



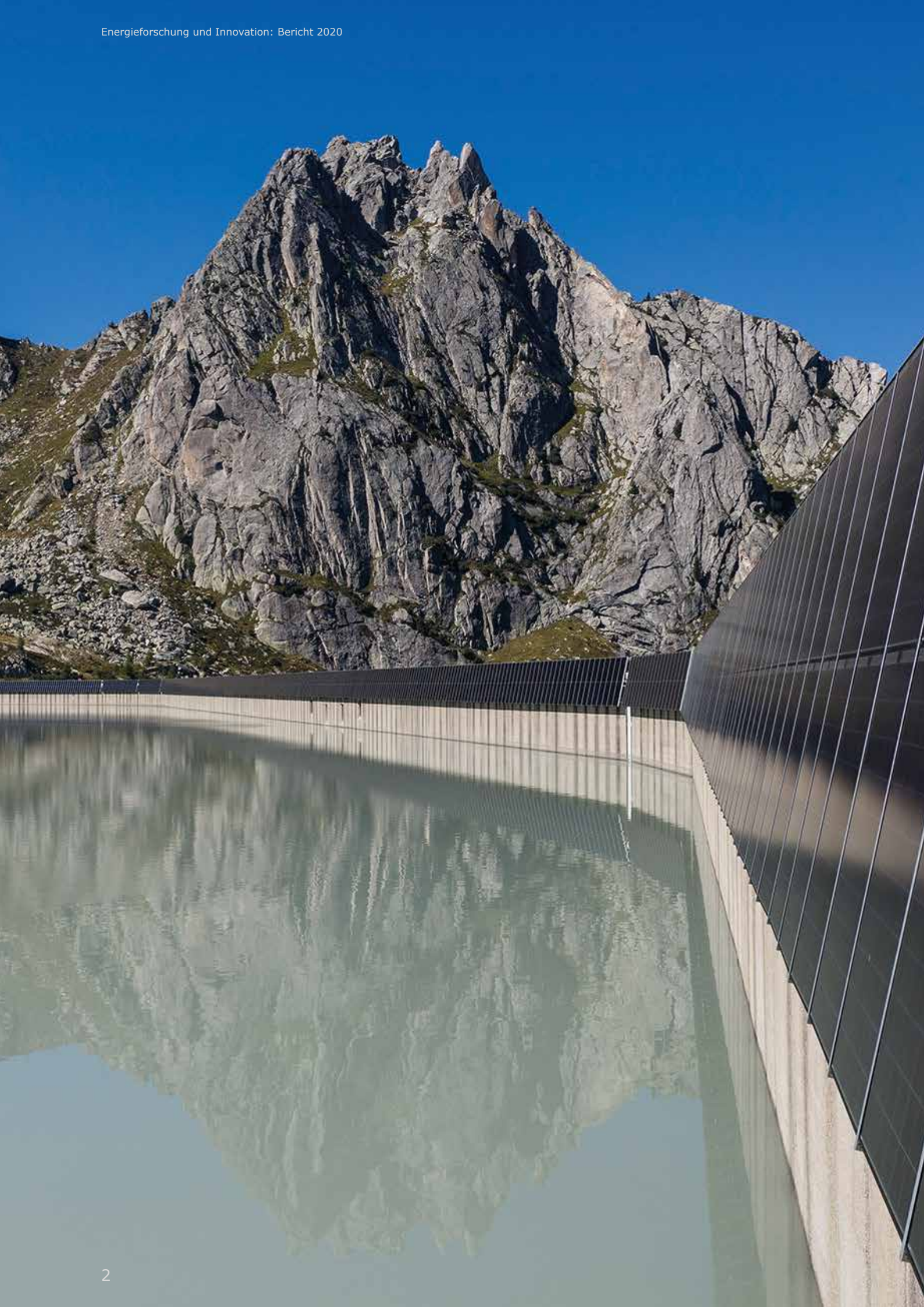
Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Energie BFE**

# **Energieforschung und Innovation**

## **Bericht 2020**





# Editorial

In der Schweiz gehören die Herausforderungen des Klimawandels und die künftige Energieversorgung nach wie vor zu den wichtigsten Themen der Tagespolitik. Die Energieforschung spielt hier eine wichtige Rolle, um das zunehmend komplexere Energiesystems mit verschiedenen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichsten Akteuren und verschiedenen Energiesektoren (Stichwort «Sektorkopplung») zu analysieren und technische und zugleich umsetzbare Lösungen zu entwickeln.

In den letzten Jahren wurde zur Stärkung der Schweizer Energieforschung starke Aufbauarbeit geleistet, insbesondere mit den verschiedenen Schweizer Kompetenzzentren für Energieforschung (SCCERs), welche 2020 nach acht Jahren abgeschlossen wurden. Das am Bundesamt für Energie BFE angesiedelte Förderprogramm «SWEET» knüpft hier an und soll dazu beitragen, dass die aufgebauten Forschungskapazitäten gezielt auf die Energiestrategie ausgerichtet werden. Eine erste Ausschreibung erfolgte im vergangenen Jahr. Überhaupt spielt das BFE mit einer programmatisch ausgerichteten Forschungs- und Technologieförderung schweizweit eine zentrale Rolle, dies seit mehreren Jahrzehnten.

In dieser Broschüre wird exemplarisch eine Auswahl von Projekten vorgestellt, welche das BFE mitträgt und eng begleitet, dies stellvertretend für eine Vielzahl von Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekten. Die angegebenen QR-Codes leiten zu detaillierten Informationen (z. B. Schlussberichte) weiter.

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech

(Titelbild) Impeller eines Turboverdichters der Schweizer Firma Celeroton AG. In Brennstoffzellensystemen für mobile Anwendungen spielen kompakte und effiziente Turboverdichter mit dazugehöriger Elektronik eine wichtige Rolle (Bildquelle: Celeroton AG).



(Links) Das Zürcher Energieversorgungsunternehmen ewz hat 2020 eine hochalpine 410 kW-PV-Anlage am Albigna-Stausee auf 2165 m in Betrieb genommen. Aufgrund ihrer Lage ist die Anlage extremen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt. Analyse der Ertragsdaten, periodische Messung der Modulleistung, Wärmebildaufnahmen und Untersuchung des Gesamtzustandes der Anlage sollen Erkenntnisse über die langfristige Zuverlässigkeit von Anlagen an vergleichbaren Standorten liefern (Bildquelle: ewz).



(Folgesseite) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer porösen Titanschicht für Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Elektrolyse (Bildquelle: Paul Scherrer Institut PSI, CH-5232 Villigen).



# Inhalt

Editorial	3
-----------	---

Inhalt	4
--------	---

Technologie- und Innovationsförderung des Bundesamt für Energie	5
Thematische Forschungsprogramme	6
Von den SCCERs zu SWEET	6
Statistik der Schweizer Energieforschung	8

## Energieeffizienz

Batterien – ein Schlüssel zur Energiewende	13
Sparsam fahren dank sparsamer Halbleiter	15
Geflügelbetriebe der Zukunft: energieneutral, emissionsarm, tierfreundlich	17
Elektrische Netze für die Zukunft rüsten	19
Neue Diagnostik für Brennstoffzellen	19
Dynamische Gebäudeökobilanzen	19

## Erneuerbare Energie

Windenergie einmal anders	21
Flexible Laufwasserkraftwerke	23
Solarstatistik aus der Luft	25
«Big Data» für Solarprognosen	27
Klimawirkung von Düngern aus Biogasanlagen	27
Neue Felder für die Solarthermie	27

## Sozioökonomie

Die Verkehrswende im Kopf	29
---------------------------	----

## Internationales

Internationale Zusammenarbeit	31
Weniger Silber – günstigere Photovoltaik	32
Wasserstoff mit negativen CO <sub>2</sub> -Emissionen	33
Beteiligung in Technologie-Kooperationsprogrammen der IEA	34
Teilnahme an ERA-NETs – European Research Area Networks	34
Weitere internationale Zusammenarbeit	34

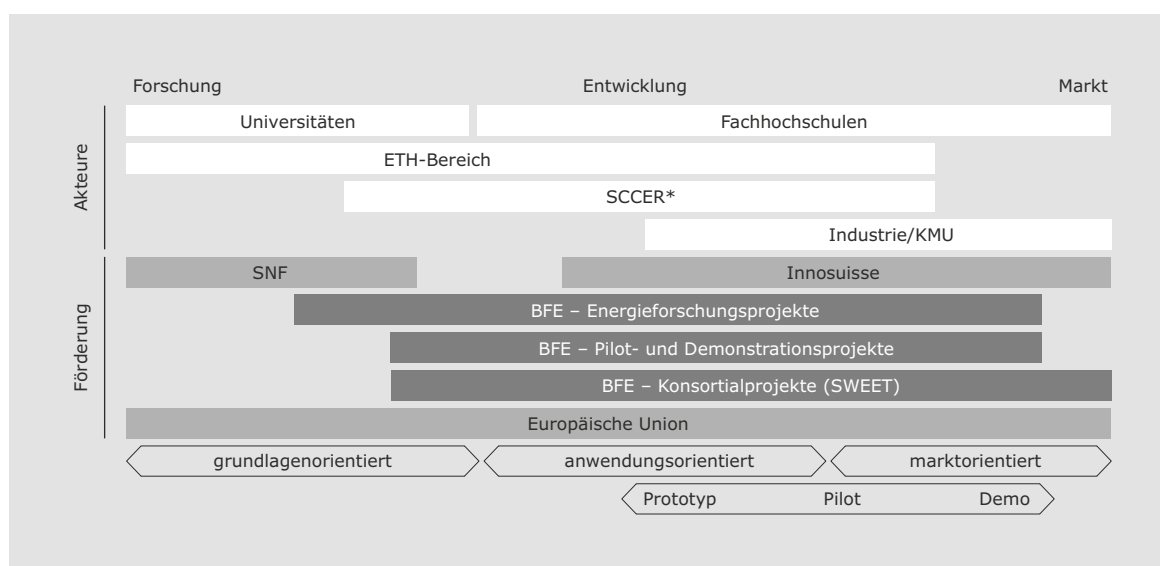
# Technologie- und Innovationsförderung des Bundesamt für Energie

Das Schweizer Stimmvolk hat im Jahr 2011 entschieden, das Energiesystem bis ins Jahr 2050 sukzessive umzubauen. Der Bundesrat hat zudem 2019 beschlossen, die Treibhausgasemissionen der Schweiz bis 2050 auf netto Null zu reduzieren. Hierzu werden auch Technologien nötig sein, welche unvermeidbare Emissionen – etwa aus der Agrarwirtschaft, der industriellen Produktion oder aus dem Flugverkehr – kompensieren können. Solche sogenannten «negativen Emissionstechnologien (NET)» sind eine zentrale Voraussetzung für die Zielerreichung. Gleichzeitig muss aber auch die Energieeffizienz beim Gebäudepark, bei der Mobilität und in der Industrie erhöht und der Zubau erneuerbarer Energie massig beschleunigt werden, dies unter Beibehaltung der Netzstabilität.

Bei all diesen Aufgaben kommt der Energieforschung eine besondere Bedeutung zu. Der Forschungsgemeinschaft müssen hier auch entsprechende Anreize geboten werden, für die Energiestrategie 2050 wichtige Fragestellungen aufzugreifen. Dies geschieht am effizientesten über geeignete Förderinstrumente. Hierbei spielt das Bundesamt für Energie BFE eine zentrale Rolle. Nach dem Abschluss der Nationalen Forschungsprogramme (NFP) 70 und 71 zur Energiewende Anfang 2020 und dem Auslaufen der «Swiss Competence Centers in Energy Research» (SCCER) Ende 2020 ist das BFE die wichtigste Schweizer Förderinstanz im Energiebereich.

Mit seinen Forschungs- und Förderprogrammen deckt das BFE praktisch das gesamte Technologiespektrum ab (Seite 6). Es richtet sich dabei nach dem Energieforschungskonzept des Bundes. Das aktuelle Konzept für die Periode 2021–2024 setzt neu einen noch stärkeren Fokus auf die nicht-technische Forschung (engl. SSH: social sciences and humanities). Technische Wissenschaften und SSH sollen demnach schon bei der Konzipierung von Forschungsvorhaben eng zusammenarbeiten. Nur so können die gewonnenen Erkenntnisse frühzeitig auf die späteren Anwender und Nutzer ausgerichtet und die entwickelten Methoden und Verfahren so gestaltet werden, dass diese breite Akzeptanz und schnellen Eingang in den Markt finden. Diesen Ansatz verfolgt das BFE schon seit längerem: Traditionell führt es neben den verschiedenen technischen Forschungsprogrammen auch ein Forschungsprogramm zu sozioökonomischen Themen, welches eng mit den übrigen Forschungsprogrammen koordiniert ist.

Mit seinem neuen Forschungsförderinstrument SWEET («Swiss energy research for the energy transition») verstärkt das BFE die Kooperationen der verschiedenen Disziplinen weiter (Seite 6). Inter- und transdisziplinäre Konsortien können sich für langfristig angelegte Konsortialprojekte zu ausgewählten Themen bewerben. Ein erster Call wurde 2020 lanciert und die ersten Konsortialprojekte starten 2021.



Das Bundesamt für Energie (BFE) koordiniert Forschung und Innovation im Energiebereich über einen grossen Teil der Wertschöpfungskette (Innosuisse = Schweizerische Agentur für Innovationsförderung; SNF = Schweizerischer Nationalfonds). \*Die acht «Swiss Competence Centers in Energy Research» (SCCER) wurden von 2013 bis Ende 2020 vom Bund unterstützt.

# Thematische Forschungsprogramme

Das BFE deckt mit seinen thematisch orientierten Forschungsprogrammen das gesamte Spektrum der Energieforschung in den Bereichen «Energieeffizienz» und «Erneuerbare Energie» ab, welche eng mit den anderen Förderinstrumenten des BFE (Programm für Pilot- und Demonstrationsprojekte und das Programm SWEET)

verknüpft sind. Die einzelnen Programme orientieren sich entlang der Achsen «Energieeffizienz», «Erneuerbare Energie», «Geistes- und sozialwissenschaftliche Themen», «Speicherung und Netze». Zentrale Themen wie «Digitalisierung», «Sektorkopplung» und «Energiespeicherung» werden programmübergreifend behandelt.



Forschungsprogramme im Bereich Energieeffizienz:					
	Gebäude und Städte (3–8)		Mobilität (4–8)		Industrielle Prozesse (3–8)
	Netze (3–8)		Elektrizitätstechnologien (3–8)		Verbrennungsbasierte Energiesysteme (3–8)
	Brennstoffzellen (2–8)		Batterien (2–8)		Wärmepumpen und Kältetechnik (4–8)
Forschungsprogramme im Bereich erneuerbare Energie:					
	Solarthermie und Wärmespeicherung (4–8)		Photovoltaik (3–8)		Solare Hochtemperaturenergie (CSP) (3–8)
	Wasserstoff (2–8)		Bioenergie (3–8)		Wasserkraft (4–8)
	Geoenergie (3–8)		Windenergie (4–8)		Stauanlagensicherheit (3–8)
Forschungsprogramme im Bereich der Geistes- und Sozialwissenschaften / Querschnittsthemen:					
	Energie-Wirtschaft-Gesellschaft		Radioaktive Abfälle		

Übersicht zu den thematischen Forschungsprogrammen des BFE. In Klammern ist der Bereich des Technologiereifegrades angegeben, der durch das Programm abgedeckt wird. Weiterführende Informationen: «Konzept der Energieforschung des Bundes 2021–2024», CORE (2020) und «Energieforschungskonzept des Bundesamt für Energie 2021–2024», BFE (2020).

