

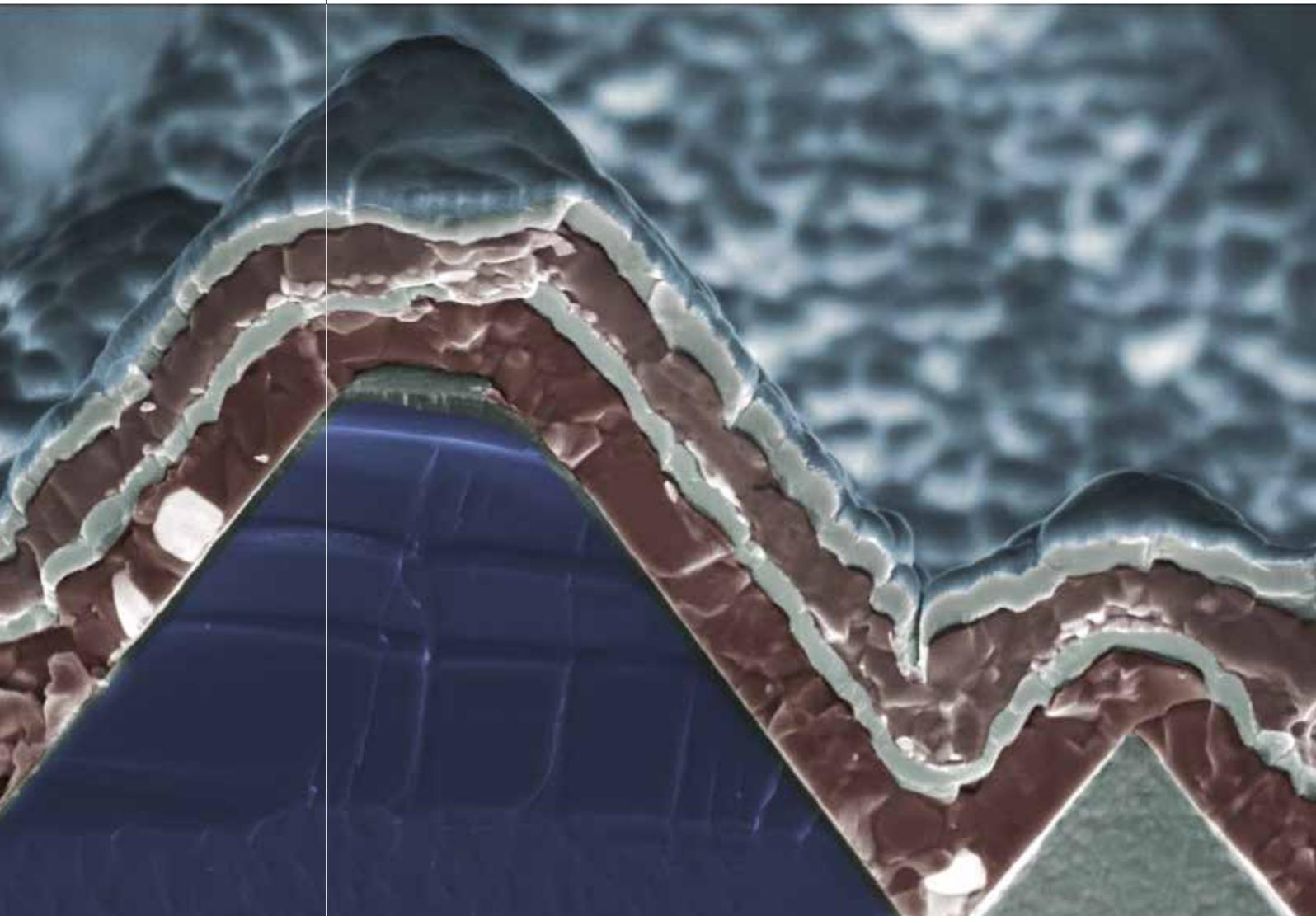


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Energieforschung und Innovation

Bericht 2018







Editorial

«Stärkung der erneuerbaren Energien», «Anreize zur effizienten Energienutzung» und «Ausstieg aus der Kernenergie»: dies ein paar Stichworte, welche wichtige Weichenstellungen für eine nachhaltige und sichere Energieversorgung der Schweiz umschreiben. Der mit der «Energiestrategie 2050» einhergehende Wandel hält Herausforderungen bereit, die von wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen sowie von politischen Entscheiden im In- und Ausland geprägt sind. Gleichzeitig liegen in diesem Wandel Chancen für wirtschaftliche Entwicklung und Innovation. Die für Innovation unabdingbare Forschung wurde daher im Zusammenhang mit dem Aufgleisen der «Energiestrategie 2050» gezielt ausgebaut.

Grundsätzlich soll Forschung frei sein von Vorgaben. Dennoch kann im Energiebereich ein gewisses Mass an Koordination und Konstanz dazu dienen, dass Ziele und Bedürfnisse der Allgemeinheit im Fokus bleiben. Seit mehr als drei Jahrzehnten spielt das Bundesamt für Energie BFE mit einer programmatisch ausgerichteten Forschungs- und Technologieförderung hier eine zentrale Rolle. Die in dieser Broschüre vorgestellten Beispiele stehen stellvertretend für eine Vielzahl von Projekten, welche das Bundesamt für Energie mitträgt und eng begleitet.

Pascal Previdoli, stv. Direktor BFE

(Links) Solarfaltdach über dem Klärbecken der Abwasserreinigungsanlage in Chur mit Technologie der Start-up-Unternehmens dhp technology. In der Luftaufnahme sind die Module halb eingefahren. Die gesamte Anlage wurde als Pilotprojekt vom BFE unterstützt und in einer zweiten Phase auf 643 kWp ausgebaut. Die Abwasserreinigungsanlage kann den über Photovoltaik produzierten Strom fast zu 100 % direkt verbrauchen. (Quelle: dhp-technology.ch).

(Titelbild) Um den Wirkungsgrad von Solarzellen zu steigern, werden verschiedene Zellen aufeinander gestapelt. Forschenden des CSEM und der EPFL ist es 2018 gelungen, sogenannte Perowskitzellen (PSC) auf der pyramidenförmigen Struktur von Siliziumzellen abzuschneiden. Im Bild ist ein Aufbau einer Dreifachzelle mit zwei PSCs (braun) über einer Siliziumzelle (blau) und einer Leerlaufspannung von 2,7 V zu sehen. Die Pyramidenstruktur ist wichtig, um das einfallende Licht genügend gut einzufangen (Reprinted with permission from ACS Energy Lett. 2018, 3, 9, 2052–2058. Copyright 2018 American Chemical Society).

Inhalt

Editorial	3
Inhalt	4
Technologie- & Innovationsförderung	5
Programme	6
Mittel für die Energieforschung	6
Effiziente Energienutzung	
Dezentraler Strom aus Erneuerbaren und Netzdynamik	11
Thermisches Potenzial urbaner Tunnelinfrastrukturen	13
Hochtemperaturbatterien aus der Schweiz	15
Effiziente Leistungselektronik	17
Silikataerogel als thermische Isolierung	17
Wassereinspritzung im Dieselmotor	17
Erneuerbare Energie	
Planungshilfe zur Erneuerung von Wasserkraftanlagen	19
Strom produzierende Kleinstlebewesen	21
Eine «alte» Photovoltaikanlage und was man daraus lernen kann	23
Innovative Vortrocknung für Biomassefeuerungen	25
Schneckenrostfeuerung	25
Abrasionsschäden in Wasserkraftwerken	25
Sozioökonomische Aspekte	
Der Schweizer Gasmarkt im europäischen Kontext	27
Internationale Zusammenarbeit	30

Windkraftanlage des Windparks «Le Peuchapatte» im Jura mit einer Jahresproduktion von 13,5 GWh (entspricht etwa 3 % des Verbrauchs des Kantons Jura (© Suisse Eole, www.suisse-eole.ch).



Technologie- und Innovationsförderung

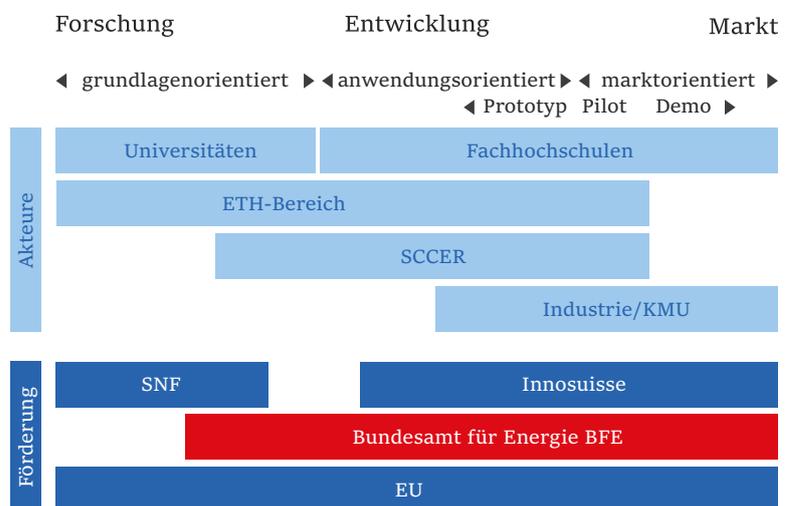
Die ausserparlamentarische Eidgenössische Energieforschungskommission CORE erarbeitet in regelmässigem Abstand das «Konzept der Energieforschung des Bundes» und vermittelt damit Leitplanken für Zielsetzungen und Fördermassnahmen. Das Bundesamt für Energie (BFE) nimmt mit einem programmatischen Förderansatz und seiner Koordinationsrolle die Funktion einer zentralen Drehscheibe in der Schweizer Energieforschungslandschaft ein, um dieses Konzept schweizweit umzusetzen.

Das Bundesamt für Energie (BFE) fördert und koordiniert die nationale Energieforschung und unterstützt den Aufbau neuer Märkte für eine nachhaltige Energieversorgung. Um eine solche Koordinationsaufgabe wahrzunehmen, werden die Fördermittel des Bundesamts für Energie dafür eingesetzt, neue Technologien und Konzepte nach einem programmatischen Ansatz gezielt weiter zu bringen. Dabei wird subsidiär dort gefördert, wo Lücken in der Förderlandschaft der Schweiz bestehen (Abbildung 1). Auftragnehmer sind Private, der Bereich der Eidgenössischen Technischen Hochschulen, Fachhochschulen und Universitäten. Die unterstützten Projekte werden vom Bundesamt für Energie fachlich begleitet, wobei fallweise Experten und Vertreter anderer Förderstellen involviert sind.

Das BFE pflegt den regelmässigen Informationsaustausch zwischen verschiedenen nationalen Förderprogrammen, speziell auch mit den nationalen Forschungskompetenzzentren SCCERs (Swiss Competence Centers for Energy Research) und unterstützt Massnahmen zur allgemeinen Wissensvermittlung unterstützt. Um die in den letzten Jahren im Rahmen der SCCERs aufgebauten Kompetenzen und Kapazitäten an Schweizer Hochschulen und Universitäten für die Zielsetzung der Energiestrategie 2050 gezielt einzusetzen, hat das BFE ein neues Forschungsförderprogramm «SWEET» (SWiss Energy research for Energy Transition) ausgear-

beitet. Mit dem auf zehn Jahre festgelegten Programm sollen thematische Ausschreibungen von Konsortialprojekten zu vom BFE ausgearbeiteten Themen durchgeführt werden. Für einzelne Konsortialprojekte wird ein Zeitrahmen von sechs bis acht Jahren angestrebt. Die Ausschreibungen sind so konzipiert, dass Kooperationen unterschiedlicher Hochschultypen und zwischen Akademie, Forschungseinrichtungen, Privatwirtschaft und öffentlicher Hand präferiert werden. Damit sollen inter- und transdisziplinäre Konsortien gefördert werden, die massgeblich zur Zielerreichung der Energiestrategie 2050 beitragen.

Abbildung 1: Das Bundesamt für Energie BFE koordiniert die Forschung und Innovation im Energiebereich über einen grossen Teil der Wertschöpfungskette. (Innosuisse = Schweizerische Agentur für Innovationsförderung, EU = Europäische Union; SNF = Schweizerischer Nationalfonds, SCCER = Swiss Competence Centers for Energy Research).



Programme

Die Herausforderung für die Energieforschung liegt im Spannungsfeld zwischen langfristigen Perspektiven und Visionen sowie kurzfristigen, wirtschaftlichen und politischen Realitäten. Die Entwicklung von

Energietechnologien ist eher von langfristiger Natur: neue technologische Ansätze und Systeme benötigen viel Zeit bis zu deren Einführung. Die langjährigen Forschungsprogramme des BFEs zusammen mit der

BFE-Förderung über das Programm für Pilot- und Demonstrations- und Leuchtturmprojekte sollen einen schnelleren Transfer hin zu marktreifen Technologien ermöglichen.

 Gebäude und Städte	 Brennstoffzellen	 Bioenergie
 Mobilität	 Batterien	 Wasserkraft
 Industrielle Prozesse	 Wärmepumpen und Kältetechnik	 Geoenergie
 Netze	 Solarwärme und Wärmespeicherung	 Windenergie
 Elektrizitätstechnologien	 Photovoltaik	 Talsperren
 Verbrennungsbasierte Energiesysteme	 Hochtemperatur Solarenergie (CSP)	 Energie – Wirtschaft – Gesellschaft
	 Wasserstoff	 Radioaktive Abfälle

Weiterführende Informationen:

«Konzept der Energieforschung des Bundes 2017–2020», CORE (2016)

«KEnergieforschungskonzept des des Bundesamtes für Energie 2017–2020», BFE (2016)

Mittel für die Energieforschung

Seit 1977 erfasst das BFE Daten zu Forschungs- und Entwicklungsprojekten und zu Pilot- und Demonstrationsprojekten. Dabei werden nur Projekte erhoben, die – ganz oder teilweise – von der öffentlichen Hand (Bund und Kantone), vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF), von Innosuisse oder von der Europäischen Union (EU) finanziert werden.

