



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Energie BFE**

# **Energieforschung und Innovation**

## **Bericht 2021**





# Editorial

Die Herausforderungen des Klimawandels und die Energieversorgungssicherheit gehören in der Schweiz und weltweit zu den wichtigsten Themen. Neben der Umsetzung von Effizienzmassnahmen und der Anwendung erneuerbarer Energietechnologien spielt die Energieforschung eine wichtige Rolle. Sie hilft, das zunehmend komplexere Energiesystem mit verschiedenen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichsten Akteuren und verschiedenen Energiesektoren zu studieren und technische und nicht-technische Lösungen zu entwickeln.

Das Bundesamt für Energie (BFE) fördert und koordiniert die Schweizer Energieforschung in einem programmatischen Ansatz seit vielen Jahren und unterstützt anwendungsorientierte Forschung, Pilot- und Demonstrationsprojekte sowie grössere interdisziplinäre Forschungskonsortien. Eingesetzt werden hierfür drei verschiedene Förderinstrumente, welche sich komplementär ergänzen. In dieser Broschüre werden exemplarisch Projekte vorgestellt, welche das BFE fördert und eng begleitet, dies stellvertretend für eine Vielzahl von weiteren Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekten. Die angegebenen QR-Codes leiten zu detaillierten Informationen weiter.

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech

(Titelbild) Das Wetter hat einen grossen Einfluss auf den Stromertrag von Photovoltaikanlagen. Schon bei leichter Bewölkung kann sich der Solastromertrag im Vergleich zu einem wolkenlosen Sommertag halbieren und an einem verregneten Tag im November sinkt dieser gar auf einen Zehntel. Auch aussergewöhnliche Wetterereignisse sind von Bedeutung: mehrere Male im Jahr tragen Luftströmungen Saharastaub bis in die Schweiz. Solche Wetterlagen mit einem hohen Anteil an Aerosolen in der Atmosphäre schmälern die Solarproduktion um bis zu 10 % (Bildquelle: Jan Remund, Meteotest AG).



(Links) An der Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne (EPFL) in Neuenburg wurde vor kurzem eine Tandemsolarzelle präsentiert, die einen zertifizierten Wirkungsgrad von 29,2 % aufweist. Ermöglicht wird dies durch die Kombination einer Perowskit-Solarzelle mit einer texturierten Siliziumsolarzelle. Die Herausforderung besteht insbesondere darin, die dünne Perowskitzelle als Film auf der absichtlich texturierten Siliziumoberfläche gleichmässig abzuschneiden. Der Wirkungsgrad dieser Tandemzelle liegt deutlich über dem maximal möglichen Wirkungsgrad einer einzelnen Siliziumsolarzelle (Quelle: Christian Wolff/EPFL).

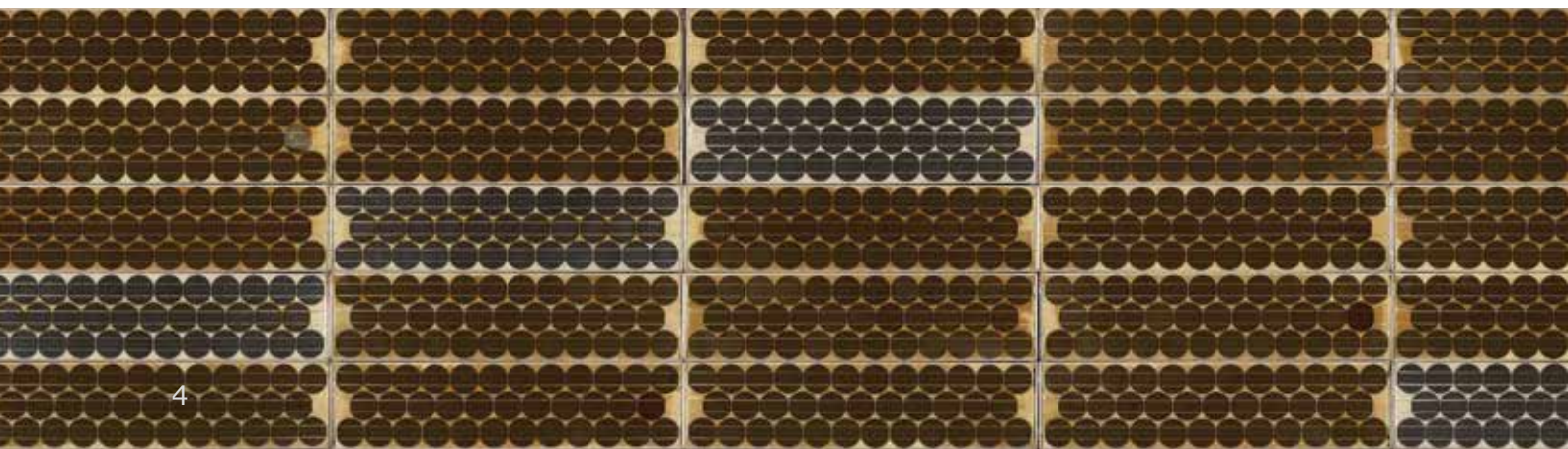


# Inhalt

Editorial	3
Inhalt	4
Überblick	
Technologie- und Innovationsförderung	5
Thematische Energieforschungsprogramme	6
Inter- und transdisziplinäre Forschungsförderung mit SWEET	6
Statistik der Schweizer Energieforschung	8
Highlights	
Batterien für die Energiewende	12
Energieeffiziente Sorptionsprozesse in der Verfahrenstechnik	16
Zusatznutzen von Photovoltaikwechselrichtern in der Industrie	18
Verlässlicher Solarstrom dank guter Einstrahlungsprognosen	20
Wärme aus der Tiefe	24
Doppelte Ernte mit Photovoltaik in der Landwirtschaft	26
International	
Internationale Zusammenarbeit	29
Beteiligung in Technologie-Kooperationsprogrammen der IEA	30
Teilnahme an ERA-NETs – European Research Area Networks	30
Weitere internationale Zusammenarbeit	30



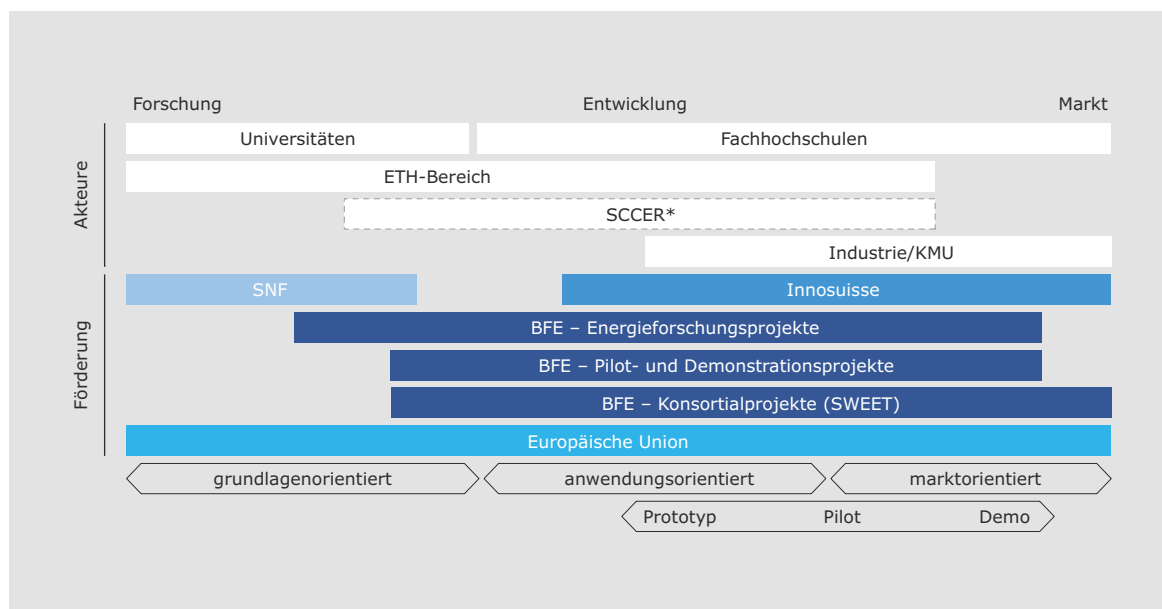
«Auguri di buon compleanno Ticino Solare»: Bei Lugano wurde im Mai 1982 die «TISO-10» als erste Photovoltaikanlage Europas ans elektrische Netz angeschlossen. «TISO» steht für «Ticino Solare» und «10» für die installierte Leistung in kW. 1982 lag die weltweit installierte Photovoltaikleistung bei 9 MW und die Kosten der TISO-Anlage bei 28'500 Franken pro installiertes kW. Zum 35. Geburtstag wurden alle 288 Module im Detail untersucht. Die Analyse ergab damals, 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 (Bildquelle: SUSPI).



