmidt, Leiter des Center for Energy and Environmental Sciences am PSI. Eine Studie des PSI und der ETH Zürich im vergangenen Jahr hat es deutlich gemacht: Eine klimaneutrale Luftfahrt ist demnach zwar möglich – erfordert aber weit mehr als solch überschaubare Preisaufschläge zur Finanzierung von Klimaschutz und SAF. «Und da geht es nicht nur um höhere Preise», so Schmidt.

## Hohe Ambitionen

Die Luftfahrtbranche hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoss auf Netto-Null zu reduzieren und Klimaneutralität zu erreichen. Damit folgt sie dem gleichlautenden Ziel, das die EU 2021 und die Schweiz per Volksentscheid 2023 beschlossen haben: Bis 2050 will man insgesamt klimaneutral werden, um der Erderwärmung effektiv entgegenzuwirken. Die grosse Frage ist, ob und wie das funktionieren kann. Insbesondere in der Luftfahrt, da Flugzeuge enorm viel Energie zum Fliegen sowie eine komplexe Infrastruktur und Logistik im Hintergrund benötigen.

Genau dieser Frage sind Romain Sacchi und Christian Bauer vom Energy Systems Analysis Lab des PSI sowie Viola Becattini und Marco Mazzotti vom Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich gemeinsam nachgegangen. Sie haben Daten und





Die Luftfahrt bürdet dem Klima einen erheblichen ökologischen Rucksack auf. Im Gepäck fällt nicht nur Kohlendioxidausstoß beim Verbrennen von Kerosin ins Gewicht. Viele weitere Effekte wirken sich aus. Neben Prozessen in der Atmosphäre auch das menschliche Verhalten, denn der Flugverkehr nimmt stetig zu.

Quellen:

- 1 Internationale Energieagentur (IEA), Daten für 2019
- 2 Statista
- 3 Flight Aware

Prognosen zu allen Aspekten gesammelt und verschiedene Szenarien der Entwicklung bis 2050 durchgerechnet.

«Eine wichtige Frage dabei ist, was eigentlich genau mit Netto-Null-CO<sub>2</sub> beziehungsweise Klimaneutralität gemeint ist», sagt Romain Sacchi, neben Viola Becattini Erstautor der Studie. Viele Bilanzen betrachten nämlich nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Fliegens selbst. «Das greift aber viel zu kurz», ergänzt Becattini. Wenn der Flugverkehr weiterhin wächst wie bisher, dann machen die reinen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Flüge laut den Berechnungen bis 2050 tatsächlich nur etwa 20 Prozent des gesamten Klimaeffekts aus. Wer den gesamten Flugbetrieb klimaneutral gestalten will, muss neben dem Fliegen auch die Produktion des Treibstoffs und die gesamte Luftfahrtinfrastruktur betrachten – vor allem aber auch andere Emissionen der Flugzeuge, die sich auf das Klima auswirken.

**Die andere Hälfte der Wahrheit**

Bei einer Flugreise ist es ja nicht mit dem Fliegen allein getan. Wie eine Reise mit dem Auto Strassen, Tankstellen und Parkplätze notwendig macht, braucht auch das Flugzeug eine gewisse Infrastruktur – und

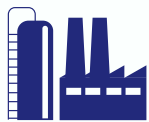
dazu noch eine komplexe Logistik, um die Flugzeuge, Mannschaften und Gäste zu versorgen und alle zusammen möglichst pünktlich abheben zu lassen. Kerosin, Gepäck, Catering – all das muss transportiert, Flugzeuge müssen instand gehalten, Terminals, Hangars und andere Betriebsgebäude gereinigt, geheizt und beleuchtet werden. Auch das verursacht Treibhausgasemissionen.

Zürich, der grösste Flughafen der Schweiz, wickelte 2023 nach eigenen Angaben knapp 250 000 Flüge ab, wobei 380 000 Tonnen Fracht und 29 Millionen Passagiere befördert wurden. 27 000 Menschen arbeiten an diesem Ort. Der Gesamtenergieverbrauch ist vergleichbar mit dem einer mittelgrossen Stadt. In der Schweiz, wo Strom vor allem mit Wasser- und Kernkraft und zu nicht einmal zwei Prozent noch mit fossilen Energieträgern erzeugt wird, trübt das weniger als in anderen Ländern die CO<sub>2</sub>-Bilanz. Dennoch setzt auch die Stromproduktion CO<sub>2</sub> frei. Zudem müssen in die Klimabilanz natürlich die Emissionen einkalkuliert werden, die beim Bau des Ganzen samt den Flugzeugen frei wurden.

Die Studie von PSI und ETH allerdings zeigt, dass der Klimaeffekt durch die Fluginfrastruktur zwar eingerechnet werden muss, insgesamt jedoch – vor allem über die Zeit bis 2050 und darüber

# Die Vielzahl der Klimaeffekte

Nicht nur der CO<sub>2</sub>-Ausstoss der Flugzeuge treibt die Klimaerwärmung an. Ein weiteres klimawirksames Flugabgas ist Stickoxid. Es fördert die Bildung von Ozon, das in dieser Höhe ein sehr effektives Treibhausgas darstellt. Den grössten Effekt aber haben Russ sowie andere Partikel: Sie fördern die Bildung von Zirruswolken, die das Klima stark erwärmen. Treibhausgase entstehen aber auch bei Bau und Betrieb des Flughafens, Herstellung und Transport des Treibstoffs und Anreisen der Passagiere.



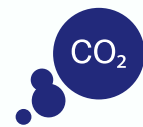
Produktion  
Treibstoff



Bau von  
Flugzeugen



An- und Abreise



direkter  
CO<sub>2</sub>-Ausstoss



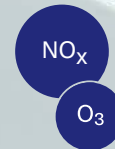
Kondensstreifen/  
Zirruswolken



Betrieb Flughafen/  
Infrastruktur



Bau Flughafen/  
Infrastruktur



Stickoxid/ Ozon

hinaus – relativ gering ausfällt. Die Klimaeffekte des Fliegens selbst und der Emissionen durch die Herstellung des Treibstoffes sind weitaus grösser. Das veranschaulicht die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Flughafens Zürich für 2021: Die Emissionen des Flughafenbetriebs lagen bei gut 30 000 Tonnen, die der Flüge und anliefernden Zufahrten dagegen bei 1,6 Millionen Tonnen.

Noch relevanter für das Klima – dies hat die Studie klarer als je zuvor gezeigt – sind die sogenannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte beim Fliegen. Gemeint sind damit die bei der Verbrennung des Kerosins frei werdenden Russ- und andere Partikel, die als Kondensationskeime für Wolken dienen. Ausserdem gehören Stickoxide dazu, die in der Luft die Bildung von Ozon fördern, das in der Troposphäre als Treibhausgas wirkt. Und schliesslich zählen noch Wasserdampf und die daraus resultierenden Kondensstreifen hierzu, welche die Bildung von Zirruswolken in der oberen Atmosphäre in rund zehn Kilometern Höhe beeinflussen können.

Diese aus Eispartikeln bestehenden Schleierwolken haben nicht etwa einen kühlenden Effekt auf die Erdoberfläche wie die tieferen Schicht- und Haufenwolken, die das einfallende Sonnenlicht reflektieren. «Stattdessen sind sie für das Sonnenlicht recht transparent», sagt Benjamin Tobias Brem, der am Labor für Atmosphärenchemie des PSI Center for Energy and Environmental Sciences die Umweltfolgen der Luftfahrtemissionen erforscht. «Die von der Erdoberfläche kommende Infrarotstrahlung dagegen wirkt die Eispartikel sehr effektiv zurück zur Erde und bewirkt dadurch eine zusätzliche Erwärmung.» Der wärmende Effekt ist von der geografischen Breite und Höhe der Wolken abhängig. In unseren Breiten tritt dieser Effekt etwa ab sechs Kilometern Höhe ein – also in den Sphären, wo die grossen Langstreckenflugzeuge verkehren, die den Grossteil der Flugemissionen weltweit ausmachen.

«Insgesamt machen diese Nicht-CO<sub>2</sub>-Faktoren mehr als die Hälfte des Klimaeffekts beim Fliegen aus», sagt Christian Bauer. «Sie werden bislang in vielen Analysen und «Net Zero»-Versprechen jedoch ausser Acht gelassen. Oder nicht korrekt berechnet.»

### Bisherige Bilanzen waren unpräzise

Üblich ist es, solche Emissionen und Effekte in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umzurechnen, um sie in die Bilanz einzubeziehen. «Doch die bisher dazu verwendeten Methoden und Werte haben sich als unzutreffend erwiesen», sagt Marco Mazzotti. «Wir sind deshalb präziser vorgegangen.» Die von den Forschenden verwendeten Verfahren berücksichtigen vor allem einen wesentlichen Unterschied zwischen den verschiedenen Faktoren: Die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte sind viel kurzlebiger als CO<sub>2</sub>, sie werden daher auch «Short Lived Climate Forcers»,

kurz SLCF genannt – also «kurzlebige Klimatreiber». Während von dem emittierten CO<sub>2</sub> etwa die Hälfte von Wäldern und Ozeanen absorbiert wird, bleibt die andere Hälfte für Tausende von Jahren in der Luft, verteilt sich und wirkt als Treibhausgas. Dagegen ist beispielsweise Ozon im Vergleich zu CO<sub>2</sub> zwar um ein Vielfaches klimawirksamer, baut sich aber binnen weniger Monate ab. Kondensstreifen und daraus resultierende Wolken verflüchtigen sich gar in wenigen Stunden. «Das Problem ist, dass wir durch den zunehmenden Flugverkehr ständig mehr SLCF produzieren, sodass sie sich summieren, anstatt schnell wieder zu verschwinden. Dadurch entfalten sie ihr gewaltiges Treibhauspotenzial auch über längere Zeiträume», sagt Viola Becattini. Das sei wie in einer Badewanne, bei der sowohl der Abfluss als auch der Wasserhahn geöffnet ist: Solange der Wasserhahn mehr Wasser reinlässt, als durch den Abfluss entweichen kann, wird die Wanne immer voller – und irgendwann läuft sie über.

Die Forschenden haben nun in ihren Szenarien Möglichkeiten betrachtet, um den Wasserhahn bis 2050 zumindest so weit zuzudrehen, dass er nur noch so viel reinlässt, wie durch den Abfluss rausläuft. Die Luftfahrt dürfte insgesamt nicht mehr CO<sub>2</sub>-Äquivalente emittieren, als der Atmosphäre an anderer Stelle wieder entzogen wird. Erst dann wäre das Fliegen tatsächlich klimaneutral. Dazu zählt ausdrücklich auch das Abscheiden von CO<sub>2</sub> aus der Luft, das anschliessend im Boden verpresst wird, wo es klimaunschädlich lagert wie einst das Erdöl, bevor wir es hervorholten. Solche sogenannten Carbon-Capture- and Storage-Verfahren (CCS) sind bereits



«Die weltweiten Kapazitäten zum Einfangen und Speichern von Kohlendioxid reichen zum Ausgleich verbleibender Emissionen nicht aus.»

Christian Bauer, PSI Energy Systems Analysis Lab



## «Wahrscheinlich geht die Zahl der Flüge nur dann spürbar runter, wenn es wirklich teurer wird.»

Thomas J. Schmidt, PSI Center for Energy and Environmental Sciences

in Gebrauch und gelten insbesondere dort, wo sich gewisse CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht vermeiden lassen, als Möglichkeit. Ihre langfristige Wirkung und Unbedenklichkeit muss diese Technik allerdings erst noch beweisen.

Der Antrieb ist der naheliegendste Hebel, um die Klimabilanz des Fliegens zu verbessern. Forschende rund um den Globus arbeiten an der Entwicklung von elektrisch und per Wasserstoff angetriebenen Flugzeugen. Wenn man den Strom zum Laden von Batterien beziehungsweise zur Herstellung von Wasserstoff aus Wasser-, Wind- oder Solarkraft gewinnt, wären solche Antriebe klimaneutral. Das setzt dann aber auch voraus, dass alle vorgelagerten Produktionsprozesse – beispielsweise die Herstellung von Akkus – mithilfe erneuerbarer Energie abgewickelt wurden.