## Von den SCCERs zu SWEET

Die Stärkung der Energieforschung in der Schweiz bildet eine zentrale Stossrichtung in der Energiestrategie 2050. So hatte das Schweizer Parlament in Folge der Reaktorkatastrophe von Fukushima 2011 unter anderem beschlossen, die Energieforschung in ausgewählten Forschungsgebieten auszubauen. Zu diesem Zweck wurden acht virtuelle Kompetenzzentren, sogenannte «Swiss Competence Centers for Energy Research» (SCCER), in den Forschungsgebieten industrielle Prozesse, Gebäude und Areale, Mobilität, Netze, Speichertechnologien, Biomasse, Energiebereitstellung (Geothermie und Wasserkraft) und Sozioökonomie an Schweizer Hochschulen etabliert, welche vom Bund mit

über 250 Millionen Franken gefördert wurden. Ebenfalls 2013 wurde das Photovoltaikzentrum am Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) etabliert. Zwischen 2013 und 2020 wurden an den SCCERs rund 800 zusätzliche personelle Forschungskapazitäten aufgebaut. Dieser Kapazitätsaufbau wurde Ende 2020 abgeschlossen.

### Neues BFE-Förderinstrument «SWEET»

In Nachfolge der SCCER sollen die Arbeiten von rund 1500 in den SCCER aktiven Forschenden nun auf für die Energiestrategie 2050 wichtige Zielsetzungen ausge-

richtet werden. Zu diesem Zweck hat das Parlament ein neues, beim BFE angesiedeltes Forschungsförderprogramm SWEET bewilligt. SWEET steht dabei für «SWiss Energy research for the Energy Transition» und soll mit regelmässigen Ausschreibungen Konsortien fördern, die über sechs bis zehn Jahren an trans- und interdisziplinären Projekten arbeiten. Die Ausschreibungen können in den Bereichen Energieeffizienz, erneuerbare Energie, Speicherung, Netze oder Sicherheit von kritischen Energieinfrastrukturen erfolgen. Ein starker Fokus wird dabei auf der nicht-technischen Forschung liegen – beispielsweise sozioökonomische oder soziopsychologische Forschung. Für Ausschreibungen in den Jahren 2021 bis 2028 stehen insgesamt 136 Millionen Franken zu Verfügung. Die letzten Forschungsarbeiten werden 2032 abgeschlossen sein.

Geförderte Konsortien sollen sich typischerweise aus öffentlichen Instituten aus dem ETH-Bereich, in Universitäten und Fachhochschulen, aber auch aus privaten Forschungseinrichtungen, Unternehmen, Organisationen und aus der öffentlicher Hand zusammensetzen. In SWEET werden keine Einzelprojekte, sondern ausschliesslich Portfolios von miteinander verbundenen Forschungsprojekten gefördert.

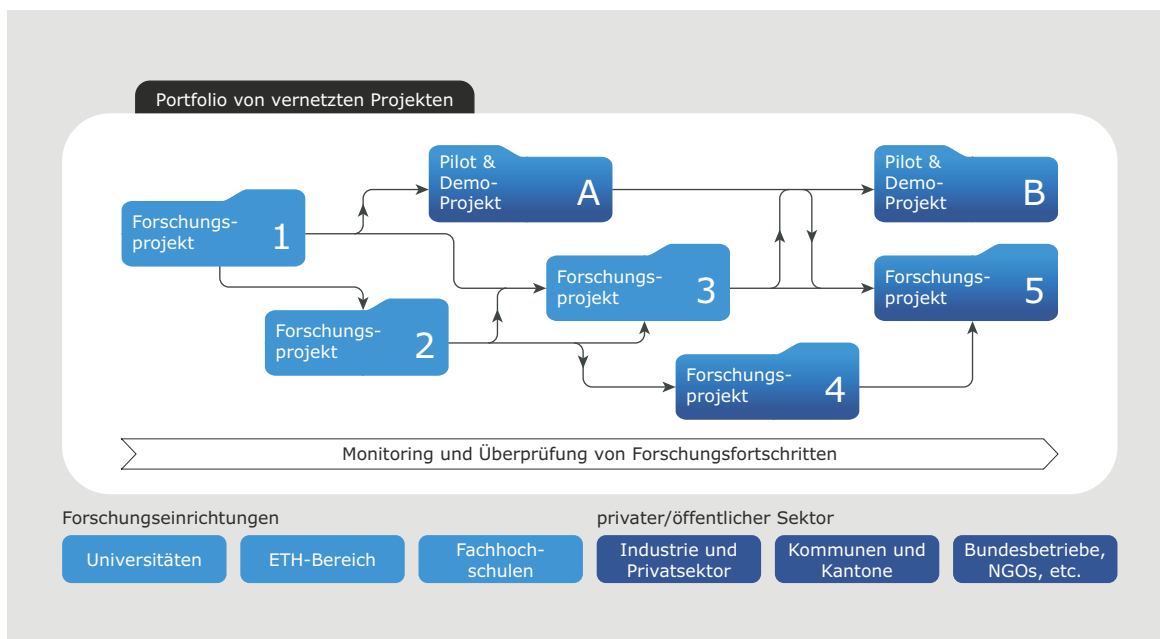
**Rollende SWEET-Ausschreibungen**

Eine erste Ausschreibung von SWEET wurde bereits 2020 zum Thema «Integration erneuerbarer Energien in ein nachhaltiges und resilientes Schweizer Energiesys-

tem» durchgeführt. Dies ermöglicht es den Forschenden, bereits 2021 mit Forschungsarbeiten zu beginnen. Eine zweite SWEET-Ausschreibung mit dem Titel «Living and Working» wurde im Frühjahr 2021 publiziert. Mit ihr soll in geografisch klar umrissenen (sub)urbanen Gebieten untersucht werden, wie Energiebereitstellung und -verteilung effizient und kostengünstig sichergestellt und der Energieverbrauch minimiert werden kann. Durch Kopplung der Sektoren Gebäude und Mobilität und durch Technologieadaption und Verhaltensanpassungen der Konsumenten sollen neue Energiesparpotenziale aufgezeigt und quantifiziert werden. Für den Herbst 2021 ist bereits die dritte Ausschreibung von SWEET geplant.

**«Game changer» gesucht**

Um gänzlich neue Forschungsansätze auszuprobieren, sind im Rahmen von SWEET sogenannte SOUR-Ausschreibungen vorgesehen. SOUR steht für «SWEET Outside-the-box Rethinking» und fördert kurze, sechs bis maximal 18 Monate dauernde Projekte, die radikal neuen und originellen Ideen nachgehen. Mit SOUR sollen vielversprechende und unkonventionelle wissenschaftliche Ansätze, Konzepte, Theorien und Ideen entwickelt und so die Forschungsgemeinschaft stimuliert werden. Die kleinen und agilen SOUR-Projekte werden von einem einzelnen Forschenden oder einem kleinen Team durchgeführt. Eine erste Ausschreibung zu SOUR wurde Ende Januar 2021 publiziert.



Geförderte SWEET-Konsortien bearbeiten ein Portfolio von untereinander vernetzten Projekten über mehrere Jahre. Dieses umfasst sowohl über SWEET finanzierte Forschungsprojekte, als auch BFE Pilot- und Demonstrationsprojekte oder Projekte von Dritten.

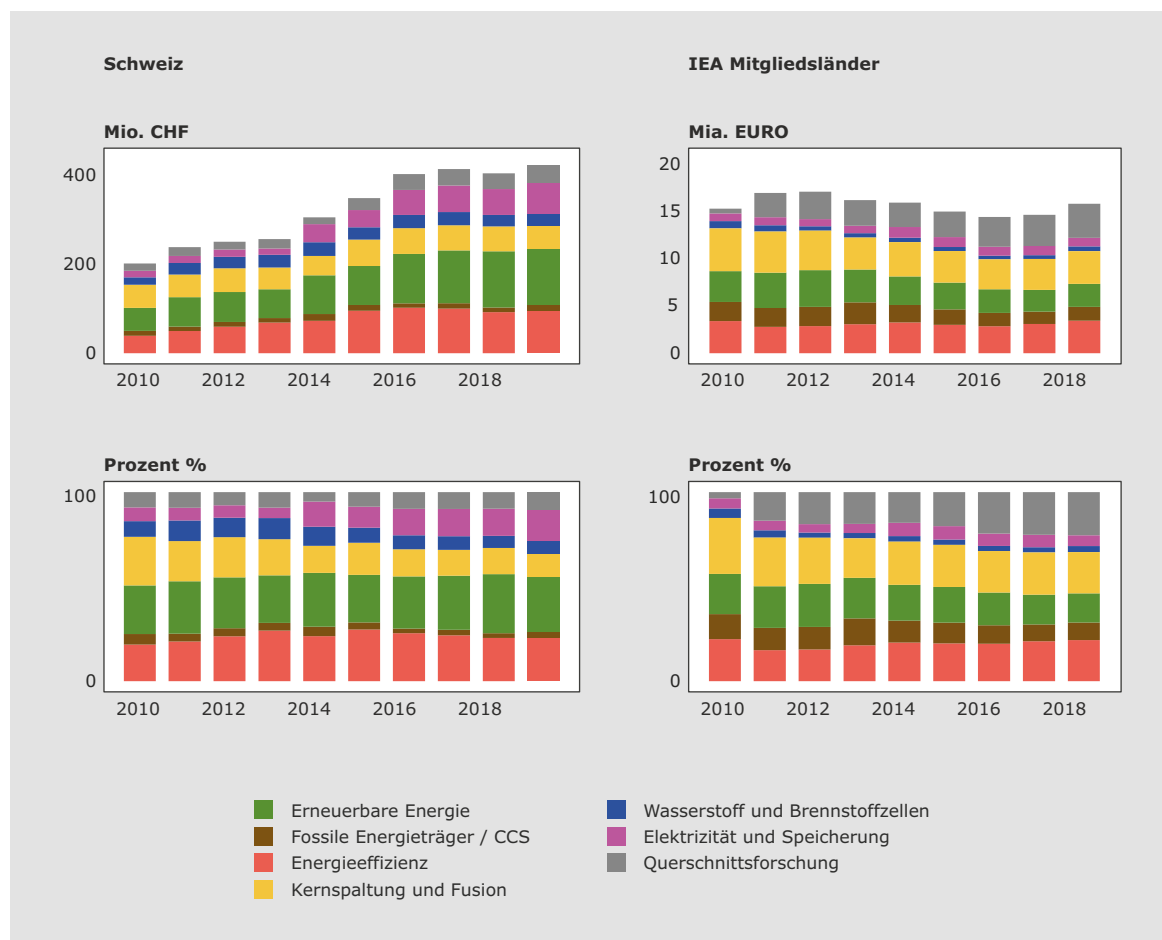
# Statistik der Schweizer Energieforschung

Das BFE erfasst seit 1977 Daten zu Projekten, 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 öffentlich zugänglichen Informationssystem des Bundes ([www.aramis.admin.ch](http://www.aramis.admin.ch)), des SNF ([p3.snf.ch](http://p3.snf.ch)), der EU ([cordis.europa.eu](http://cordis.europa.eu)) und den jeweiligen Webseiten der Institute eingesehen werden.

Die Grafik unten zeigt die Aufwendungen der öffentlichen Hand für die Energieforschung in der Schweiz und

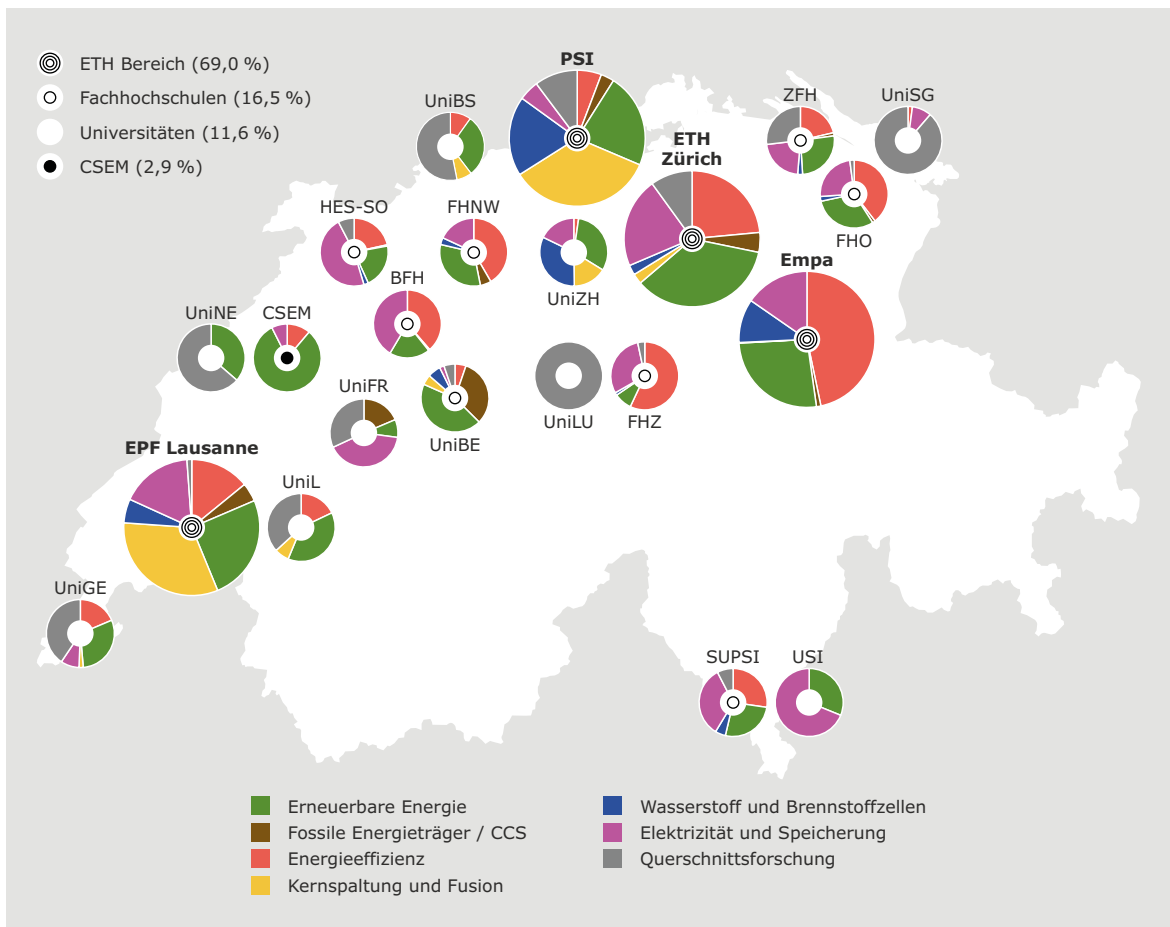
in den Mitgliedsländern der Internationalen Energieagentur IEA in den letzten zehn Jahren (in Mio. Schweizerfranken, teuerungskorrigiert bzw. in Mia. Euro) gegliedert nach der Klassifikation der Internationalen Energieagentur IEA.