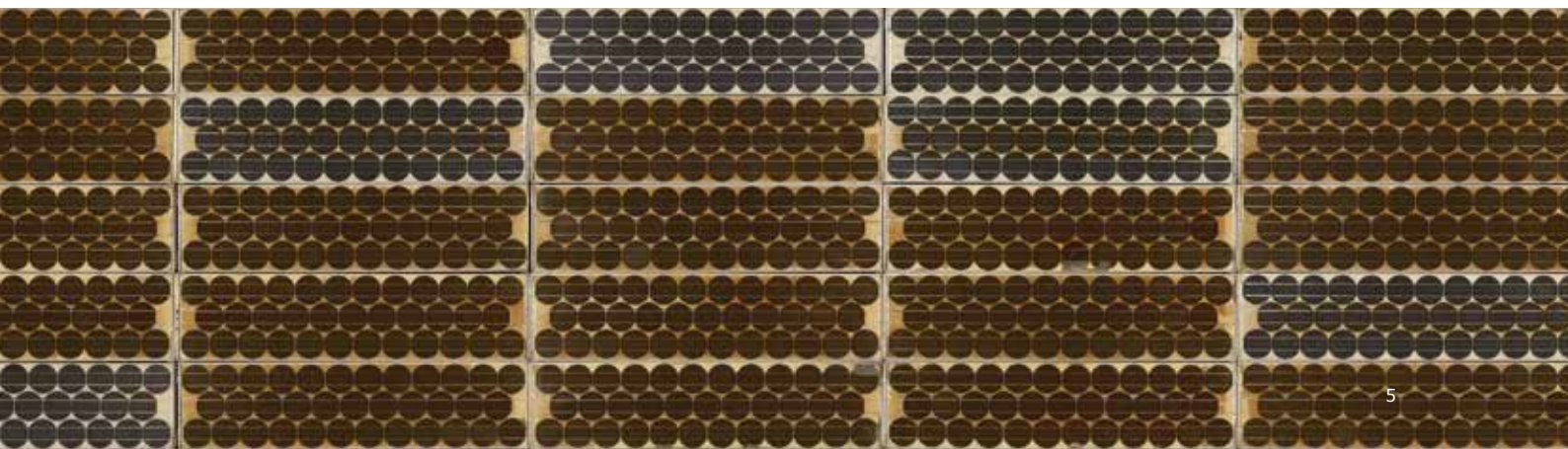
# Technologie- und Innovationsförderung

Mit drei komplementären Förderinstrumenten für Forschung und Innovation im Energiebereich deckt das Bundesamt für Energie (BFE) praktisch das gesamte Technologiespektrum ab. Es richtet sich dabei nach einem eigenen Energieforschungskonzept 2021–2024, das sich wiederum am Energieforschungskonzept des Bundes orientiert. Für die aktuelle Periode 2021–2024 ist ein noch stärkerer Fokus auf nicht-technische Forschung (engl. SSH: social sciences and humanities) gelegt. Technische Wissenschaften und SSH sollen schon bei der Konzipierung von Forschungsvorhaben eng zusammenarbeiten, um Forschungsergebnisse frühzeitig auf die spätere Anwendung auszurichten.

Die BFE-Mittel für Energieforschung werden unterstützend eingesetzt, um Lücken in der Förderlandschaft zu schliessen und die Schweizer Energieforschung damit zu koordinieren. Aktuell stehen hierfür rund 50 Millionen Franken pro Jahr zur Verfügung und es werden rund 300 laufende Projekte pro Jahr eng begleitet.



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 Energieforschungsprogramme

Das BFE deckt mit thematisch orientierten Energieforschungsprogrammen das gesamte Spektrum der Energieforschung in den Bereichen «Energieeffizienz» und «Erneuerbare Energie» ab. Diese Programme sind eng mit den anderen Förderinstrumenten des BFE (Programm für Pilot- und Demonstrationsprojekte und das Programm SWEET) verknüpft.



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.

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)
Solarthermie und Wärmespeicherung (4–8)	Photovoltaik (3–8)	Solare Hochtemperaturenergie (CSP) (3–8)
Wasserstoff (2–8)	Bioenergie (3–8)	Wasserkraft (4–8)
Geothermie (3–8)	Windenergie (4–8)	Stauanlagensicherheit (3–8)
Energie-Wirtschaft-Gesellschaft		

Thematische Energieforschungsprogramme des BFE. Die Zahlen in Klammern bezeichnen den Technologiereifegrad von Projekten, die durch das entsprechende Programm gefördert werden.

## Inter- und transdisziplinäre Forschungsförderung mit SWEET

Ende 2020 wurde vom eidgenössischen Parlament das Forschungsförderprogramm SWEET – «SWiss Energy research for the Energy Transition» bewilligt, welches nahtlos an die vorangegangenen SCCERs «Swiss Competence Centers in Energy Research» anknüpft. Für SWEET stehen bis 2028 Fördermittel von 136,4 Millionen Franken zur Verfügung. Im Gegensatz zu den SCCERs ist SWEET als Programm kompetitiver aufgestellt, d. h. es werden fortwährend Ausschreibungen publiziert, auf die sich Konsortien bewerben können. Auch gibt es bei SWEET keine fixen Vorgaben zu «Matching Funds», d. h. zum Anteil an eigenen bzw. Drittmitteln, die für ein Projekt aufgebracht werden müssen. SWEET fördert über Ausschreibungen grössere Konsortien, die sich aus verschiedenen Hochschulen, Universitäten und Partnern aus Wirtschaft und öffentlicher Hand zusammensetzen.



Die erste Ausschreibung zum Thema «Integration erneuerbarer Energien in ein nachhaltiges und resilientes Schweizer Energiesystem» wurde Anfang 2021 abgeschlossen. Die vier erfolgreichen Konsortien DeCarbCH, EDGE, PATHFNDR und SURE haben ihre Forschungsarbeiten 2021 aufgenommen. Das Konsortium DeCarbCH («Decarbonization of Switzerland») fokussiert auf die Dekarbonisierung von Heiz- und Kühlsystemen und verfolgt das Ziel, den Einsatz von erneuerbaren Energien sowohl im Gebäudebereich, als auch im Industrie- und Dienstleistungssektor zu fördern. Bei EDGE («Integrating very high shares of decentralized renewable energy into the Swiss energy system») liegt das Hauptziel darin aufzuzeigen, wie in der Schweiz ein hoher Anteil dezentraler erneuerbarer Energiebereitstellung erreicht werden kann, mit einem Schwerpunkt im Strombereich. Das

Konsortium PATHFNDR («Pathways to an efficient future energy system through flexibility and sector coupling») wiederum untersucht, wie der Umbau des Schweizer Energiesystems erfolgen muss, damit es einen grösseren Anteil an erneuerbarer Energie aufnehmen kann. Das vierte Konsortium aus dem ersten Call SURE («Sustainable and Resilient Energy for Switzerland») soll aufzeigen, wie die Energieversorgungssicherheit in einem in der Zukunft dekarbonisierten Energiesystem gewährleistet werden kann und entwickelt hierzu neue Szenarien.