Die Erhebung erfolgt über Abfragen von Datenbanken des Bundes, des Schweizerischen Nationalfonds SNF und der EU, Analyse von Jahres- und Geschäftsberichten sowie über eine Selbstdeklaration der Forschungsverantwortlichen der Forschungsstätten. Informationen zu einzelnen Forschungsprojekten können aus dem öf-

fentlich zugänglichen Informationssystem des Bundes (www.aramis.admin.ch), des SNF (p3.snf.ch), der EU (cordis.europa.eu) und den jeweiligen Webseiten der Institutionen eingesehen werden.

Abbildung 2 zeigt die Aufwendungen der öffentlichen Hand für die Energieforschung

in der Schweiz seit 1990 (in Mio. Franken, teuerungskorrigiert) in den vier Hauptbereichen gemäss der Schweizerklassifikation. Im Zusammenhang mit der «Energierstrategie 2050» und dem «Aktionsplan Energieforschung» wurde die Schweizer Energieforschung in den letzten Jahren allgemein ausgebaut. Stark dazu beigetragen

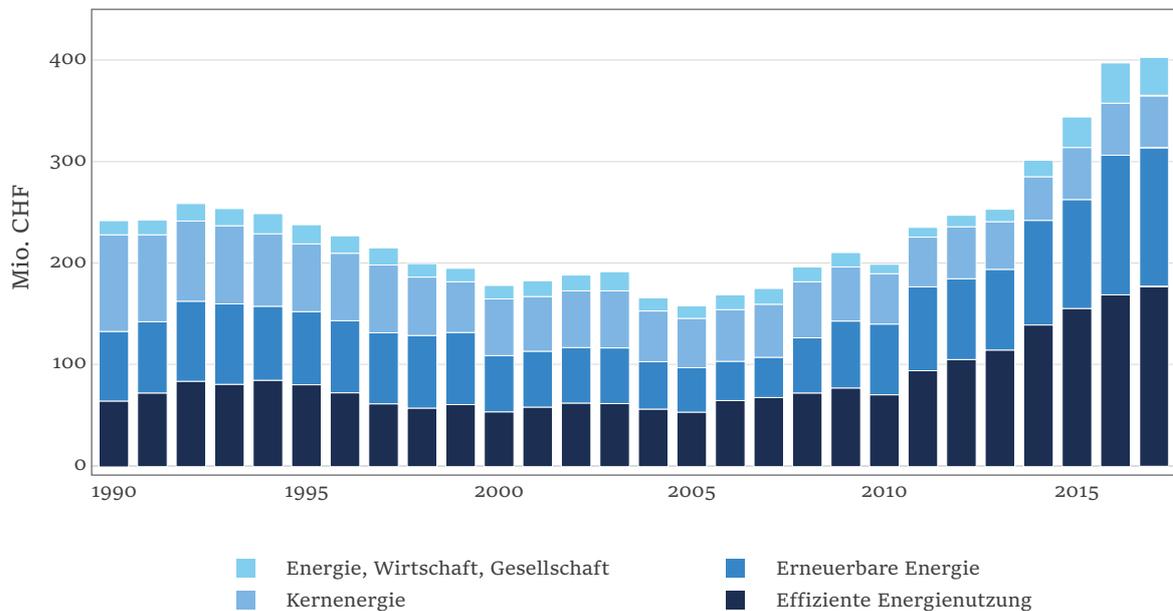


Abbildung 2: Langzeitüberblick über die für die Energieforschung aufgewendeten öffentlichen Mittel. Die Daten werden in Realwerten, d. h. teuerungskorrigiert, dargestellt. Die Werte bewegen sich zwischen 0,3 und 0,65 Promille des Bruttoinlandsprodukts.

haben: (1) der Aufbau von nationalen Kompetenzzentren in der Energieforschung durch die KTI/Innosuisse (Swiss Competence Center for Energy Research, SCCER) seit 2013, welche 2017 in die zweite Phase gestartet sind; (2) neue Nationale Forschungsprogramme (NFP70 und 71) im Energiebereich des Schweizer Nationalfonds; (3) sowie ein gezielter Ausbau der Pilot- und Demonstrationsaktivitäten des Bundesamts für Energie. Innerhalb des ETH-Rats standen zusätzlich Mittel für den Infrastruktur- und Kapazitätsausbau zur Verfügung, welche ebenfalls zum Zuwachs der Energieforschungsmittel beigetragen haben. Ein Teil des Anstiegs geht auch auf Anpassungen in der Datenerfassung zurück, so z. B. auf eine konsistente Berücksichtigung des «Overheads», welche die Eigenleistungen des ETH-Bereichs und von Universitäten ansteigen liessen.

Abbildung 3 zeigt, dass ein grosser Anteil der eingesetzten öffentlichen Mittel für die Energieforschung (42 %) direkt über die strategischen Ziele des ETH-Rats festgelegt, nach denen die Forschungsschwerpunkte und Mittel für die Eidgenössischen Technischen Hochschulen und die Institutionen des ETH-Bereichs festgelegt werden. Als Orientierungshilfe dient dabei das aktuelle Energieforschungskonzept des Bundes, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, welches eine gemeinsame Vision der Schweizer Forschergemeinde mit Empfehlungen für die mit Mitteln der öffentlichen Hand finanzierte Energieforschung in der Schweiz beinhaltet. Weitere substantielle Mittelbeiträge für die Energieforschung erfolgen durch die Kantone (16 %) über die Finanzierung von Universitäten und Fachhochschulen.

Der Anteil (41 %) der Mittel, welche über Innosuisse, den Schweizer Nationalfonds, über das Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI) und die Europäische Union (EU), sowie über das BFE bereitgestellt werden, sind kompetitiver Natur. Die Projektmittel von EU und SBFI fliessen grossmehrheitlich in europäische Projekte.

Speziell das Bundesamt für Energie fördert relativ breit Akteure aus dem ETH-Bereich, aus Universitäten und Fachhochschulen wie auch aus der Industrie (Abbildung 4). Damit wird es seiner koordinierenden Rolle gerecht und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung von Resultaten aus Forschung und Entwicklung hin zu marktfähigen Innovationen.

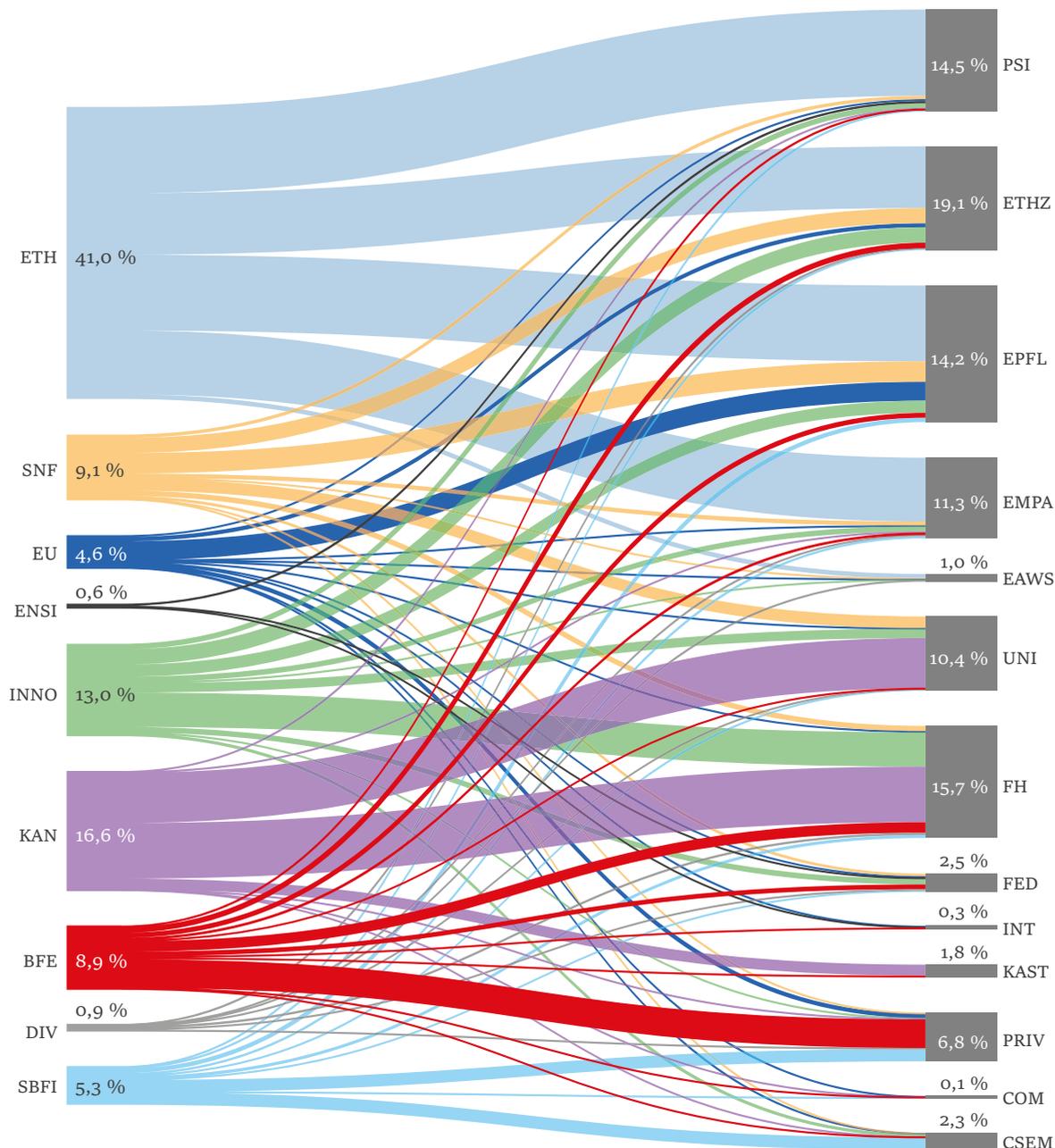


Abbildung 3: Herkunft der öffentlichen Mittel (links) für die Energieforschung in der Schweiz 2017 (total CHF 410 Mio.) und deren Verwendung (rechts) in Institutionen aus dem Energieforschungsbereich. Nicht berücksichtigt sind Mittel von privater Seite (z. B. grosse Eigenleistungen in Innosuisse-Projekte und Pilot- und Demonstrationsprojekten des BFE). Die Zahlen entsprechen Mio. CHF.

Herkunft: ETH: ETH-Rat, SNF: Schweizerischer Nationalfonds, EU: Europäische Union, ENSI: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, INNO: Innosuisse (KTI), KAN: Kantone, BFE: Bundesamt für Energie, DIV: Diverse, SBFI: Staatssekretariat für Bildung, Forschung & Innovation

Verwendung: PSI: Paul Scherrer Institut, ETHZ: ETH Zürich, EPFL: ETH Lausanne, EMPA: Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EAWS: Eawag/WSL = Eawag: Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz und WSL: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, UNI: Universitäten, FH: Fachhochschulen, FED: Andere Bundesstellen, INT: Internationale Organisationen, KAST: Andere kantonale Stellen, PRIV: Privatwirtschaft, COM: Gemeinden, CSEM: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique).

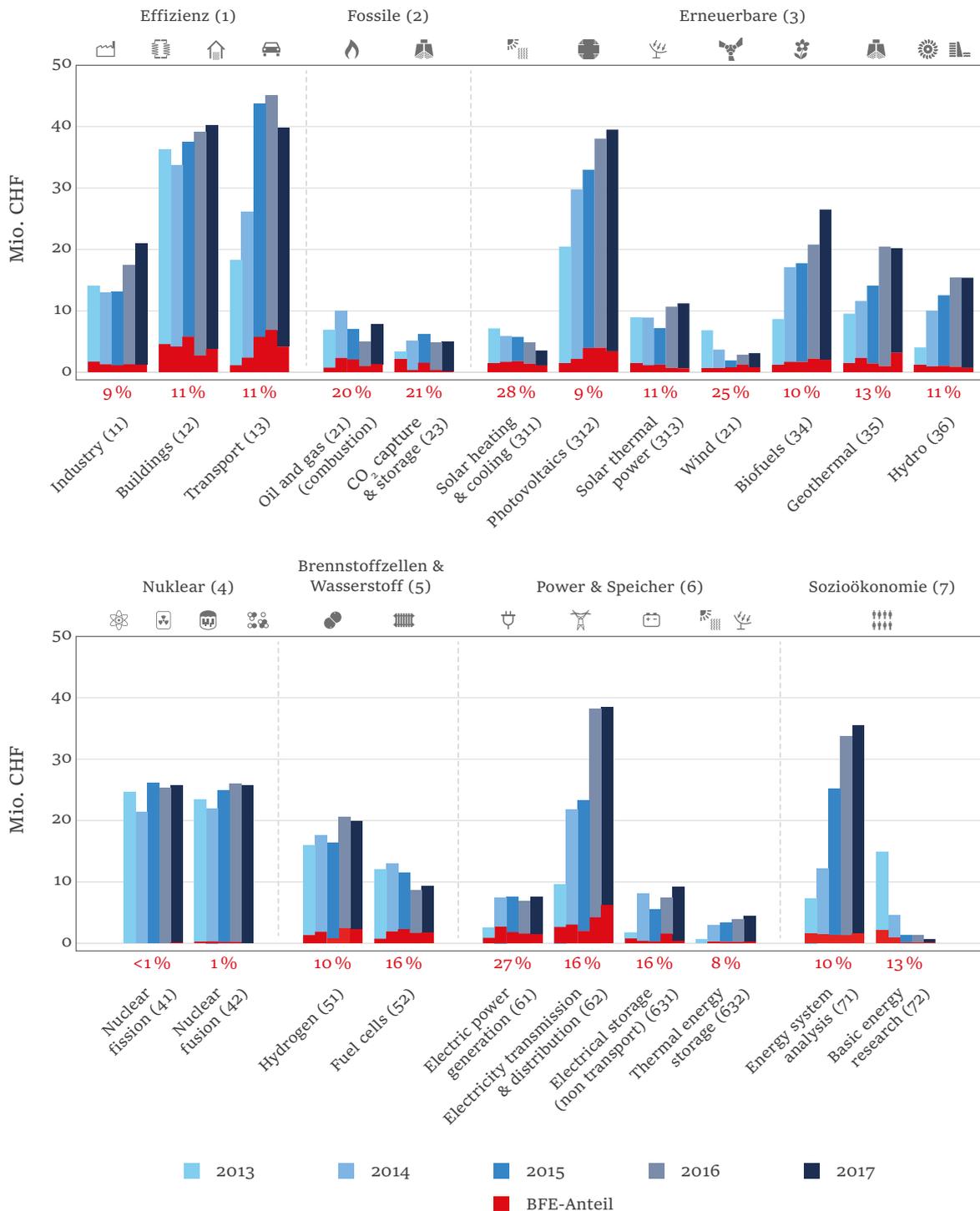


Abbildung 4: Entwicklung des Aufwands 2013–2017 für die Schweizer Energieforschung in Teilbereichen nach der Klassifikation der internationalen Energieagentur (IEA). Es sind nur grobe Klassifikationen dargestellt ohne Unterklassifikationen. Detaillierte Daten können unter der «www.energieforschung.ch» eingesehen werden. Themen wie Wärmepumpen und -rückgewinnung sind in den Klassifikationen «Buildings» und «Industry» enthalten.