2019 hat die öffentliche Hand in der Schweiz 427 Mio. Franken für die Energieforschung aufgewendet. Davon steuerte mit rund 40 % der ETH-Bereich den grössten Anteil bei. Das BFE war zusammen mit dem Schweizerischen Nationalfonds mit je einem Anteil von 9 bzw. 8 % nach Innosuisse (13 %) drittgrösster Forschungsförderer. Von den 2019 durch das BFE aufgewendeten 37 Millionen Franken flossen rund 17 Millionen Franken in Projekte aus dem Bereich «Energieeffizienz», rund 17.5 Millionen Franken in Projekte im Zusammenhang mit «Erneuerbarer Energie» und 2.3 Millionen Franken für Projekte im Bereich der «Geistes- und Sozialwissenschaften».

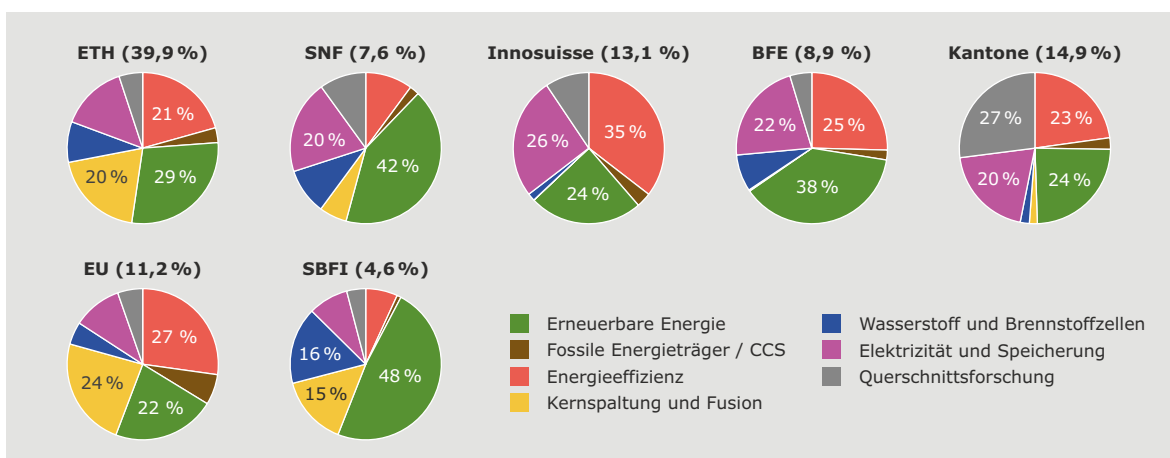


Überblick zu den für die Energieforschung aufgewendeten öffentlichen Mittel in der Schweiz und in den Mitgliedsländern der Internationalen Energieagentur IEA. Es sind Realwerte (teuerungskorrigiert) dargestellt, die sich für die Schweiz zwischen 0,3 und 0,65 Promille des Bruttoinlandsprodukts bewegen. Die eingesetzten Mittel sind nach der Klassifikation der Internationalen Energieagentur (IEA) aufgliedert (Quelle: Energieforschungsstatistik BFE).

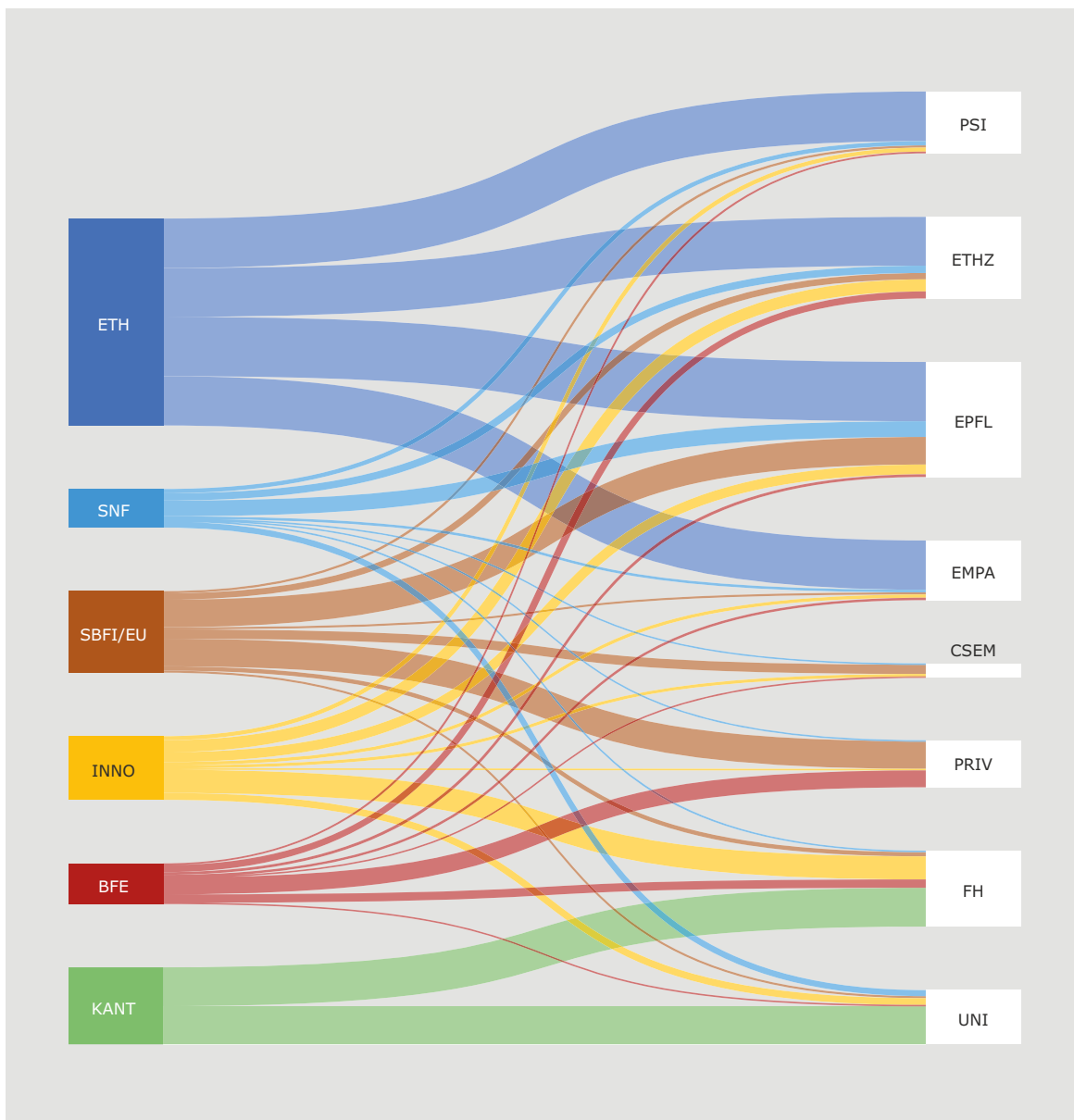




Verschiedene Energieforschungsthemen an Schweizer Hochschulen (2019). Die Themen sind nach der Klassifikation der Internationalen Energieagentur (IEA) aufgliedert. Der grösste Teil der öffentlichen Energieforschung (69 % der eingesetzten öffentlichen Mittel) findet im ETH-Bereich statt. BFH: Berner Fachhochschule, CSEM: Centre suisse d'électronique et de microtechnique, EMPA: Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, EPFL: Eidgenössische technische Hochschule Lausanne, ETHZ: Eidgenössische technische Hochschule Zürich, FHNW: Fachhochschule Nordwestschweiz, FHO: Fachhochschule Ostschweiz, FHZ: Fachhochschule Zentralschweiz, HES-SO: Fachhochschule Westschweiz, PSI: Paul Scherrer Institut, SUPSI: Fachhochschule der italienischen Schweiz, UniGE: Universität Genf, UniLS: Universität Lausanne, UniLU: Universität Luzern, UniNE: Universität Neuenburg, UniSG: Universität St. Gallen, UniZH: Universität Zürich, USI: Universität der italienischen Schweiz, ZFH: Zürcher Fachhochschule (Quelle: Energieforschungsstatistik BFE).



Öffentliche Mittel für die Energieforschung (2019) nach Förderstelle und Themenfeld: Rund 40 % der Mittel für die Energieforschung in der Schweiz stammen direkt aus dem ETH-Bereich, etwa 15 % aus kantonalen Mittel für Fachhochschulen und Universitäten. Der Rest sind kompetitive Fördermittel. ETH: Rat der Eidgenössischen Technischen Hochschulen, SNF: Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Innosuisse: Schweizerische Agentur für Innovationsförderung, BFE: Bundesamt für Energie, EU: Europäische Union, SBFI: Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation (Quelle: Energieforschungsstatistik BFE).



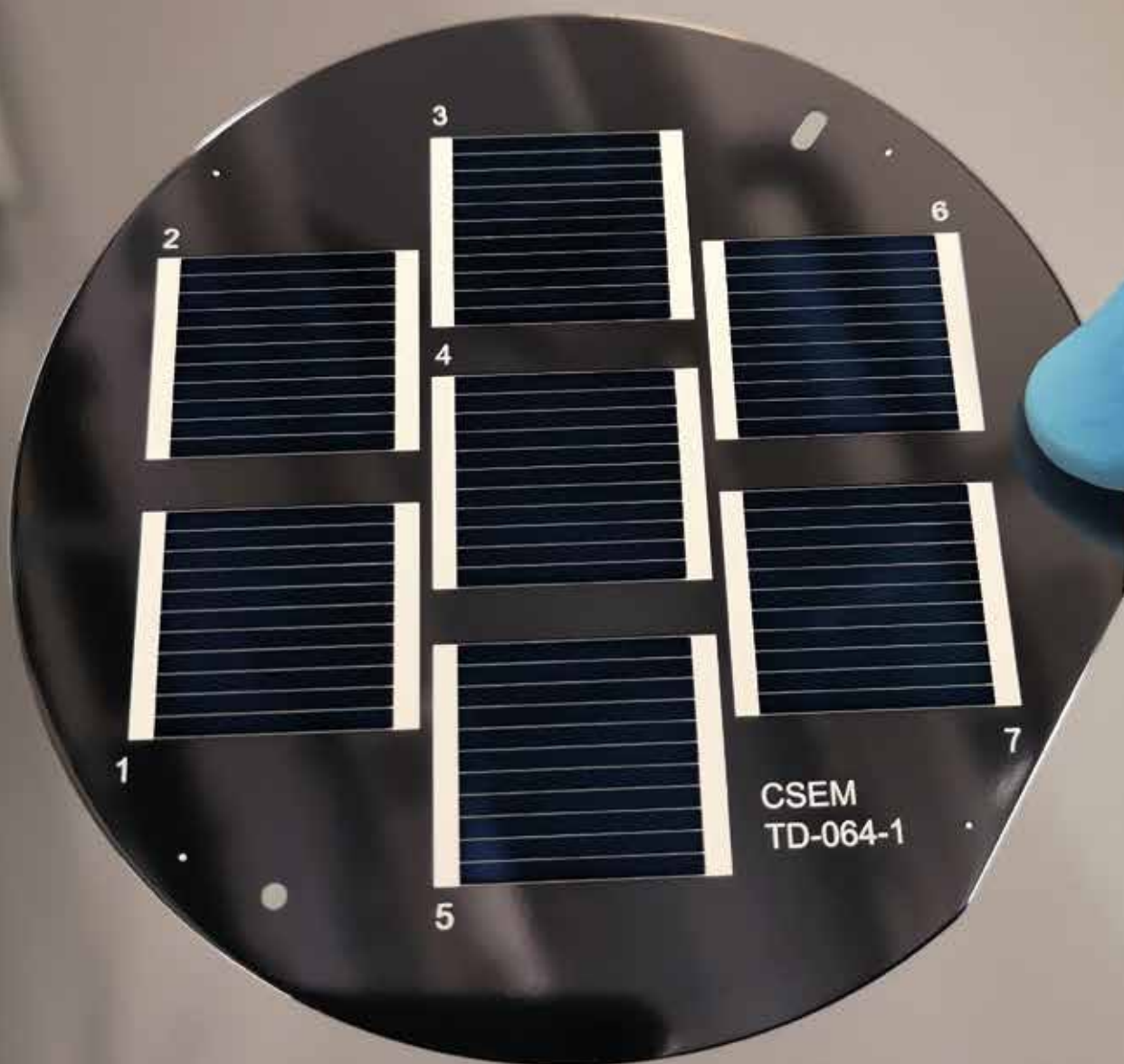
Woher stammen die öffentlichen Mittel für die Energieforschung in der Schweiz und wohin fließen diese? Ein grosser Teil kommt direkt aus dem ETH-Bereich. Nicht brücksichtigt sind Mittel von privater Seite, etwa Eigenleistungen in Innosuisse-Projekten oder in Pilot- und Demonstrationsprojekten des BFE. Nicht abgebildet sind Mittelflüsse kleiner als 0.2 Millionen Franken.

Mittelherkunft: ETH: ETH-Rat, SNF: Schweizerischer Nationalfonds, SBFI/EU: Mittel aus europäischen Projekten oder vom SBFI (Staatssekretariat für Bildung, Forschung & Innovation), INNO: Innosuisse, BFE: Bundesamt für Energie, KANT: Kantone.

Mittelverwendung: PSI: Paul Scherrer Institut, ETHZ: ETH Zürich, EPFL: ETH Lausanne, EMPA: Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, UNI: Universitäten, FH: Fachhochschulen, PRIV: Privatwirtschaft, CSEM: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique.

(Links) Tandem-Solarzellen, die Perowskit- und Silizium-Solarzellen kombinieren, bieten einen interessanten Ansatz, um den Wirkungsgrad von Solarzellen weiter zu steigern. Das Photovoltaikzentrum am Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) arbeitet erfolgreich auf diesem Gebiet und entwickelt Methoden, die sich industriell umsetzen lassen (Bildquelle: CSEM, private Kommunikation).





# Energieeffizienz



## Batterien – ein Schlüssel zur Energiewende

Batterien spielen eine zentrale Rolle in der Energie- und Klimapolitik, sowohl zur Dekarbonisierung des motorisierten Verkehrs als auch als kurzfristige Speicher für erneuerbare Energien, um Lastspitzen zu brechen. Wie effizient sind eingesetzte Batteriesysteme? Welchen Beitrag können sie zum Ausgleich der Verteilnetze leisten? Und wie lassen sich Zellen aus Batterien aus Elektroautos wirtschaftlich für «Second-Life»-Speicher einsetzen?

Im vergangenen Jahr waren 8 % aller neu in Verkehr gesetzten Autos in der Schweiz reine batterieelektrische Fahrzeuge, was einer Verdoppelung gegenüber 2019 entspricht. Dazu kommen 6 % Plug-in-Hybride, wovon 4 Mal mehr zugelassen wurden. Die in diesen Fahrzeugen verwendeten Batterien haben gemäss Herstellerangaben eine Lebensdauererwartung von mindestens acht Jahren, was einer Fahrleistung von etwa 160 000 km entspricht. Nach dieser Zeit kann die Kapazität der Batterie unter 80 % der ursprünglichen sinken, so dass sie für den Antrieb eines Fahrzeugs nicht mehr ausreicht. Anderen Anwendungen, zum Beispiel als Heimspeicher für Solaranlagen, genügen diese Kapazitäten jedoch durchaus.