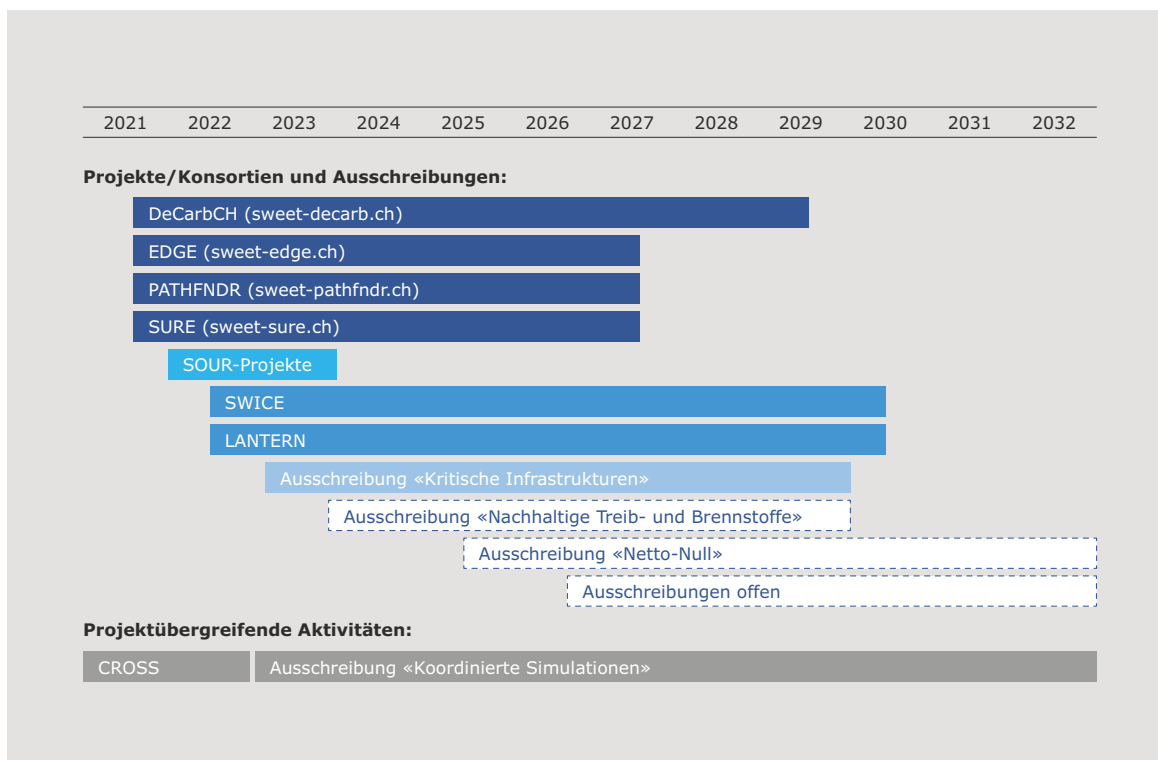
Neben den SWEET-Konsortien werden mit dem Instrument SOUR («SWEET Outside-the-box Rethinking») bewusst unkonventionelle Projekte gefördert. In einer ersten SOUR-Ausschreibung – zum selben Leitthema wie die erste SWEET-Ausschreibung – erhielten vier ausgewählte Projekte einen Zuschlag.

Die zweite SWEET-Ausschreibung mit dem Titel «Living & Working» wurde im Frühjahr 2021 publiziert. In geografisch klar umrissenen (sub)urbanen Gebieten soll untersucht werden, wie Energiebereitstellung und -verteilung effizient und kostengünstig sichergestellt und der Energieverbrauch minimiert werden kann. Mit Kopplung der Sektoren «Gebäude» und «Mobilität» und durch Technologieadaption und Verhaltensanpassungen von Konsumenten werden neue Energiesparpotenziale aufgezeigt und quantifiziert. Hierzu starten die

Konsortien LANTERN («Living Labs Interfaces for Energy Transition») und SWICE («Sustainable Wellbeing for the individual and the Collectivity in the Energy transition») 2022 ihre Arbeiten.

Im Herbst 2021 wurde die dritte SWEET-Ausschreibung mit dem Leitthema «Kritische Infrastrukturen, Klimawandel und Resilienz des Schweizer Energiesystems» lanciert. Im Rahmen dieser Ausschreibung soll der Einfluss der Transformation der Energieversorgung auf kritischen Infrastrukturen analysiert und die Verwundbarkeit des Energiesystems gegenüber technischen, natürlichen und gesellschaftlichen Gefahren untersucht werden.

Aktuell wird ein weiteres Konsortium gesucht, welches verschiedene Simulationen der einzelnen SWEET-Konsortien übergreifend koordiniert. Als zentrale Anforderung sollen dabei nebst technischen und wirtschaftlichen Aspekten auch Erkenntnisse aus den Sozial- und Geisteswissenschaften einfließen. Die Tätigkeiten des aus dieser Ausschreibung resultierenden Konsortiums werden an die Aktivitäten von CROSS («Coordination Of Scenarios for SWEET») anschliessen. CROSS ist eine gemeinsame Aktivität der vier ersten Konsortien DeCarbCH, EDGE, PATHFNDR und SURE und wird bis Ende 2022 andauern.



DeCarbCH



EDGE



PATHFNDR



SURE



Übersicht zu Projekten/Konsortien im Förderprogramm SWEET und zu aktuellen und geplanten Ausschreibungen.

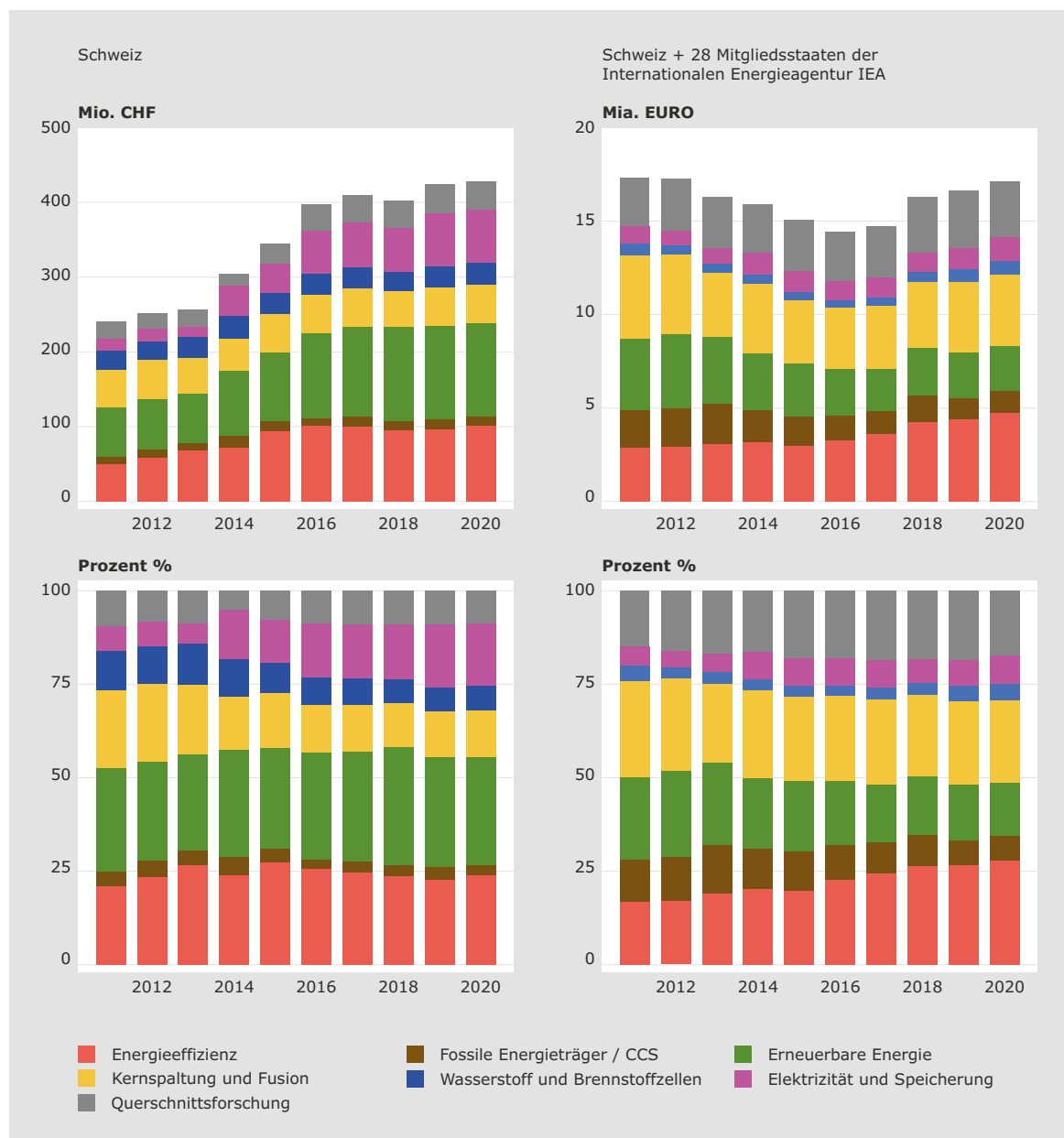
# Statistik der Schweizer Energieforschung

Seit 1977 erfasst das Bundesamt für Energie (BFE) 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. Informationen zu einzelnen Projekten können aus dem öffentlich zugänglichen Informationssystem des Bundes ([www.aramis.admin.ch](http://www.aramis.admin.ch)), des SNF ([data.snf.ch](http://data.snf.ch)), der EU ([cordis.europa.eu](http://cordis.europa.eu)) und den