Die rot eingefärbten Anteile entsprechen der Förderung durch das BFE (Forschung- und Entwicklungsprojekte/ Pilot- und Demonstrationsprojekte). Der BFE-Anteil liegt zwischen einigen wenigen Prozent bis zu rund 30 %. Die roten Prozentzahlen geben einen Durchschnittswert für den BFE-Anteil gemittelt über die Jahre 2013–2017 an.

Die Zunahme der öffentlichen Mittel für die Energieforschung (siehe Abbildung 2) und der damit verbundenen Forschungsaktivitäten manifestiert sich insbesondere im Bereich der Netze (62), des Transports (13), in den Bereichen Biomasse (34) und Photovoltaik (312) sowie im Bereich der sozioökonomischen Forschung (71).

Effiziente Energienutzung

Eine effiziente Energienutzung ist für das Erreichen der in der «Energiestrategie 2050» des Bundes vorgesehenen Ziele von grösster Bedeutung. Seit 2013 wurden und werden die Forschungskapazitäten in den Bereichen Netze, Gebäude, Industrie, Mobilität und Speichertechnologien wesentlich gestärkt. In allen diesen Be-

reichen werden vorhandene Potenziale heute bei weitem noch nicht ausgenutzt. Die Energieforschung soll helfen, diese Potenziale zu identifizieren und zu ihrer Ausschöpfung technisch realisierbare und wirtschaftlich tragbare Lösungen zu finden.



Dezentraler Strom aus Erneuerbaren und Netzdynamik

Der Zubau erneuerbarer Energiequellen beeinflusst das dynamische Verhalten des Übertragungsnetzes. Rotierende Generatoren, die bislang als Kurzzeitspeicher stabilisierend auf das Netz wirken, werden zunehmend durch elektronische Wechselrichter abgelöst. Diesem Umstand muss sich die Betriebsweise der Übertragungsnetze anpassen, wozu es neuer Instrumente zur Echtzeitüberwachung und Aufrechterhaltung eines stabilen Betriebs bedarf.

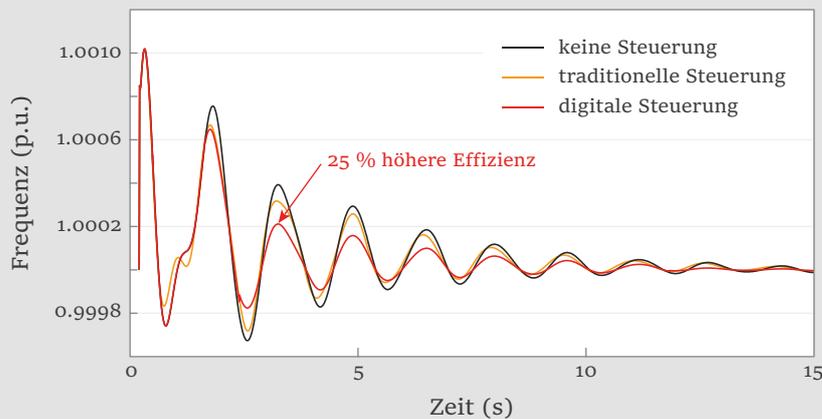
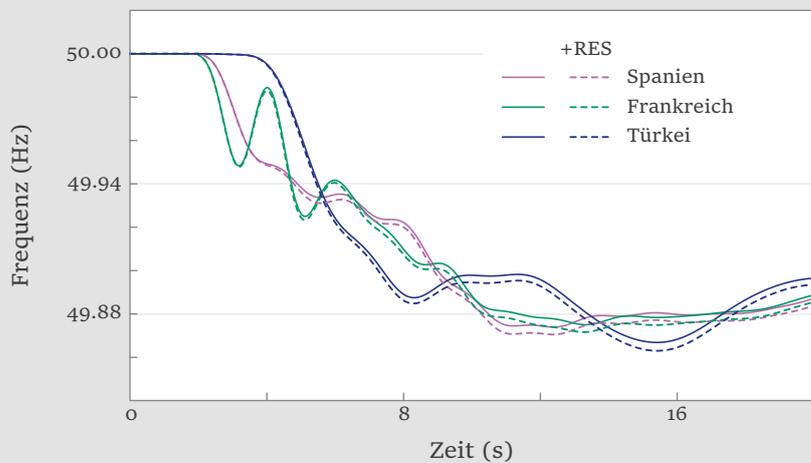
Um ihren Nachhaltigkeitszielen gerecht zu werden, fördern die Schweiz sowie der Rest von Europa und die meisten industrialisierten Länder den Zubau dezentraler, erneuerbarer Energiequellen. Heute ist das kontinentale Elektrizitätssystem aber immer noch dominiert von Einspeisungen mit Synchrongeneratoren (50 Hz), also grossen rotierenden Massen, die weiträumig über das Übertragungsnetz miteinander verbunden sind. Projekte wie «European Power System 2040» zeigen, dass die heutige Komplexität des europäischen Übertragungssystems noch zunehmen wird, wenn 75 % des europäischen Strombedarfs durch erneuerbare Quellen gedeckt werden sollen, was nur durch grenzüberschreitenden Austausch möglich sein wird.

Das heutige Übertragungssystem in Kontinentaleuropa kann mit einem System aus drei Massen verglichen werden, die mit Federn

untereinander verbunden sind: plötzliche Ausfälle von einzelnen Leitungen und Kraftwerken regen das System zum Schwingen an und gefährden damit den sicheren Betrieb. Der Zubau erneuerbarer Energiequellen, allen voran Wind und Photovoltaik, stellt den Echtzeitbetrieb des Systems nicht nur wegen des fluktuierenden Einspeiseverhaltens vor neue Herausforderungen, sondern auch wegen zusätzlich auftretender Effekte, ausgelöst durch die Netzanbindung mittels moderner, leistungselektronischer Wechselrichter.

Bislang ist unklar, wie das dynamische Verhalten des Übertragungsnetzes dadurch beeinflusst wird. Diese Frage steht im Zentrum des transnationalen Projekts «CloudGrid». Eine Vielzahl nichtlinearer Simulationen des europäischen Verbundnetzes ist notwendig, um Antworten darauf zu finden. Dazu wird erstmals das detaillierteste heute verfügbare dynamische Netzmodell ver-

Übertragungsleitungsnetz in Europa (Quelle: www.entsoe.eu).



Frequenzgang an drei verschiedenen, zufällig gewählten Stellen im europäischen Netz (Spanien, Frankreich und Türkei), nachdem sich bei $t = 0$ in Frankreich zwei Synchrongeneratoren (rotierende Massen) mit 2 800 MW verabschiedet haben. Die durchgezogenen Linien beziehen sich auf das heutige Netz (mit Kernkraftwerken in DE und CH), die gestrichelten auf das gleiche Netz aber ohne Kernkraftwerke in DE und CH, dafür mit 10 GW Erneuerbaren (+RES) an den gleichen Netzknoten. Dabei machen nicht die Erneuerbaren resp. ihre Fluktuationen den Unterschied aus, sondern einzig die stark reduzierte rotierende Masse des «künftigen» Systems (Quelle: ZHAW).

Vergleich der Dämpfung von Schwingungen im Frequenzgang (Abweichungen zu Referenz per unit) nach Auftreten einer Netzstörung, einmal mit bisheriger Kontrolltechnik und einmal mit der in diesem Projekt neu entwickelten digitalen Steuerungstechnik (Quelle: ZHAW).

wendet, das vom Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E) entwickelt wurde. Ein plötzlicher Ausfall von zwei Synchrongeneratoren in Frankreich mit einer Gesamtleistung von 2 600 MW verursacht Frequenzschwankungen, die in der Abbildung oben für drei zufällig ausgewählte Orte im Modell beispielhaft dargestellt sind. Um die Auswirkungen der Abschaltung der Kernkraftwerke in der Schweiz und in Deutschland im Modell zu simulieren, werden nun die entsprechenden Synchrongeneratoren durch Einspeisungen von 10 GW aus erneuerbaren Energiequellen ersetzt. Dies beeinflusst direkt sowohl die Fre-

quenz wie auch deren Änderungsrate. Die Abbildung oben zeigt die resultierenden Frequenzverläufe, die prinzipiell kleinere Werte annehmen. Die bereits signifikante Absenkung dürfte sich mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energie weiter vergrößern.

Damit ändert sich aber nicht nur das dynamische Verhalten des Systems, sondern auch die Art und Weise wie es betrieben werden muss. Bereits vorhandene Messinfrastrukturen wie Weitbereichs-Überwachungssysteme erlauben eine schnellere und zuverlässigere Steuerung, als es mit konventionellen Systemen möglich

ist. Die im Rahmen des Projekts «CloudGrid» entwickelte Methodik verwendet Synchrophasor-Messungen, um die Steuerungsparameter aktiv anzupassen, und verhindert damit einen Systemzusammenbruch. In der unteren Abbildung auf dieser Seite wird die Leistungsfähigkeit einer konventionellen Steuerung mit derjenigen der entwickelten Methode verglichen. Sie zeigt, dass mit der neuen Steuerungsmethode eine Schwingung um bis zu 25 % effektiver gedämpft werden kann.

Rafael Segundo, ZHAW



Thermisches Potenzial urbaner Tunnelinfrastrukturen

Tunnelröhre der U-Bahn in München (Quelle: Wikipedia, Autor: OhWeh).

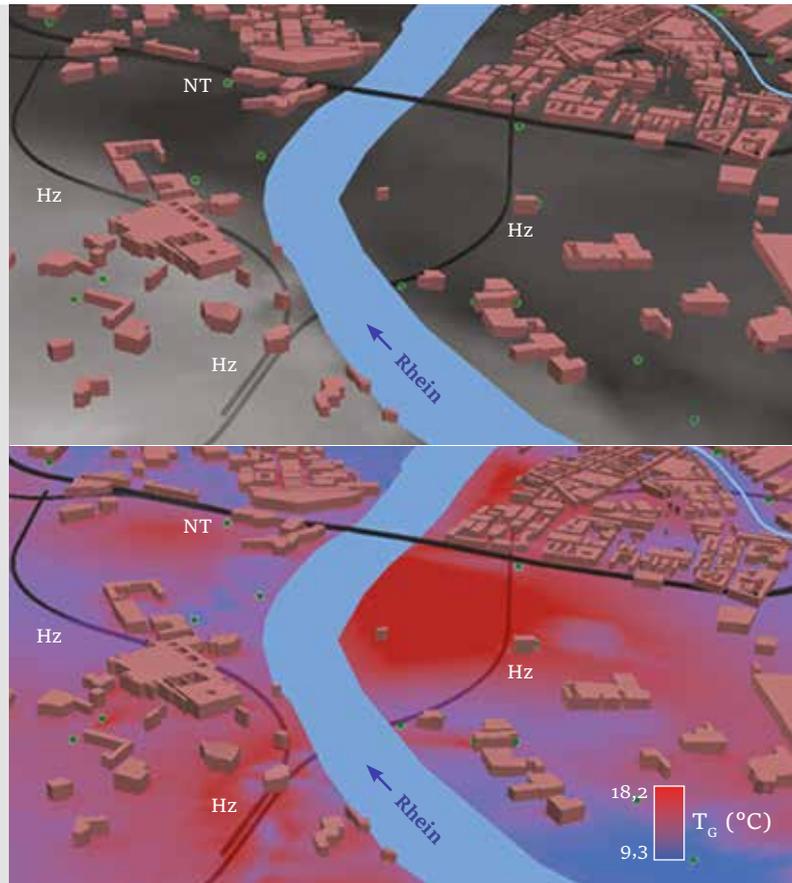
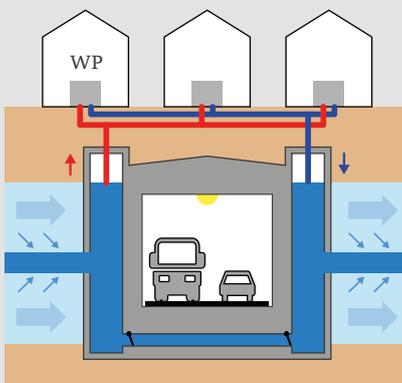
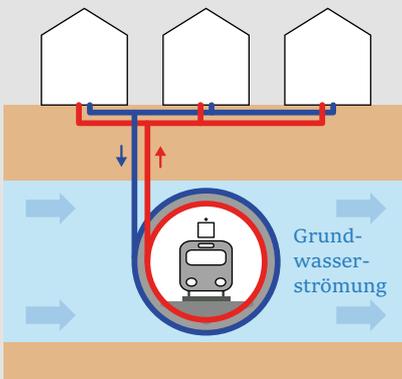
Urbane Regionen weisen oft erhöhte Grundwassertemperaturen auf mit einem energetischen Potenzial, welches durch unterirdische Verkehrswege erschlossen werden könnte. Die Machbarkeit einer solchen Nutzung von Tunnelinfrastrukturen wird aktuell im urbanen Ballungsraum von Basel untersucht.