Das Schweizer Unternehmen Libattion hat sich darauf spezialisiert, ausgedienten Akkus ein zweites Leben zu ermöglichen. Technisch funktionieren solche «Second-Life»-Speicher gut. Doch sind diese auch wirtschaftlich? Ein Hindernis für eine Wiederverwertung im gross-

en Stil ist die Prüfung der Zellen. Um den Zustand der Einzelzellen eines Batteriesystems exakt zu eruiieren, braucht es einen vollen Lade- und Entladezyklus, der drei bis fünf Stunden dauert – viel zu aufwändig, um konkurrenzfähige «Second-Life»-Speicher herzustellen. Das Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) hat deshalb zusammen mit Libattion untersucht, mit welchen alternativen Messverfahren sich der Zustand von Batteriezellen innerhalb nützlicher Frist verlässlich abschätzen lässt. Die Untersuchungen zeigen, dass zwischen verschiedenen Messgrössen und dem Alterungszustand (Englisch: state of health, SoH) der Zellen gute Korrelationen bestehen. Damit lassen sich Zellen, die geeignet sind für eine «Second-Life»-Anwendung, sehr viel schneller finden. Je nach Anforderung – Genauigkeit der Messung, Robustheit der Analyse für unterschiedliche Batterietypen, Zeitdauer der Analyse oder Einfachheit der maschinellen Verarbeitung – sind unterschiedliche Messmethoden geeignet.

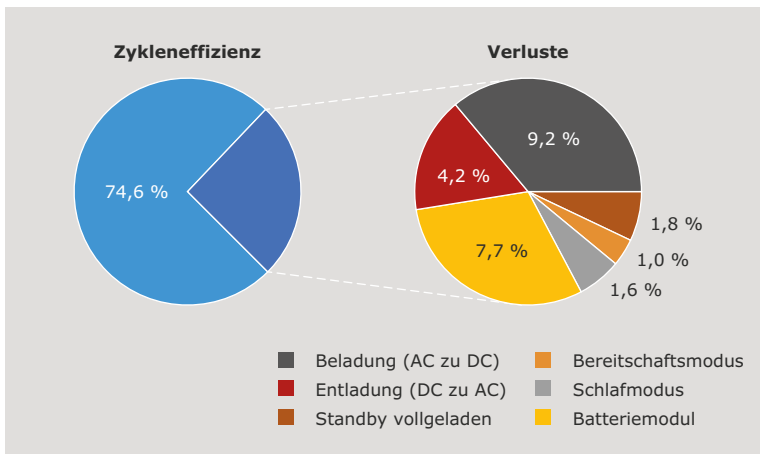
Jedes Jahr werden in der Europäischen Union etwa 543 000 Fahrzeugbatterien für Traktionszwecke (reine Batteriefahrzeuge und Plug-in-Hybride) eingeführt, was bei einem Standardbatteriepaket von 50 kWh einem Speichervolumen von rund 27 GWh entspricht. Es wird prognostiziert, dass im Jahr 2025 etwa 27 % dieser Batterien ein zweites Leben in stationären Anwendungen haben werden, während die restlichen 73 % für das Recycling zur Verfügung stehen. Dank effizienter Testverfahren von gealterten Batteriezellen, wie sie das Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) zusammen mit der Firma Libattion entwickelt, sollen «Second-Life»-Anwendungen wirtschaftlicher werden.



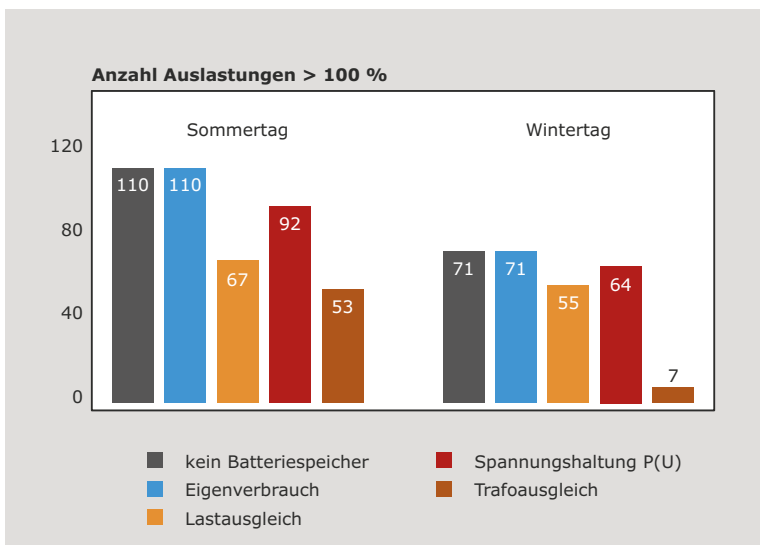
In einem BFE-Forschungsprojekt wurden Testprotokolle entwickelt, die den Alterungszustand von Batteriezellen in wenigen Minuten liefern können, im Vergleich zu drei bis fünf Stunden, wie sie nötig sind für einen vollständiger Entlade-/Ladezyklus (Bildquelle: CSEM).

Nicht nur der Markt für Batterien in der Elektromobilität wächst stark, auch derjenige für Heimspeicher in Kombination mit Photovoltaikanlagen. Von 2018 bis 2019 hat die installierte Speicherkapazität um rund 70 % zugenommen. Doch wie effizient sind auf dem Markt erhältlichen Batteriespeichersysteme in der Realität? Bis anhin existiert kein standardisiertes Testverfahren, das einen realitätsnahen Betrieb abbildet. Die Fachhochschule OST hat ein solches Testverfahren entwickelt, das im dynamischen Betrieb relevante Kennzahlen ermittelt. Geprüft wird dabei das ganze Batteriesystem inklusive Batterie- und Photovoltaik-Wechselrichter. Photovoltaik-Produktion und Strombezug werden emuliert.

Meist werden Heimspeicher heute eingesetzt, um den Eigenverbrauch zu optimieren. Dabei wird das Verteilnetz mitunter stark belastet. Jedoch haben solche dezentralen Speicher auch das Potenzial, das Verteilnetz zu stabilisieren, vorausgesetzt, dass diese «netzdienlich» gesteuert werden: Heimspeicher beziehen zum Beispiel dann Strom, wenn die Spannung im Netz zu hoch wird und geben die Energie wieder ans Netz ab, wenn die Spannung sinkt. Verschiedene Regelstrategien sind dabei möglich. Wie gross der Nutzen einer «netzdienlichen» Steuerung für das Verteilnetz ist und welche Anreizsysteme eine «netzdienliche» Steuerung fördern könnten, wird im Rahmen eines laufenden BFE-Forschungsprojektes mit Beteiligung von Fachhochschulen, Verteilnetzverteilern und Batterieherstellern untersucht. Erste Resultate zeigen, wie sich die Netzauslastung mit verschiedenen Steuerstrategien verändert. In einem nächsten Schritt soll der Nutzen quantifiziert werden.



Ergebnisse eines Tests mit einem Wechselstrom (AC)-gekoppelten Batterieheimspeichersystem: Ein neues Testverfahren der Fachhochschule OST prüft Batterien in einem Drei-Tages-Testprofil, das alle typischen Betriebsbedingungen für die Batterie abdeckt. Es liefert reproduzierbare Kennzahlen zur Effizienz der Systeme bei unterschiedlichen Steuerungsansätzen wie Eigenverbrauch, Strompreis und Netznutzen, und zeigt, wo welche Verluste entstehen (Quelle: OST-SPF).



Die Simulation der Netzauslastung für ein typisches vorstädtisches Verteilnetz im Jahr 2035 zeigt den Nutzen einer «netzdienlichen» Steuerung dezentraler Speicher gegenüber einer Eigenverbrauchs-optimierten Steuerung (blau). Drei «netzdienlichen» Steueralgorithmen wurden unterschieden: Lastausgleich (orange) und Spannungshaltung (rot) bei Haushalten mit Speichern sowie Lastausgleich an der Trafostation (braun). Basis bildet ein Szenario für das Jahr 2035 ohne Netzausbau, das den erwarteten Ausbau von Photovoltaik, Elektromobilität und Batteriespeicher berücksichtigt. Im Sommer führt die Photovoltaikproduktion zu Einspeisespitzen, im Winter sind es hohe Strombezüge, die grosse Lastspitzen erzeugen (Datenquelle: BFH-Zentrum Energiespeicherung).





Lange hat Silizium die Welt der Transistoren dominiert. Heute spielen Verbindungshalbleiter aus verschiedenen Elementen eine zunehmend wichtige Rolle. Auf Galliumverbindungen basierende Leuchtdioden haben andere Leuchtmittel im Alltag verdrängt. Im Bereich der Leistungselektronik ermöglicht die Anwendung von Galliumnitrid- (GaN) und Siliziumkarbid- (SiC) Transistoren eine Steigerung der Energieeffizienz, was für die Elektromobilität und für die Stromerzeugung mit erneuerbaren Energietechnologien entscheidend ist. Abgebildet ist ein Wafer mit SiC-Dioden (Bildquelle: Bosch).

## Sparsam fahren dank sparsamer Halbleiter

Ob Rechenzentrum, Photovoltaik- und Windenergieanlagen oder Elektrofahrzeuge – bei all diesen Anwendungen ist Leistungselektronik im Spiel, die auf Schaltelemente aus Halbleitern setzt. Jeder Schaltvorgang bringt Verluste. Diese lassen sich mit dem Einsatz von Halbleitermaterialien mit breiter Bandlücke, sogenannten «Wide-Bandgap» (WBG)-Halbleitern, massgeblich verringern.

Eine Arbeitsgruppe, die auf Initiative der Schweiz 2019 innerhalb der Internationalen Energieagentur (IEA) etabliert wurde, zeigt auf, wie viel Energie eingespart werden könnte mit «Wide-Bandgap» (WBG)-Halbleiterbauteilen: Eingesetzt in Windkraft- und Photovoltaikanlagen, Rechenzentren, Elektroautos und mobilen Geräten liessen sich jährlich global rund 90 TWh an Strom einsparen, etwa das Anderthalbfache des jährlichen Schweizer Stromverbrauchs.

Die wichtigsten WBG-Halbleiter sind Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Im Vergleich zu auf Silizium basierten Bauteilen schalten WBG-Leistungsschalter (Transistoren) schneller, erlauben eine höhere Packungsdichte und arbeiten bei höheren Umgebungstemperaturen. Ein gewichtiger Vorteil ist der Effizienzgewinn: Die Verluste bei einem Schaltvorgang sind deutlich geringer. Dies kommt bei vielen Anwendungen zum Tragen, zum Beispiel bei Umrichtern in Elektrofahrzeugen. Diese wandeln den Gleichstrom

der Batterie in Wechselstrom und speisen den Antriebsmotor. Um dessen Drehzahl zu regeln, schalten die Halbleiterbauelemente die Spannung in kurzen Abständen ein- und aus – je nach Konzept und Einsatz mehrere tausendmal pro Sekunde. Jeder Schaltvorgang bringt Verluste mit sich. Je geringer diese sind, umso effizienter ist der Umrichter und umso grösser wird die Strecke, die mit einer Batterieladung zurückgelegt werden kann. Auch die höhere Packungsdichte von WBG-Halbleiter ist entscheidend: Umrichter las-



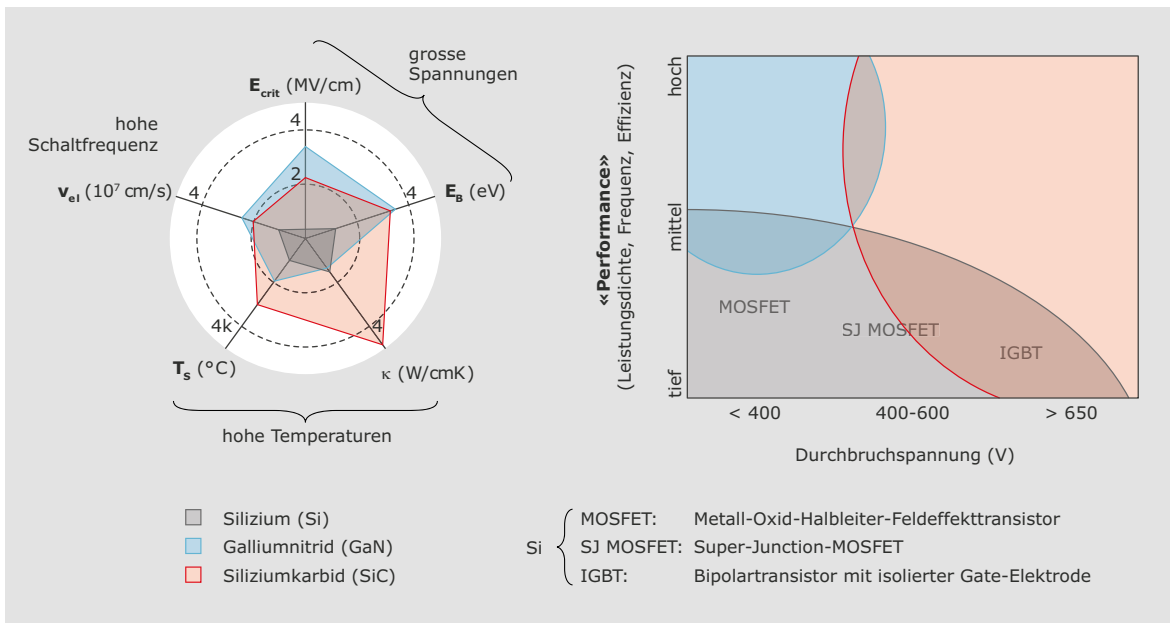
Wichtige Kostenpositionen bei elektrisch angetriebenen Bussen und Nutzfahrzeugen sind der Antriebsstrang und der Energiespeicher. Im Rahmen eines Pilotprojektes soll eine Flotte von batterieelektrischen Bussen mit einem neuen auf Siliziumkarbid (SiC)-Halbleitern basierenden Stromrichter ausgerüstet werden, der direkt in den Motor integriert wird. Die Effizienz des Stromrichters hat unmittelbaren Einfluss auf die benötigte Batteriekapazität und so indirekt wieder auf die Systemkosten (Bildquelle: ABB).

sen sich kleiner und leichter bauen, was die Reichweite weiter erhöht.

Wie gross das Einsparpotenzial der Technologie bei Mobilitätsanwendungen ist, klären der Energietechnikkonzern ABB und der Bushersteller Hess. Sie entwickeln alle Komponenten für den Antriebsstrang

eines Elektrobusses, vom Chip über das Leistungshalbleitermodul bis zum Umrichter und testen die Komponenten in der Praxis. In Baden wird ein Elektrobus mit der neuen Technologie auf einer regulären Linie der Regionalen Verkehrsbetriebe Baden-Wettingen fahren. Damit soll das Energieeinsparpotenzial

der Technologie in der Praxis verifiziert werden. Der Feldtest dient zum Sammeln von Erfahrungen, insbesondere für eine genaue Quantifizierung der möglichen Energieeinsparung. Damit kann eine fundierte Hochrechnung zum Effizienzpotenzial erstellt werden.