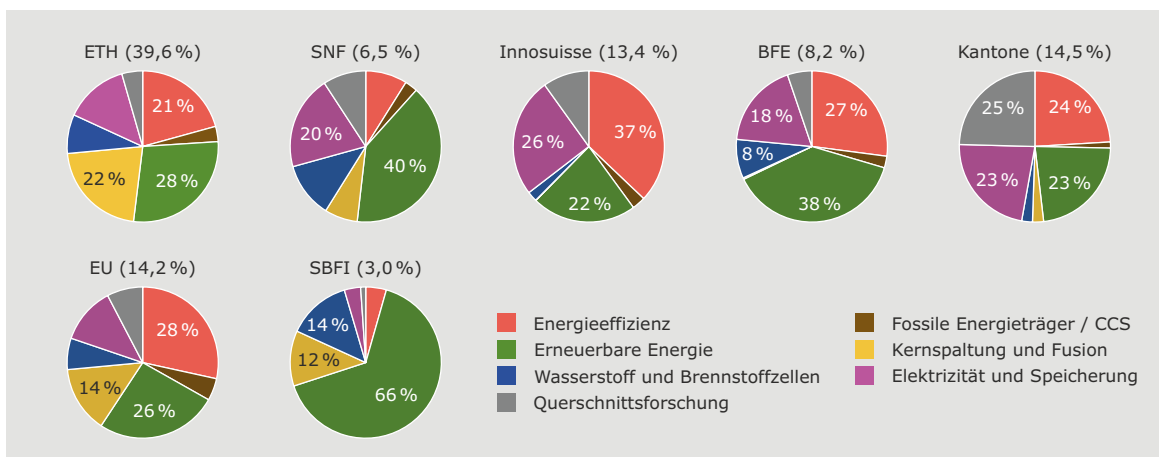
jeweiligen Webseiten der Institute eingesehen werden. 2020 hat die öffentliche Hand in der Schweiz 432 Millionen Franken für die Energieforschung aufgewendet, was 180 % des Aufwands im Jahr 2011 entspricht. Zum Vergleich liegen die Ausgaben von 29 Mitgliedsländern der Internationalen Energieagentur (IEA) zusammen (inkl. der Schweiz) bei rund 17 Mia. Euro und waren über die letzten 10 Jahre in etwa konstant.



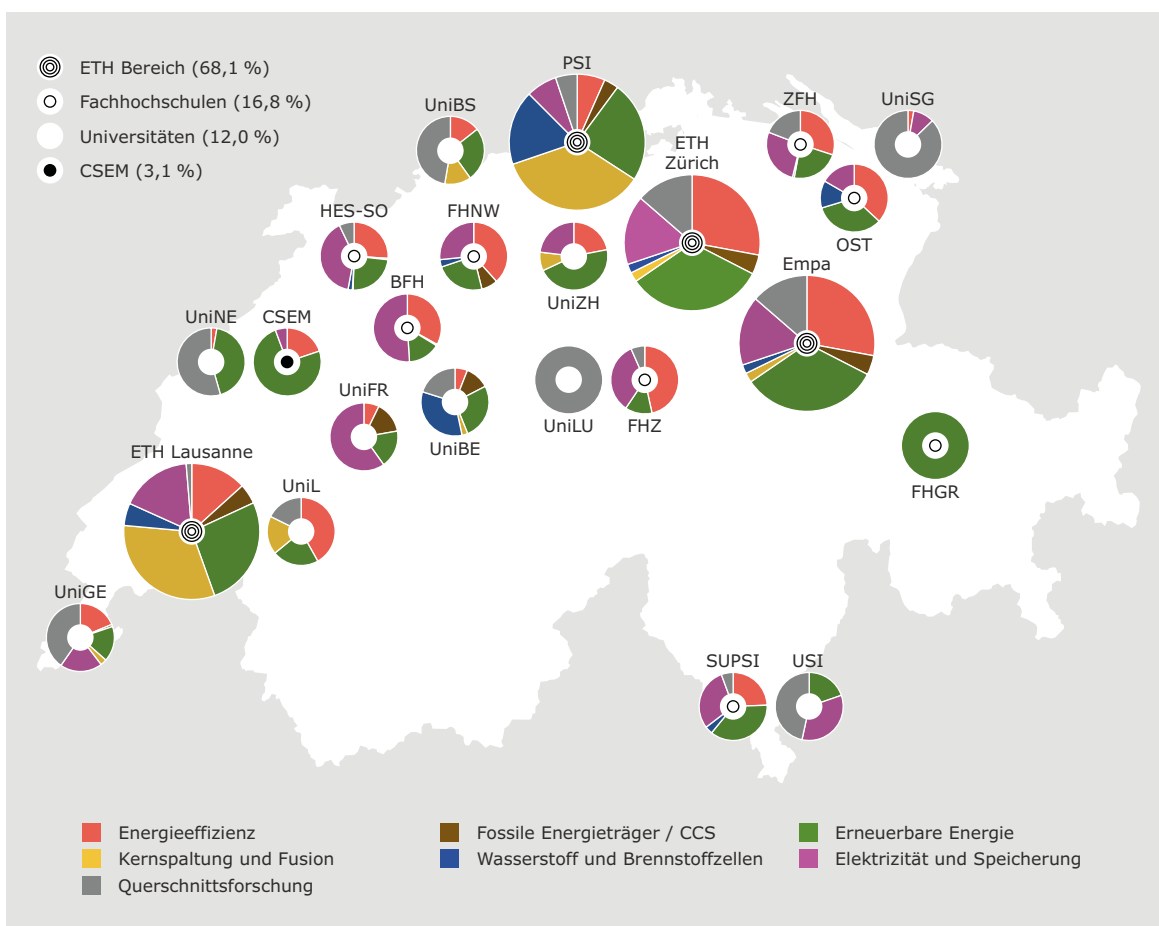
Für Energieforschung aufgewendeten öffentliche Mittel in der Schweiz (links) und in 29 Mitgliedsländern der Internationalen Energieagentur IEA (rechts). Für die Schweiz liegt dieser Aufwand im Bereich 0,3 bis 0,65 Promille des Bruttoinlandsprodukts. Die eingesetzten Mittel sind nach der Klassifikation der Internationalen Energieagentur (IEA) aufgegliedert (Quelle: Energieforschungsstatistik BFE).