Die thermische Nutzung des Untergrunds im Zusammenhang mit Gebäudekühlung und die durch unterirdische Bauten (Gebäude, Tunnels usw.) eingebrachte Wärme resultieren in der Stadt Basel in erhöhten Grundwassertemperaturen von bis zu 18 °C. Es stellt sich die Frage, ob man diese eingebrachte Wärme wieder nutzbar machen und die Entwicklung der Grundwassertemperatur damit stabilisiert werden kann. Erste Untersuchungen zeigen,

dass die enorme «Abfallwärme» im Untergrund stellenweise 20 bis 100 % des Heizenergiebedarfs decken könnte.

Aktuell entwickeln Forschende der Universität Basel Werkzeuge, um thermische Einflüsse auf Grundwasserressourcen zu untersuchen und eine energetische Nutzung von Tunnelinfrastrukturen zu bewerten. Zentral dabei ist der Wärmetransport durch Grundwasserströmungen im

hochdurchlässigen Lockergestein. Grosse Kontaktflächen von Tunnelinfrastrukturen mit dem Untergrund ermöglichen hier eine thermische Nutzung, dies vor allem in Quartieren, in denen grossflächige Neugebauten geplant sind, deren Energiebedarf mit «aktiven» Wärmepumensystemen, die das Grundwasser nutzen, sowie mit «passiven» Energieabsorbieren gedeckt werden kann. In Tunnelsegmenten installierte Wärmetauscher bilden soge-



Thermischen Nutzung von Tunnelinfrastrukturen (oben) mit Absorberlementen in der Tunnelverschalung und (unten) mit Nutzung des Grundwassers mit Wärmepumpensystemen (WP)..

(Oben) Urbane Untergrundbauten am Rheinknie in Basel: Verlauf der geplanten Eisenbahn- (S-Bahntunnel Hz-Herzstück) und der vorhandenen Autobahntunnelinfrastrukturen (NT-Nordtangente) in Bezug zur Felsoberfläche im Untergrund (graue Fläche). (Unten) Aktuelle Grundwassertemperaturen am Rheinknie in Basel (Quelle: Universität Basel).

nannt «passive» Systeme (siehe Abbildung oben). «Aktive» Systeme werden in Tunnel unterquerenden Grundwasserleitungen eingesetzt, welche die Durchgängigkeit des Grundwassers sicherstellen und dazu dienen, Rückstaueffekte und stagnierende Zonen im Bereich von Tunnelbauwerken zu vermeiden.

In Abhängigkeit des Tunneltyps und der örtlichen Gegebenheiten im Untergrund gibt es unterschiedliche Lösungen zur thermischen Nutzung von Tunnelbauten: in Eisenbahntunnels kann die Abwärme von Zügen mit Temperaturen im Tunnel um 30 °C «passiv»

genutzt werden, womit gleichzeitig die Tunnelinfrastruktur gekühlt wird. Autobahntunnels mit grösseren Durchmessern eignen sich eher für eine «aktive» Nutzung, insbesondere wenn der Tunnel quer zu einer Grundwasserströmung im Lockergestein verläuft.

Eine aktuelle Untersuchung in Basel zeigt, dass in zwei 740 bzw. 280 m langen Abschnitten im Bereich der Eingänge eines neu geplanten S-Bahntunnels Wärmeleistungen von rund 4,8 bzw. 1,8 MW genutzt werden könnten. In der Heizperiode liessen sich damit rund 10 bzw. 3,7 GWh an Wärme bereitstellen. Im geplan-

ten Rhein unterquerenden Autobahntunnel sind lediglich Tunnelabschnitte, welche quer zur vergleichsweise warmen Grundwasserströmung verlaufen, für eine thermische Nutzung geeignet. In einem 320 m langen Tunnelabschnitt liesse sich eine thermische Leistung von rund einem halben MW nutzen. Die am Beispiel Basel erzielten Ergebnisse können dazu dienen, Strategien für eine nachhaltige Bewirtschaftung urbaner Untergrundressourcen zu entwickeln.

Jannis Epting und Peter Huggenberger, Universität Basel

Hochtemperaturbatterien aus der Schweiz

Natrium-Nickelchlorid (NaNiCl)-Batterien sind bewährte und äusserst betriebssichere Spezialbatterien. Ausgehend von ersten Forschungsarbeiten Ende der 70er-Jahre in Südafrika wurde diese Technologie in den letzten Jahrzehnten in Grossbritannien, Deutschland und in der Schweiz weiterentwickelt. Heute werden NaNiCl-Batterien vom Schweizer Unternehmen FZSoNick in Stabio (Kanton Tessin) gefertigt. Mit über 150 Angestellten und einer Fertigungskapazität von 800 000 Zellen (80 MWh) pro Jahr ist FZSoNick weltweit führend in der Herstellung dieses Batterietyps.

Für die Herstellung von Natrium-Nickelchlorid (NaNiCl)-Batterien werden Rohstoffe verwendet, die in grossen Mengen verfügbar und zu 100 % recycelbar sind (Edelstahl, Nickel, Eisen, Steinsalz, Aluminiumoxid-basierte Keramikelektrolyten). Die geladenen Zellen bestehen aus einer flüssigen Natrium-Anode, einer teilweise flüssigen Kathode und einem festen Keramik-Elektrolyten als

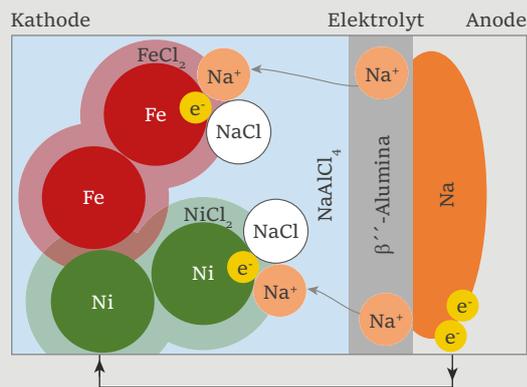
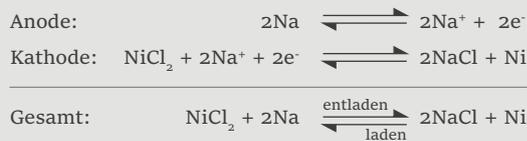
aktive Bestandteile. Zur Verringerung des Innenwiderstands der Zelle und Steigerung der Energieeffizienz beträgt die innere Betriebstemperatur der Zelle rund 270 °C. Dennoch liegt die äussere Oberflächentemperatur nur wenige Grade über der Umgebungstemperatur. NaNiCl-Batterien bieten neben einem wartungsfreien Betrieb während bis zu 4500 Lade- und Entladezyklen eine

Lebensdauer von 20 Jahren. Anders als Lithium-Ionen-Batterien tolerieren sie auch Ausstemperaturen zwischen -20 und +60 °C bei konstanter Leistung.

Dank dieser Eigenschaften weisen NaNiCl-Batterien niedrige Gesamtkosten für Speicheranwendungen im Bereich Telecom, Onboardsysteme im Schienenverkehr oder

Ein Vorteil der Natrium-Nickelchlorid-Technologie besteht darin, dass die Herstellung nicht unter Schutzgasatmosphäre erfolgen muss. «Glovebox»-Versuche (z. B. mit metallischem Natrium) helfen bei der Ermittlung der Prozesse, welche die Ladegeschwindigkeit in «State-of-the-Art»-Zellen einschränken (Quelle: Empa).





Schematischer Aufbau einer Natrium-Nickelchlorid (NaNiCl)-Zelle: Kathode aus Nickel und Natriumchlorid (NaCl), welche zusätzlich Eisen (Fe) enthält, was höhere Lade- und Entladeraten ermöglicht. Anode aus Natrium, Elektrolyt aus Aluminiumoxid. Oben sind die Anoden- und Kathodenreaktionsgleichungen angegeben.

Die Betriebstemperatur solcher Batterien liegt bei rund 270 °C, damit die Elektroden im flüssigem Zustand vorliegen und der Elektrolyt eine hohe Leitfähigkeit zeigt. Daher müssen NaNiCl-Zellen thermisch isoliert werden (Bildquelle: FIAMM SoNick, R. Simon).

unterbrechungsfreie Stromversorgung auf. Mit spezifischen Energiedichten von 140 Wh/kg und 280 Wh/Liter auf Zellebene sind sie zudem 70 % leichter und 30 % kleiner als herkömmlichen Speichersysteme auf Blei-Säure-Basis. Modernste NaNiCl-Batterien kommen auch in grösseren stationären Energiespeichern (bis 1,4 MWh, 400 kW) und für E-mobilitätsanwendungen (Nutzfahrzeuge, Busse, Bergbau) zum Einsatz. Im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus weisen NaNiCl-Batterien aber tiefere Lade- und Entladeraten und einen relativ komplexen Zellherstellungsprozess auf. Momentan sind die Kosten für diese Technologie noch nicht auf dem Niveau von Lithium-Ionen-Batterien, die aufgrund ihrer starken Verbreitung in letzter Zeit deutlich günstiger geworden sind.

Ziel der Forschung ist es deshalb, die industrielle Fertigbarkeit von NaNiCl-Batterien zu verbessern, da so nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit erhöht wird, sondern gleichzeitig auch der Prozess an sich energie- und ressourceneffizienter wird. Forscherinnen und Forscher der Empa und der ETH Lausanne entwickeln dazu zusammen mit FZSoNick eine neue Generation von leistungsstarken NaNiCl-Zellen. Im Rahmen eines 2018 neu gestarteten Projekts wird an der Weiterentwicklung des Zelldesigns, des Keramik-Elektrolyten und der Elektroden gearbeitet. Im Gegensatz zu den heute üblichen rohrförmigen Zellen soll eine flache Geometrie entwickelt werden, mit der die Komplexität der Zellherstellung verringert, die Laderaten erhöht und die Zuverlässigkeit verbessert werden soll.

Gleichzeitig werden eine hohe Betriebssicherheit und eine lange Lebensdauer angestrebt.

Mit Hilfe multiphysikalischer Modellierung in Verbindung mit elektrochemischer Zellcharakterisierung werden Prozesse ermittelt, welche die Ladegeschwindigkeit der neuen Generation von NaNiCl-Zellen einschränken. Aufgrund dieser Erkenntnisse werden die Zusammensetzung und Mikrostruktur der Kathode und der Stromabnehmer angepasst, um den Anteil an Aktivmaterial zu maximieren und die Laderaten zu steigern. Ausserdem werden neuartige Zellfertigungsverfahren untersucht, um die Herstellbarkeit und Skalierbarkeit zu erhöhen.

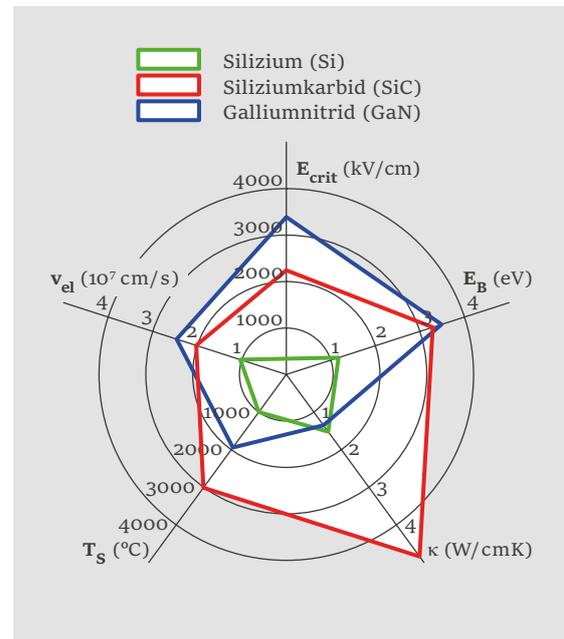
Meike Heinz, Empa

Effiziente Leistungselektronik

Der Einsatz sogenannter «Wide-Bandgap»-Halbleiter wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) in leistungselektronischen Bauteilen verspricht gegenüber konventionellem Silizium signifikante Steigerungen in der Systemeffizienz. Das Anwendungsgebiet solcher Bauteile ist riesig und reicht von kleinen Schaltnetzteilen (Laptops, Handys) über Wechselrichter für Photovoltaik bis zu grösseren Leistungsbereichen, etwa bei elektrischen Antrieben. Eine amerikanische Studie aus 2015 schätzt das jährliche Einspar-

potenzial allein im Bereich von Laptops, Tablets und Handys auf über 7 500 GWh. Auf Initiative des BFE wird dieses Potenzial im Rahmen der Zusammenarbeit in der Internationalen Energieagentur nun weiter konkretisiert. Dazu erfolgt ein breit abgestütztes «Technology Assessment» und es wird eine Roadmap der vielversprechendsten Anwendungen entwickelt. Roland Brüniger

Die Halbleiter SiC und GaN haben im Vergleich zu Silizium eine grössere Bandlücke (E_B), sind schneller (v_{el}), leiten die Wärme besser (k) und können bei höherer Spannung (E_{crit}) betrieben werden ($T_s = \text{Schmelzpunkt}$).