(Links) Die Verbindungshalbleiter Galliumnitrid (GaN) und Siliziumkarbid (SiC) haben im Vergleich zu Silizium eine grössere Bandlücke ( $E_b$ ) und ein höheres kritisches Feld ( $E_{crit}$ ), was einen Betrieb bei höheren Spannungen ermöglicht. Dank einer hohen Elektronenmobilität ( $v_e$ ) schalten die Transistoren schneller. Ein hoher Schmelzpunkt ( $T_s$ ) und eine gute Wärmeleitfähigkeit ( $\kappa$ ) erlauben speziell für SiC den Betrieb bei höheren Temperaturen. (Rechts) Halbleiterbauteile auf Basis von SiC und GaN verdrängen Silizium (Si)-Bauteile immer mehr, da diese eine deutlich höhere «Performance» ermöglichen.







Geflügelställe haben einen relativ hohen Energiebedarf, um die gesetzlichen Vorschriften zu erfüllen. Während eines Mastzyklus ist der Temperaturverlauf genau definiert: von anfangs 33 geht es schrittweise hinunter auf 20 Grad Celsius. Die relative Feuchtigkeit sollte dabei nie über 60 % steigen, da sonst Krankheiten zunehmen. Weiter sind Grenzwerte für die CO<sub>2</sub>- und Ammoniak-Konzentrationen in der Luft einzuhalten. Durch diese Anforderungen ist eine hohe Luftwechselrate gefordert. Durch Wärmerückgewinnungstechnik konnte in zwei Pilotbetrieben der Energiebedarf bedeutend gesenkt werden (Bildquelle: hiltifarm.ch).

## Geflügelbetriebe der Zukunft: energie-neutral, emissionsarm, tierfreundlich

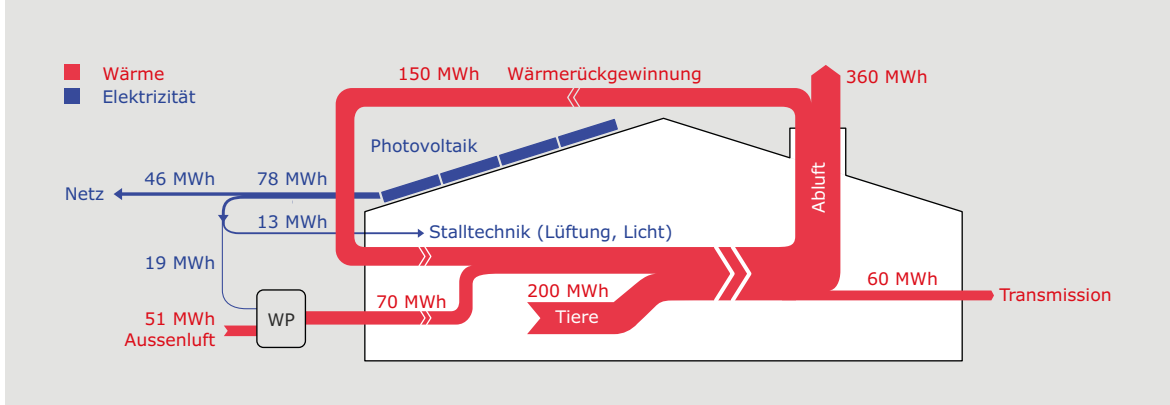
Geflügelmastbetriebe haben einen hohen Energieverbrauch, weil die Ställe geheizt werden müssen und ein stetiger Luftaustausch erforderlich ist. Demonstrationsprojekte haben nun gezeigt, dass durch Wärmerückgewinnung und Dämmung der Gebäudehülle der Energiebedarf um mehr als 50 % gesenkt werden kann.

Rund 160 MWh an elektrischer Energie verbraucht ein Geflügelmastbetrieb mit einer Grösse von 600 m<sup>2</sup> pro Jahr in der Schweiz, was in etwa dem Verbrauch von 40 Vier-Personen-Haushalten entspricht. Dämmung und Massnahmen zur Wärmerückgewinnung, wie sie bei anderen Gebäuden eingesetzt werden, waren in der Landwirtschaft bisher kaum verbreitet. Gross war das Misstrauen, ob technische Anpassungen ihre Investitionskosten wert sind und ob diese angesichts der staubigen Bedingungen in landwirtschaftlichen Betrieben zuverlässig funk-

nieren. Angesichts der rund 30 Mastbetriebe, die jährlich in der Schweiz neu gebaut werden, und steigenden Anforderungen an Energieeffizienz und an das Tierwohl, lohnt es sich jedoch, Energiesparmassnahmen für solche Betriebe genauer zu prüfen.

Im Rahmen von Demonstrationsprojekten wurden in zwei Stallneubauten in Hellsau und in Zimmerwald während eines Jahres alle relevanten Parameter zum Stallklima und Energieverbrauch aufgezeichnet. Die Schweizer Fleischverarbeiterin Bell Food Group AG und das Tier-

und Stalltechnikunternehmen Global AG haben unabhängig voneinander neue Stallkonzepte entwickelt, die künftig von Landwirten übernommen werden sollen. Beide Konzepte setzen auf eigene Solarstromproduktion auf Dächern, auf Dämmung der Gebäudehülle, Wärmerückgewinnung aus der Abluft und Wärmepumpen zur Heizung. Dadurch lässt sich der Energiebedarf im Vergleich zu den Erfahrungswerten von vergleichbaren Betrieben um über 50 % senken. Drei Viertel dieser Einsparungen gehen auf das Konto der Wärmerückgewinnung.

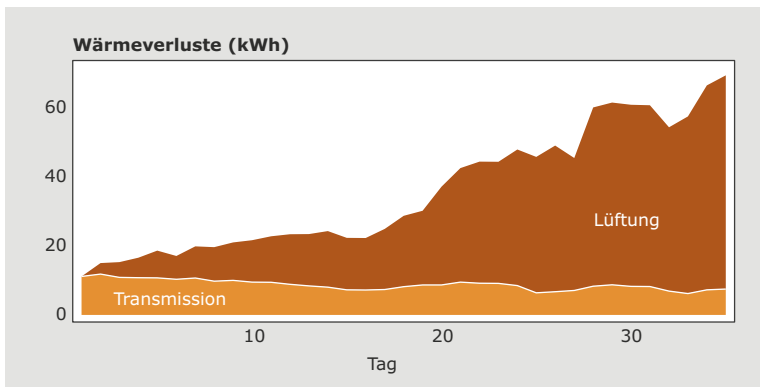


(Ganz oben) Mastgeflügelstall Leuenberger, Hellsau BE, 2019. (Darunter) Energieflussdiagramm für Wärme und Elektrizität in einem Minergie-Geflügelmastbetrieb (Daten Hellsau).

Die Projekte demonstrieren, dass Neubauten für Geflügelmastbetriebe die Anforderungen des Minergie-standards erreichen können, und dass die Betriebssicherheit gewährleistet ist: Die Wärmerückgewinnungssysteme beider Hersteller halten im Dauerbetrieb der staubigen Abluft stand. Die Mehrinvestitionen betragen beim Projekt in Hellsau rund 400 000 Franken. Dem gegen-

über stehen Einsparungen bei den Energiekosten von rund 21 000 Franken pro Jahr. Weitere Optimierungen sind möglich und das Stallkonzept ist vielversprechend für einen langfristig wirtschaftlichen Betrieb. Die Investitions- und Unterhaltskosten für die Wärmetauscher isoliert betrachtet dürften sich innerhalb weniger Jahre amortisieren lassen.

Bei beiden Betrieben ist der Ertrag der Photovoltaikanlagen mehr als doppelt so hoch wie der Eigenbedarf. Der Stall in Hellsau verfügt neben der Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 70 kW über einen Wärmespeicher für die Wärmepumpe (WP) von 20 000 Litern und einen Stromspeicher von 18,8 kWh. Damit deckt der Betrieb über das ganze Jahr 87 % seines Strom- und Wärmebedarfs selbst. Mit grösseren Speichern könnte sich der Betrieb fast vollständig autark versorgen.



Nur etwa 25 % des Wärmeverlusts erfolgt durch Transmission (Wärmeabgabe über die Gebäudehülle), der Rest geht zu Lasten der stetigen Lüftung. Durch Wärmerückgewinnungstechnik kann mehr Energie eingespart werden als durch die Dämmung der Gebäudehülle.

Neben einer verbesserten Energieeffizienz erzielen die Massnahmen auch ein besseres Klima im Stall, das der Gesundheit der Tiere zugute kommt und den Landwirten zu höheren Fleischerträgen und besserer Fleischqualität verhilft. Die Abluftwäscher des Betriebs in Zimmerwald gewinnen ausserdem Nährstoffe aus der Abluft zurück. Diese werden als Dünger wieder auf die Felder ausgetragen und schliessen so den Nährstoffkreislauf.



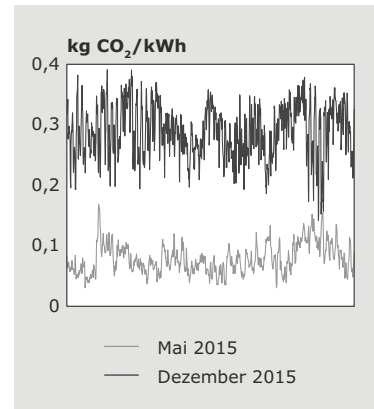
## Elektrische Netze für die Zukunft rüsten

Verteilnetze werden durch die zunehmende dezentrale Einspeisung erneuerbarer Energie, durch Batteriespeicher, Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen immer intensiver genutzt. Zudem beeinflusst moderne Leistungselektronik, die etwa in Wechselrichtern oder Ladegeräten zum Einsatz kommt, die Spannungsqualität. Wie sich diese Faktoren auf die Netzqualität auswirken, untersuchten Forschende mit Messungen in verschiedenen Verteilnetzen und im Labor sowie mit Simulationen. In Langzeitdaten lässt sich keine generelle Verschlechterung der Spannungsqualität feststellen. Messungen zeigen jedoch, dass Geräte mit Leistungselektronik die Netzimpedanz beeinflussen und damit die Kommunikation über das Strom-



Eine Vielzahl verschiedener Einflussgrößen erschwert den netzübergreifenden Vergleich der Spannungsqualität (PQ). Im Rahmen verschiedener Messkampagnen wurde ein PQ-Index entwickelt, der die Bewertung unterschiedlicher PQ-Phänomene anhand einer einzelnen Kennzahl ermöglicht (Bildquelle: Berner Fachhochschule BFH).

netz (Powerline-Kommunikation) beeinträchtigen können, die unter anderem für Rundsteuerungen zur Anwendung kommt.

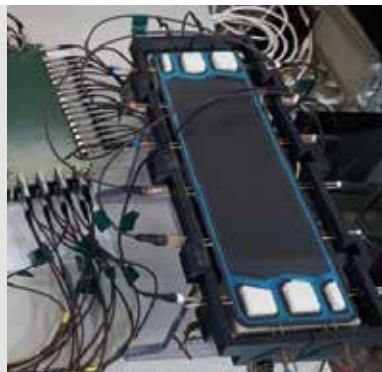
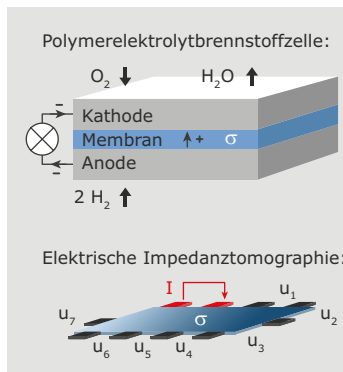


Die CO<sub>2</sub>-Belastung des Schweizer Verbraucherstrommixes ändert sich im Jahres- und Tagesverlauf. Im Sommer ist der Anteil an Strom aus erneuerbaren Quellen wie Wasserkraft und Photovoltaik höher. Im Winter, wenn der Strombedarf von Gebäuden am höchsten ist, machen die Stromimporte, die auch aus nicht-erneuerbaren Quellen stammen, einen grösseren Anteil aus (Datenquelle: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105509>).



## Dynamische Gebäudeökobilanzen

In Ökobilanzierungen für Gebäude wird der Schweizer Strommix eingesetzt, um die mit dem Stromverbrauch verbundene Umweltbelastung zu berechnen – unabhängig davon, ob der Strom im Sommer oder Winter, tagsüber oder nachts verbraucht wurde. Je nach Zeitpunkt des Strombezugs variiert jedoch die Herkunft des Stromes und damit auch dessen Umweltbelastung. Wie stark sich dies auf die Ökobilanz auswirkt, zeigen zwei aktuelle Studien auf, worin die Stromherkunft für verschiedene stündliche Lastprofile analysiert wurde. Auf Basis dieser Daten wurde ein neues Berechnungsverfahren und eine Methodik für die Ökobilanzierung für den Schweizer Gebäudepark entwickelt.



(Links) Um die Leitfähigkeitsverteilung  $\sigma$  in Brennstoffzellen zu untersuchen wird bei der elektrischen Impedanztomographie ein Wechselstrom  $I$  zwischen zwei Elektroden (rot) angelegt und die resultierenden Änderungen des Oberflächenpotenzials zwischen weiteren Elektrodenpaaren gemessen. Die Wiederholung mit vielen verschiedenen Konfigurationen liefert Daten, aus denen die Leitfähigkeitsverteilung in der Membran berechnet werden kann. (Rechts) Versuchsanordnung am Paul Scherrer Institut.

## Neue Diagnostik für Brennstoffzellen

Für den Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätsbereich sind Polymerelektrolytbrennstoffzellen (PEFCs) zentral. Wichtig dabei ist die Kenntnis über die Leitfähigkeitsverteilung innerhalb der PEFC-Membran. Die Leitfähigkeit ist abhängig von der Membranfeuchtigkeit, die durch verschiedene Betriebsparameter beein-

flusst wird. Es geht darum, dass die Membran nicht lokal austrocknet, was zu Schäden führt. Zudem muss eine teilweise Flutung der Brennstoffzelle durch zu viel Produktwasser verhindert werden. Die Leitfähigkeit innerhalb einer PEFC-Membran zu bestimmen war, bis anhin nur mit invasiven Methoden möglich, die sich praktisch nicht anwenden lassen. Das Paul Scherrer Institut entwickelt im Rahmen eines BFE-For-

schungsprojektes eine neue, nicht invasive Methode. Diese basiert auf der elektrischen Impedanztomographie, wo die Beziehung zwischen der Leitfähigkeitsverteilung eines Objektes und der an der Oberfläche messbaren Potenzialverteilung analysiert wird.



# Erneuerbare Energie



## Windenergie einmal anders

In 200 bis 500 m Höhe bewegt sich ein Fluggerät auf einer kreisförmigen Bahn – was auf den ersten Blick nach einer Spielerei aussieht, produziert Strom aus Windenergie. Solche alternativen Windenergiekonzepte, «Airborne Wind Energy» (AWE) oder auf Deutsch «Flugwindkraftanlagen» genannt, stossen international auf immer mehr Interesse und sind auch in der Schweiz Gegenstand aktueller Forschungsprojekte.