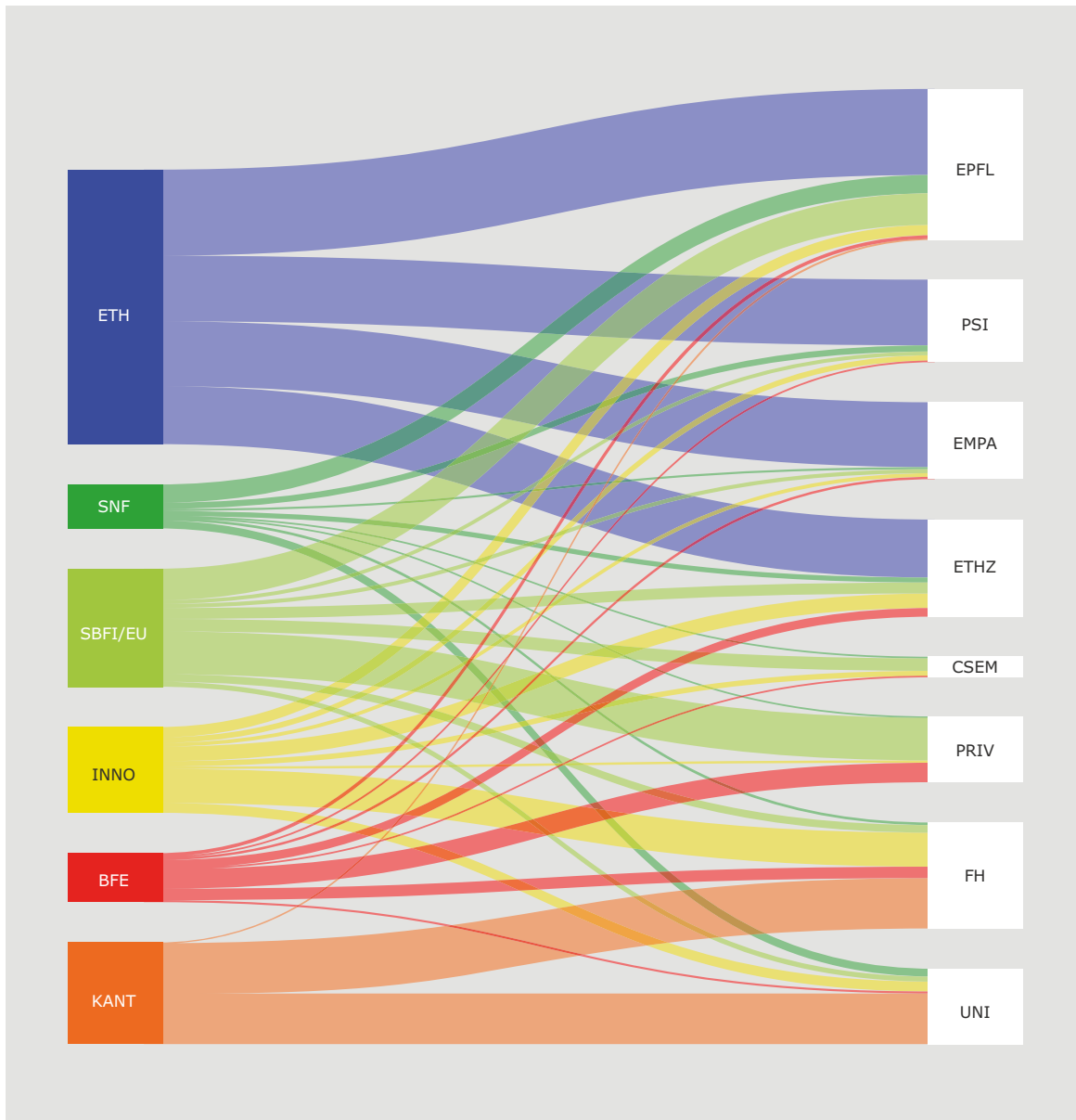




Öffentliche Mittel für die Energieforschung (2020) nach Förderstelle und Themenfeld: Rund 40 % der Mittel für die Energieforschung in der Schweiz stammen direkt aus dem ETH-Bereich, etwa 15 % aus kantonalen Mittel für Fachhochschulen und Universitäten. Der Rest sind kompetitive Fördermittel. ETH: Rat 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).



Energieforschungsthemen an Schweizer Hochschulen (2020). Die Themen sind nach der Klassifikation der Internationalen Energieagentur (IEA) aufgliedert. Der grösste Teil der öffentlichen Energieforschung (68 % 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, FHGR: Fachhochschule Graubünden, FHNW: Fachhochschule Nordwestschweiz, FHO: Fachhochschule Ostschweiz, FHZ: Fachhochschule Zentralschweiz, HES-SO: Fachhochschule Westschweiz, PSI: Paul Scherrer Institut, SUPSI: Fachhochschule der italienischen Schweiz, UniBE: Universität Bern, UniBS: Universität Basel, UniFR: Universität Freiburg, 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).



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 (Quelle: Energieforschungsstatistik BFE).

(Links) Sekundärspule für eine induktive Leistungsübertragung, um Energie kontaktlos/drahtlos aus einem Photovoltaikmodul zu übertragen («Wireless Power Transfer» WPT). Dank diesem neuen Konzept erfolgt mit der mechanischen Montage eines solchen WPT-Photovoltaikmoduls gleichzeitig die elektrische Verbindung ohne klassische Stecker, was die Zuverlässigkeit der Photovoltaiksystemtechnik erhöhen kann. Die abgebildete Spule besteht aus 280 Windungen, gleichmässig auf sieben Lagen verteilt, und ermöglicht die Anbindung an einen Photovoltaiksystemstring mit hoher Stringspannung von über 1400 V. Dabei ist die Leistungselektronik – anders als heute – im Modul einlaminiert. In einem BFE-Projekt konnte ein Wirkungsgrad von  $97.9\% \pm 0.83\%$  (Kopplungskoeffizient  $k=1$ ) für das Spulensystem verifiziert werden. Unter Einbezug der modellierten Verluste der Leistungselektronik auf Basis des Resonanzwandlers und Gleichrichters ist ein Gesamtwirkungsgrad von 95,7 % möglich (Quelle: ZHAW).





# Batterien für die Energiewende

Die Verbreitung der Elektromobilität auf Schweizer Strassen ist auf leistungsfähige Batterien angewiesen. Batterien sind zudem ein wichtiges Instrument, um Solarstrom von den sonnigen Tagesstunden in den verbrauchsstarken Abend zu verlagern. Diese Anwendungen machen deutlich: Batterien und andere elektrochemische Speicher sind eine Schlüsseltechnologie für den Umbau des Energiesystems in Richtung Nachhaltigkeit.

Die im Jahr 2017 von der Europäischen Union (EU) ins Leben gerufene «Europäische Batterieallianz», welche den Aufbau einer eigenständigen, wettbewerbsfähigen und nachhaltigen Wertschöpfungskette für Batterietechnologien in Europa verfolgt, unterstreicht die zentrale Wichtigkeit dieser Technologie für die Energiewende. Dazu wurden von der Europäischen Kommission 2019 und 2021 insgesamt 20 Milliarden Euro an staatlichen Beihilfen für sogenannte «Wichtige Projekte von gemeinsamem europäischem Interesse» (Important Projects of Common European Interest, IPCEI) bewilligt, welche von verschiedenen EU-Mitgliedstaaten angemeldet wurden. Weiter werden bis 2027 rund 925 Millionen Euro aus dem EU-Haushalt direkt für Batterie-forschungsprojekte bereitgestellt. Eine indirekte Förderung auf europäischer Ebene erfolgt auch über das «Fit-for-55»-Gesetzespaket, welches die CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für Fahrzeuge verschärft und Vorschriften für den Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur einführt.

In der Schweiz nimmt die Batterie-forschung ebenfalls einen immer höheren Stellenwert ein. So haben sich im Jahr 2020 verschiedene Forschungs-

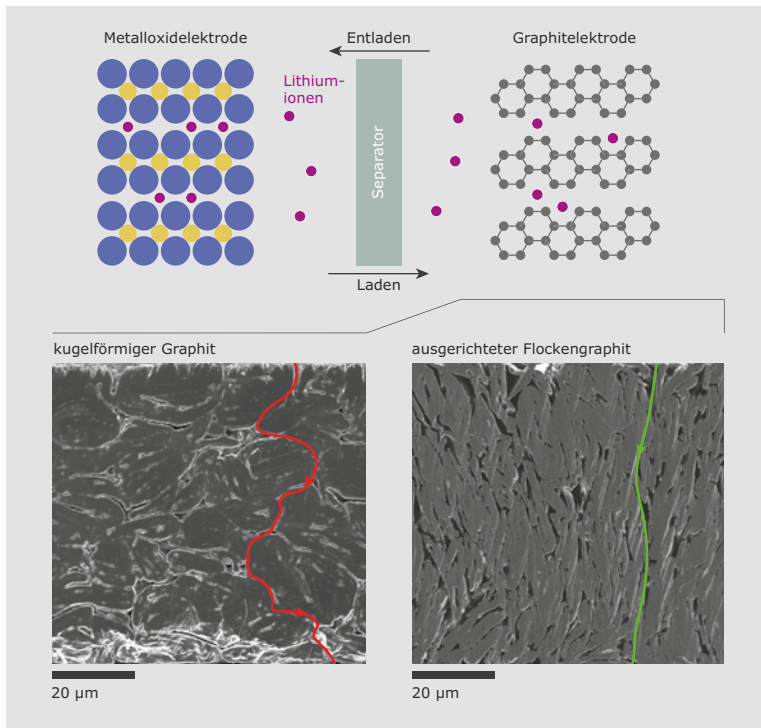
einrichtungen und Industrieunternehmen zur Innovationsplattform iBAT zusammengeschlossen. Die Wettbewerbsfähigkeit der Schweiz in dieser Kerntechnologie soll durch diese Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie weiter gestärkt werden. In der Schweiz gibt es zwar keine ganz grossen Batteriehersteller, Forschung und Zulieferung von Halbfabrikaten und Maschinen sind aber hierzulande von grösserer Bedeutung.

Batterieforschungsaktivitäten in der Schweiz zielen beispielsweise auf eine Verbesserung des Lithium-Ionen-Akkumulators ab. Dieser wiederaufladbare Batterietyp wurde in den späten 1970er Jahren entwickelt und findet seit den 1990er Jahren zunehmend Verbreitung. Heute kommt diese Batterietechnologie in verschiedensten Formen in Elektroautos, Mobiltelefonen und vielen weiteren Anwendungen zum Einsatz. Zentral für die Funktionsweise sind die namensgebenden Lithium-Ionen: die positiven Ladungsträger bewegen sich beim Laden des Akkus von der positiven zur negativen Elektrode und beim Entladen in die Gegenrichtung. Die Schweizer Firma Batrion, welche als Spin-Off im Jahr 2015 aus der Eidgenös-

«Roll-to-Roll»-Fertigungsanlage der Schweizer Firma Batrion für die industrielle Produktion von neuartigen Graphit (Kohlenstoff)-Elektroden, welche die Ladezeiten von Lithium-Ionen-Batterien signifikant reduzieren sollen (Quelle: Batrion AG).