Silikataerogel als thermische Isolierung

Dank seiner extrem niedrigen thermischen Leitfähigkeit kann Silikataerogel für eine Wärmedämmung in dünnen Schichten angewendet werden und ist be-

sonders interessant für Gebäuderenovationen im städtischen Bereich. Leider ist die Herstellung kostspielig und ineffizient. In einer Pilotanlage der Empa wird die technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer industriellen Fertigung demonstriert, um damit dem Einsatz von Silikataerogel aus einem Nischenmarkt zu einer breiten Anwendung zu verhelfen. Wim Malfait, Empa

Wassereinspritzung im Dieselmotor

Grosse Dieselmotoren kommen als Antriebe von Schiffen und für die stationäre Stromerzeugung zum Einsatz. Eine Herausforderung ist die Reduktion der Stickoxyd- (NO_x) sowie der Russemissionen. Um den Aufwand für Installation und Betrieb externer Komponenten wie Katalysator und Partikel-

filter gering zu halten, werden innermotorische Massnahmen zur Reduktion der Emissionen erforscht. Bekannt ist die Abgasrückführung (AGR), welche zwar die NO_x -Bildung vermindert, zugleich aber die Verbrennungstemperatur absenkt und damit wegen ungenügender Oxydation mehr Russbildung verursacht. Durch die Einspritzung von Wasser in den Brennstoff konnte das Paul Scherrer Institut nun bei einem mit AGR ausgerüsteten Motor zeigen, dass Russemissionen um bis zu 85 % reduziert werden können bei gleichzeitiger Absenkung der NO_x -Emissionen. Der Wirkungsgrad des Motors wurde dabei um 0.85 % erhöht. Der Effekt wird einer explosionsartigen Verdampfung der Wassertropfen im Motor zugeschrieben, die zu einer besseren Zerstäubung und damit Verbrennung führt. Stephan Renz

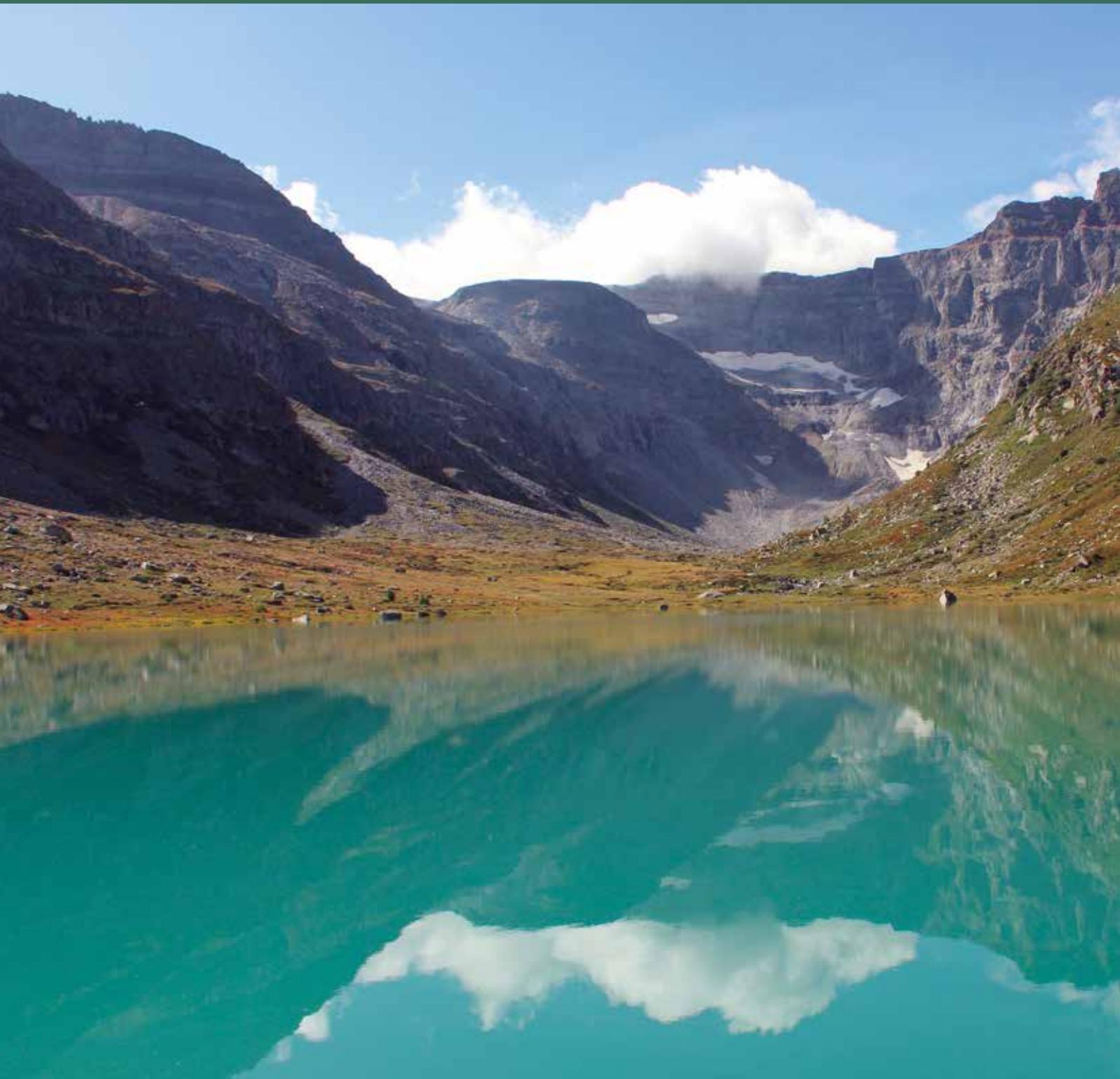


(Oben) Aerogel auf Silikatbasis ist ein leichter und poröser Feststoff und eignet sich dank seiner geringen thermischen Leitfähigkeit hervorragend für Wärmeisoliationsanwendungen (Quelle: Empa). (Unten) Motorenteststand (Quelle: PSI).

Erneuerbare Energie

Der Anteil erneuerbarer Energiebereitstellung nimmt weltweit kontinuierlich zu, insbesondere im Stromsektor für Wind und für Photovoltaik. Andere Technologien wie Wasserkraft, Biomasse und Geothermie werden ebenfalls ausgebaut mit hunderten von GW an zusätzlicher Kapazität weltweit. Im Bereich der erneuerbaren Energie

fördert das BFE die Forschung und Entwicklung sowohl von Technologien, welche unmittelbar für eine nachhaltige Energieversorgung in der Schweiz eingesetzt werden können, als auch in Themengebieten, welche dem Aufbau einer Wertschöpfung in der Schweiz dienlich sind.



Planungshilfe zur Erneuerung von Wasserkraftanlagen

In den kommenden Jahrzehnten stehen für die meisten Wasserkraftanlagen der Schweiz Konzessionserneuerungen an. Im Rahmen der Energiestrategie 2050 wird eine deutliche Produktionssteigerung erwartet. Schweizer Forschende entwickeln Werkzeuge, um aus einer Vielzahl an verschiedenen Erneuerungs- und Erweiterungsoptionen die wirtschaftlich sinnvollsten baulichen und elektromechanischen Varianten zu identifizieren.

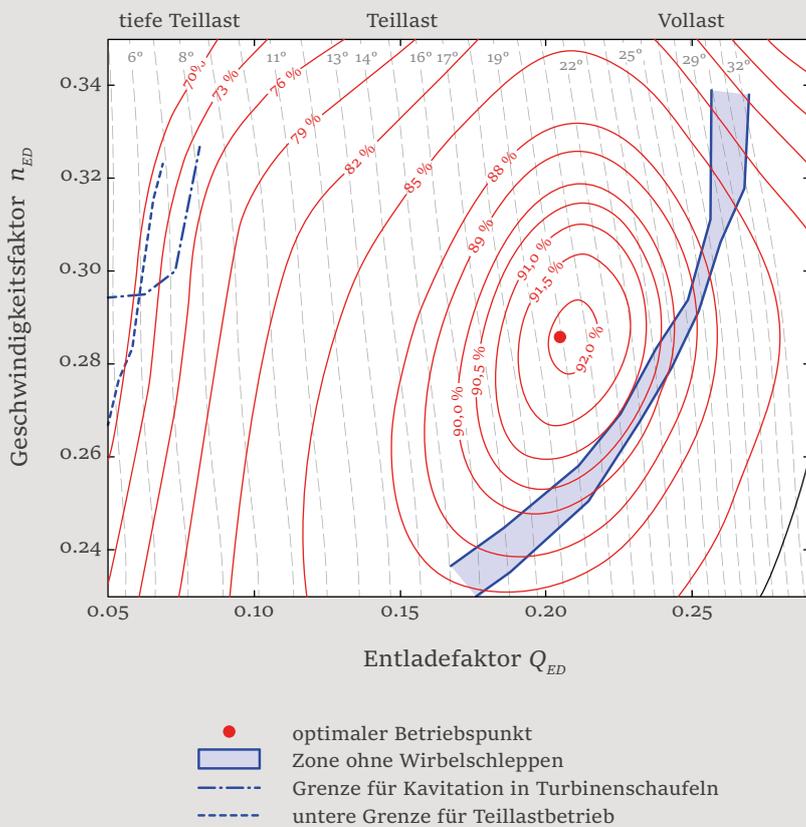
Um den mit dem Atomausstieg verbundenen Produktionswegfall zu kompensieren, basiert die Energiestrategie 2050 auf einer erhöhten Nutzung des Schweizer Wasserkraftpotenzials sowie auf neuen erneuerbaren Energien. Neben strengerem Gewässerschutzbestimmungen stellt der Zubau nicht regulierter erneuerbarer Energien und dem damit verbundenen Flexibilitätsbedarf im elektrischen Netz die Schweizer Wasserkraft vor neue Herausforderungen.

In den kommenden Jahren stehen für rund 24 TWh (70 %) an jährlicher Stromerzeugung aus heimischer Wasserkraft Konzessionserneuerung an. Dafür gibt es die unterschiedlichsten baulich und maschinentechnisch denkbaren Varianten, z. B. die Erhöhungen von Staumauern und die Vergösserung des Speichervolumens, aber auch geänderte maschinentechnische Ausstattungen wie zusätzliche oder andere, flexiblere Turbinen. In

Kombination ergibt sich daraus eine grosse Anzahl möglicher Szenarien, die untereinander verglichen werden müssen. Mit einem an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne EPFL zusammen mit weiteren Partnern entwickelten Planungstool «RENOVHydro» können unterschiedlichste Varianten miteinander verglichen werden, wobei sowohl Energieerzeugung und mögliche Netzdienstleistungen, als auch verschiedene Randbedingungen, z. B. der Schutz der Gewässerökosysteme, berücksichtigt werden können.

Wirkungsgrade von Turbinen und reversiblen Pumpenturbinen bei unterschiedlichen Betriebspunkten werden mithilfe von sogenannten «hill charts» dargestellt, wo die Effizienz als Funktion des Durchflusses Q und der Rotationsgeschwindigkeit n der Turbine/Pumpe aufgetragen wird. Anhand empirischer Daten des Labors für hydraulische Strö-

Wasserreservoir "Chummibort" eines Kraftwerks der Gommerkraftwerke AG (Source: Pedro Manso, EPFL).



mungsmaschinen an der EPFL können mithilfe spezieller Interpolationsverfahren generische «hill charts» erstellt werden. Das Labor profitiert dabei von seiner einzigartigen Versuchsanlage, in der über die letzten 50 Jahre die Turbinen der wichtigsten Wasserkraftanlagen der Welt mithilfe verkleinerter physikalischer Modelle entsprechend der international gültigen Standards getestet wurden. Die daraus entwickelten Diagramme («hill charts») ermöglichen die numerische Simulation beliebiger neuer oder teilerneuerter Turbinen in den unterschiedlichsten Betriebspunkten, wie zum Beispiel Fallhöhe H und Durchfluss Q , wie sie an einer zu modernisierenden Wasserkraftanlage zukünftig auftreten könnten. Innerhalb des Model-

lierungstools wird ebenfalls die Kopplung mit dem Stromnetz mit berücksichtigt.

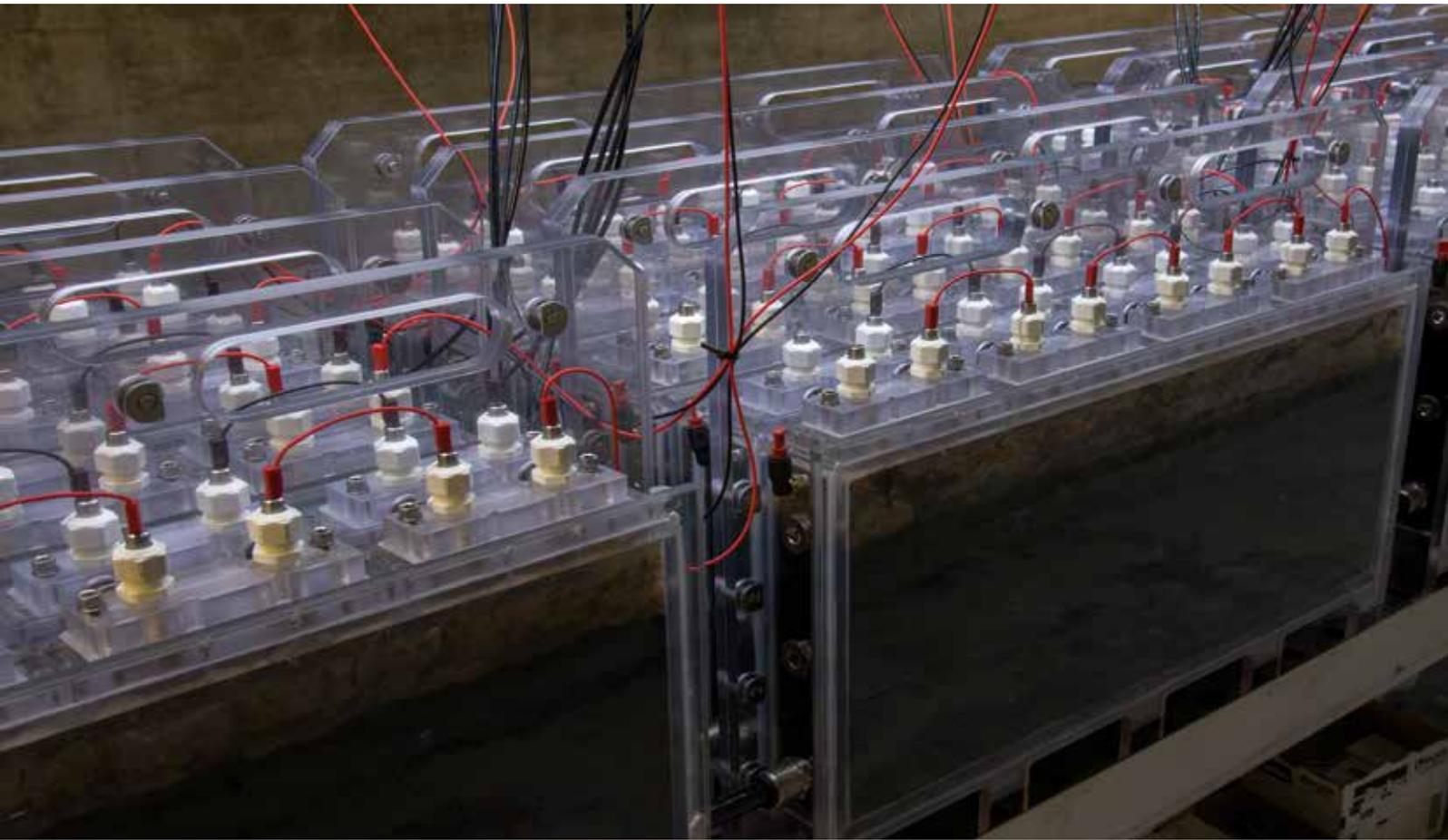
In einem Praxistest wurde dieses Tool an einem realen System von Wasserkraftanlagen eingesetzt, welche von den Projektpartnern Forces Motrices Valaisanne und Groupe E betrieben werden. Für dieses System, welches aus mehreren Speichern und Wasserkraftanlagen besteht, wurden über 700 unterschiedliche Szenarien für die mögliche Erneuerung und zukünftige Betriebsweise untersucht. Dabei wurde ein bestimmtes hydrologisches Jahr und ein Szenario für die erzielbaren Strommarktpreise zu Grunde gelegt. Aus allen Szenarien konnten die zehn mit dem besten wirtschaftlichen Ergebnis identi-