Doch selbst wenn das so wäre, bleiben noch unüberwindbare technische Hürden: Batterien erreichen heute eine Energiedichte von 250 Wattstunden pro Kilogramm. Kerosin liefert 12000 – das bedeutet beinahe Faktor 50. Man müsste für den Langstreckenflug einer grossen Maschine wie bei einer New-York-Reise derzeit also so viele vollgeladene Batterien mitnehmen, dass das Flugzeug zu schwer wäre, um abzuheben. Und selbst mit Fortschritten in der Batterietechnik wird sich das absehbar nicht hinreichend bessern. Einstweilen können daher allenfalls Kleinflugzeuge auf Kurzstrecken batterieelektrisch fliegen. Die machen jedoch weniger als zwei Prozent der Treibhausgasemissionen in der Luftfahrt aus.

Ähnlich sieht es beim Wasserstoff aus: Selbst in seiner tiefgekühlten kompakten flüssigen Form

nimmt Wasserstoff pro Wattstunde, die er liefert, viermal so viel Volumen ein wie Kerosin. Die Flugzeuge müssten zwar nicht mehr Gewicht tragen, aber mehr Volumen für den Treibstoff bereitstellen, und Volumen ist bei der Konstruktion von Flugzeugen eine kritische Grösse. Es wird intensiv daran geforscht, wie Flugzeuge und die Zulieferkette für Wasserstoff optimal gestaltet werden müssten. Aber das ist eben der Haken: Der Umgestaltungsaufwand für Flugzeuge wie Infrastruktur ist immens – und beansprucht Zeit. Einige Hersteller wie Airbus haben angekündigt, frühestens 2035 die ersten Wasserstoffflugzeuge in Dienst zu stellen.

Doch auch die werden nicht allzu gross sein (bis etwa 90 Sitzplätze) und nicht für die Langstrecke taugen, sondern eher für innerkontinentale Flüge. Die angepeilte Reichweite liegt bei rund 2000 Kilometern. Bis New York kommt man damit nicht. Den Hauptteil der Treibhausgasemissionen in der Luftfahrt machen jedoch grosse Flugzeuge auf der Langstrecke über 4000 Kilometer aus.

Der Hoffnungsträger ist daher das bereits erwähnte Sustainable Aviation Fuel (siehe auch Infografik Seite 14).

### Dreifach teurere Flugtickets



Der umfassende Einsatz von SAF kann uns einer klimaneutralen Luftfahrt bis 2050 sicher deutlich näherbringen, kostet aber mehr Ressourcen und Geld, vor allem weil die Produktion von Wasserstoff per Elektrolyse sehr energieaufwendig ist.

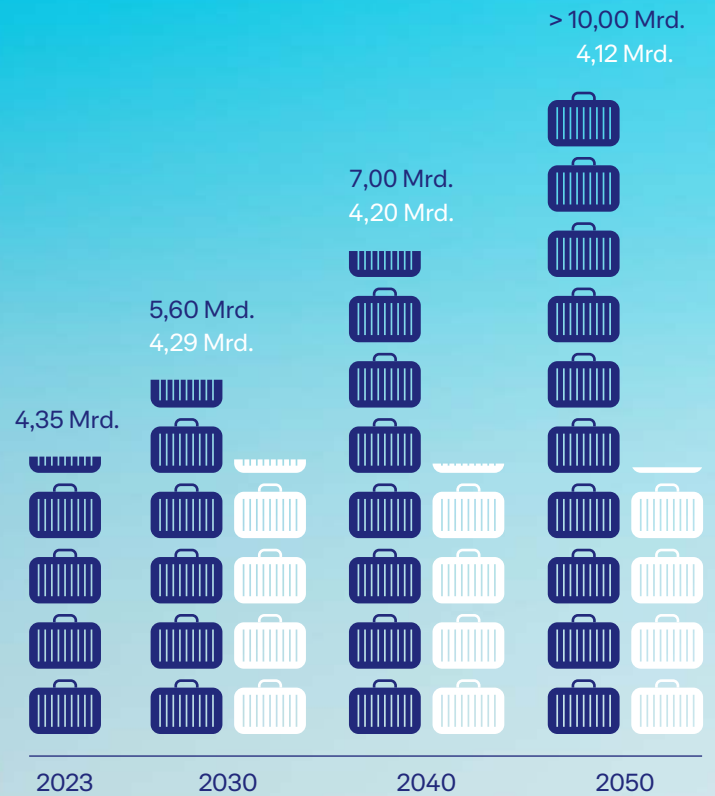
Was uns zu den Kompensationszahlungen zurückbringt. Die Forschenden von PSI und ETH haben auch das durchkalkuliert: «Ein paar Euro Aufschlag sind reine Augenwischerei», sagt Christian Bauer. «Um die tatsächliche Klimawirkung einer Flugreise umfassend auszugleichen, müsste ein Ticket stattdessen etwa das Dreifache kosten.» Für den New-York-Flug hätten wir dann nicht 890 Franken statt 800 bezahlt. Sondern 2400.

«Eine derart heftige Preissteigerung hätte gleichzeitig den Vorteil, dass dadurch sicherlich die Nachfrage nach Flügen deutlich sänke», sagt Viola Becattini. Darin nämlich liegt die wichtigste Botschaft ihrer Studie: So vielversprechend der Einsatz von SAF, alternative Antriebe und mögliche Effizienzgewinne in Herstellung, Logistik und Transport auch sind – bis ganz ans Ziel werden sie uns laut den berechneten Szenarien alle nicht bringen. Zumindest nicht bis 2050. Denn dazu müssten wir zu grosse Mengen verbleibender Emissionen durch CCS ausgleichen, also aus der Luft einfangen und im Boden speichern. «Dafür reichen die weltweiten Kapazitäten dieser Methode nicht aus», sagt Bauer. Zumal sie natürlich nicht

## Wunsch und Wirklichkeit

Die Prognosen der Luftfahrtbranche hinsichtlich des Flugaufkommens weichen erheblich davon ab, was wir uns aus Klimasicht leisten können: Selbst wenn wir alle Flugzeuge auf grüne Antriebe umstellen, müssten die Zahlen sinken, um bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen.

-  Prognose zur Entwicklung der Passagierzahlen
-  Notwendige Entwicklung der Passagierzahlen



Quelle: IATA



nur der Luftfahrt vorbehalten seien und im grossen Massstab noch wenig erprobt sind.

Fazit: Letztlich müssen wir weniger statt mehr fliegen – anders geht es nicht. Sacchi und Becattini haben auch berechnet, wie viel weniger: Im Zusammenspiel mit gesteigerter Effizienz und CCS im Rahmen des Machbaren müsste der Flugverkehr sich jedes Jahr um 0,2 Prozent verringern, sodass er 2050 nur noch rund 95 Prozent des heutigen Aufkommens

beträgt. Blieben wir bei fossilem Kerosin, müssten wir uns viermal so stark einschränken – auf 80 Prozent.

«Wie wir es hinbekommen, die Flugzahlen im nötigen Mass zu regulieren, ist eine Frage, die Gesellschaft und Politik beantworten müssen», sagt Thomas J. Schmidt. «Da braucht es sicher Verhaltensänderungen. Doch die lassen sich nicht leicht verordnen. Wahrscheinlich geht die Zahl der Flüge nur dann spürbar runter, wenn es wirklich teurer wird.» ●



## Massiv investieren

Emanuel Fleuti ist Head of Sustainability and Environment der Flughafen Zürich AG.

### Herr Fleuti, die Luftfahrt soll bis 2050 klimaneutral sein. Wie kann Ihr Flughafen da vorangehen?

**Emanuel Fleuti:** Wir investieren massiv in die Dekarbonisierung, elektrifizieren zum Beispiel unsere Fahrzeugflotte, vor allem aber gestalten wir die Energieversorgung unseres grossen Gebäudeparks immer effizienter und setzen auf erneuerbare Energieträger. Wir wollen die Zahl unserer zwölf Solaranlagen bis 2040 mindestens verdoppeln, Bestandsgebäude sanieren wir energetisch, Neubauten werden mit modernster Technologie ausgestattet wie etwa Energiepfählen oder Erdsonden, die geothermische Wärme aus dem Boden nutzbar machen. Aktuell prüfen wir mit Fachleuten, ob die unter unserem Flughafen verlaufende geologische Eiszeitrinne als Wärme- und Kältespeicher dienen kann. Das wäre ein grosser Schritt in Richtung emissionsfreies Heizen und Kühlen am Flughafen Zürich bereits ab 2040.

### Wie würde das funktionieren?

Diese natürliche Rinne in rund 300 Metern Tiefe ist bis zu einem Kilometer breit und circa 30 Kilometer lang und mit wasserführendem Kies gefüllt. Im Sommer könnten wir die Wärme aus unseren Energieüberschüssen im Wasser speichern, um diese Wärme dann im Winter zu nutzen. Und umgekehrt. Derzeit bauen wir an einem Testbrunnen.

### Welche Rolle spielt aus Ihrer Sicht SAF beim Erreichen der Klimaneutralität?

SAF gilt als eine Art Königsweg zur Klimaneutralität im Flugverkehr. Wir sind bereits 2020 eine Kooperation mit dem Hightechunternehmen Synhelion SA eingegangen. 2020 hat bei uns auch erstmals in der Schweiz ein Flugzeug SAF getankt. Wir selbst als Flughafen haben da aber nur eine vermittelnde Funktion zwischen Treibstoffhersteller und Fluggesellschaft.

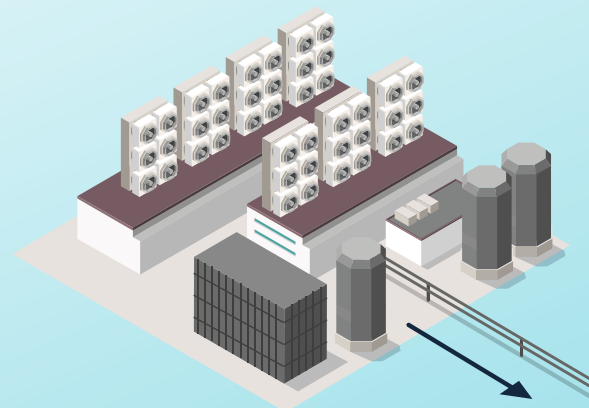
### Eine Studie des PSI hat ergeben, dass zur Klimaneutralität auch die Flugzahlen um fünf Prozent sinken müssten. Was würde das für Ihren Flughafen bedeuten?

Ich kenne die Studie nicht. Als Flughafen haben wir keine Wachstumsziele. Unsere Entwicklung hängt vom Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum der Schweiz ab. Aber angesichts der Nachfrage nach Flugreisen erscheint es schwierig, die Zahlen zu reduzieren. Vor allem für Langstreckenflüge gibt es oft keine Reise-Alternative. Wir dürfen nicht vergessen, dass Fliegen in einer vernetzten Welt für viele Menschen die einzige realistische Option ist, um Freunde, Verwandte und Familie zu sehen.

### Wie könnten Sie mit einem Rückgang der Passagierzahlen umgehen?

Als Flughafen haben wir vom Bund den Auftrag, dafür zu sorgen, die Schweiz mit den Metropolen der Welt zu verbinden. Wenn die Gesellschaft sich entscheidet, weniger zu fliegen, passen wir uns an.

## Produktionskette: So könnte SAF in Zukunft hergestellt werden



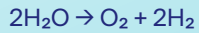
### CO<sub>2</sub> aus der Luft

Mit speziellen Turbinen lässt sich CO<sub>2</sub> aus der Luft filtern. Alternativ kann man es auch bei Biogas- oder Kläranlagen aus den Abgasen abscheiden.



## Wasser-Elektrolyse

Mithilfe elektrischen Stroms und einer speziellen Membran spalten Elektrolyseure Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff.

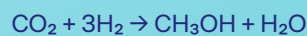


## Erneuerbare Energien

Grundvoraussetzung ist es, den Strombedarf für die Anlagen ökologisch zu decken, also aus Wasser, Wind und Sonne. Insbesondere zum Betrieb der sehr energiehungrigen Elektrolyseure.

## Methanol-Synthese

In einer Raffinerie-artigen Anlage wird mithilfe von Katalysatoren aus dem Kohlendioxid und dem Wasserstoff Methanol hergestellt.



## Am Flughafen

Mit herkömmlicher Transportlogistik wird der Kerosin-Ersatz am Flughafen angeliefert. Flugzeuge können ihn tanken wie normales Kerosin.

## SAF

Aus Methanol wiederum lässt sich mithilfe neu entwickelter mehrstufiger Verfahren und einem Katalysator sehr effizient der richtige Mix aus Kohlenwasserstoffen synthetisieren. Dieser künstliche Flugtreibstoff kann Kerosin eins zu eins ersetzen.