(Oben) Bei Lithium-Ionen-Zellen werden beim Laden und Entladen Lithiumionen zwischen den Elektroden ausgetauscht. (Unten) Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Graphitelektroden mit (links) konventionellem kugelförmigem Graphit und mit (rechts) ausgerichtetem Graphitpartikeln, die in einem von der Schweizer Firma Batttrion entwickelten Verfahren hergestellt werden. Rechts sind Diffusionswege für Lithiumionen deutlich kürzer (Quelle: Batttrion).

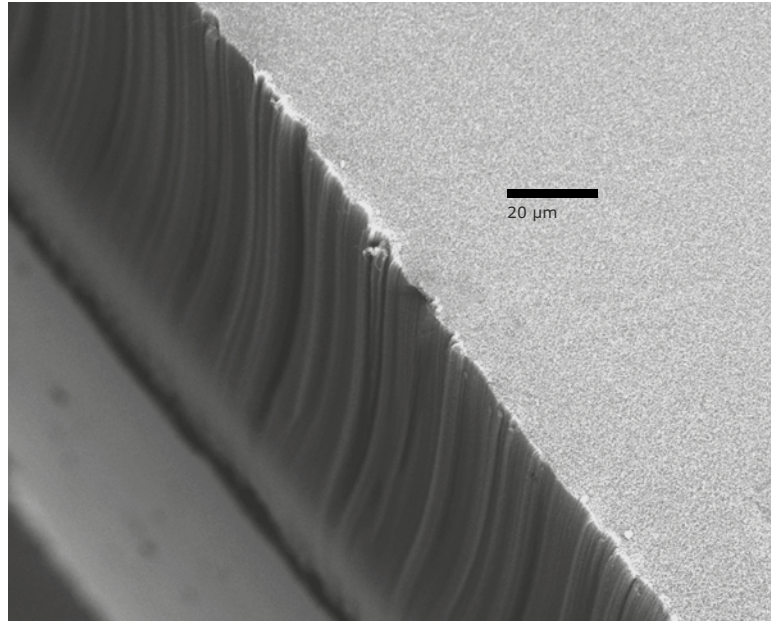
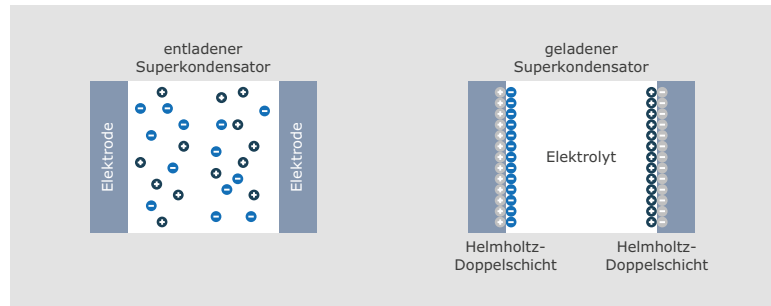
sischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) hervorgegangen ist, beschäftigt sich dazu mit der negativen Elektrode von Lithium-Ionen-Batterien, welche typischerweise aus Graphit (Kohlenstoff) besteht. Batttrion hat in jahrelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeit die Mikrostruktur von solchen Graphitelektroden verbessert, so dass die Einlagerung von Lithium-Ionen in die Elektroden schneller erfolgt. Die Technologie bietet damit das Potenzial, die Ladezeit eines Elektrofahrzeugs deutlich zu reduzieren.

Die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa entwickelt Hochtemperaturbatteriezellen auf Natrium-Nickelchlorid-Basis mit flacher Geometrie, die sich besser herstellen lassen im Vergleich zu herkömmlichen Röhrengermetrien. Die passiven Zellkomponenten, der Festelektrolyt sowie die negative Elektrode aus geschmolzenem Natrium-Metall tolerieren hohe Raten für Lade- und Entladeströme (Quelle: Empa).



Batterien mit Natrium-Nickelchlorid-Zellen stellen eine bisher eher wenig verbreitete Technologie dar. Die Faszination für diesen Batteriespeicher rührt nicht zuletzt daher, dass er auf der Basis von Kochsalz (Natriumchlorid) arbeitet. Alle erforderlichen Rohstoffe zum Bau der Batteriezellen sind in ausreichendem Mass vorhanden und relativ günstig verfügbar. Allerdings arbeiten diese Batteriezellen bei Temperaturen von rund 300 °C und müssen daher thermisch isoliert werden. Bisher kommt diese wartungsarme Technologie, die auch bei tiefen Aussentemperaturen verlässlich arbeitet, vor allem in Nischenanwendungen wie der Stromversorgung von Mobilfunk- und Notstromanlagen zum Einsatz. Künftig könnte sie beispielsweise auch in stationären Netzbatterien dazu dienen, Stromproduktion und -nachfrage auszugleichen.

(Oben) Vereinfachtes Prinzip eines Superkondensators (Doppelschichtkondensators) mit Energiespeicherung in Helmholtzdoppelschichten von negativen und positiven Ionen, die sich spiegelbildlich an den Elektroden anordnen. (Unten) Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Elektrode mit einer Vielzahl von vertikal ausgerichteten Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon nanotubes) (Quelle: EPFL).



Die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa arbeitet im Rahmen eines vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projektes an der Optimierung verschiedener Komponenten von Natrium-Nickelchlorid-Zellen. Speziell wurden Zellen mit einer flachen Geometrie entwickelt im Gegensatz zu klassischerweise röhrenförmigen Zellen. Die Röhrenform heutiger Natrium-Nickelchlorid-Zellen ist mit einer Komplexität bei Herstellung, Zusammenbau und Qualitätskontrolle verbunden, welche durch flache Zellen vereinfacht wird. Umgesetzt werden die Forschungsergebnisse durch das Tessiner Unternehmen FZSoNick.

Um die Verbesserung einer bestehenden Speichertechnologie geht es auch in einem weiteren vom BFE geförderten Projekt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL). Im Fokus stehen hier sogenannte Superkondensatoren. Die Elektroden solcher Speicher sind durch einen Elektrolyten miteinander verbunden, der positiv und negativ geladene Ionen enthält. Beim Anlegen einer äusseren Spannung erfolgt die Energiespeicherung in sogenannten Helmholtz-doppelschichten von negativen und positiven Ionen, die sich spiegelbildlich an den Elektroden anordnen. Im Unterschied zu Batterien erfolgt keine chemische Stoffänderung. Superkondensatoren zeichnen

sich durch hohe Wirkungsgrade und hohe Leistungsdichten aus und spielen in der Elektromobilität eine Rolle, um Leistungsspitzen abzudecken. Herkömmliche Superkondensatoren eignen sich aber weniger als Energiespeicher. Im Projekt der EPFL soll die Energiedichte von Superkondensatoren erhöht werden, um so neue Anwendungsgebiete zu ermöglichen. Dazu gehört beispielsweise die Stromversorgung von Sensoren, wie sie immer öfter in vernetzten intelligenten Geräten («Smart Devices») eingesetzt werden. Bei den Elektroden der an der EPFL untersuchten Superkondensatoren handelt es sich um röhrenförmige Gebilde aus Kohlenstoffatomen, sogenannten «Carbon Nanotubes» mit einem Durchmesser von lediglich wenigen Nanometern. Die Elektroden werden mit

elektrochemisch aktiven Materialien beschichtet, womit sich die Energiespeicherdichte erhöhen lässt.

Mit der Frage, wie elektrische Speicher am besten in die Stromversorgung eingebunden werden, befasst sich insbesondere die Berner Fachhochschule. In einem vor kurzem abgeschlossenen Projekte wurde untersucht, wie Betreiber von Solaranlagen mit Batteriespeichern diese «netzdienlich» einsetzen können, das heisst, in einer Art und Weise, dass die Stromverteilnetze möglichst wenig stark belastet werden. Mit dem Einsatz von netzdienlichen Algorithmen für den Lastausgleich können Überlastungen von Stromleitungen und Transformatoren deutlich reduziert und in vielen Fällen komplett verhindert werden.