«Airborne Wind Energy» (AWE) Systeme nutzen den Wind auf unkonventionelle Weise: ein Fluggerät – ein kleines Flugzeug, eine Drohne oder ein Drachen – treibt über das Abrollen eines Seils einen Generator am Boden an (Grafik Seite 22). Dank einer optimierten Steuerung und Flügelform wird beim Aufstieg des Fluggeräts im Wind mehr Strom produziert als beim Einholen verbraucht wird. Im kontinuierlichen Betrieb bewegt sich das Fluggerät auf einer dreidimensionalen Flugbahn im Raum, wo sich Auf- und Abstieg kontinuierlich abwechseln.

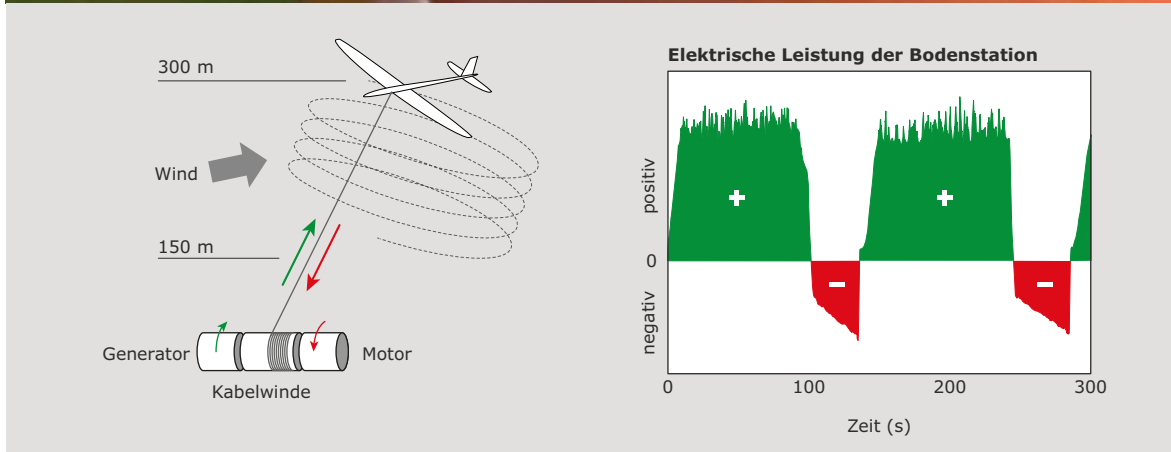
Auf einer Höhe von 200–500 m sind Winde stärker und regelmässiger als in Bodennähe. Solche konstanten Windbedingungen können AWE-Systeme ausnutzen, da diese in Bereichen fliegen, die deutlich über der Höhe der grössten konventionellen Windturbinenanlagen liegen. Damit fallen Produktionsschwankungen geringer aus. AWE-Systeme sind leicht, brauchen wenig Material und sind zudem mobil einsetzbar an verschiedenen Standorten.

Ob sich diese noch junge Windenergietechnologie im Markt durchsetzen wird, ist heute noch offen. Vor zehn Jahren herrschte grosse Skepsis, heute räumen Fachleute dieser Technologie intakte Chancen ein. So diskutierten im September 2020 fast 100 Personen aus Forschung und Industrie aus 18 Ländern an einem Treffen der Internationalen Energieagentur (IEA) die Technologie und deren Potenzial. Weltweit arbeiten gemäss der IEA rund 60 Organisationen in diesem Bereich. In der Schweiz sind hier gleich zwei junge Unternehmen aktiv: die Unternehmen TwingTec AG und Skypull SA verfügen beide über Pilotsysteme (siehe Abbildung links und auf der Folgeside) und entwickeln diese derzeit zur Marktreife weiter. Die Systeme sollen soweit verbessert werden, dass Starts, Landungen und ein voll automatischer kontinuierlicher Betrieb stabil ablaufen, auch bei schwierigen Wetterbedingungen.

Weitere Herausforderungen sind die Langlebigkeit der Materialien und

Bei der «Airborne Wind Energy» (AWE) wird der effizienteste Teil einer konventionellen Windkraftanlage, die Spitze des Turbinenblatts, durch ein hocheffizientes Flugobjekt ersetzt, welches mit dem Boden über ein Seil verbunden ist. Das periodische Abrollen des Seils über eine Winde erzeugt Strom in einem Generator. Bei manchen Systemen erfolgt die Stromerzeugung auch in der Luft über mitgetragene Turbinen (Generatoren), wo der erzeugte Strom über ein Kabel auf den Boden geleitet wird.

Die Abbildung links zeigt das System der Tessiner Firma Skypull SA. Das Fluggerät ist eine Mischung aus einem normalen Starrflügler und einer Multicopter-Drohne mit vier Rotoren. Als Drohne kann das Gerät damit auch in komplexem Terrain abheben und landen, während in grösseren Höhen der Auftrieb durch die Flügel erzeugt wird. In der Testphase hat das System eine Spannweite von 1,3 m, künftig könnten aber auch deutlich grössere Geräte gebaut werden (Bildquelle: Skypull SA).



Funktionsprinzip eines «Airborne Wind Energy»-Systems mit einer Stromerzeugung am Boden: ein Fluggerät (Drohne, Segelflieger oder Kite), das mit einem Kabel mit dem Boden verbunden ist, nutzt die kinetische Energie des Windes und zieht damit das Kabel von der Winde, die mit einem Stromgenerator verbunden ist. Ist eine bestimmte Flughöhe erreicht, wird das Fluggerät wieder auf die Ausgangshöhe eingeholt. Die Netto-Stromerzeugung in so einem «Pumpzyklus» entspricht der grünen Fläche minus der roten. (Rechts) Fluggerät der Schweizer Firma TwingTec AG, welches aus einem kleinen Segelflieger besteht, der mit elektrischen Propellern auf die Ausgangshöhe gebracht werden kann. Das im «Pump»-Betrieb überflogene Gelände, das durch die maximale Kabellänge gegeben ist, darf wegen der Gefahr eines Kabelrisses nicht betreten werden (Photo: TwingTec AG).

insbesondere auch regulatorische Vorschriften für den Betrieb. Was passiert etwa, wenn sich ein Helikopter nähert und der Pilot das Fluggerät oder das Seil nicht sieht? Wie können Objekt und Seil besser sichtbar gemacht werden? Diesen Fragen gehen TwingTec und Skypull im Rahmen eines vom BFE unterstützten Projektes nach. Bei den Systemen beider Firmen wird das Kollisionswarnsystem «FLARM» genutzt, welches ursprünglich für den Segelflug entwickelt wurde. Es besteht aus einem

GPS-Empfänger und einem Funkmodul, das die aktuelle eigene Position im Nahbereich (einige Kilometer) an andere «FLARM»-Geräte übermittelt. Skypull arbeitet zudem an einem Kamerasystem, mit dem ihr Fluggerät hernahende Helikopter, Gleitschirme oder Kleinflugzeuge erkennt. Beide Unternehmen untersuchen weiter, wie die Fluggeräte am besten beleuchtet werden können, damit diese von Piloten eines Flugzeugs oder Gleitschirms besser gesehen werden. Lärmemissionen, insbesondere bei

Start und Landung, sind ein weiteres Themenfeld, das bearbeitet wird. Dazu die beiden Firmen Skypull und TwingTec Messungen an verschiedenen Orten durch.

Der Anwendungsbereich für solche Windenergiesysteme könnte in der Schweiz speziell in Insellösungen liegen, etwa bei Berghütten. Denkbar sind diese auch als Ergänzung in konventionellen Windparks oder – eine noch visionäre Idee – als Offshore-Anlagen im Meer.





Wasserstollen des Kraftwerks Gletsch-Oberwald. Durch diesen Stollen fliesst das Wasser der Rhone mit einer Fallhöhe von rund 300 m zu den Turbinen. Die installierte Leistung liegt bei 14 MW, mit einer Jahresproduktion von 41 GWh beträgt die durchschnittliche Leistung des Kraftwerks jedoch nur 4,7 MW. Die Anlage ist unterirdisch gebaut, um die Umwelt möglichst wenig zu beeinflussen. Das Prinzip solcher Hochdruck-Laufwasserkraftwerke nutzen nur wenige Schweizer Kleinwasserkraftwerke. Sie machen aber einen grossen Teil der Gesamtstromproduktion aus Kleinwasserkraftwerken aus (Quelle: FMV).

## Flexible Laufwasserkraftwerke

Je nach Abflussmenge produziert ein Wasserkraftwerk an einem Fliessgewässer mehr oder weniger Strom. Unterschreitet der Wasserpegel einen Minimalwert, steht ein Kraftwerk ganz still. Die Produktion lässt sich flexibilisieren, wenn bereits vorhandene Volumina in Becken und Stollen als Wasserspeicher genutzt werden. Damit kann wertvolle Regelernergie gewonnen und eine bessere Ausbeute bei geringen Abflussmengen erzielt werden.

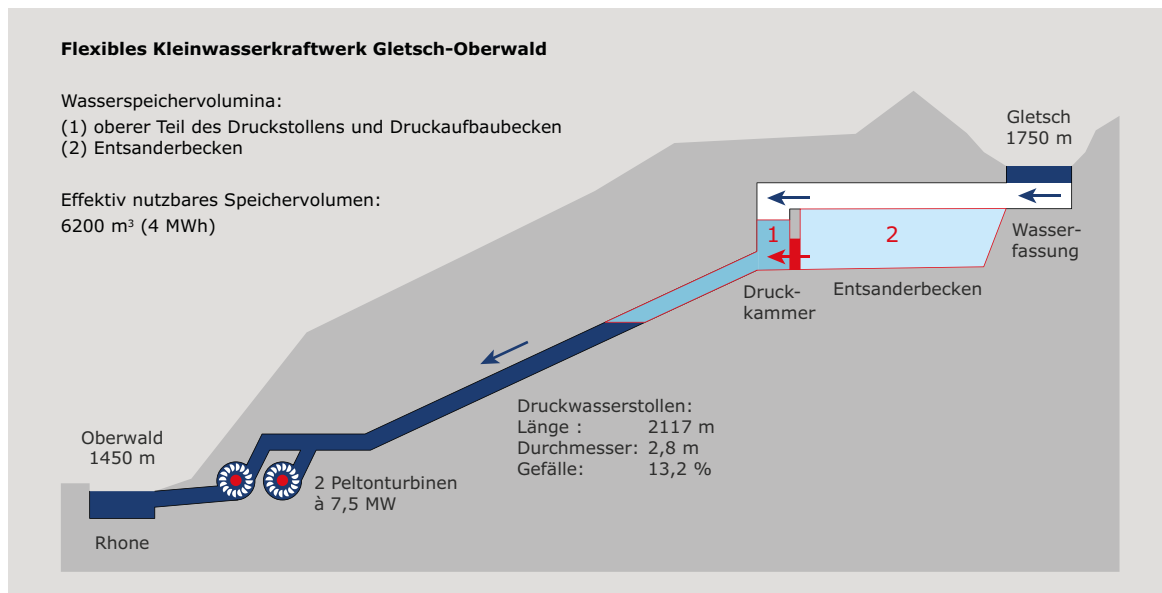
Seit 2018 liefert das Kraftwerk Gletsch-Oberwald Strom für 9000 Haushalte. Es nutzt dabei das Gefälle der Rhone zwischen Gletsch (1750 m) und Oberwald (1450 m) zur Energiegewinnung. Wie viel Strom produziert wird, hängt von der Wasserführung der Rhone ab und kann nicht an die Nachfrage angepasst werden. Vor allem im Winter reicht der Abfluss der Rhone oft nicht aus, um die Turbinen auf minimaler Leistung zu betreiben und das Wasser wird am Kraftwerk vorbei geleitet.

Forschende verschiedener Institute unter Leitung der Fachhochschule

Westschweiz untersuchen, wie Laufwasserkraftwerke flexibler betrieben werden können, um so lukrative Regelernergie bereitzustellen. Hierzu wird bei hohem Strombedarf mehr Wasser auf die Turbinen geleitet, als von der Rhone effektiv zufliesst. Damit werden Absetzbecken und ein Teil des Triebwasserstollens entleert (siehe Grafik auf der Folgeseite). Bei geringerem Strombedarf werden diese Volumina wieder mit Wasser aufgefüllt und so als Speicher genutzt. Diese Speichervolumina können auch bei tiefen Abflussmengen gefüllt werden, während die Turbinen vorübergehend stillstehen. So lässt

sich selbst im Winter zeitweise Strom produzieren, auch wenn die Rhone eigentlich zu wenig Wasser führt.

Ein Pilotbetrieb verlief bisher erfolgreich: die Produktion im Winter konnte ohne grössere bauliche Anpassungen verdoppelt werden, allein durch die Nutzung der vorhandenen Speichervolumina in Absetzbecken, Druckkammer und einem Teil des Triebwasserstollens. Zudem konnte der Betreiber über das ganze Jahr hinweg Regelernergie mit einer Leistung von rund 1,5 MW anbieten. Mit guten Prognosen zu Abflussmengen und Stromnachfrage kann



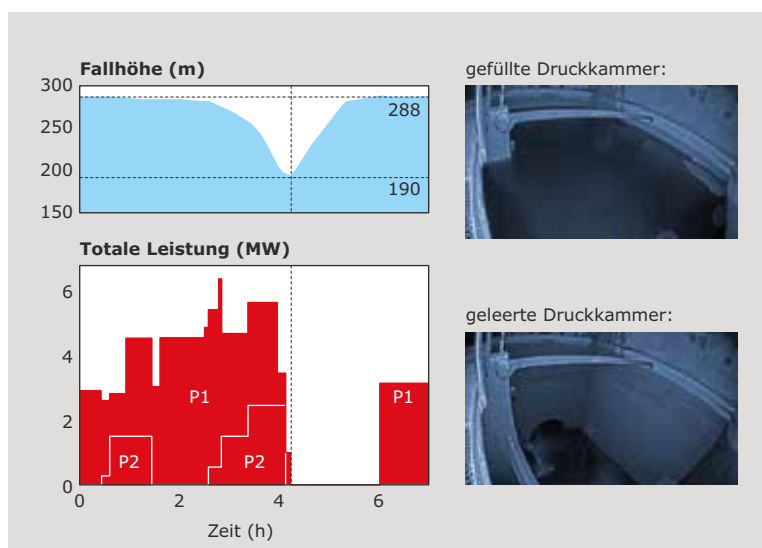
Im Kraftwerk Gletsch-Oberwald wird das Wasser der Rhone gefasst und in ein Entsanderbecken (Absetzbecken für den mitgeführten Feinstoffanteil) geleitet. Ist das Becken voll, fließt das Wasser über eine Trennwand zur Druckkammer und von dort in den Stollen, der zu den rund 300 m tiefer gelegenen Turbinen in Oberwald führt. Im Normalbetrieb sind Entsanderbecken, Druckkammer und Stollen mit Wasser gefüllt. Für einen flexiblen Betrieb können die (1) Volumina eines Teils des Druckwasserstollens und der Druckkammer und (2) das Volumen des Entsanderbeckens genutzt werden. Der Wasserinhalt dieser Volumina kann mit dem Betrieb der Turbinen und über das Öffnen und Schliessen eines Tors (rot) in der talseitigen Trennwand des Entsanderbeckens gesteuert werden. Der Wasserstand im Druckwasserstollen kann nur bedingt abgesenkt werden, da bei einem zu stark verminderten Wasserdruck die Geometrie des auf die Pelton turbine treffenden Wasserstrahls nicht mehr stimmt und die Turbine an Effizienz verliert und schneller altert.

der Kraftwerksbetreiber die Produktion steuern und so bessere Preise erzielen, was die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks entscheidend erhöht.