# Mit nachhaltigem Kerosin abheben

Weltweit arbeiten Forschende daran, neue Produktionswege für klimaneutralen Flugtreibstoff zu finden und zu optimieren. Am PSI verfolgen sie gemeinsam mit der Industrie einen vielversprechenden Ansatz.

Text: Jan Berndorff

Ein grosser Hoffnungsträger der Luftfahrtbranche, um das ausgerufene Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen, heisst Sustainable Aviation Fuel, kurz SAF. Bislang eingesetztes Kerosin besteht aus einem Mix bestimmter Kohlenwasserstoffe, die auf Erdöl basieren. Bei ihrer Verbrennung in den Flugzeugturbinen wird neben der Energie auch Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) frei. Dessen Konzentration in der Atmosphäre steigt, das Klima heizt auf.

SAF besteht aus den gleichen Kohlenwasserstoffen und kann das fossile Kerosin anders als Energieträger wie Strom oder Wasserstoff unmittelbar ersetzen. «SAF lässt sich direkt in die bestehende Flughafeninfrastruktur integrieren und mit ein paar Anpassungen in konventionellen Triebwerken nutzen», erklärt Marco Ranocchiari, Chemiker am PSI und Leiter der ESI-Plattform (ESI steht für «Energy System Integration», die Plattform ist eine Versuchsanlage für umweltfreundliche Energien der Zukunft).

Der Klimavorteil von SAF besteht darin, dass die Kohlenwasserstoffe nicht in Form von Erdöl dem Erdboden entnommen werden und die Atmosphäre zusätzlich belasten. Stattdessen dient biologisches Material von der Oberfläche als Quelle – bislang vor allem gebrauchte pflanzliche und tierische Speiseöle und -fette. Der enthaltene Kohlenstoff stammt aus der Atmosphäre, die CO<sub>2</sub>-Konzentration bleibt unterm Strich gleich. Der Antrieb ist klimaneutral – vorausgesetzt, Herstellung und Transport des SAF laufen ausschliesslich mit erneuerbarer statt fossiler Energie. Aktuell ist das noch nicht der Fall. Daher kann SAF die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fluges zurzeit noch nicht auf null drücken, aber immerhin um rund 80 Prozent senken.

Allerdings ist die Produktion der erforderlichen Mengen von SAF zu tragbaren Kosten eine grosse Herausforderung. Weltweit wurden 2023 rund 600 Millionen Liter SAF produziert, ein winziger Bruchteil der benötigten rund 325 Milliarden Liter. 2050, so schätzt der Dachverband der Fluggesellschaften IATA, wird der Bedarf, wenn man das fossile Kerosin komplett ersetzen will, bei 450 Milliarden Litern liegen.

Mit verschiedenen Partnern untersuchen, entwickeln und optimieren deshalb PSI-Forschende mehrere Möglichkeiten, Kerosin ohne Erdöl herzustellen. Etwa in der dreijährigen SynFuel-Initiative gemeinsam mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa und finanzieller Unterstützung des ETH-Rats. Oder mit dem Klima-Start-up Metafuels.

## Die verfügbare Biomasse reicht nicht

Eine Möglichkeit basiert auf Biomasse. Bereits im Einsatz und als einzige Option bislang zertifiziert ist SAF aus Speiseölen und -fetten. In einem als Hydrolyse bezeichneten Verfahren werden aus Ölen Fettsäuren gewonnen. Über weitere Verfahrensschritte werden diese dann zu einem Produkt verwandelt, das Rohöl ähnelt. Zuletzt wird dieses mit Wasserstoff zu Bio-Kerosin veredelt. Dieses SAF der ersten Generation darf heute bis zu 50 Prozent herkömmlichem Kerosin beigemischt werden.

Doch so viel Frittiertes kann die Menschheit gar nicht vertilgen, um genügend altes Speiseöl für die Produktion der notwendigen Mengen SAF zu generieren. Daher erkunden die Forschenden weitere Wege, Biomasse in Kerosin zu verwandeln. Sägespäne und andere Pflanzenreste aus Gartenbau, Land- und Forstwirtschaft etwa bieten sich an oder Klärschlamm. Mit verschiedenen hydrothermalen Verfahren – also unter Einsatz von Hitze, Druck und Wasser – gewinnen die Forschenden aus dem Material die gesuchten Kohlenwasserstoffe, die dann mit Wasserstoff zu Kerosin veredelt werden.

Doch selbst das wird nicht ausreichen, und so suchen die Forschenden nach weiteren Möglichkeiten, fossiles Kerosin zu ersetzen. So könnte eine Variante des SAF unter Einsatz von Ökostrom (Power-to-Liquid) oder direkt durch die Kraft der Sonne (Sun-to-Liquid) aus den simplen Ausgangsstoffen Wasserstoff und Kohlendioxid künstlich hergestellt werden. Man nennt dieses SAF der zweiten Generation daher auch «e-Kerosin». Davon liessen sich erheblich grössere Mengen herstellen als aus alten Speiseölen (siehe Infografik Seite 14).



Marco Ranocchiari (links) und Jörg Roth verfolgen das Ziel, die Produktion von SAF im industriellen Massstab voranzutreiben. Als einer der notwendigen Schritte wird derzeit eine Pilotanlage auf dem Gelände des PSI errichtet.



### **Künstliche Treibstoffe sind besonders umweltfreundlich**

Ein Verfahren, das aus kohlenwasserstoffreichen Feststoffen und Gasen Treibstoffe herstellen kann, ist schon lange bekannt: Es nennt sich Fischer-Tropsch-Synthese, benannt nach den deutschen Chemikern Franz Fischer und Hans Tropsch, die es bereits vor knapp 100 Jahren zum Patent anmeldeten. Dabei wird bei Temperaturen von 150 bis 350 Grad Celsius an kobalt- oder eisenhaltigen Katalysatoroberflächen, die die chemischen Reaktionen regulieren, Kohlenstoffmonoxid mit Wasserstoff hydriert. Das Verfahren hat sich etabliert und wird heute in gross-technischem Massstab eingesetzt.

«Kerosin ist allerdings besonders anspruchsvoll», sagt der PSI-Chemieingenieur Jörg Roth, Projektkoordinator von SynFuel. Der sehr energiereiche Treibstoff bestehe aus einer speziellen Kombination leichter und schwerer Kohlenwasserstoffe. Diese Kombination verleiht dem Kerosin bestimmte Werte bei Viskosität, Siede-, Flammpunkt und anderen Parametern, die für die nötige Sicherheit beim Fliegen unbedingt eingehalten werden müssen. Das Fischer-Tropsch-Verfahren produziert aber einen wilden Mix, in dem viele Sorten enthalten sind, die man im Kerosin nicht haben will. «Man muss das Produkt erst aufwendig aufbereiten, um hochwertiges Kerosin zu erhalten, und hat dadurch grosse Effizienzverluste», räumt Roth ein.

### **Der Weg über Methanol ist vielversprechend**

Forschende des PSI arbeiten deshalb daran, Alternativen zu entwickeln. Eine Möglichkeit stellt die

sogenannte Methanolsynthese dar. Dabei wird mit Katalysatoren aus Zinkoxid und Kupfer unter hohem Druck Methanol aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff produziert. Das Verfahren ist zwar lange etabliert, doch wie sich aus Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) über weitere Syntheseschritte länger-kettige Kohlenwasserstoffe wie Ethen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), Propen ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ), Buten ( $\text{C}_4\text{H}_8$ ) und letztlich Kerosin produzieren lassen, wird erst mit neuerer Forschung offenbar.

Reaktortyp, Temperatur, Druck, Verhältnis zwischen Wasserstoff und Kohlenstoffoxiden sind nur einige Parameter, die dafür aufeinander abgestimmt werden müssen. «Das Entscheidende aber ist die Wahl des Katalysators», sagt ESI-Leiter Ranocchiari. Ein Katalysator ist ein Material, das bestimmte chemische Reaktionen fördert, manche macht er überhaupt erst möglich. In diesem Fall steuert er die zunehmende Verkettung der Kohlenwasserstoffe. Die Porengrösse seiner Oberfläche bestimmt, welche Molekülketten entstehen. Der richtige Katalysator sorgt also für weniger unerwünschte Nebenprodukte. Vor allem bricht er die Reaktionen an einem gewissen Punkt ab. «Sonst wird die Kohlenstoffkette endlos, und wir haben am Ende nur Wachs», erklärt Jörg Roth.

Die auf der ESI-Plattform gewonnenen Erkenntnisse sind auch Basis für eine aussichtsreiche Industriekooperation, die Anfang letzten Jahres startete: «Das Schweizer Start-up Metafuels war auf uns zugekommen», erzählt Ranocchiari. Die Firma sieht in SAF einen riesengrossen Markt, hatte schon einen Businessplan und potente Investoren aus dem Green-Tech-Bereich an der Hand. Was noch fehlte, war der Nachweis, dass man SAF effizienter herstellen kann als mit herkömmlichen Fischer-Tropsch-Anlagen. Erst dann würde die Produktion wirtschaftlich tragfähig.

## Der Katalysator sorgt für den richtigen Mix

Gemeinsam haben die Projektpartner verschiedene Ideen getestet und letztlich eine funktionierende Konfiguration inklusive eines effektiven Katalysators gefunden. Im Labor funktioniert die Synthese bereits wie gewünscht. Nun gilt es, den Prozess zu skalieren: Aktuell stellen die Partner die Komponenten für eine etwa hausgrosse Pilotanlage zusammen, die kommandes Jahr auf dem Gelände des PSI in Betrieb gehen und 50 Liter SAF am Tag produzieren soll. Der Bau wird vom Bundesamt für Energie (BFE) mit neun Millionen Franken unterstützt. Bis 2028 will Metafuels dann eine erste kommerzielle Anlage im industriellen Massstab mit rund hundertfacher Kapazität bauen. «Wie die Herstellung in diesem Massstab optimal zu gestalten ist, müssen wir mit der Pilotanlage erst herausfinden», räumt Ranocchiarini ein.

Jedenfalls versprechen sich alle Beteiligten von ihrer neu entwickelten Technologie, die sie «aerobrew» getauft haben, wichtige Impulse auch für Nachahmerprojekte, um das grosse Ziel Klimaneutralität zu erreichen: «Vor allem solche Transferprojekte zwischen Forschung und Industrie können den Weg weisen», meint Thomas J. Schmidt, Leiter des Center for Energy and Environmental Sciences am PSI.

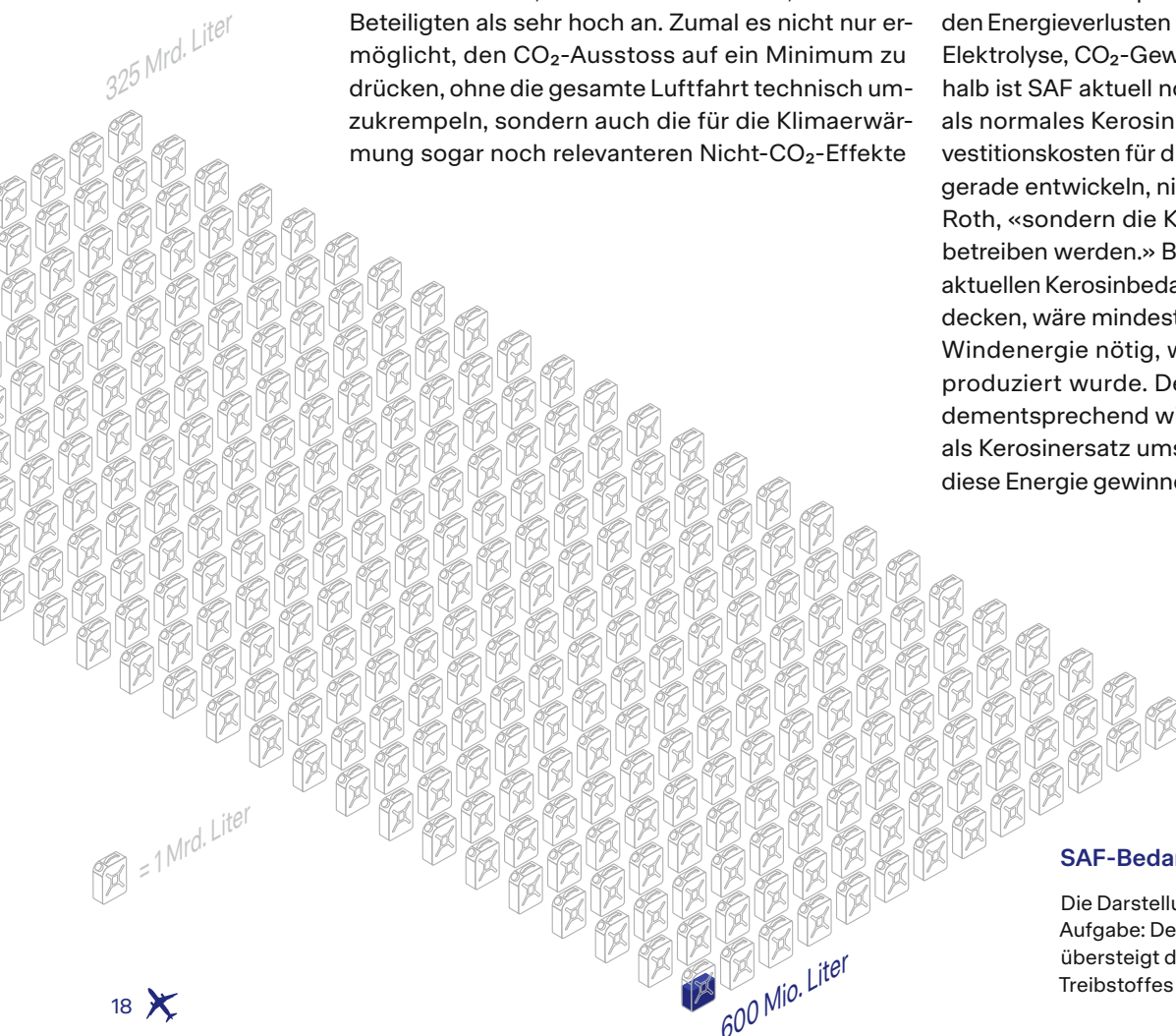
Die Chancen, dass SAF dies schafft, sehen die Beteiligten als sehr hoch an. Zumal es nicht nur ermöglicht, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss auf ein Minimum zu drücken, ohne die gesamte Luftfahrt technisch umzukrempeln, sondern auch die für die Klimaerwärmung sogar noch relevanteren Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte

des Fliegens anzugehen. Synthetisches Kerosin lässt sich so gestalten, dass es im Betrieb zu weniger Wolkenbildung führt und auch damit die Klimaerwärmung eindämmt.

Inwieweit das sinnvoll und machbar ist, soll eine neue Initiative mit Namen reFuel.ch bis 2032 erforschen. Neben der Zusammensetzung von SAF nimmt das Projekt einen weiteren, wichtigen Aspekt in den Fokus: «Die Ausgangsstoffe wie Methanol, Kohlenmonoxid und Ethylen sind im Wesentlichen dieselben, die auch in der chemischen Industrie verwendet werden, um daraus alle möglichen Kunststoffe und auch etwa Feinchemikalien für Medikamente herzustellen», sagt Thomas J. Schmidt. Bislang diene dafür als Basis meist Erdgas, also ebenfalls eine fossile, klimaschädliche Ressource. Auch wegen dieser vielseitigen Anwendbarkeit hat reFuel.ch eine BFE-Förderung von 15 Millionen Franken erhalten.

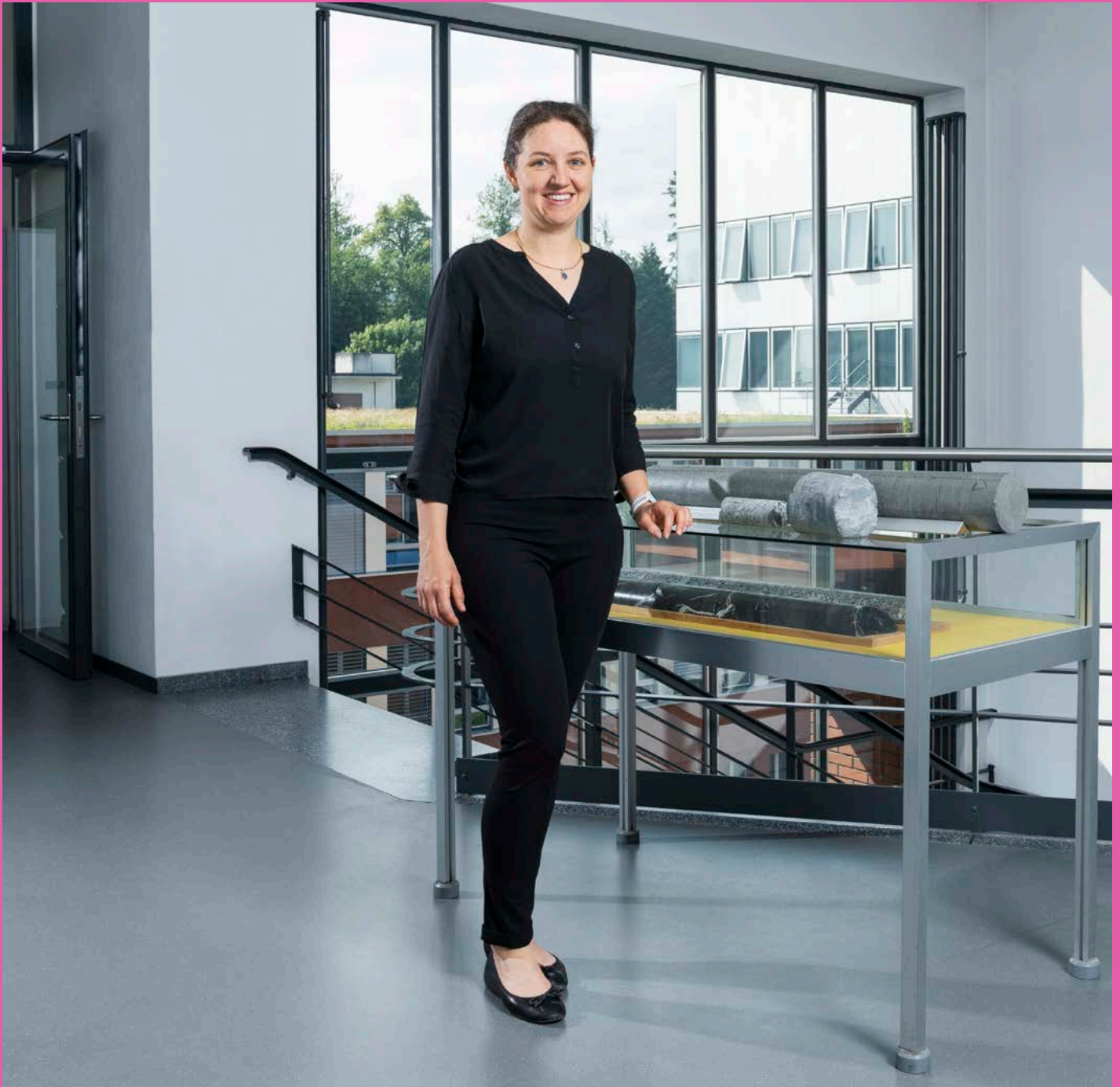
## Der Bedarf ist riesig

Ein Faktor allerdings bleibt: Die Produktion von SAF wird auch mit weiteren Effizienzgewinnen deutlich mehr Strom erfordern als die von herkömmlichem Kerosin. Das liegt vor allem an der energieintensiven Wasserstoffproduktion per Elektrolyse und an den Energieverlusten bei jedem Produktionsschritt – Elektrolyse, CO<sub>2</sub>-Gewinnung, Synthetisierung. Deshalb ist SAF aktuell noch vier- bis siebenmal teurer als normales Kerosin. «Am Ende sind daher die Investitionskosten für die neuen Technologien, die wir gerade entwickeln, nicht entscheidend», sagt Jörg Roth, «sondern die Kosten für die Energie, die sie betreiben werden.» Berechnungen zeigen: Um den aktuellen Kerosinbedarf der Luftfahrt synthetisch zu decken, wäre mindestens dreimal so viel Solar- und Windenergie nötig, wie 2021 weltweit insgesamt produziert wurde. Der Bedarf ist also riesig. Und dementsprechend wird die gesamte Idee von SAF als Kerosinersatz umso lohnender, je günstiger wir diese Energie gewinnen. ●



## SAF-Bedarf

Die Darstellung verdeutlicht die Grösse der Aufgabe: Der tatsächliche Bedarf an SAF übersteigt die derzeit produzierte Menge des Treibstoffes noch gewaltig.



## Mathematisches Modellieren mit KI

Romana Boiger ist Mathematikerin, spezialisiert auf numerische Modellierung und künstliche Intelligenz. Dies ist der Schwerpunkt ihrer Forschungsarbeit im Labor für Endlagersicherheit, das die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) beim Entsorgungsprogramm von radioaktivem Abfall in der Schweiz unterstützt. Sie entwickelt komplexe Modelle, die anhand der Labordaten von Gesteinsproben zahlreicher Bohrkern die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Gesteinen ableiten. Diese Eigenschaften werden genutzt, um die Ausbreitung von Gas, Wasser und Radionukliden zu simulieren. Ihr Beitrag unterstützt somit Entwicklung und Bau eines sicheren geologischen Tiefenlagers.

# Im fliegenden Labor

Mittels Aeroradiometrie lässt sich Radioaktivität am Boden aus der Luft aufspüren. Die Nationale Alarmzentrale NAZ führt jährlich mit Unterstützung des PSI Messflüge durch, um die radiologische Lage der Schweiz zu bestimmen.



Text: Benjamin A. Senn



Die Rotorblätter des Helikopters vibrieren und heben das fünf Tonnen schwere Ungetüm scheinbar mühelos in die Luft – im Super Puma raunt's und riecht's, als befände man sich im Inneren eines gigantischen Rasenmähers. Mit hundert Kilometern pro Stunde geht es im Eiltempo vom Startplatz des Flughafens Dübendorf hoch über die Stadt Zürich, der Limmat entlang Richtung Wasserschloss, dem eigentlichen Messgebiet, wo die radiologische Lage des PSI, des Schweizer Zwischenlagers für radioaktive Abfälle ZWILAG und den beiden Kernkraftwerken Leibstadt und Beznau bestimmt werden soll.

Um die Messdaten möglichst genau zu bestimmen, muss der Helikopter auf neunzig Metern Flughöhe gehalten werden – in der Ladebucht an seinem Bauch befindet sich nämlich das Messsystem, mit dessen Hilfe die Radioaktivität der Erdoberfläche detektiert wird. Das konstante Halten der Höhe ist sowohl für die Piloten als auch für die Crew eine Herausforderung, denn durch die kontinuierliche Veränderung des Untergrunds spürt man jeden Hügel in der Landschaft. Und so steigt der Helikopter steil an der Kante des Villiger Geissbergs empor – die Crew drückt es in die Sitze – um auf der anderen Seite ebenso steil wieder herunterzufallen. Ein Gefühl von Achterbahn fahren – und die anfangs verteilten Brechbeutel ergeben nun plötzlich Sinn.

Der Helikopter folgt genau vorgegebenen parallelen Bahnen. Mit einer Sicht von dreihundert Metern Durchmesser und einem Abstand von zweihundertfünfzig Metern zwischen den benachbarten Bahnen lässt sich so der komplette Untergrund abscannen. Die Route kann man auch auf den Bildschirmen der beiden Operatoren im Helikopter live verfolgen. Dabei geschieht eine erste Auswertung in diesem fliegenden Labor in Echtzeit. Und anhand der farbigen Flächen auf dem Bildschirm kann man den radiologischen Untergrund unmittelbar erkennen: Blau und grün entsprechen etwa vierzig bis hundert Nanosievert pro Stunde – Sievert ist die physikalische Einheit zur Quantifizierung der Strahlenexposition – alles im grünen (oder eben im blauen) Bereich.

Die Operatoren können vom Helikopter aus die Messergebnisse direkt verfolgen. Wenn nötig, informieren sie die Piloten, um eine bestimmte Stelle noch einmal zu überfliegen.



Cristina Poretti, Leiterin der Aero-  
radiometrie der NAZ, und der  
PSI-Physiker Alberto Stabilini  
besprechen kurz vor Abflug noch  
einmal die Messroute.

Das fliegende Labor schafft es,  
ohne Zwischenlandung  
innert drei Stunden eine Fläche  
von rund 100 Quadratkilo-  
metern zu messen.