Sorptionsprozesse spielen in der Industrie seit langem eine wichtige Rolle. Ein jüngeres Anwendungsbeispiel ist das Verfahren zur direkten Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre der Schweizer Firma Climeworks. In einer ersten Anlage in Hinwil, welche 2017 in Betrieb ging, werden pro Tag 2,5 Tonnen an CO<sub>2</sub> abgeschieden. Die Industrialisierung und Skalierung wird weiter vorangetrieben, etwa mit einer grösseren Anlage in Island, wo CO<sub>2</sub> abgeschieden und anschliessend im Untergrund gespeichert wird. (Bildquelle: Climeworks).

## Energieeffiziente Sorptionsprozesse in der Verfahrenstechnik

In vielen Industrieunternehmen kommen Adsorber zum Einsatz, etwa um unerwünschte Farb-, Geruchs- oder Giftstoffe aus Gasen und Flüssigkeiten zu entfernen. Solche technischen Systeme sind oftmals überdimensioniert und weisen daher einen zu hohen Energiebedarf auf. Mit einer richtigen Dimensionierung lassen sich Energie und Material einsparen.

In der Verfahrenstechnik versteht man unter der «Absorption» von Stoffen den Prozess der Aufnahme von Atomen, Molekülen oder Ionen in einer anderen Phase, so etwa die Aufnahme von Gasmolekülen in einem Feststoff oder in einer Flüssigkeit. Im Gegensatz dazu bezeichnet «Adsorption» den Vorgang der Anlagerung allein an der Oberfläche. «Desorption» steht für den inversen Prozess, wo Gasmoleküle einen Fest-

körper oder eine Flüssigkeit verlassen und in die Gasphase übergehen.

Sorptionsprozesse, d. h. Abfolgen von Absorption/Adsorption und Desorption spielen in der Industrie eine wichtige Rolle, um beispielsweise die Luft eines Lackierwerks von Lösungsmitteln zu reinigen. Lebensmittel- oder Chemieunternehmen nutzen solche Verfahren zur Trennung von Gasgemischen. Von

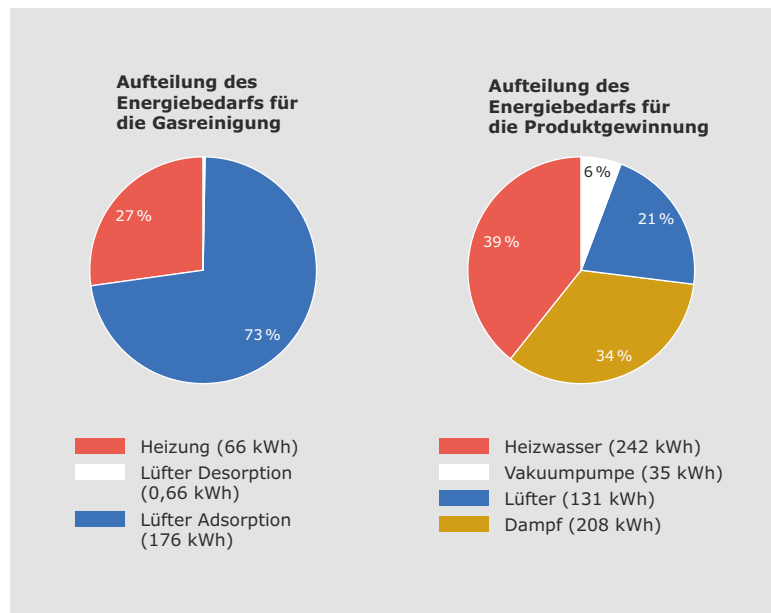
grosser Bedeutung sind Sorptionsprozesse auch in der Umwelt- und Energietechnik.

Aus energetischer Sicht besteht bei Adsorbersystemen in der Industrie ein grosses Optimierungspotenzial. Oftmals werden Systeme nämlich überdimensioniert und weisen hohe Sicherheitsmargen auf, was den den Energie- und Materialverbrauch in die Höhe treibt und unnötige Kos-





ten verursacht. In mehreren vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projekten hat die Hochschule Luzern hierzu in den vergangenen Jahren Optimierungsmöglichkeiten angeschaut. Systematisch wurde das energetische Einsparpotenzial von Sorptionsprozessen analysiert und nach geeigneten Vorgehensweisen gesucht, um dieses auszuschöpfen. Aus den Arbeiten resultierte ein Leitfaden, mit dem Adsorptionsanlagen besser geplant und dimensioniert werden können. Ein zentraler Schritt besteht in der Erstellung eines mathematisch-physikalischen Modells, das den jeweiligen Adsorptionsprozess quantitativ beschreibt. Ein solches Modell kann nach der Validierung für die Sensitivitätsanalyse und die Optimierung des Adsorptionsprozesses herangezogen werden. Mit einer optimierten und bedarfsgerechten Dimensionierung etwa von Gasreinigungsanlagen lassen sich so 25 bis 30 Prozent an Energie einsparen.



Sorptionsprozesse sind von zentraler Bedeutung bei der Reinigung von Gasen oder bei der Gewinnung eines Stoffes aus einem Gasgemisch. Bei der Gasreinigung (links) entfallen rund drei Viertel des Energiebedarfs auf die Stromversorgung des Ventilators, welcher das Gasgemisch durch den Adsorber befördert. Ein Viertel des Energiebedarfs geht auf den Wärmebedarf für die Desorptionsluft, welche die am Adsorber anhaftenden Stoffmoleküle löst. Anders verteilt sich der Energiebedarf beim Anwendungsfall Produktgewinnung (rechts). Hier wird viel Wärme für die Produktion von Heizwasser und Dampf benötigt und nur knapp ein Viertel für den elektrischen Antrieb des Ventilators. Detaillierte Analyse der Fachhochschule Luzern hierzu haben gezeigt, dass entsprechend dem Ziel der Anwendung von Sorptionsprozessen unterschiedliche energetische Optimierungsmöglichkeiten bestehen (Quelle: Fachhochschule Luzern, BFE-Schlussbericht «Empfehlungen zum Energieeffizienten Einsatz von Adsorptionsprozessen aus der Gasphase», 2021).



## Zusatznutzen von Photovoltaikwechselrichtern in der Industrie

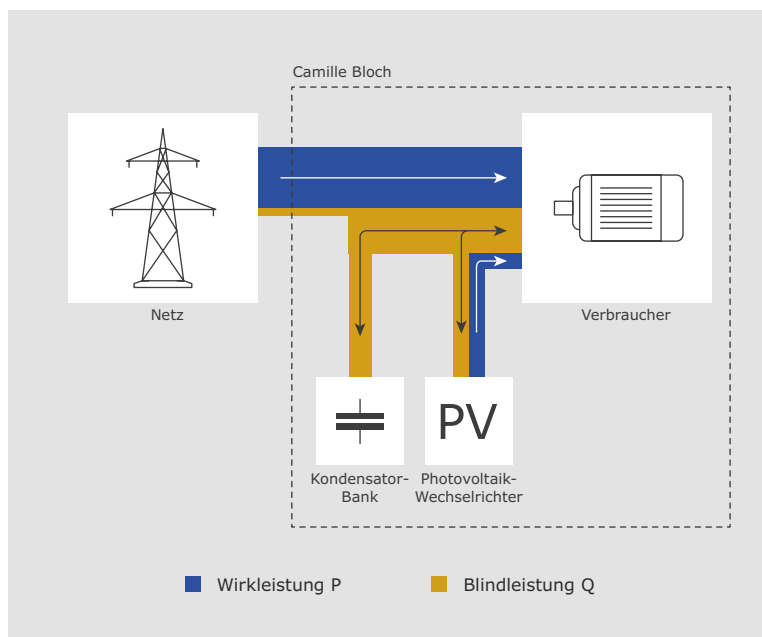
Photovoltaikanlagen im industriellen Umfeld sind speziell interessant, da hier ein grosser Teil des produzierten Solastroms selbst verbraucht werden kann. Die dabei eingesetzten Wechselrichter können zusätzlich zur Kompensation von Blindleistung genutzt werden, welche etwa durch den Betrieb von Elektromotoren entsteht. Erfolgt diese Kompensation schon vor dem Netzanschlusspunkt, können so Kosten reduziert werden, da Entgelte für vom Stromnetz aufgenommene Blindleistung vermieden werden. In der Schokoladenfabrik Camille Bloch im Berner Jura wurde dieser innovative Einsatz von Photovoltaikwechselrichtern erfolgreich erprobt.