Durch diese flexible Nutzung sind jedoch unterhalb des Kraftwerks im natürlichen Lauf der Rhone höhere Schwankungen im Abfluss zu erwarten. Aus Sicht der Gewässerökologie

kann dieser sogenannte Schwall und Sunk problematisch sein. Begleitende ökologischen Untersuchungen zeigten jedoch einen geringen Einfluss auf Gewässerlebewesen. Um die Auswirkungen auf die Gewässerökologie möglichst klein zu halten, wird das Kraftwerk so geregelt, dass die Abflussspitzen maximal 1,5-mal so gross sind wie der Basisabfluss.

Im Winter wird der Abfluss aufgrund der geringeren Anzahl von Abschaltungen und Neustarts sogar geglättet. Dennoch muss für jedes Kraftwerk, das so betrieben werden soll, vorab geklärt werden, ob sich wechselnde Abflussmengen negativ auf das Ökosystem auswirken könnten.



Test beim Kraftwerk Gletsch-Oberwald: Durch die Nutzung von Wasserspeichern im Kraftwerk konnte während vier Stunden Spitzenenergie produziert werden. Dabei wurden die Speicher geleert und das Wasserniveau im Druckstollen bis auf 190 m abgesenkt. In der darauffolgenden dreistündigen Phase füllten sich die Speicher wieder, wobei kein oder nur wenig Strom erzeugt wurde. Bei den Test ging es darum, verschiedene Geschwindigkeiten der Niveauabsenkung und der Befüllung im Druckstollen und die Auswirkungen auf die Pelton turbinen zu analysieren. (P1 = Pelton turbine 1, P2 = Pelton turbine 2) (nach Schlussbericht BFE-Projekt «SmallFLEX»).







Mit maschinellem Lernen lassen sich Solaranlagen auf Luftbildern erkennen. Das Resultat hier zeigt einen Ausschnitt der Stadt Basel mit rot eingezeichneten Photovoltaikanlagen und gelb markierten solarthermischen Anlagen.

## Solarstatistik aus der Luft

Wer mit der Software «Google-Earth» über die Schweiz fliegt, erkennt Dächer mit Solaranlagen meistens sofort. Trotzdem weiss niemand genau, wo in der Schweiz welche Anlagen installiert sind. Bestechend wäre es, aus Luftbildern Photovoltaik- und solarthermische Kollektorflächen systematisch zu erkennen. Forschende der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) haben sich mithilfe von maschinellem Lernen daran gewagt.

Wie viele Solaranlagen sind in der Schweiz installiert? Wie viel Strom und Wärme produzieren diese? Solche Zahlen werden heute aufgrund von Markterhebungen und durchschnittlichen Jahreserträgen geschätzt. Doch sie sind mit Unsicherheiten behaftet. Unter anderem wird aus Verkaufszahlen nicht klar, wo und mit welcher Ausrichtung und Neigung die Photovoltaikmodule und solarthermischen Kollektoren installiert sind. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Jahresproduktion.

Liessen sich diese Daten dank Digitalisierung genauer erfassen? Forschende der FHNW hatten zusammen mit dem BFE die Idee, Photovoltaikanlagen und thermische Solarkollektoren auf Luftbildern automatisch zu detektieren und daraus die Fläche zu berechnen. Ähnliche Ansätze werden auch an anderen Forschungsinstitutionen im In- und Ausland verfolgt.

Möglich ist eine automatische Erkennung nur dank hochauflösender Luftbilder des Bundesamt für

Landestopografie swisstopo. Die von Verzerrungen befreiten Bilder (Orthobilder) decken die ganze Schweiz mit einer Auflösung von 10 cm im Flachland sowie 25 cm in den Alpen ab und werden in einem Zyklus von drei Jahren aktualisiert. Zudem verfügt swisstopo über 3D-Modelle aller Schweizer Gebäude. Daraus lassen sich Orientierung und Neigung der Dächer auslesen, um die Fläche von Solaranlagen zu berechnen, in einem weiteren Schritt auch deren Produktion.

Für die Analyse der Luftbilder greifen die Forschenden auf Methoden des maschinellen Lernens zurück. Anhand von Luftbildern, auf denen Solaranlagen von Hand markiert und zugeordnet wurden, «lernt» der Computer, die Solarflächen als solche zu erkennen. Dabei sucht der Algorithmus die Luftbilder nicht ein-

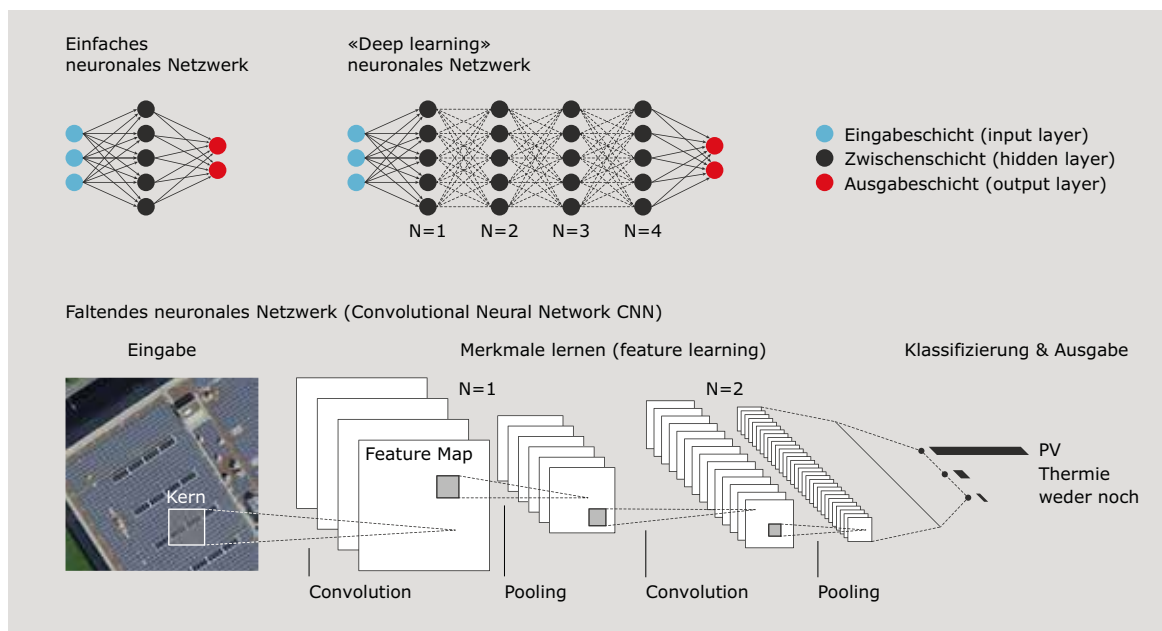
fach nach vorgegebenen Bildern ab, sondern er leitet aus den Trainingsdaten eigene Muster und Gesetzmässigkeiten ab.

Je mehr Lernstoff der Algorithmus erhält, desto besser wird er. Die Software der FHNW, die mit 30 000 Trainingsdaten gefüttert wurde, erreicht

schon eine beachtliche Leistung: 92 % der ausgewiesenen Photovoltaikanlagen waren wirklich solche. Etwas mehr Schwierigkeiten hat der Algorithmus mit solarthermischen Kollektoren: 88 % werden richtig zugeordnet. Noch erkennt der Algorithmus aber nicht alle Solarflächen. Die Quote wird umso schlechter, je genauer der Algorithmus bestimmen soll, ob es sich um photovoltaische oder solarthermische Module handelt. Absolute Flächendaten lassen sich mit dem Verfahren deshalb noch nicht ganz genau ableiten. Möglich sind jedoch Aussagen zur geografischen Verteilung der Solaranlagen oder zur zeitlichen Veränderung, wenn die Analyse regelmässig wiederholt wird.



Entscheidende Voraussetzung für die Erkennung von Solaranlagen auf Luftbildern ist eine entsprechend hohe Auflösung. Das Bundesamt für Landestopographie swisstopo liefert hierzu neu Aufnahmen mit 10 cm Auflösung. Das Bild links illustriert das im Vergleich zur bisherigen Auflösung von 25 cm (linker Bildteil). Um das neuronale Netzwerk zu trainieren, wurden insgesamt 7839 Bilder präpariert, wo Photovoltaik- und thermische Anlagen mit Polygonen markiert wurden (Quelle: FHNW).



Zur Erkennung von Solaranlagen auf Luftbildern werden künstliche neuronale Netzwerke genutzt. Diese sind aus verschiedene Schichten von künstlichen Neuronen (Knoten) aufgebaut, die untereinander verbunden sind. Sogenannte Gewichte definieren, wie stark die einzelnen Neuronen voneinander abhängen. Durch vorgegebenes «Lernmaterial» werden die Gewichte in der Zwischenschicht (hidden layer) so angepasst, dass das Resultat in der Ausgabe möglichst der Eingabe entspricht. Gibt es mehrere Zwischenschichten, spricht man von «Deep learning»-Netzwerken.

Bei einem faltenden neuronalen Netzwerk (convolutional neural network, CNN) sind diese Zwischenschichten aufgebaut aus einem (1) Convolutional Layer, wo Merkmale mit Filtern (Kern) abgescannet werden und die Information auf verschiedenen Feature Maps abgebildet wird, und (2) einem Pooling Layer, wo unnötige Information entfernt wird. Am Ende erfolgt eine Klassifikation und eine Ausgabe, mit welcher Wahrscheinlichkeit es sich um eine bestimmte Objektklasse handelt. Beim hier beschriebenen Forschungsprojekt wurde eine relativ neue Methode (Faster R-CNN) genutzt. Bei einem R-CNN wird ein Bild zunächst nach möglichen Objekten mit einem Suchalgorithmus untersucht, der dann Bildregionen vorschlägt, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Objekt beinhalten. Das R steht für «region based». Faster R-CNN baut darauf auf und entspricht dem aktuellen Stand der Forschung.



## «Big Data» für Solarprognosen

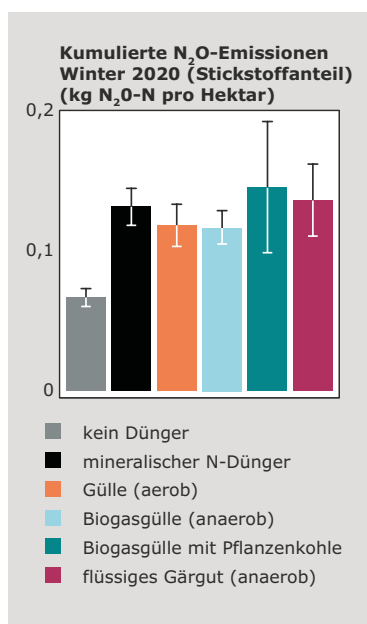
Wie viel Strom eine Photovoltaikanlage produziert, hängt vom Wetter ab. In umgekehrter Richtung lässt sich aus den Produktionsdaten die aktuelle Wettersituation an einem Ort ableiten – Photovoltaikanalgen könnten also als dezentrale Wetterstationen dienen, um die Produktion vorzusagen. Dazu haben Forschende des Centre Suisse d’Electro-



nique et de Microtechnique (CSEM) einen selbstlernenden Algorithmus entwickelt, der mit realen sowie simulierten Produktionsdaten trainiert wurde. Die damit berechneten Produktionsvorhersagen für drei Stunden waren vergleichbar oder sogar besser als solche, die auf Meteodaten beruhen. Der Algorithmus erwies sich zudem als robust gegenüber Fehlern und Lücken in den Produktionsdaten, die von den Photovoltaikanalgen übermittelt werden.



Der Grundgedanke bei Solarprognosen auf Basis von «Big Data» ist, dass Ereignisse in der vergangenen Photovoltaikproduktion (z. B. Wolken) informativ sind, um die Produktion an anderen Orten vorherzusagen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel eines Satzes von Photovoltaikproduktionsstandorten für die Vorhersage einer Anlage in der Zentralschweiz.



## Klimawirkung von Düngern aus Biogasanlagen

Gülle und Gärgut aus Biogasanlagen sind wertvolle Dünger. Seit Kurzem rückt auch die Anwendung von Pflanzenkohle in den Fokus. Bei der Herstellung mittels Pyrolyse lässt sich nicht nur erneuerbare Energie gewinnen, die Pflanzenkohle selbst soll auch den Boden verbessern und CO<sub>2</sub> langfristig binden. Wie verhalten sich organische Dünger aus Biogas-

Kumulierte Lachgasemissionen bei verschiedenen Düngergaben für Wintergerste. Die Art des Düngemittels hat keinen signifikanten Einfluss auf die Emissionen. Vielmehr steigen diese mit grösseren Niederschlägen und höheren Bodentemperaturen.



anlagen und Pflanzenkohle im Feld? Führen sie zu höheren oder tieferen Treibhausgasemissionen als andere Düngemittel? Dies ist mit entscheidend dafür, ob sich die Energiegewinnung aus Biomasse langfristig positiv auf das Klima auswirkt. Diese Frage untersucht ein übergreifendes Forschungsprojekt der Bundesämter für Landwirtschaft, für Umwelt und für Energie.

## Neue Felder für die Solarthermie

Wie lässt sich Solarwärme saisonal speichern? In mehreren Pilot- und Demonstrationsprojekten werden dazu verschiedene Ansätze untersucht. Ein Weg ist, die Wärme über Erdsonden von Wärmepumpenheizsystemen dem Erdreich zuzuführen. So kühlt das Erdreich weniger aus und die Wärme steht im Winter wieder zur Verfügung. Mit neuartigen Materialien für Erdwärmesonden könnte der Wärmetransfer zwischen Sonde und Erdreich verbessert werden, sowohl beim Wärmeentzug als auch bei der Rückspeisung. Nebst dem Erdreich kommen aber auch Bauteile eines Gebäudes als Wärmespeicher infrage. Geografisch scheinen solche Lösungen insbesondere in Lagen mit hoher Einstrahlung und hohem Heizwärmebedarf vielversprechend.



Auf dem Gebäude der Firma Oblamatik in Chur sind Hybrid-(PVT-)module aus photovoltaischen und thermischen Kollektoren installiert. Weiter verfügt das Gebäude über eine thermisch aktive Fundamentplatte. Während der Heizperiode dient diese als Wärmequelle für die Wärmepumpe und wird über die PVT-Anlage aktiv und über das Erdreich passiv regeneriert. Im Kühlbetrieb nimmt die Platte und das umliegende Erdreich Gebäudewärme auf. Über Nacht wird die Betonplatte über die PVT-Anlage ausgekühlt. Die 384 m<sup>2</sup> grosse Absorberfläche der PVT-Module gibt die Wärme über Konvektion an die Luft und über Strahlungsaustausch an den kalten Himmel ab (Quelle: Oblamatik).



# Sozioökonomie





## Die Verkehrswende im Kopf

Elektrofahrzeuge sind auf dem Vormarsch. Wie man noch mehr Personen zum Kauf eines Elektrofahrzeugs bewegen kann, wird in verschiedenen aktuellen Studien untersucht.