### Das Problem mit dem Regen

Drei Stunden früher in einem schlichten Konfe-  
renzzimmer auf dem Militärflughafen Dübendorf:  
Übungsleiterin Cristina Poretti präsentiert die heutige  
Mission und zeigt das Messgebiet; eine Landkarte  
mit darüber gezogenen roten, parallelen Linien. Diese  
Linien gilt es zu überfliegen. «Das Wetter sieht jedoch  
schlecht aus. Wir erwarten gegen Abend eine Regen-  
front von Osten»: Die gebürtige Tessinerin verweist  
auf die winzigen Ziffern von eins bis vier oberhalb der  
roten Linien. «Ich habe das Gebiet in vier verschiede-  
ne Prioritätszonen unterteilt: Zone 1 und 2 sollten wir  
heute schaffen. Zone 3 und 4 müssen wir eventuell  
auf den nächsten Messtermin verschieben.»

Ihre Zuhörer, uniformierte Berufsmilitärs, Mili-  
zionäre, zivile NAZ-Beamte und PSI-Physiker Alberto  
Stabilini lauschen aufmerksam. «Gibt es Anmerkun-  
gen vonseiten der Piloten?» Keine Anmerkungen.  
Cristina Poretti leitet die Übung – in Gedanken geht  
sie noch einmal den Ablauf durch. In einem radiolo-  
gischen Ernstfall wäre sie für eine reibungslose Or-  
ganisation zuständig.

Das hiesse: Planung der Mission, Zusammenarbeit mit den Partnern wie dem Militär und den Kantonen, Lokalisierung des betroffenen Gebiets und Planung und Priorisierung von weiteren Messungen am Boden – all das lief über ihre Abteilung; weshalb die jährlichen Messflüge auch gleichzeitig als Training dienen.

Die Piloten und Loadmaster sowie die Infrastruktur am Militärflughafen Dübendorf werden von der Armee zur Verfügung gestellt. Als Operatoren werden WK-Soldaten mit einer besonderen Ausbildung und verlängerter Dienstzeit aufgebildet – Milizionäre, die organisatorisch der NAZ untergeordnet sind. «Diese Leute bringen meist einen naturwissenschaftlichen Hintergrund mit und fungieren während des Flugs als Spezialisten – dadurch, dass alles in Echtzeit passiert, können sie direkt in den Messprozess eingreifen und bei Bedarf die Piloten instruieren, beispielsweise einen bestimmten Punkt erneut zu überfliegen.»

Und was hat es nun mit dem Regen auf sich? «Der Regen wäscht Radonfolgeprodukte aus der Luft», erklärt Alberto Stabilini. Radon ist ein im Boden entstehendes, natürliches, radioaktives Edelgas, das als Teil der Uranzerfallsreihe entsteht. Gelangt das Radongas in die Atmosphäre, zerfällt es weiter – es entstehen unter anderem Wismut und Blei. Diese sogenannten Radonfolgeprodukte sind ebenfalls radioaktiv und schweben in der Luft. Bei Regen werden sie aus der Luft gewaschen und sammeln sich am Boden. «Dies führt in der Auswertung zu einer Überschätzung der Uranaktivitätskonzentration im Boden.»

### Schnell und grossflächig

1975 war die Schweizer Aeroradiometrie noch rein militärischer Natur und das Vorgehen bestand darin, dass sich ein Soldat mit Geigerzähler aus dem Helikopter lehnte und dabei die Strahlung detektierte. Im Jahr 1986 kam die Methode dann erstmals in einem Projekt der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission zur geologischen Kartierung der Zentralmassive Aar und Gotthard zum Einsatz. Im Rahmen zweier Dissertationen an der ETH Zürich wurde daraufhin ein Algorithmus zur Datenauswertung entwickelt. Ab 1994 übernahm die NAZ die Leitung. Erstmals wurde dabei mit einem Super Puma der Schweizer Armee geflogen, mit welchem auch unter schwierigen Wetterbedingungen und bei Nacht Einsätze durchgeführt werden können.

Im Jahr 2003 wurde die wissenschaftliche Expertise von der ETH ans PSI transferiert, in Kooperation mit dem ENSI. 2018 wurde schliesslich das neuartige Messsystem in Betrieb genommen. Seitdem stehen in der Schweiz an zwei Standorten vier hochsensitive

Detektoren mit dazugehöriger Elektronik und Software zur Verfügung. Ein solches System kann innerhalb weniger Stunden in den Super Puma eingebaut werden. Alle Daten vom Helikopter wie GPS, Flughöhe und Geschwindigkeit fliessen dabei in die Auswertung ein. Der Helikopter verschmilzt quasi mit dem Detektor zu einem einzigen Messgerät, das dank der zeitgleichen Auswertung der Daten zugleich als Labor dient.

Dies erlaubt es, ohne Zwischenlandung innerhalb von drei Stunden eine Fläche von bis zu hundert Quadratkilometern zu messen und die radiologische Lage dieses Gebiets in Echtzeit zu bestimmen. Zusammen mit einem schweizweit engmaschigen Netz aus dauerhaften Messsonden am Boden sowie weiteren Messequipen und Fahrzeugen leistet die Aeroradiometrie einen wichtigen Beitrag zum Bevölkerungsschutz.

### Die Details herauskitzeln


Während des Flugs bleibt Alberto Stabilini am Boden und arbeitet mit seinem Laptop im Hintergrund. Seine Funktion ist es, einzugreifen, wenn ein Messergebnis unklar ist und seine Expertenmeinung gefragt wird. «Bei neunzig Metern über dem Boden kommt nur wenig Strahlung im Detektor an», erklärt der Physiker. «Da kann es auch mal vorkommen, dass ein Signal nicht eindeutig einer Quelle zugeordnet werden kann.»

Für die NAZ muss die Datenauswertung instantan erfolgen, denn auf ihrer Grundlage muss schliesslich die Entscheidung getroffen werden, ob von einer radiologischen Quelle eine Gefahr für die Bevölkerung ausgeht und falls ja, welche nächsten Schritte eingeleitet werden müssen. «Dafür genügt das System vollkommen», so Stabilini. «Doch manchmal muss man auch etwas genauer hinschauen.»

Schaffen es die Operatoren mit ihren Computern nicht, eine bestimmte Anomalie einer Quelle zuzuordnen oder benötigen sie eine Zweitmeinung, schicken sie den Datensatz an Stabilini, der ihn mit einer speziellen Software noch einmal überprüft. «Dieser Code wurde von meinem Vorgänger Gernot Butterweck entwickelt», erklärt Stabilini. «Darin bündelt sich seine mehr als 25-jährige Erfahrung mit Feldmessungen. Denn Geschwindigkeit, Flughöhe, Geometrie der Strahlung sowie auch das Gelände können das Signal beeinflussen – mit dieser Software schaffen wir es, das Maximum an Information aus den Rohdaten herauszukitzeln.»

Der heutige Flug blieb jedoch ohne Ungereimtheiten. In drei Stunden schaffte es das Team, hundertfünfzehn Quadratkilometer zu kartieren. «Ein gelungener Arbeitstag», freut sich Stabilini. ●

# Aktuelles aus der PSI-Forschung



## 1 Bionanomaschine für grüne Chemie

Forschende am PSI haben erstmals das Enzym Styroloxid-Isomerase genau charakterisiert, mit dem sich umweltschonend wertvolle Chemikalien und Vorstufen von Medikamenten herstellen lassen. Zusammen mit zwei weiteren Enzymen ermöglicht die Styroloxid-Isomerase bestimmten Umweltbakterien die Umwandlung des Kohlenwasserstoffs Styrol. Die Styroloxidisomerase katalysiert dabei einen ganz spezifischen Reaktionsschritt: Sie spaltet im Styroloxid den dreigliedrigen Ring bestehend aus einem Sauerstoff- und zwei Kohlenstoffatomen, ein sogenanntes Epoxid. Dabei geht das Enzym so vor, dass immer nur ein einziges Produkt entsteht. Es kann auch eine Reihe weiterer Stoffe umsetzen, wobei Produkte entstehen, die wichtige Vorläufer für medizinische Anwendungen sind. Mithilfe des Enzyms könnte die Industrie unter energiesparenden und umweltschonenden Bedingungen beispielsweise Vorläufer für Medikamente und wichtige Chemikalien herstellen. Das Enzym lässt sich potenziell so verändern, dass es eine ganze Reihe neuer Substanzen umsetzen kann. Zudem ist das Enzym sehr stabil und daher im grossen Massstab einsetzbar. Es könnte deshalb ein neues wichtiges Werkzeug für die Kreislaufwirtschaft und die grüne Chemie werden.

Weitere Informationen:  
<https://i.psi.ch/4Lj>

## 2 Medizinische Praxis und Forschung zusammenbringen

Fortschritte in der medizinischen Forschung und Innovation profitieren von einer engen Zusammenarbeit zwischen Ärztinnen und Ärzten einerseits sowie Forschenden andererseits. Um das zu fördern, haben die Kantonsspital Aarau AG, die Kantonsspital Baden AG, die Hirslanden Klinik Aarau AG, die ETH Zürich, die Empa sowie das PSI am 3. Juni 2024 gemeinsam den «Verein für medizinische Forschung und Innovation im Kanton Aargau» gegründet. Künftig sollen Ärztinnen und Ärzte, die an Aargauer Spitälern vorwiegend klinisch arbeiten, über diesen Verein Forschungszeit beantragen können. Im Rahmen dieser Forschungszeit arbeiten sie dann an gemeinsamen Projekten mit Forschenden der ETH Zürich, der Empa oder dem PSI. Der Verein kompensiert mit finanziellen Beiträgen die von den Spitälern ermöglichte Forschungszeit und erhält für die ersten fünf Jahre eine einmalige Anschubfinanzierung von insgesamt einer Million Schweizer Franken von den teilnehmenden Institutionen und Spitälern (50 %) sowie vom Kanton Aargau (50 %).

Weitere Informationen:  
<https://i.psi.ch/4rY>

## 3 Park Innovaare eröffnet

Nach vierjähriger Bauzeit ist neben dem PSI ein moderner Innovationspark mit 23 000 Quadratmetern Reinräumen, Labors, Präzisionswerkstätten, Büros und Sitzungszimmern entstanden. Ende April wurde die Einrichtung offiziell eröffnet. Bereits heute sind 80 Prozent des Gebäudes vermietet. Das PSI ist sowohl strategischer Partner als auch grösster Mieter. Der einzigartige Zugang zu Forschungsinfrastrukturen, Grossforschungsanlagen und Know-how des PSI verschafft den Unternehmen im Park Innovaare wichtige technologische Nähe und dementsprechend einen Vorsprung. Damit wird die hohe Wettbewerbsfähigkeit der Schweiz weiter gestärkt. Park Innovaare fokussiert sich dabei auf vier Bereiche: Photonik und Quantentechnologien, Life Sciences, Advanced Manufacturing und Halbleitertechnologien sowie Energie und Nachhaltigkeit.

Weitere Informationen:  
<https://i.psi.ch/4Lk>





Nach **34** Jahren soll das neue Verfahren den verschollenen Queen-Song «Face it alone» wiedererwecken.

Etwa **0,001** Millimeter Durchmesser betragen die magnetisierbaren Teilchen, die in Tonbändern Information speichern.

**48** Minuten Live-Musik von B. B. King sollen von einem zerfallenen Magnettonband gerettet werden.

#### 4 Röntgenlicht rettet Musik

Forschende des PSI entwickeln eine Methode, um mit dem speziellen Röntgenlicht der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS Aufnahmen auf hochwertigen historischen Tonbändern zerstörungsfrei zu digitalisieren. Tonbänder speichern Information in einer Schicht aus winzigen magnetischen Partikeln – ähnlich kleinen Kompassnadeln, die entweder gen Norden oder Süden zeigen. Wird das Band gespielt, ändert sich ihre magnetische Ausrichtung – das Band wird magnetisiert und die Audio-Information ist nun im Ausrichtungsmuster physisch gespeichert. Um dieses Muster wieder abzuspielen, bewegt man es an einem Lesekopf vorbei. Da sich das Magnetfeld durch die Ausrichtung der Kompassnadeln ständig ändert, wird im Lesekopf eine Spannung induziert und es entsteht ein elektrisches Signal. Dieses wird wiederum verstärkt und in ein akustisches Signal umgewandelt. Mit ihrer Röntgenmethode setzen die Forschenden nicht auf das Magnetfeld, sondern auf die einzelnen Kompassnadeln, die dieses Feld erzeugen. Die Magnetisierungszustände dieser winzigen Teilchen lassen sich mit Röntgenlicht der SLS fast individuell auslesen und in ein hochwertiges Audiosignal umwandeln.