«Hill chart» einer Francis-Turbine, wo die Effizienz als Funktion der Laufgeschwindigkeit bzw. der Rotationsfrequenz n (s^{-1}) und des Durchflusses Q (m^3/s) aufgetragen ist. Um verschiedene Turbinen miteinander vergleichen zu können, werden Laufgeschwindigkeit und Durchfluss als dimensionslose Größen dargestellt: Geschwindigkeitsfaktor: $n_{ED} = nD/(gH)^{0.5}$ und Entladefaktor $Q_{ED} = D^2/(gH)^{0.5}$ mit dem Turbinendurchmesser D , der Erdbeschleunigung g und der Fallhöhe H . Die gestrichelten Linien geben den Öffnungswinkel der Führungsschaufeln an (0° bis 32°).

Ein an der EPFL zusammen mit Partnern entwickeltes Modellierungstools ermöglicht es, solche «hill charts» generisch zu erzeugen, um die Erneuerung bestehender Wasserkraftanlagen zu beurteilen. Grundlage dazu ist eine Datenbank von empirischen Untersuchungen (Quelle: EPFL).

fiziert und dann zusätzlich jeweils die damit möglichen Netzdienstleistungen und die daraus resultierenden Einnahmen ermittelt werden. Gleichzeitig wurden die notwendigen Investitionen für bauliche und maschinentechnische Veränderungen berechnet. Mit diesen Informationen lassen sich die erfolgversprechendsten Optionen für die Erneuerung und/oder Erweiterung für Konzessionserneuerung der jeweiligen Anlagen ermitteln. Der dafür erforderliche Aufwand lässt sich durch den Einsatz des «RENOVHydro»-Tools gegenüber einer herkömmlichen Herangehensweise für derartige Studien etwa um den Faktor 20 reduzieren.

François Avellan, Christophe Nicolet und Christian Landry, EPFL



Einzelne mikrobielle Brennstoffzellen in einer Stapelanordnung. Das Abwasser fließt während der Reinigung und Stromproduktion von rechts nach links durch die miteinander verbundenen Zellen (Quelle: HES-SO Valais-Wallis).

Strom produzierende Kleinstlebewesen

In der Schweiz liegt der Anteil der kommunalen Abwasserreinigung am Gesamtstromverbrauch schätzungsweise bei einem Prozent. Davon gehen etwas mehr als die Hälfte in die aktive Belüftung der biologischen Klärbecken. Einen deutlich tieferen Stromverbrauch versprechen sogenannte mikrobielle Brennstoffzellen, welche das Abwasser reinigen und dabei gleichzeitig Strom erzeugen. Eine 1000 Liter grosse mikrobielle Brennstoffzelle wird zurzeit an der Abwasserreinigungsanlage in Sitten erprobt.

In mikrobiellen Brennstoffzellen verarbeiten lebende Mikroorganismen organische Substanzen (Substrat) und geben die bei ihrem Stoffwechsel entstehenden Elektronen an

eine Anode ab (siehe Abbildung Seite 20). Wie in einer «normalen» Niedertemperaturbrennstoffzelle wandern die erzeugten Protonen über eine Membran zur Kathode,

während die Elektronen von der Anode aus über einen äusseren Stromkreislauf fließen und dabei zur Energiegewinnung genutzt werden können.

Elektrische Mikroben sind im kommunalen Abwasser natürlicherweise enthalten und siedeln sich spontan auf Elektroden der mikrobiellen Brennstoffzellen an. Die resultierenden Biofilme enthalten eine breite Palette an spezialisierten Mikroben, welche die vielfältigen Verunreinigungen im Abwasser abbauen. Diese anaeroben Mikroben brauchen keinen molekularen Sauerstoff brauchen und machen so eine kostenintensive Belüftung der biologischen Klärstufe überflüssig

Zur Zeit wird eine auf 1000 Liter hochskalierte mikrobielle Brennstoffzelle in der Abwasserreinigungsanlage (ARA) in Sitten praktisch er-

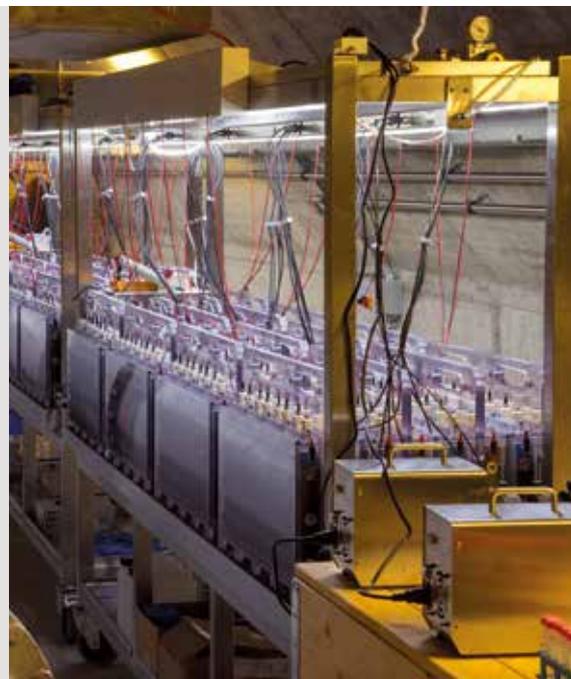
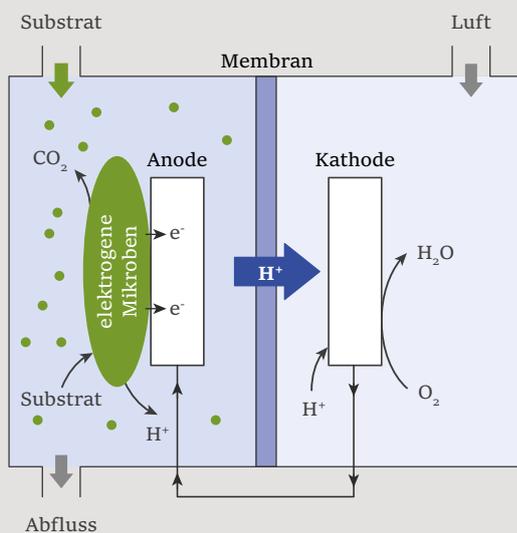
probt Neben der eigentlichen Konstruktion der Anlage spielt das Leistungsmanagement eine wichtige Rolle. Dabei werden einzelne mikrobielle Brennstoffzellen zu Stapeln kombiniert, so dass diese optimal Strom produzieren. Spannungsschwankungen unter den einzelnen mikrobiellen Brennstoffzellen werden durch ein adaptives elektronisches Leitsystem erfasst und ausgeglichen. Zusätzlich wird die Leistung der Zellen via «Maximum Power Point Tracking» optimiert, was die Geschwindigkeit der Abwasserreinigung erhöht. Unerwartete Ereignisse wie Zuflüsse von toxischen Stoffen, welche die Mikroben schädigen könnten, werden erfasst und

stärker betroffene Elektroden automatisch von der Stromproduktion entkoppelt und regeneriert, um danach wieder automatisch zugeschaltet zu werden. Ein Stromspeichermodule transformiert die niedrigen Ausgangsleistungen der 64 Einzelzellen in verwertbare Elektrizität, welche in Lithiumbatterien gespeichert wird.

Zusammengefasst: mikrobielle Brennstoffzellen dienen zur Reinigung von Abwasser, reduzieren dabei den Energiekonsum in der biologischen Stufe einer Kläranlage und erzeugen gleichzeitig noch nutzbare Elektrizität.

Fabian Fischer, HES-SO Valais-Wallis

Mikrobielle Brennstoffzelle:



Funktionsweise einer mikrobiellen Brennstoffzelle: lebende Mikroorganismen auf der Anode verarbeiten organische Substanzen (Substrat) und geben die bei ihrem Stoffwechsel entstehenden Elektronen an eine Anode ab. Wie in einer «normalen» Brennstoffzelle wandern die erzeugten Protonen über eine ionenleitende Membran zur Kathode, während die Elektronen von der Anode aus über einen äusseren Stromkreislauf fließen und dabei zur Energiegewinnung genutzt werden können

Abwasserreinigungsanlage von Sitten mit Mikrobiellen Brennstoffzellen. Der 1000 Liter Reaktor mit 64 in Reihe geschaltete Brennstoffzellen ist über 12 Meter lang. Das System produziert Elektrizität, während es Abwasser klärt. Der erzeugte Strom wird in Lithiumbatterien gespeichert (Quelle: HES-SO Valais-Wallis).

«Alte» Photovoltaikanlagen und was man daraus lernen kann

Die Gewissheit, wieviel Strom eine Photovoltaikanlage über eine bestimmte Zeit produzieren wird, ist entscheidend für eine verlässliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Ausschlaggebend ist hier insbesondere, wie sich das Modul und dessen Leistung zeitlich entwickelt. Damit Module am Markt zugelassen werden, müssen gewisse qualitative Mindestanforderungen erfüllt sein, welche mit international standardisierten Testverfahren nachgewiesen werden. Langzeitanalysen von unter realen Umweltbedingungen betriebenen Modulen sind dabei wichtig, um Langzeitprognosen aus beschleunigten Alterungsversuchen zu validieren. Mit dem Monitoring der «TISO»-10 kW-Anlage seit 1982 leistet hier die Tessiner Fachhochschule SUPSI einen wichtigen Beitrag.

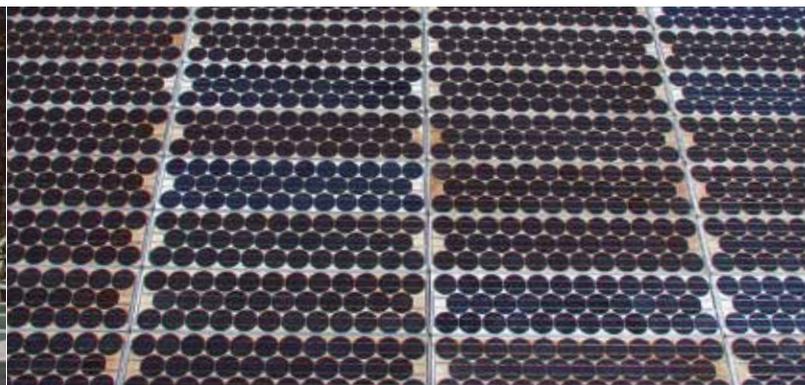
Die «TISO»-Anlage war 1982 die erste ans öffentliche Netz gekoppelte Anlage in Europa und besteht aus 288 mono-kristallinen Siliziummodulen mit 37 W Nennleistung und einer Effizienz von rund 10 % des Herstellers ARCO Solar. Die Einzigartigkeit dieser Anlage

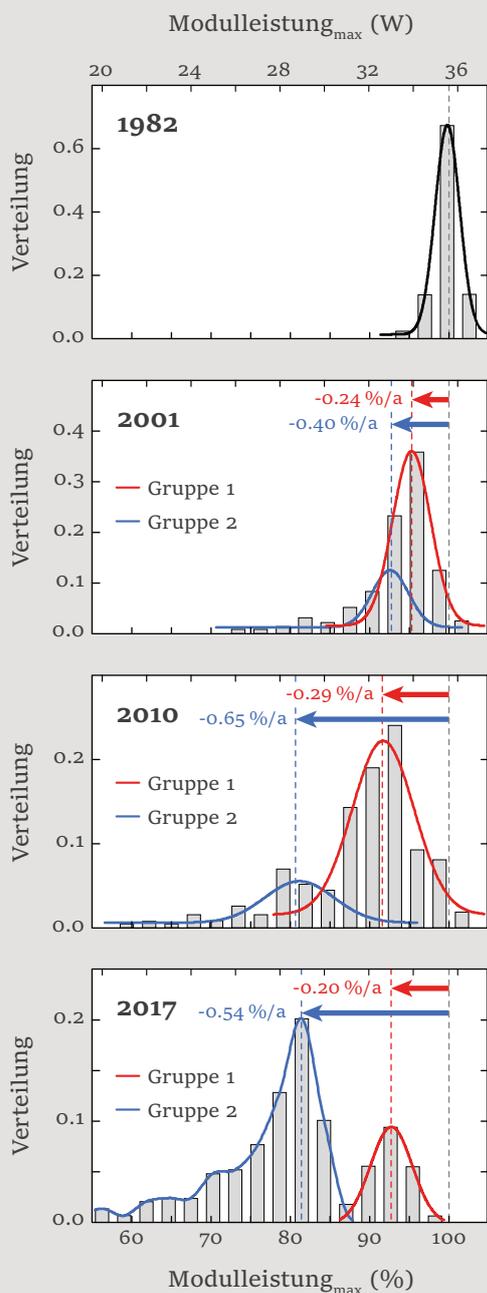
liegt neben dem hohen Alter in der Tatsache, dass 18 Referenzmodule in regelmässigen Abständen im Labor ausgemessen wurden und dass diese Messungen mit der Charakterisierung von 1982 verglichen werden können. In den Jahren 2001, 2010 und 2017 wurde die

Anlage jeweils komplett auf Leistung, elektrische Isolierung und visuelle Schäden geprüft. Dieser Datensatz ermöglicht es, langfristige Degradationsphänomene zu erforschen.