Der Strassenverkehr ist für etwa einen Drittel des CO<sub>2</sub>-Ausstosses in der Schweiz verantwortlich. Elektrofahrzeuge sind der Schlüssel, um diesen zu senken. Diese werden auch immer beliebter: Die Verkaufszahlen im Fahrzeugmarkt liegen seit Beginn der Covid-19-Pandemie unter dem langjährigen Schnitt, der Absatz von Elektro- und Hybridfahrzeugen nimmt jedoch deutlich zu. Dennoch verfügen erst rund 8% der Neuzulassungen über einen reinen Elektroantrieb. An welchem Punkt müsste angesetzt werden, um Kunden und Kundinnen noch stärker von der Elektromobilität zu überzeugen?

Eine Studie der ETH Zürich untersuchte, wie Personen, die selbst ein Fahrzeug besitzen, die Elektromobilität und staatliche Anreizsysteme für diese wahrnehmen. Die Zustimmung und mögliche Kaufabsichten nahmen im Laufe der Studie deutlich zu, nachdem die Teilnehmenden mehr Wissen zur Elektromobilität erhalten hatten und einige zudem Elektrofahrzeuge Probe fahren konnten. Informationen über bereits installierte öffentliche Ladestationen sowie eigene Erfahrungen mit einem Elektroauto wirkten sich positiv auf die Kaufabsichten aus.

Eine andere Studie der Universität Genf zeigte zudem, dass viele Autofahrer unterschätzten, wie gross der Anteil an Fahrten ist, der mit einem Elektroauto abgedeckt werden kann. Informationen hierzu können positiv gegen die sogenannte Reichweitenangst wirken. Laut einer anderen Studie der Universität St. Gallen können Produktbündelungen von Elektrofahrzeugen und Ladediensten die Kundenakzeptanz von Elektromobilität positiv beeinflussen. Die Universität St. Gallen hat in einer weiteren Arbeit auch untersucht, mit welchen Marketing- und Kommunikationsmassnahmen sich der Kaufprozess beeinflussen lässt, um die Elektromobilität zu unterstützen. Dabei erwies sich die Rolle der Fahrzeugverkäufer als zentral, wobei die Art der Kommunikation beim Verkaufsprozess sehr wichtig ist.



(Links) Das Netz an Ladestationen für Elektromobilität in der Schweiz ist im internationalen Vergleich schon heute relativ dicht. Auf [www.ich-tanke-strom.ch](http://www.ich-tanke-strom.ch) ist in Echtzeit ersichtlich, ob eine Ladestation gerade frei ist (Bildquelle: [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch)).

# Internationales



## 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](http://www.iea.org/tcp)), siehe Liste auf der Folgeseite.

Auf europäischer Ebene wirkt die Schweiz – wo immer möglich – aktiv in den Forschungsprogrammen der Europäischen Union mit. Das BFE koordiniert hier auf institutioneller 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, Wasserstoff) existiert eine intensive multilaterale Zusammenarbeit mit ausgewählten Ländern.

Auf der folgenden Doppelseite werden exemplarisch zwei Projekte dargestellt, wo Schweizer Akteure im Rahmen von ERA-NET-Projekten eng mit europäischen Partnern zusammengearbeitet haben, einmal im Bereich der CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Verwertung und -Speicherung (CO<sub>2</sub> Capture, Utilisation and Storage, CCUS) und einmal im Bereich Photovoltaik.

(Links) Die Wasserstoffmobilität in der Schweiz nimmt Fahrt auf, inzwischen sind rund 50 Brennstoffzellenlastwagen auf Schweizer Strassen unterwegs. Auch das Tankstellennetz wird auf Basis privater Initiative stetig ausgebaut. Die Wasserstofflogistik hierfür erfolgt über Container, wo Wasserstoff unter Druck gespeichert ist. Im Bereich des Einsatzes von Wasserstoff für den Schwerverkehr nehmen Schweizer Akteure international eine Pionierrolle ein und die Aktivitäten erhalten international hohe Aufmerksamkeit (Bildquelle: Hydros spider AG).

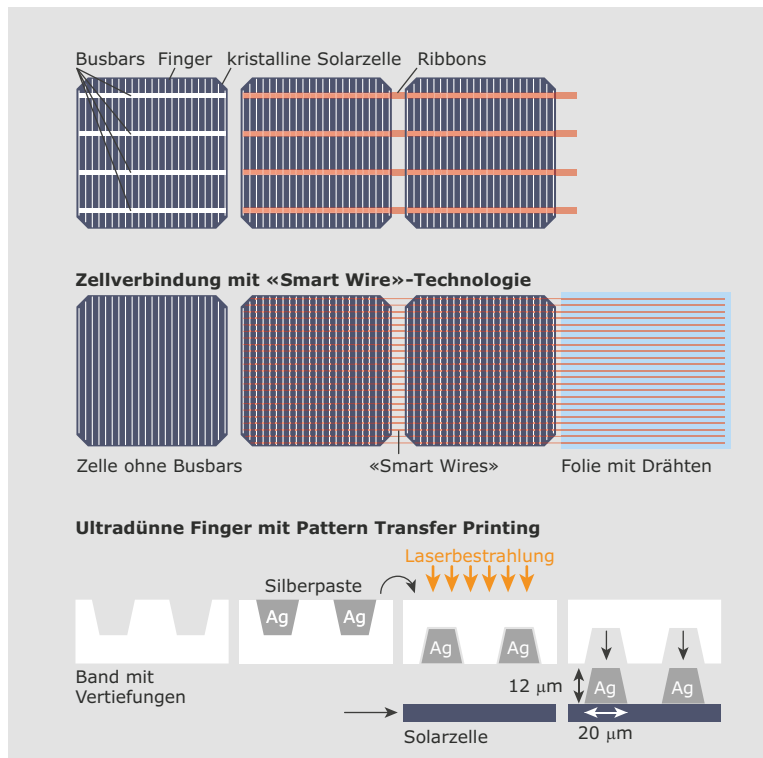
# Weniger Silber – günstigere Photovoltaik

Die Preise in der Photovoltaik sinken seit Jahren. Es dreht sich alles um die Steigerung des Wirkungsgrades und eine Senkung der Herstellkosten. In einem europäischen Projekt ging es um die Kostenreduktion, die durch Einsparung von teuren Bestandteilen (Silber) durch innovative Kontakt- und Verbindungstechnologie für Solarzellen erzielt werden kann.

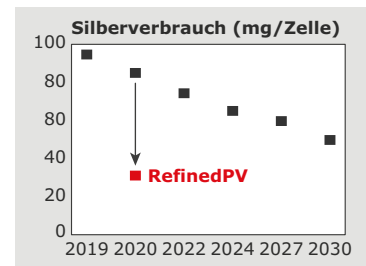
Dank der rasanten Marktentwicklung sind die Preise für Photovoltaik in den letzten zehn Jahren um 80 % gesunken. Solarstrom gehört heute zu den günstigsten erneuerbaren Energien. Ein Ansatzpunkt, um die Kosten weiter zu reduzieren, ist die Senkung des Silberanteils in den Leiterbahnen, die den Strom aus den Zellen aufnehmen und transportieren: Feine Finger sammeln den Strom in den Zellen und leiten ihn an die Busbars. Einzelne Solarzellen sind durch sogenannte Ribbons miteinander verbunden. In den letzten Jahren wurden neue Ansätze entwickelt, die mit weniger Material aus-

kommen und wo die Leitungsverluste kleiner sind. Das Schweizer Unternehmen Meyer Burger nutzt hier ihre «Smart Wire Connection Technology» (SWCT), wo viele feine Drähte quer zu den Kontaktfingern auf die Zelle angebracht werden und benachbarte Zellen untereinander verbinden. Um den Silberverbrauch in den Kontaktfingern zu reduzieren, hat die israelische Firma Utilight eine neue Technologie entwickelt, mit der ultradünne Drähte (20 µm) auf den Solarzellen abgeschieden werden können, was mit Standardsiebdruckverfahren so nicht möglich ist.

In einem gemeinsamen Projekt im Rahmen des europäischen Netzwerkes SOLAR-ERA.NET haben diese beiden Firmen zusammen mit dem deutschen Forschungszentrum ISC Konstanz ihre Technologien kombiniert. Zellseitig konnte der Verbrauch an Silber auf 28 mg pro Zelle reduziert werden, ein Wert, der in der zeitlichen Technologieentwicklung um Jahre voraus ist. Aus den feinlinien-metallisierten Zellen wurden bei Meyer Burger Solarmodule mit der SWCT-Verbindungstechnologie und Verwendung von Indium-freien Drähten hergestellt und gemäss Standardnormen getestet. Die mit diesen Zellen maximal erreichte Modulleistung liegt bei 310 W (60-Zellen-Modul) und übertrifft damit kommerzielle 3-Busbar-Module um mehr als 15 W.



Um kristalline Siliziumsolarzellen zu kontaktieren werden metallische Finger und Busbars als Stromsammelschienen auf die Zellen aufgedruckt. In den letzten Jahren wurden Technologien entwickelt, um Zellen ohne Busbars miteinander zu verbinden und um die Breite der Kontaktfinger zu reduzieren. Beides hilft, die Leistung zu verbessern, da die Zelle weniger verschattet wird und geringere ohmsche Verluste auftreten. Weiter wird massiv Silber eingespart, was ein relevanter Kostenfaktor ist.



Silberverbrauch für Siliziumsolarzellen (monofazial, p-Typ) gemäss der International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV, 2020).

SOLAR ERA-NET  
**Projekt «RefinedPV»**  
 (Reduction of Power Losses by Ultra-fine Metallization and Interconnection of Solar Cells)  
 Projektdauer: 2017–2020  
 Schweizer Beteiligung:  
 Meyer Burger Technology AG





## Wasserstoff mit negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen

Netto-Null Treibhausgasemissionen bis 2050: Bei diesem Ziel spielen Wasserstoff und die Bindung und Einlagerung von CO<sub>2</sub> eine entscheidende Rolle. Wie dieser Weg aussehen könnte, untersuchten Forschende in einem breit angelegten europäischen Forschungsprojekt mit Schweizer Beteiligung.

Für sehr hohe Prozesstemperaturen sind Wärmepumpen eher weniger geeignet, beim Transport von schweren Lasten kommen batteriebetriebene Fahrzeuge an ihre Grenzen. Um diese Bereiche zu dekarbonisieren, soll Wasserstoff zum Einsatz kommen. Doch wie kann Wasserstoff bereitgestellt werden, der mit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen produziert wurde? In dem europäischen «Elegancy» mit 22 Partnern wurde die Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas bei gleichzeitiger Abscheidung und Einlagerung des dabei frei werdenden CO<sub>2</sub> untersucht.

Grosses Potenzial sehen die Forschenden in der Gewinnung von Wasserstoff aus Biomasse. Dabei lassen sich «negative CO<sub>2</sub>-Emissionen»

realisieren, um Emissionen in anderen Sektoren wie der Landwirtschaft oder dem Flugverkehr zu kompensieren. Die Gewinnung von Wasserstoff aus Biomasse erfolgt entweder durch Dampfreformierung von Biogas, das aus Bioabfällen erzeugt wurde. Oder Holz wird durch Vergasung in synthetisches Methan oder Wasserstoff umgewandelt. In beiden Fällen kann CO<sub>2</sub> abgeschieden und permanent im Untergrund gelagert werden. Das von Pflanzen während des Wachstums aus der Atmosphäre entnommene CO<sub>2</sub> wird nicht wieder freigesetzt und die CO<sub>2</sub>-Bilanz ist negativ.

Ein spezielles Augenmerk lag auf der Einlagerung des CO<sub>2</sub> im Untergrund. Gibt es in der Schweiz geeignete

Lagerstätten, die genügend grosse Kapazitäten aufweisen und gegen Gasaustritt dicht sind? Die Forschenden haben eine Screening-Methodik entwickelt, um potenzielle Lager zu bestimmen. Dabei geht es darum, die wichtigsten geologischen Eigenschaften, die für eine CO<sub>2</sub>-Injektion erforderlich sind, zu quantifizieren und ihre Unsicherheiten zu bewerten. Drei Standorte wurden auf ihr Potenzial untersucht – einer davon im Entlebuch, wo früher einmal Erdgas gefördert wurde. Solche ehemaligen Gasvorkommen, wie sie in der Nordsee zahlreich vorhanden sind, eignen sich besonders gut als Senken. Denn wo sich früher einmal Erdgas ansammelte, kann man davon ausgehen, dass der Untergrund gasdicht ist.



Am Standort Werdhölzli der Biogas Zürich AG wird aus organischen Abfällen Biogas gewonnen und in das Gasnetz eingespeist. Aus dem Biogas liesse sich künftig auch Wasserstoff herstellen. Wenn dabei das CO<sub>2</sub> abgeschieden und langfristig im Erdreich eingelagert würde, wären die Emissionen sogar negativ (Bildquelle: Energie 360° AG / Daniel Hager Photography).

ERA-NET ACT























**Projekt «Elegancy»**  
(Enabling a Low-Carbon Economy via Hydrogen and CCS)

Projektdauer: 2017–2020

Schweizer Beteiligung:  
ETH Zürich,  
Paul Scherrer Institut PSI,  
Climeworks AG








## Beteiligung in Technologie-Kooperationsprogrammen der IEA

	Energy Conservation through Energy Storage (iea-eces.org)		Energy in Buildings and Communities (iea-ebc.org)
	Energy Efficient End-Use Equipment (iea-4e.org)		Heat Pumping Technologies (heatpumpingtechnologies.org)
	User-Centred Energy Systems (userstcp.org)		International Smart Grid Action Network (iea-isgan.org)
	High-Temperature Super Conductivity		Advanced Fuel Cells (ieafuelcell.com)
	Clean and Efficient Combustion (ieacombustion.com)		Advanced Motor Fuels (iea-amf.org)
	Hybrid & Electric Vehicles Technologies (ieahev.org)		Bioenergy (ieabioenergy.com)
	Geothermal (iea-gia.org)		Hydrogen (ieahydrogen.org)
	Hydropower (ieahydro.org)		Photovoltaic Power Systems Programme (iea-pvps.org)
	Solar Heating and Cooling (iea-shc.org)		Solar Power and Chemical Energy Systems (solarpaces.org)
	Wind (community.ieawind.org)		Greenhouse Gas (ieaghg.org)
	Gas and Oil Technologies (gotcp.net)		Energy Technology Systems Analysis Program (iea-etsap.org)

## Teilnahme an ERA-NETs (European Research Area Networks)

	Bioenergy (eranetbioenergy.net)		Solar (Cofund1 & Cofund2) (solar-era.net)
	Smart Cities and Communities (jpi-urbaneurope.eu/calls/enscc)		Accelerating CCS Technologies (act-ccs.eu)
	Concentrated Solar Power (csp-eranet.eu)		Geothermica (geothermica.eu)
	Smart Energy Systems (eranet-smartenergysystems.eu)		Materials (https://m-era.net/)

## Weitere internationale Zusammenarbeit

	International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy		Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
	DACH-Kooperation Smart cities and communities		DACH-Kooperation Smart grids
	International Partnership for Geothermal Technology		

(Rechte Seite) Drohne der Firma TwingTec AG für ein alternatives Windenergiekonzept, siehe Bericht Seite 21 (Bildquelle: TwingTec AG).



Impressum:  
Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern  
[stefan.oberholzer@bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

[www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)