Weitere Informationen:  
<https://i.psi.ch/4Ln>



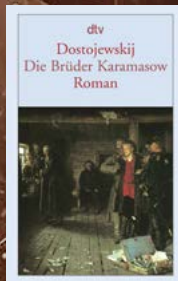
## Lieblingsbücher am PSI

Wir haben die PSI-Mitarbeitenden gefragt, welches ihr Lieblingsbuch ist, und möchten Ihnen in dieser Galerie aus den vielen Rückmeldungen fünf Bücher vorstellen.

Text: Christian Heid



## Brüder



Federica Marone ist Wissenschaftlerin an der TOMCAT-Strahllinie der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS. An der TOMCAT ermöglichen tomografische Techniken die zerstörungsfreie Darstellung der Mikrostruktur von Proben aus einer Vielzahl von Forschungsbereichen, darunter Biomedizin, Materialwissenschaften, Geowissenschaften und Paläontologie.

Das Lieblingsbuch von Federica Marone ist einer der grossen Romane der Weltliteratur, «Die Brüder Karamasow». In dieser epischen Familienchronik taucht Dostojewski in die Abgründe der menschlichen Seele ein. Federica: «Ich war völlig erstaunt über die Aktualität dieses fast 150 Jahre alten Dramas. Ethische Fragen zu Glaube, Zweifel, Moral und freiem Willen werden mit grosser Leidenschaft diskutiert.»



## Galaxis

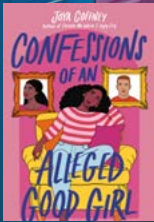


Andreas Spittaler ist als IT-Experte im IT-Servicedesk tätig und hilft Lösungen zu finden, wenn die PSI-Mitarbeitenden bei Fragen rund um den Computer nicht mehr weiterwissen.

Sein Lieblingsbuch wurde Ende der 1970er-Jahre publiziert und heisst «Per Anhalter durch die Galaxis». Der Kultroman von Douglas Adams kann immerhin mit nichts weniger als der Antwort nach dem Sinn des Lebens aufwarten! Und warum gefällt dir, Andreas, dieses Buch so gut? Andreas: «Ich finde das Buch super, weil es einen mit humorvollen Wendungen wie der folgenden in genialer Weise an Freundschaft und Zusammenhalt erinnert und einen dadurch den manchmal tristen Alltag vergessen lässt: «Zwei Köpfe sind besser als einer. Hat man doppelt so viel Spass.»»



## Girl



Shawn Bell ist Assistentin für das Upgrade-Projekt der Synchrotron Lichtquelle Schweiz SLS (SLS 2.0). Wenn die SLS im Jahr 2025 wieder in Betrieb geht, wird sich die Leistung in vielen Fällen um bis zu einem Faktor 40 verbessern.

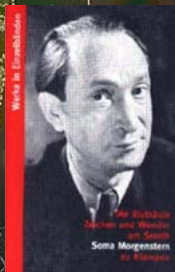
Shawn Bell hat letzten Winter ihr neues Lieblingsbuch entdeckt: Joya Goffneys «Confessions of an Alleged Good Girl», das letztes Jahr erschienen ist. In diesen Bekenntnissen über ihr Erwachsenwerden entdeckt die Tochter des Pastors in einer texanischen Kleinstadt Liebe, Sexualität und ihre Unabhängigkeit. Shawn: «Dieses Buch gab mir das Gefühl, gesehen zu werden und dass ich nicht die Einzige bin, die mit den zerstörerischen Auswirkungen des Purismus zu kämpfen hat. Diese Art von Geschichte gab es nicht, als ich in dem Alter der Hauptfigur war, aber ich bin froh, dass es dieses Buch jetzt für jeden gibt, der eine ähnliche Situation durchmacht.»



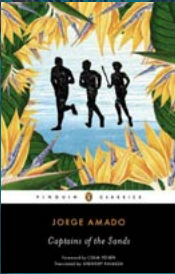
## Blutsäule

Ute D. Mayer ist Assistentin im PSI Center for Nuclear Engineering and Sciences, dem nuklearen Kompetenzzentrum der Schweiz.

Zu Utes Lieblingsbüchern zählt der Titel «Die Blutsäule» aus dem Jahr 1955. Das Buch setzt sich mit der Verfolgung und Ermordung der europäischen Juden in den 30er- und 40er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts auseinander und geht dabei Fragen nach Schuld, Sinn und Gerechtigkeit nach. In eindrücklicher Weise verwendet der Schriftsteller Soma Morgenstern in seinem Buch einen biblischen Sprachduktus. Ute: «Morgenstern verleiht der deutschen Sprache eine Vielfalt und Klarheit, wie ich sie bisher nicht kannte und die mich völlig begeistert hat. Für mich glänzt das Buch durch seine noble und anmutige Sprache: ein echtes Ausnahmewerk!»



## Captains



Vitor Barrote arbeitet als Chemiker in der Forschungsanlage Hotlabor, dem einzigen Schweizer Labor, das für den Umgang mit grossen Mengen radioaktiver Stoffe einschliesslich kommerzieller und experimenteller Kernbrennstoffe zugelassen ist.

Zu seinen Lieblingsbüchern zählt der sechste Roman des brasilianischen Erfolgsautors Jorge Amado: «Captains of the Sands». In dieser Milieustudie wird die Lebenswelt von heimatlosen Halbwüchsigen beschrieben, die sich in Salvador da Bahia zu einer Bande zusammengeschlossen haben. Vitor: «Jorge Amado geht es in allen seinen Büchern um dieselbe Hauptfigur: das brasilianische Volk. Und wie das brasilianische Volk lebt dieses Buch von Schönheit und ein bisschen Traurigkeit.»



# Eine Teilchenphysikerin im Klassenzimmer

Der Zerfall von Myonen gehört zwar nicht zum regulären gymnasialen Lehrplan der Schweiz. Giada Rutar, die während ihres Doktorats am PSI solche Zerfälle untersucht hat, kann trotzdem einiges aus ihrer Forschung in den Unterricht miteinbringen – und sei es bloss ihre schiere Begeisterung für die Physik.

Text: Benjamin A. Senn

Die Museggmauer mit ihren ikonischen Türmen gehört zu den Wahrzeichen der Stadt Luzern. Von hier überblickt man die Stadt, sieht auf den tiefblauen Vierwaldstättersee hinaus, in dessen Hintergrund sich das Bergpanorama erstreckt – mit dem Hausberg Pilatus und die Rigi, Königin der Berge. In dieser malerischen Umgebung unterhalb des Schirmerturms befindet sich der Arbeitsort von Giada Rutar, Physik- und Informatiklehrerin an der Kantonsschule Musegg.

Man merkt schnell, dass man mit Giada Rutar eine wahre Physik-Enthusiastin trifft. Ihre Begeisterung steckt sofort an, zum Beispiel wenn sie erklärt, dass zwischen dem Schattenspiel von Baumblättern nicht diffuses Sonnenlicht auf den Boden fällt, sondern überall kleine Abbilder der Sonne selbst. «Ähnlich wie bei einer Lochkamera», sagt die 33-jährige Gymi-Lehrerin. Dass sie mal Lehrerin wird und das Vermitteln dieser Begeisterung zum Beruf machen würde, war jedoch nicht von Anfang an klar. Dass sie sich hingegen mit Physik beschäftigen möchte, um diese Phänomene zu studieren und sie zu verstehen, schon. Deshalb war es für Rutar auch keine Frage, nach dem Physikstudium ein Doktorat anzuhängen – so kam sie 2013 ans PSI.

Im Center for Neutron and Muon Sciences fand sie ihr Forschungsgebiet. Zusammen mit ihrer Mentorin Angela Papa, ihrerseits Teilchenphysikerin am PSI, suchte sie nach seltenen Myonenzerfällen. Myonen sind exotische Elementarteilchen, die sehr kurzlebig sind und praktisch unmittelbar nach ihrer Entstehung in stabilere Teilchen zerfallen. Die Zerfallspfade, die sie dabei einschlagen, können jedoch sehr unterschiedlich sein.

Rutar beschäftigte sich mit einem ganz besonderen Zerfall, der bisher nur in der Theorie existiert. «Unser Experiment zielte darauf ab, den sogenannten MEG-Zerfall zu detektieren» – MEG steht für Myon-Elektron-Gamma, also der Zerfall eines Myons in ein Elektron und ein Photon – Letzteres wird in der

Teilchenphysik mit dem griechischen Buchstaben Gamma bezeichnet. «Dieser Zerfallspfad ist so etwas wie der heilige Gral der Teilchenphysik – ihn zu entdecken, würde eine völlig neue Physik offenbaren – jenseits des Standardmodells.» Doch falls er existiert, wäre der MEG-Zerfall extrem selten. «Die Chance ihn zu entdecken, wäre kleiner als 1 zu 3,2 Billionen und damit rund 650 000-mal unwahrscheinlicher als ein Sechser im Schweizer Lotto.»

Am PSI befindet sich die weltweit leistungsstärkste Myonenanlage, an der sich pro Sekunde rund dreissig Millionen Myonenzerfälle beobachten lassen. Perfekte Bedingungen also für einen so seltenen Zerfall. Angesichts der hohen Zerfallsrate braucht es jedoch auch dementsprechend schnelle Detektoren – solche, die es nicht zu kaufen gibt und deren Entwicklung Rutar während ihres Doktorats vorantrieb. Daneben galt es auch, Experimente zu kalibrieren und die enormen Datenberge mit entsprechender Software auszuwerten. «Das alles war enorm spannend und vielseitig.»

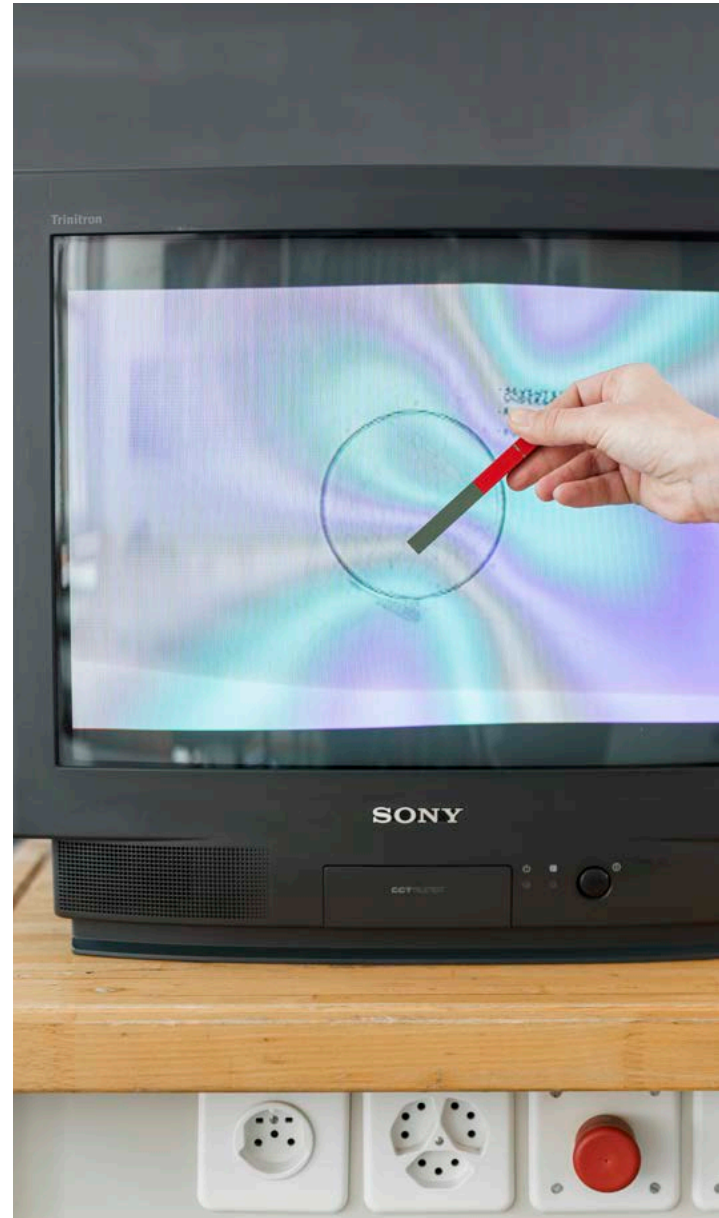
Und weshalb hat sie sich gegen eine weitere akademische Karriere entschieden? «Es war einfach an der Zeit für etwas Neues – und Lehrerin fand ich einen sinnstiftenden Beruf.» So begann Rutar direkt nach ihrem Doktorat mit dem Lehrdiplom an der ETH Zürich und fing zu unterrichten an. «Ich freute mich riesig, etwas Neues auszuprobieren. Gleichzeitig war ich aber auch ein bisschen melancholisch – die Arbeit am PSI hat mir sehr gut gefallen und ich hatte ein grossartiges Kollegium.» Rutar denkt zurück: «An meinem letzten Tag war tatsächlich ein Regenbogen über dem PSI – absolut kitschig, wie in einem Bollywood-Film», fügt sie lächelnd hinzu.