Die heute dominierende kristalline Siliziumtechnologie

Die «TISO»-10 kW-Anlage am SUPSI ist seit 1982 in Betrieb und besteht aus total 288 kristallinen Siliziummodulen des Herstellers ARCO Solar. Ansicht der Anlage von 1982, 2002, 2005 und 2013 (Quelle: SUPSI).





(Links) Zeitliche Entwicklung der Verteilung der Modulleistung von 288 Modulen aus der «TISO»-10 kW-Anlage. Während gewisse Module (Gruppe 1) eine moderate Degradationsrate aufweisen, ist für eine zweite Gruppe (Gruppe 2) die Degradation sehr viel stärker ausgeprägt (Datenquelle: SUPSI).

(Unten) Beispiel einer massiven Schädigung, wofür das Zusammenspiel verschiedener Effekte (Delimitation am Modulrand, Schimmelbefall, Oxidation, Hotspots) verantwortlich ist (Quelle: SUPSI).

hat sich seit den 80er-Jahren stark weiterentwickelt und die bei «TISO» damals installierten Modulen unterscheiden sich in vielen Eigenheiten von den heute gängigen Produkten. So sind etwa die Zellen heute nur noch rund halb so dick und in den «TISO»-Modulen sind andere als heute gängig eingesetzte Einkapselungsmaterialien verbaut, welche die Zellen gegen äussere Einflüsse abschirmen. Diverse Untersuchungen zeigen, dass die Degradation von Photovoltaikmodulen in der Regel kontinuierlich verläuft. Typischerweise wird das Lebensende eines Photovoltaikmoduls über eine Leistungseinbusse von 20 % gegenüber der ursprünglichen Leistung definiert und Hersteller geben hierfür meistens eine Garantie von mindestens 20 Jahren.

Im Jahr 2017 wurde die komplette «TISO»-Anlage demontiert und alle Module einzeln in Zusammenarbeit mit der EPFL untersucht. Analysiert wurden Leistungscharakteristik, die Isolation der Module und der Zustand von Bypassdioden. Weiter wurden Messungen zur Elektrolumineszenz durchgeführt, womit Zellschäden (z. B. Mikrorisse) identifiziert werden können. Zusätzlich fand eine visuelle Analyse aller Module statt. Die verschiedenen Feh-

lertypen wurden anschliessend statistisch ausgewertet und mit früheren Testkampagnen 1982, 2001 und 2010 verglichen. Die Analyse dieser Messungen ergab, dass 56 % der Module nach 35 Jahren immer noch mehr als 80 % der Nennleistung erreichen und somit eine Leistungsgarantie von einer maximalen Einbusse von 20 % noch erfüllen würde. Im Vergleich zu früheren Messungen wurde 2017 eine grössere Degradationsrate bestimmt. Auch verläuft die Entwicklung der Module nicht durchwegs homogen: während eine Gruppe von Modulen (ca. 21 %, «rote Gruppe») eine moderate Degradationsrate von nur -0.2 % an Leistungsverlust pro Jahr (a) aufweist, zeigt eine zweite, grössere Gruppe (ca. 73 %, «blaue Gruppe») eine erhöhte Degradationsrate von -0.5 % pro Jahr und mehr auf. 5 % aller Module funktionieren nicht mehr.

Bei einer solchen Untersuchung von Photovoltaiktechnologie aus dem Jahr 1982 stellt sich zwangsläufig die Frage, welche Ergebnisse auf moderne Module übertragen werden können. Es hat sich gezeigt, dass die unterschiedliche Degradation der Module insbesondere auf den Zustand der Einkapselung zurückzuführen ist. In der «TISO»-Anlage wurden damals Module mit drei unterschiedlichen Einkapselungstypen verbaut. Grundsätzlich ist ein Verständnis des Zusammenwirkens verschiedenster Degradationsmechanismen notwendig, um längere Lebensdauer gewährleisten zu können.

Stefan Oberholzer

Für detaillierte Informationen:
A. Virtuani et al., Prog. Photovolt Res Appl. 2019;27:328-339.
<https://doi.org/10.1002/pip.3104>

Innovative Vortrocknung für Biomassefeuerungen

Für die Heizzentrale der Bérocad SA in St. Aubin-Sauges hat die Firma OekoSolve AG einen innovativen Hackschnitzeltrockner entwickelt, der durch eine Vortrocknung der Hackschnitzel eine Effizienzsteigerung der Biomassefeuerung von über 10 % ermöglicht. Dazu werden die Hackschnitzel aus einer benachbarten Sägerei über einen Bandrockner geführt und mit den heißen Abgasen der Biomassefeuerung getrocknet, bevor sie in den Heizkessel kommen. Durch die Hackschnitzel kann zudem bereits ein substantieller Teil des Feinstaubs zurückgehalten werden. Im Anschluss an den Bandrockner werden die gesättigten Abgase zusätzlich mit einem Elektrofilter gereinigt, der aufgrund der Vorkühlung entsprechend kleiner dimensioniert werden kann. Die erfolgreiche Erprobung dieser Brennstofftrocknung eröffnet neue Möglichkeiten für die effiziente und wirtschaftliche Verwertung von feuchter Biomasse.

Men Wirz

Schneckenrostfeuerung

Automatische Holzfeuerungen können Fernwärmenetze versorgen oder Öl- und Gasheizungen in grösseren Gebäuden ersetzen. Da das Schweizer Holzpotenzial begrenzt ist, werden zunehmend auch Holzsortimente oder Biomassepellets mit erhöhtem Aschegehalt genutzt. Hierzu müssen Feuerungen im Bereich von 100 bis 300 kW entwickelt werden, die für solche Brennstoffe geeignet sind. Konzepte hierfür basieren auf sogenannten Schneckenbrennern, welche einen kontinuierlichen Austrag der Asche sicherstellen, Verschla-

Abrasionschäden in Wasserkraftwerken

Aufgrund der zunehmenden Verlandung von Speicherseen nehmen Abrasionschäden durch Sedimente an Turbinen und Umleitstollen von Wasserkraftwerken stetig zu, was zu erhöhten Betriebskosten und Ertragsausfällen sowie zu einer reduzierten Speicherkapazität führt. Mit verbesserten Abrasionsmodellen der ETH Zürich können Hochwasserereignisse und die Schwebstoffbelastung im Wasser genauer vorhergesagt und der Betrieb von Turbinen und Sedimentumleitstollen optimiert werden. Der Wasserbedarf kann damit reduziert und Schäden an den Anlagen verhindert werden, was zu einer erhöhten energetischen Nutzung und einem wirtschaftlicheren Betrieb von Wasserkraftwerken führt. Men Wirz

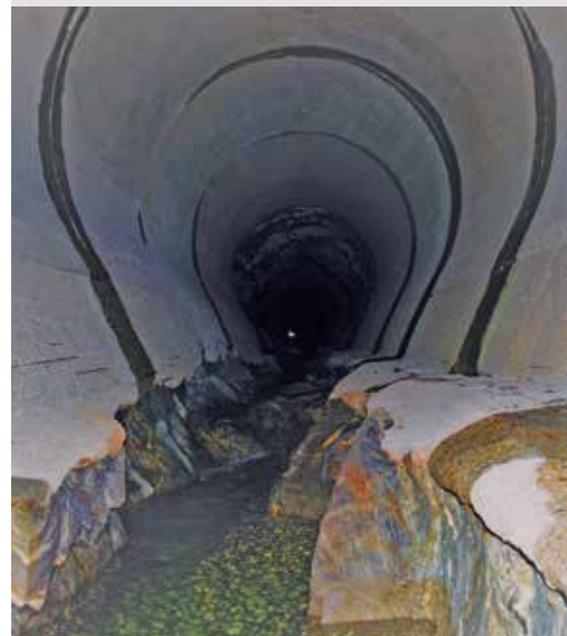
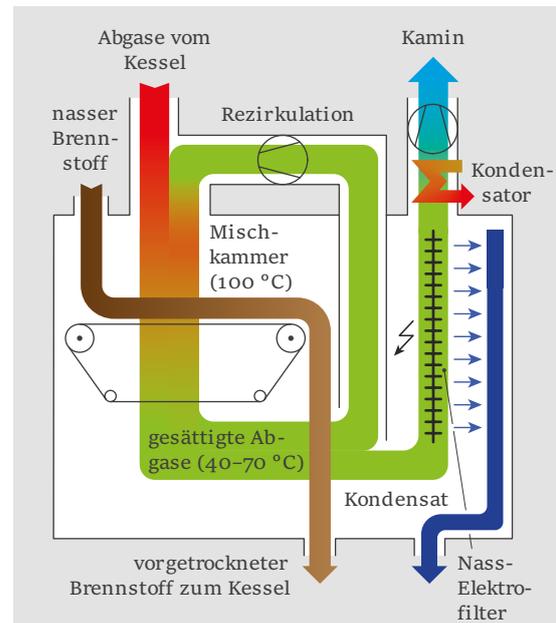
(Oben) Brennstofftrocknung.

(Mitte) Abrasion in einem Sedimentumleitstollen (Quelle: ETHZ).

(Unten) Plexiglasmodell einer Schneckenrostfeuerung mit durch Laserstrahl beleuchteten Tröpfchen im Brennraum (Quelle: HSLU).

ckung verhindern und dank gestufter Verbrennung niedrige Emissionen an Feinstaub und Stickoxiden erzielen. Anhand einer Versuchsanlage mit 35 kW wurde demonstriert, dass die Schneckenrostfeuerung Biomassebrennstoffe mit Aschegehalten von bis zu 7 Gew.-% nutzen und tiefe Emissionswerte erzielen kann. Für den Bau einer 150 kW-Feuerung wurde anhand von feuerungstechnischen Kennwerten ein Scale-up durchgeführt und mit Strömungsberechnungen und Messungen an Modellen die Lufteindüsung und der Brennraum optimiert.

Sandra Hermle



Sozioökonomische Aspekte

Das Querschnittsprogramm Energie – Wirtschaft – Gesellschaft (EWG) befasst sich mit ökonomischen, soziologischen, psychologischen sowie politologischen Fragestellungen über die ganze Wertschöpfungskette der Energie hinweg. Das Forschungsprogramm dient sowohl der Entwicklung neuer, als auch der Überprüfung beste-

hender energiepolitischer Instrumente. Im Jahr 2018 wurde eine breite Palette von Forschungsprojekten zu so unterschiedlichen Themen wie dem Verhalten der Energieverbraucher, Investitionen in erneuerbare Energien, Energiemarkt-design und Mobilität unterstützt.



Der Schweizer Gasmarkt im europäischen Kontext

Im Rahmen des Projekts «Modelling the Swiss Gas Market in a European Context» wurde die Entwicklung der europäischen Erdgasversorgung und deren Rückwirkungen für die Schweiz untersucht. Zentral waren hierbei die Fragen rund um die Modellierung des europäischen und Schweizer Gasmarktes, der Versorgungssicherheit, der möglichen Ausgestaltung einer Marktöffnung und der Implementierung eines «Entry-Exit»-Systems in der Schweiz. Das Projekt wurde vom Bundesamt für Energie im Rahmen des Forschungsprogramms Energie – Wirtschaft – Gesellschaft (EWG) unterstützt.

Um die Marktentwicklung und Versorgungssicherheit abzuschätzen, entwickelte das Forscherteam ein Modell, welches die europäischen und globalen Erdgasmärkte abbildet. Mittels einer Szenarioanalyse wurden unterschiedliche Netzausbauvarianten («Southern Gas Corridor», «Nordstream 2»), Unterbrechungen in der Versorgung (Russland–Ukraine) und mögliche Strategien zur Verbesserung der Versorgungssicherheit in Krisensituationen (Speichermanagement, langfristige Verträge) simuliert und analysiert. Dabei zeigen die Modellergebnisse, dass die existierende Netzinfrastruktur sowie die geplanten Ausbaumassnahmen ein generell hohes Versorgungsniveau in Europa und der Schweiz sicherstellen.

Eine hohe Abhängigkeit von russischen Importen besteht allerdings weiterhin – insbesondere in Osteuropa.

Diese können auch mit den geplanten Ausbaumassnahmen nicht vollständig ausgeglichen werden. Um diesem Risiko begegnen zu können, ist die analysierte strategische Speichervorsorge eine kosteneffiziente Vorgehensweise. Bereits bei einer Reserve von 20 bis 30 % des Gesamtspeichervolumens könnte ein viermonatiger Versorgungsunterbruch der russisch-ukrainischen Verbindung grösstenteils kompensiert werden, wenn die verschiedenen Speicher in Europa entsprechend effizient koordiniert werden. Für die Schweiz, welche über keine eigenen Produktions- oder Speichermöglichkeiten verfügt, ist dabei eine Koordination mit der EU sinnvoll. Da ca. 30 % der Schweizer Gasnachfrage durch Zweistoffkunden (z. B. Erdgas- oder Ölbefeuerng möglich) erfolgt, verfügt die Schweiz über ein gewisses eigenständiges Flexibilitätspotenzial.