## Die Freude an der Physik vermitteln

Am Gymi Musegg fallen die Experimente etwas leichter verdaulich aus als am PSI; keine komplexen Grossforschungsanlagen, weniger Kabelsalat und







«Ich will Freude an der Physik vermitteln und zeigen, dass man auch als Frau darin erfolgreich sein kann.»

Giada Rutar, Physik- und Informatiklehrerin an der Kantonsschule Musegg

auch kein unübersichtlicher Datensatz, der nach bestimmten Peaks durchforstet werden soll. «Bei uns geht es darum, die Physik mit den eigenen Sinnen zu erfassen und eigenständig nach Erklärungen zu suchen», so Rutar. Eine kleine Sammlung an Experimenten hilft der Lehrerin, die verschiedenen Phänomene greifbar zu machen.

In einer «bring your own device»-Klasse, in der die Schülerinnen und Schüler aufgefordert werden, ihre eigenen Laptops oder Tablets zum Lernen mitzubringen, sticht ein Gerät besonders hervor, ein alter Röhrenfernseher. «Während wir noch damit aufgewachsen sind, dürfte es den meisten aus meiner Klasse heute als Museumsstück erscheinen», lacht die Lehrerin. «Aber damit lässt sich wunderbar die Ablenkung von Elektronen in einem Magnetfeld visualisieren.»

Der Bildschirm eines Röhrenfernsehers besteht aus kleinen fluoreszierenden Punkten, die beim Auftreffen eines Elektrons aufleuchten. Um ein Farbbild zu generieren, werden drei verschiedene Elektronenstrahlen für die Grundfarben Rot, Grün und Blau verwendet. Diese Strahlen werden gleichzeitig auf einen Bildpunkt gelenkt, wobei jeder Strahl seine jeweilige Farbe aufleuchten lässt. Kombiniert man die drei Farben, so lässt sich das gewünschte Farbspektrum darstellen.

Giada Rutar nimmt einen Magneten und hält ihn an den Bildschirm. Das ursprüngliche Bild verschwimmt augenblicklich und die Farben beugen sich zu einem psychedelischen Muster. «Da die Elektronen eine negative Ladung besitzen, werden sie vom Magneten abgelenkt und treffen am Bildschirm am falschen Ort auf – das Bild bekommt dann diese farbigen Flecken. Auch an der SLS am PSI werden Magnete verwendet, um die Elektronen auf ihre Kreisbahn zu lenken.»

Aber auch eine simple CD, mittlerweile ebenfalls ein Museumsstück aus vergangenen digitalen Tagen, genügt, um Physik sichtbar zu machen. Wahrscheinlich kennt jeder das bunte Regenbogenmuster auf der Unterseite handelsüblicher CDs. «Hier wird weisses Sonnenlicht in seine Spektralfarben zerlegt», so Rutar. Diese Zerlegung lässt sich jedoch nicht nur mit Sonnenlicht vorführen: «Jedes Element sendet ein ganz charakteristisches Spektrum aus, wenn man es beispielsweise erhitzt.»

Anhand dieses Fingerabdrucks der Elemente kann man Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung in einem Stoff ziehen. «So können wir auch bestimmen, welche Elemente in den Sternen enthalten sind.» Rutar demonstriert den Effekt mit einer Neonlampe. «Auch hier sehen wir eine Art Regenbogen – einfach aus orange-rötlichen Farben – dieser ist charakteristisch für das Element Neon.

## Klassenfahrt ans PSI

Seit sieben Jahren schon arbeitet Giada Rutar nun als Gymnasiallehrerin an der Kanti Musegg. Für die gebürtige Luzernerin war dies auch eine Art Rückkehr in die alte Heimat. «Ich hatte meine Kanti-Zeit ebenfalls hier in Luzern absolviert – allerdings nicht an der Musegg, sondern an der Kantonsschule Alpenquai auf der anderen Seeseite.»

Der Rückzug aus der Forschung bedeutete nicht nur ein Heimkehren, sondern auch eine neue Work-Life-Balance und plötzlich mehr Zeit für sich selbst. «Ich liebe die Forschung und machte meine Arbeit mit Leidenschaft», so Rutar. «Aber es ist halt auch eine Realität, dass die Wissenschaft sehr viel von einem verlangt – man muss sich voll engagieren und schon mal über das Limit gehen, wenn man erfolgreich sein will. Hinzu kommt, dass man sehr mobil sein muss und die Chancen auf eine permanente Arbeitsstelle gering sind, was sich insgesamt nicht mit meiner Lebensplanung vereinbaren liess.»

Als Lehrerin bestehen diese Nachteile nicht mehr. So bleibt nun endlich auch etwas Zeit für Hobbys. Rutar spielt Blockflöte in einem Ensemble – nicht einfach Blockflöte, wie wir sie vielleicht vom Instrumentalunterricht kennen, sondern alle möglichen exotischen Tonlagen: «Von Sopran bis Bass – wir sind zu viert und machen Alte Musik.» Im Dezember 2023 ist sie zum ersten Mal Mutter geworden. «Auch hier bin ich für die Flexibilität als Lehrerin dankbar, dass ich Familie und Beruf gut unter einen Hut bringen kann», sagt die junge Mutter stolz. Ihren Ehemann hat sie übrigens am PSI kennengelernt, er arbeitete damals ebenfalls am MEG-Experiment mit.

Trotz der Distanz zu Villigen hat Rutar noch immer Kontakt zu ihrem alten Arbeitsort. Mindestens einmal pro Jahr organisiert sie mit einer ihrer Klassen einen Tagesausflug: PSI Visitor Center, Schullabor iLab und die Grossforschungsanlagen – all inclusive. «Das kann sehr inspirierend sein», so Rutar. «Eine meiner Schülerinnen hat am Zentrum für Protonentherapie ihre Leidenschaft für die Materie entdeckt und studiert heute Physik – mit dem Ziel, Medizinphysikerin zu werden.»

Und das ist ebenfalls eine Motivation in Rutars Beruf. Junge Menschen zu begeistern und zu inspirieren – insbesondere junge Frauen, die in diesem Fach immer noch eine Minderheit bilden. «Ich will ihnen die Freude an der Physik vermitteln und zeigen, dass man auch als Frau darin erfolgreich sein kann.» ●

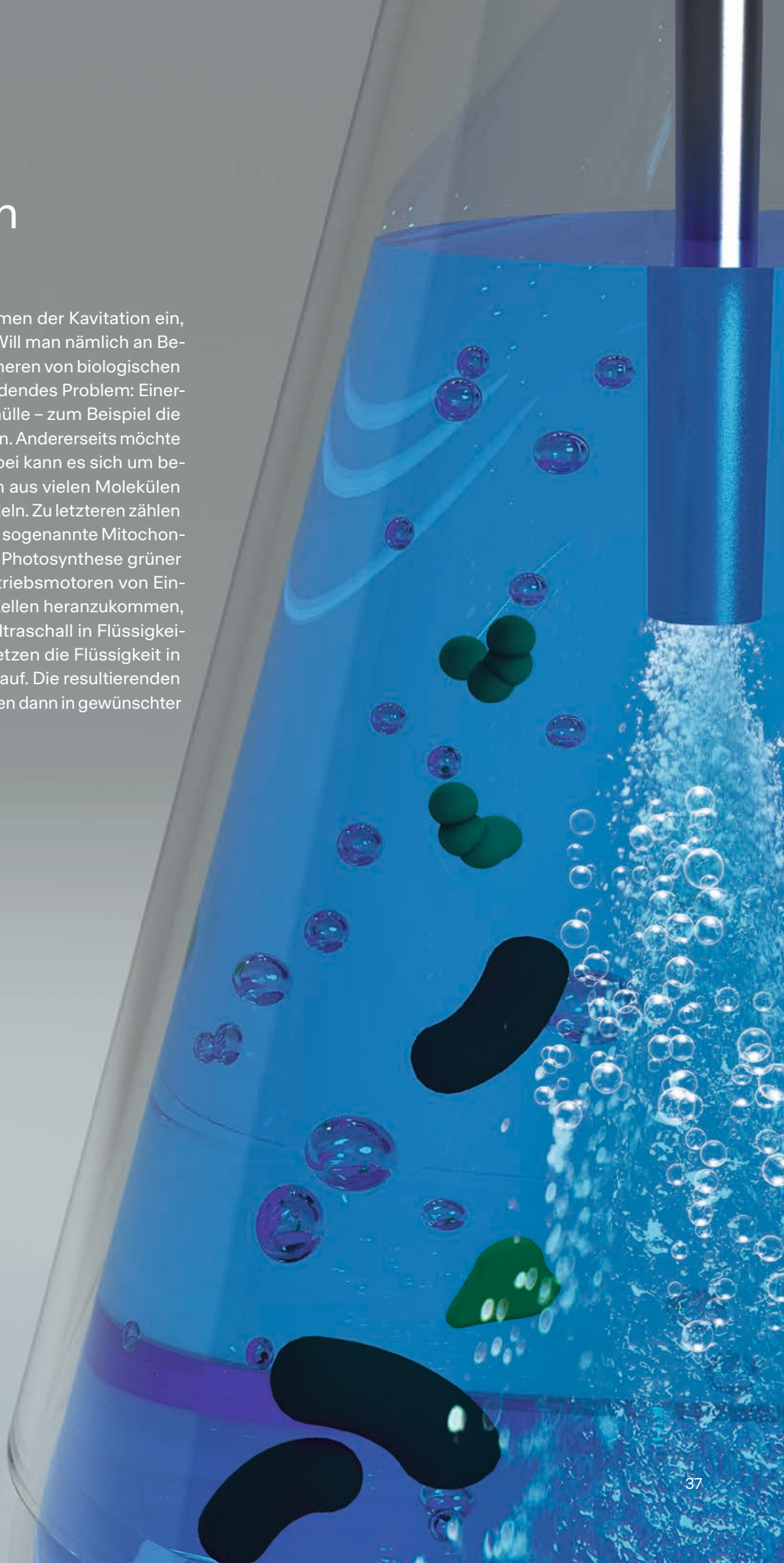


## Tempolimit für Delfine

Werden Flüssigkeiten schnell bewegt, so fällt nach einem physikalischen Gesetz ihr statischer Druck. Fällt dieser Druck unter den sogenannten Dampfdruck der in der Flüssigkeit gelösten Gase, bilden sich kleine Dampfbläschen. Gelangen diese durch die Strömung wieder in Bereiche mit einem höheren statischen Druck, implodieren die Bläschen schlagartig. Das verursacht enorme Druckwellen, die eine zerstörerische Kraft entfalten. Das bekommen unter anderem Delfine zu spüren, wenn sie zu schnell schwimmen. Schlagen sie zu schnell mit ihrer Fluke, tritt an der Schwanzflosse auch das Phänomen der Kavitation auf und verursacht schmerzhafte Gewebeschädigungen. Forschende haben berechnet, dass die Höchstgeschwindigkeit von Delfinen an der Wasseroberfläche deshalb bei maximal 54 Kilometern in der Stunde liegt. Fische können schneller schwimmen, denn ihre Schwanzflossen sind in der Regel nicht innerviert. Die schuppigen Gesellen spüren dort also nichts. Man hat beispielsweise bei Thunfischflossen ähnliche Schäden entdeckt, wie man sie unter anderem bei Schiffsschrauben oder Turbinen findet, die durch Kavitation beschädigt wurden.

## Schonend Zellen knacken

Am PSI setzen Forschende das Phänomen der Kavitation ein, um Zellen schonend aufzuschliessen. Will man nämlich an Bestandteile herankommen, die sich im Inneren von biologischen Zellen befinden, stellt sich ein entscheidendes Problem: Einerseits möchte man die äussere Schutzhülle – zum Beispiel die Zellwand oder Zellmembran – aufbrechen. Andererseits möchte man das Innere nicht beschädigen. Dabei kann es sich um bestimmte Moleküle, grössere Strukturen aus vielen Molekülen oder ganze sogenannte Organellen handeln. Zu letzteren zählen unter anderem die Kraftwerke der Zelle, sogenannte Mitochondrien, oder Chloroplasten, die Orte der Photosynthese grüner Pflanzen, oder auch Flagellen, also Antriebsmotoren von Einzellern. Um an diese Bestandteile von Zellen heranzukommen, hat es sich bewährt, mittels Sonden Ultraschall in Flüssigkeiten zu schicken. Die Schallwellen versetzen die Flüssigkeit in schnelle Bewegung und Kavitation tritt auf. Die resultierenden mechanischen Kräfte schliessen die Zellen dann in gewünschter Weise auf.



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



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 Institut, das sich über 342 000 Quadratmeter erstreckt, eine eigene Brücke über die Aare besitzt und mit 2300 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 Bundes 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 Eidgenossenschaft haben wir den Auftrag erhalten, komplexe Grossforschungsanlagen zu entwickeln, zu bauen und zu betreiben. Unsere Anlagen sind in der Schweiz einzigartig, manche Geräte gibt es auch weltweit nur am PSI.

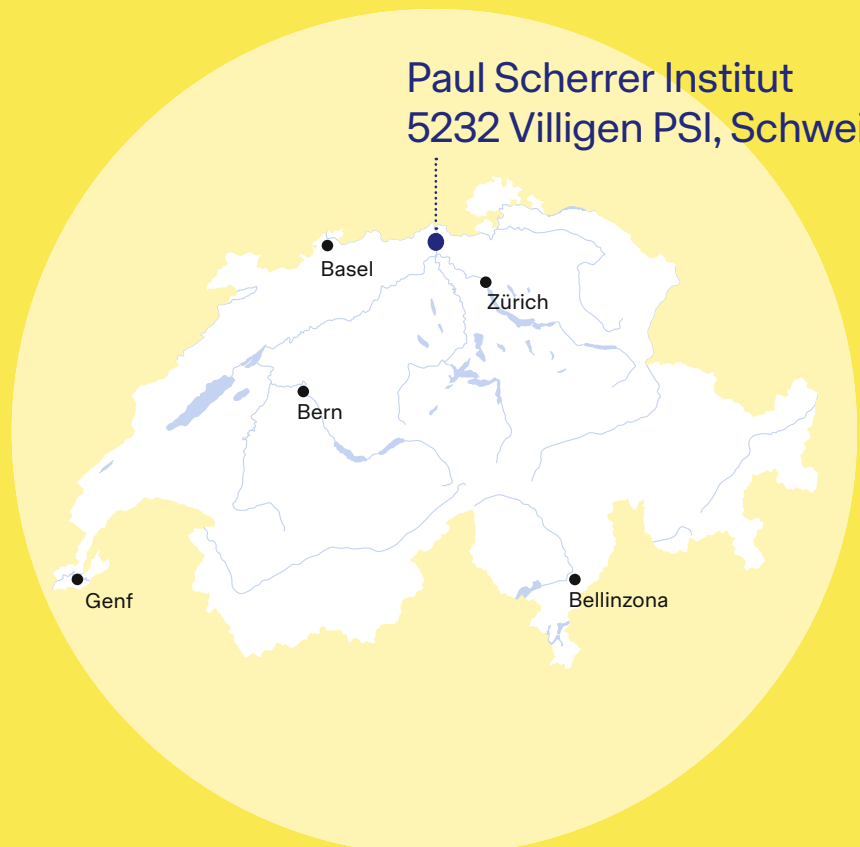
Zahlreiche Forschende, die auf den unterschiedlichsten Fachgebieten arbeiten, können durch Experimente an solchen Grossforschungsanlagen wesentliche Erkenntnisse für ihre Arbeit gewinnen. Gleichzeitig sind Bau und Betrieb derartiger Anlagen mit einem so grossen Aufwand verbunden, dass Forschergruppen an den Hochschulen und in der Industrie an der eigenen Einrichtung solche Messgeräte nicht vorfinden werden. Deshalb stehen unsere Anlagen allen Forschenden offen.

Um Messzeit für Experimente zu erhalten, 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 wissenschaftliche Qualität hin und empfehlen dem PSI, wer tatsächlich Messzeit bekommen soll. Denn obwohl es rund 40 Messplätze gibt, an denen gleichzeitig Experimente durchgeführt werden können, reicht die Zeit nie für alle eingegangenen 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 fünf 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



800  
Fachartikel jährlich, die auf  
Experimenten an den Gross-  
forschungsanlagen  
beruhen

3000  
Wissenschaftlerinnen und  
Wissenschaftler aus der  
ganzen Welt führen jährlich an  
diesen Grossforschungs-  
anlagen Experimente durch

5  
schweizweit einzigartige  
Grossforschungsanlagen

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.

#### Vier 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 vier Schwerpunkte. Auf dem Gebiet Zukunftstechnologien untersuchen wir die vielfältigen Eigenschaften von Materialien. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen schaffen wir Grundlagen für neue Anwendungen – sei es in der Medizin, der Informationstechnologie, der Energiegewinnung und -speicherung – oder für neue Produktionsverfahren der Industrie. Ziel der Arbeiten im Schwerpunkt Energie und Klima ist die Entwicklung neuer Technologien für eine nachhaltige und sichere Energieversorgung sowie für eine saubere Umwelt. Ausserdem erforschen wir in diesem Bereich Zusammenhänge innerhalb des Klimasystems der Erde. Im Schwerpunkt Health Innovation suchen Forschende nach den Ursachen von Krankheiten und nach möglichen Behandlungsmethoden. Zudem betreiben wir in der Schweiz die einzige Anlage zur Therapie von spezifischen Krebserkrankungen mit Protonen. Dieses besondere Verfahren macht es möglich, Tumore gezielt zu zerstören und dabei das umliegende Gewebe weitgehend unbeschädigt zu lassen.

Im Schwerpunkt Grundlagen der Natur suchen Forschende nach Antworten auf die fundamentale Frage nach den Grundstrukturen der Materie und den Funktionsprinzipien in der Natur. Sie untersuchen Aufbau und Eigenschaften der Elementarteilchen – der kleinsten Bausteine der Materie – oder klären grundlegende Vorgänge in lebenden Organismen auf. Das so gewonnene Wissen eröffnet neue Lösungsansätze in Wissenschaft, Medizin oder Technologie.

#### 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 PSI

Erscheint zweimal jährlich.  
Ausgabe 2/2024 (September 2024)  
ISSN 2504-2262

#### Herausgeber

Paul Scherrer Institut  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI  
www.psi.ch

#### Redaktionsteam

Monika Gimmel, Martina Gröschl,  
Christian Heid, Sebastian Jutzi (Ltg.),  
Benjamin A. Senn,  
Dr. Mirjam van Daalen

#### Designkonzept

Scholtysik & Partner AG und  
Studio HübnerBraun

#### Design, Art Direction und Layout

Studio HübnerBraun

#### Fotos

Paul Scherrer Institut PSI / Markus  
Fischer und Mahir Dzambegovic  
ausser: Seite 14: Flughafen Zürich.

#### KI-Bildgeneration

Cover, Seiten 3, 6, 7, 9, 10, 13:  
Adobe Stock (KI);  
Seiten 26–31: Midjourney durch  
Studio HübnerBraun.

#### Illustrationen und Grafiken

Studio HübnerBraun,  
ausser: Seiten 36, 37: Daniela Leitner.

#### Mehr über das PSI lesen Sie auf:

www.psi.ch

**5232 steht im Internet zur  
Verfügung und kann kostenlos  
abonniert werden unter**

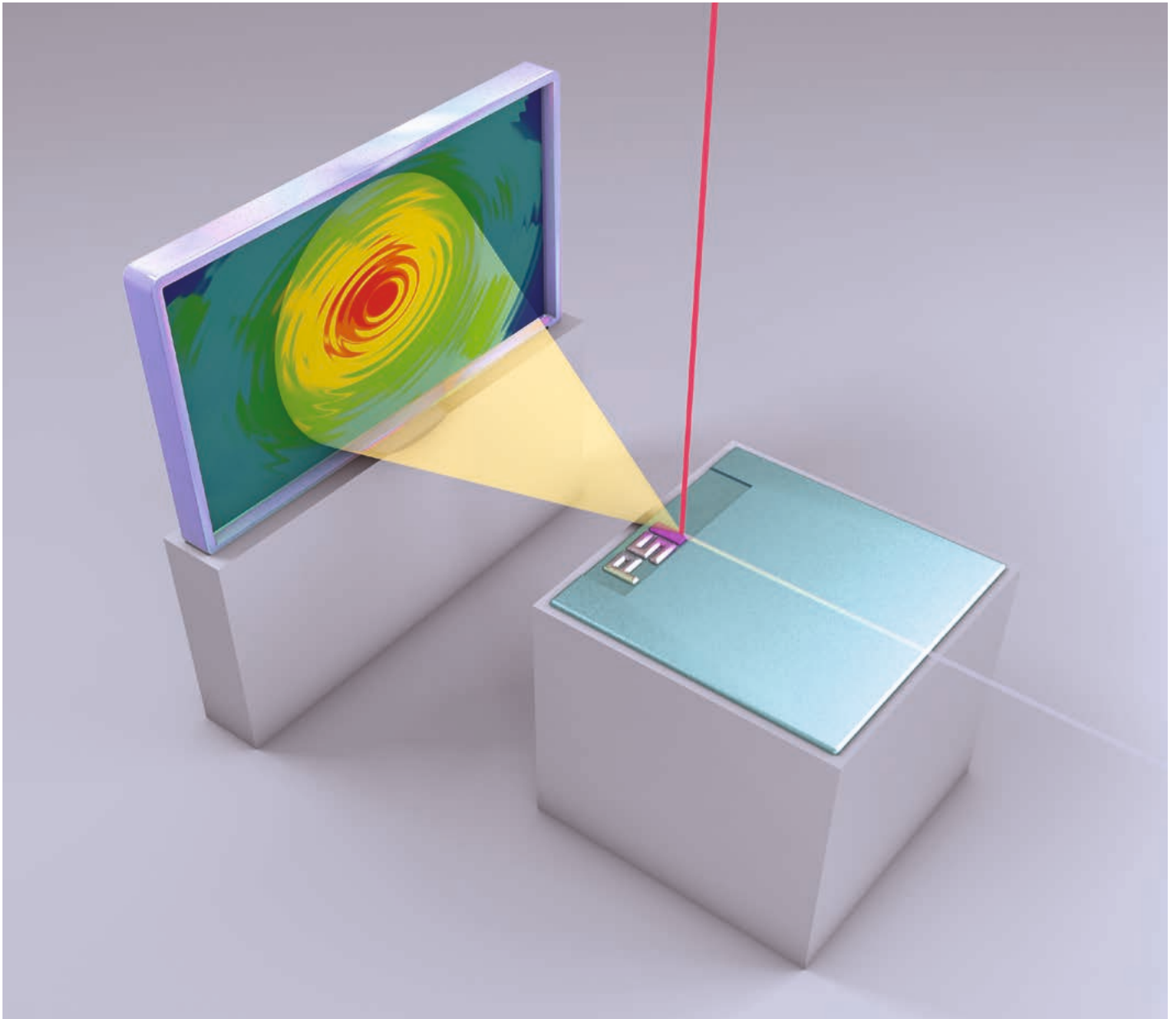
www.psi.ch/de/5232

**5232 ist auch auf Englisch und  
Französisch erhältlich**

www.psi.ch/en/5232

www.psi.ch/fr/5232





## Das erwartet Sie in der nächsten Ausgabe

Ganz gleich, welches Ziel wir verfolgen, oft sind dafür innovative Technologien, Verfahren und Materialien erforderlich. Daher sind Erforschung und Entwicklung fortschrittlicher Produktionsmethoden, die uns die notwendigen Werkzeuge bereitstellen, von entscheidender Bedeutung. In diesem Bereich, bekannt als Advanced Manufacturing, arbeiten wir am PSI eng mit internationalen Forschenden zusammen, um Lösungen für die vielfältigen Herausforderungen zu entwickeln, denen sich die Schweiz und andere Länder weltweit gegenübersehen. In dieser Ausgabe präsentieren wir Ihnen einige der aufregendsten Fortschritte: von 3-D-Druck und der Herstellung von Halbleitern über die Entwicklung neuer Materialien bis hin zu intelligentem Glas oder sensibler Aussenhaut für Roboter.



**Paul Scherrer Institut PSI**  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI  
Schweiz  
[www.psi.ch](http://www.psi.ch)