Markierung der Erdgasleitung bei Seeberg, Kanton Bern
(Bildquelle: Christoph Hurni).

Bei der Analyse der Versorgungssicherheit zeigte sich zudem, dass einfache statische oder auf rein technischen Parametern und Strukturen beruhende Analysen der Versorgungssituation unzureichend sind, um die Dynamik während Krisenzeiten ausreichend abzuschätzen. Es empfiehlt sich daher, technische Sicherheitsbewertungen mit einer globalen Marktbewertung zu kombinieren, um die Verknüpfung von

angebots- und nachfrageseitigen Dynamiken zu erfassen.

Für die Analyse der Ausgestaltungen einer Schweizer Marktöffnung wurde ein vereinfachtes Schweizer «Entry-Exit»-Marktmodell entwickelt und verschiedenen Tarifoptionen analysiert. Die Ergebnisse zeigen dabei jedoch relativ wenig Unterschiede auf. Für die zukünftige Entwicklung des Schweizer Gasmarktes sind die

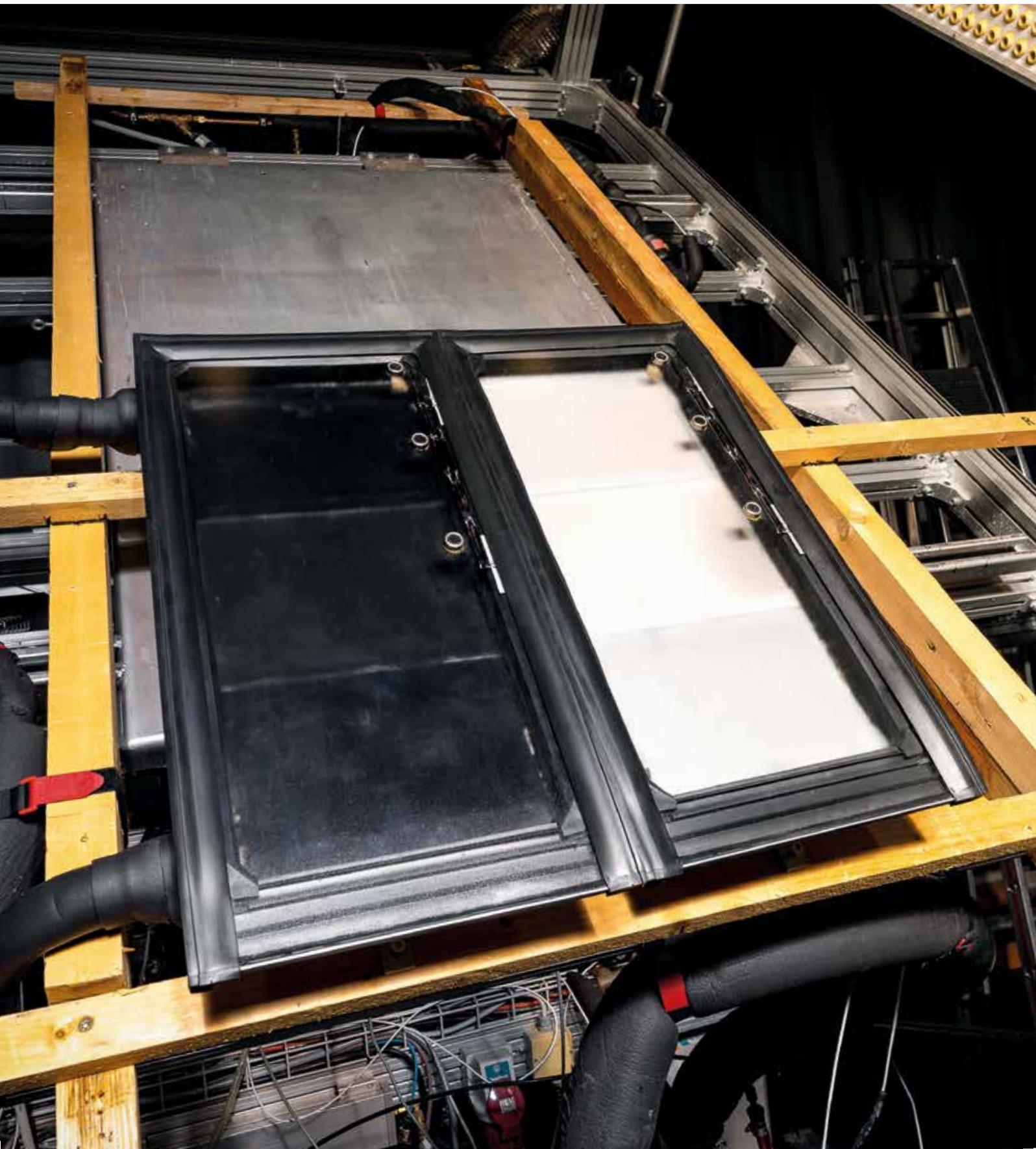
europäischen Marktpreise weiterhin der Haupttreiber. Allerdings ist aufgrund der sehr aggregierten Modellstruktur und der Nichtverfügbarkeit detaillierter Netzdaten die Aussagekraft des Modells limitiert.

Léo Chavaz and Hannes Weigt (University of Basel, Sustainable Energy and Water Supply Research Centre) and Jan Abrell (Centre for Energy Policy and Economics, Federal Institute of Technology, Zurich)



Solarer Konzentrator des Laboratory of Renewable Energy Science and Engineering an der EPFL zur Produktion von erneuerbarem Gas (Wasserstoff). Die Kombination eines photo-electrochemischen System mit konzentrierter Solarenergie zusammen mit einem intelligenten Wärmemanagement erlaubt die Umwandlung von Solarenergie zu Wasserstoff mit Effizienzen bis zu 17 % (siehe S. Tembhurne, F. Nandjou & S. Haussener, Nature Energy 4, 399-407, 2019).

(Rechts) Verglaste Solarwärmekollektoren erreichen Temperaturen $>180\text{ }^{\circ}\text{C}$, was hohe Ansprüche an die Materialien und Bauteile im Kollektor und Kollektorkreis stellt und sich in den Systemkosten niederschlägt. Im Projekt «ReSo-Tech» entwickeln Forscher vom SPF Rapperswil kosteneffiziente Lösungen für die Begrenzung der Maximaltemperatur auf $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. In einem Teilprojekt wird die Absorberoberfläche des Kollektors so beschichtet, dass sie temperaturabhängig von Schwarz auf Weiss «schaltet» und damit kaum noch Solarstrahlung absorbiert. Die Abbildung zeigt einen Versuchskollektor im Betriebszustand $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (schwarz, links) und im «ausgeschalteten» Zustand $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (weiss, rechts). (Text: Elimar Frank, Bildquelle: SPF Rapperswil).



Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit in der Energieforschung hat in der Schweiz einen hohen Stellenwert. Das Bundesamt für Energie stimmt auf institutioneller Ebene seine Forschungsprogramme mit internationalen Aktivitäten ab, um Synergien zu nutzen und Doppelspurigkeiten zu vermeiden. Der Zusammenarbeit und dem Erfahrungsaustausch im Rahmen der internationalen Energieagentur (IEA) kommt eine besondere

Bedeutung zu. So beteiligt sich die Schweiz über das Bundesamt für Energie an verschiedenen «Technology Collaboration Programmes» der IEA, vormals «Implementing Agreements» (www.iea.org/tcp).

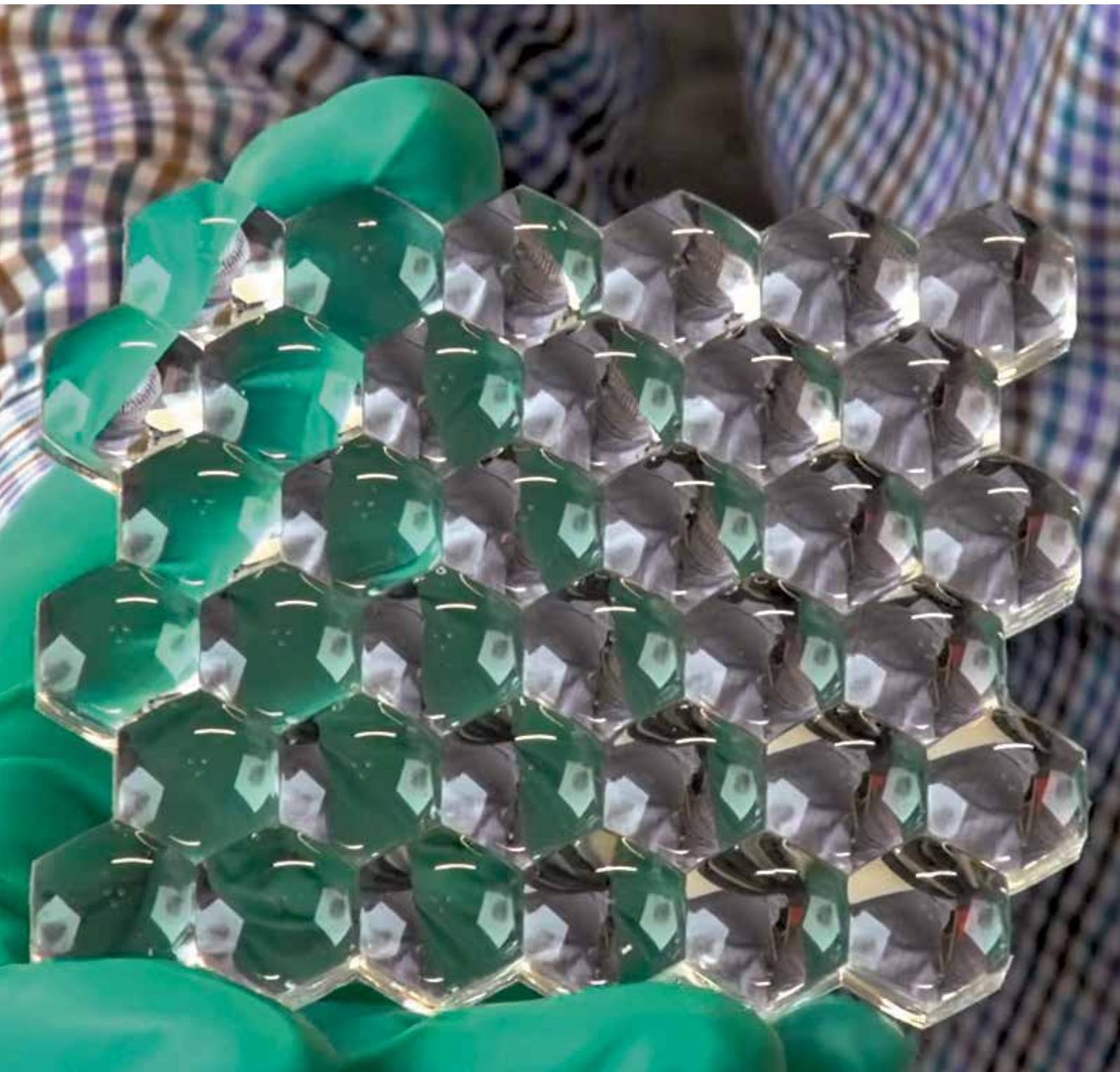
Auf europäischer Ebene wirkt die Schweiz – wo immer möglich – aktiv in den Forschungsprogrammen der Europäischen Union mit. Das BFE koordiniert hier auf instituti-

oneller Ebene die Energieforschung mit dem Europäischen Strategieplan für Energietechnologie (SET-Plan), den European Research Area Networks (ERA-NET), den europäischen Technologieplattformen, den gemeinsamen Technologieinitiativen (JTI) u. a. In gewissen Themenbereichen («Smart Grids», Geothermie) existiert eine intensive multilaterale Zusammenarbeit mit ausgewählten Ländern.

Teilnahme der Schweiz an «Technology Collaboration Programmes» der IEA

- Energy Conservation through Energy Storage (ECES)
- Energy Efficient End-Use Equipment (4E)
- Energy in Buildings and Communities (EBC)
- Demand Side Management (DSM)
- High-Temperature Super Conductivity (HTSC)
- International Smart Grid Action Network (ISGAN)
- Advanced Fuel Cells (AFC)
- Emission Reduction in Combustion (Combustion)
- Advanced Motor Fuels (AMF)
- Hybrid and Electric Vehicles Technologies (HEV)
- Bioenergy
- Geothermal
- Hydrogen
- Photovoltaic Power Systems (PVPS)
- Solar Heating and Cooling (SHC)
- Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES)
- Wind
- Greenhouse Gas (GHG)
- Gas and Oil Technologies (GOT)
- Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP)
- Environmental, Safety & Economy (ESEFP)*
- Fusion Materials (FM)*
- Nuclear Technology of Fusion Reactors (NTFR)*
- Plasma Wall Interaction (PWI)*
- Reversed Field Pinches (RFP)*
- Spherical Tori (ST)*
- Stellarator-Heliotron Concept (SH)*
- Tokamak Programmes (CTP)*

* via Euratom (<https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/euratom>)



Das Start-up-Unternehmen Insolight hat eine Photovoltaiktechnologie entwickelt, wo ein Array aus kleinen Linsen die einfallende Strahlung bündelt und auf hoch effiziente Solarzellen konzentriert. Im Gegensatz zu standard konzentrierenden Photovoltaikanlagen, wo die Module dem Sonnenstand nachgeführt werden müssen, ist hier das Nachführungskonzept im Modul integriert und ermöglicht konzentrierende Anwendungen auch auf Gebäuden (Quelle: Insolight).

Impressum:
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

www.energieforschung.ch