Stromverbraucher in Industrieanlagen wie Elektromotoren benötigen sowohl Wirk- als auch Blindleistung. Wirkleistung (P) entspricht dem Teil, der für die tatsächliche Arbeit eingesetzt wird, während Blindleistung (Q) nicht direkt genutzt werden kann und durch induktive und kapazitive Lasten beim Einsatz Wechselstrom entsteht. Der Bezug von Blindleistung aus dem Netz wird vom Stromversorger nur bis zu einem Grenzwert toleriert, für grosse Mengen an Blindleistung wird diese in Rechnung gestellt, da dadurch das elek-

trische Netz stärker belastet wird. In der Industrie werden daher häufig Anlagen zur Vermeidung (Kompensation) von Blindleistung installiert.

Induktive Blindleistung wird in Unternehmen in der Regel mit Kondensatorbänken ausgeglichen. Hierfür können aber auch Photovoltaikwechselrichter neuerer Bauart eingesetzt werden, welche den Gleichstrom aus den Photovoltaikmodulen für die Netzeinspeisung in Wechselstrom umwandeln. In einem Projekt unterstützt durch das Bundesamt

für Energie (BFE) wurde eine solche Blindleistungskompensation in der Schokoladenfabrik von Camille Bloch in Courtelary (BE) erprobt. Auf dem Dach der Fabrik ist eine Photovoltaikanlage mit 260 kW Leistung installiert, welche zehn Prozent des firmeneigenen Strombedarfs deckt. Im Rahmen des Projekts wurden die Wechselrichter zur Kompensation von Blindleistung herangezogen. Je nach Bedarf kompensierten sie Blindleistung im Umfang von bis zu 200 kvar (Kilovoltampere reaktiv). Die bestehende Blindleistungskom-



Bei industriellen Stromverbrauchern wie Motoren entsteht auf Grund einer Phasenverschiebung von Strom und Spannung, welche das elektrische Netz belastet. Neben Kondensatoren können moderne Photovoltaikwechselrichter dazu genutzt werden, diese Blindleistung zu kompensieren. In einem vom Bundesamt für Energie (BFE) geförderten Projekt wurde dies in der Schokoladenfabrik von Camille Bloch erfolgreich demonstriert.



(Oben) Photovoltaikanlage auf dem Dach der Schokoladenfabrik von Camille Bloch in Courtelary. (Unten) Blick in die Schokoladenfabrik. Alle elektrisch angetriebenen Maschinen verursachen Blindströme, welche herkömmlicherweise mit Kondensatorbänken kompensiert werden (Bildquellen: B. Vogel).

ensionsanlage aus Kondensatoren hat eine Kapazität von 720 kvar.

Die Tests bei Camille Bloch haben gezeigt, dass Photovoltaikwechselrichter ebenso gut geeignet sind zur Kompensation von Blindleistung wie

herkömmliche Kondensatorbänke. Photovoltaikwechselrichter können auch ausserhalb der Betriebszeiten der Photovoltaikanlage aktiviert werden, da sie unabhängig von der Solarstromproduktion Blindleistung kompensieren können.



# Verlässlicher Solarstrom dank guter Einstrahlungsprognosen

Die Stromproduktion von Photovoltaikanlagen unterliegt Schwankungen. Für den Stromertrag ist neben der Tageszeit das Wetter eine zentrale Einflussgrösse. Bereits heute lässt sich der Ertrag auf mehrere Tage hinaus mit guter Genauigkeit vorhersagen. Akurate Ertragsprognosen werden immer wichtiger, um mit zunehmendem Photovoltaikausbau eine sichere Stromversorgung garantieren zu können.

Der ideale Zeitraum zur Gewinnung von Solarstrom ist ein strahlender Tag im Frühjahr: die Sonne steht steil am Himmel, die Atmosphäre ist frei von Wolken oder Dunst und die Sonnenstrahlen treffen ungehindert auf die Erde. Eine leichte Brise kühlt die Photovoltaikmodule und fördert damit ihre Effizienz bei der Energieumwandlung. Unter solch günstigen Voraussetzungen spendet die Sonne im Schweizer Mittelland rund 1000 Watt pro Quadratmeter. Davon wandelt eine Solaranlage rund einen Fünftel in Strom um.

Nicht immer jedoch ist das Wetter der solaren Stromerzeugung so freundlich gesinnt. Bei leichter Bewölkung sinkt der Ertrag auf rund die Hälfte, an einem Regentag im November auf einen Zehntel. So launisch wie das Wetter, so überraschend hoch kann der Stromertrag sein, der bei ganz speziellen Verhältnissen kurzzeitig erreicht wird. So können ganz vereinzelt Situationen entstehen, wo die auf eine Photovoltaikanlage einfallende Strahlung grösser ist als die Strahlung am oberen Rand der Erdatmosphäre, nämlich wenn durch Reflexionen – etwa an einer weissen Gewitterwolke –

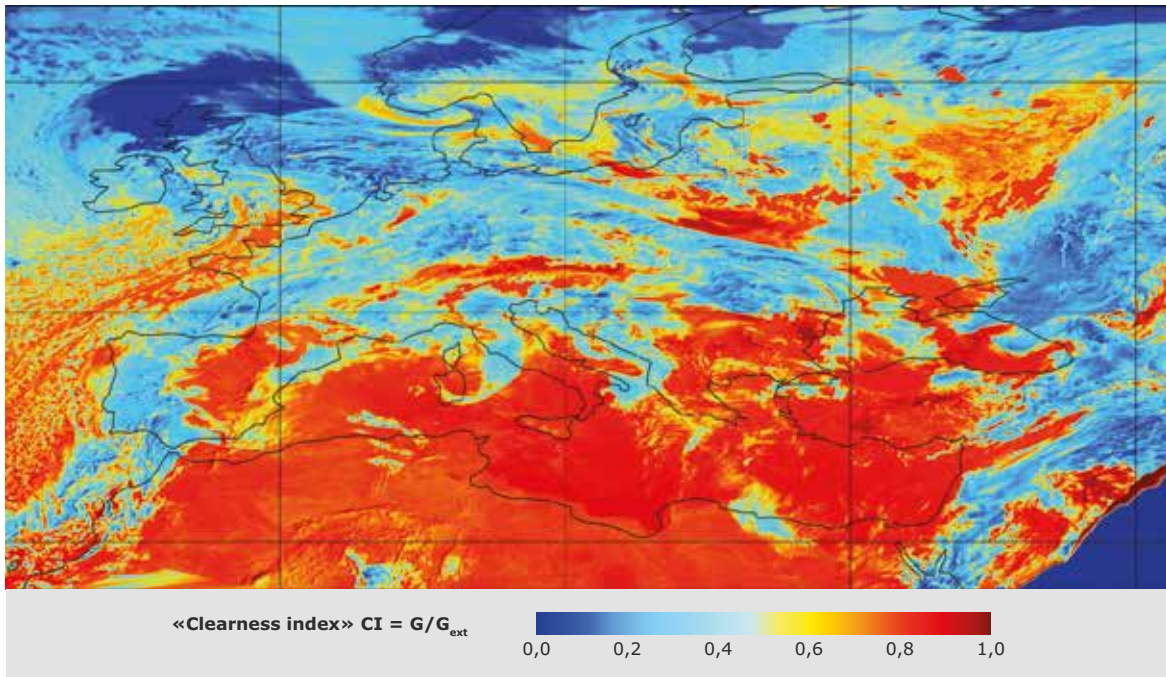
zusätzliche Strahlung auf eine Photovoltaikanlage einfällt.

Wer Solarstrom produziert, muss mit Erträgen rechnen, die sich im Zeitverlauf stark ändern. Die Meteorologie kann diese Schwankungen nicht beeinflussen, aber sie kann voraussagen, wie sich Erträge in den nächsten Stunden und Tagen entwickeln können. Ertragsprognosen schaffen Berechenbarkeit für den Betrieb von Solaranlagen und bilden zugleich die Grundlage für eine sichere Stromversorgung. Wenn die Betreiber von elektrischen Netzen dank der Vorhersagen die zu erwartende Strommenge kennen oder wissen, wieviel aus anderen Quellen beschafft werden muss, können sie Netzprobleme durch proaktive Massnahmen vorbeugen. Dazu gehören der Einsatz von Batteriespeichern und die Steuerung von Wärmepumpen und anderen elektrischen Verbrauchern. Die nationale Netzgesellschaft Swissgrid nutzt Prognosedaten heute ebenso wie die grossen Schweizer Elektrizitätswerke. Von Bedeutung sind Ertragsvorhersagen auch im Stromhandel, da damit die Preisentwicklung an den Strombörsen besser abgeschätzt werden kann.

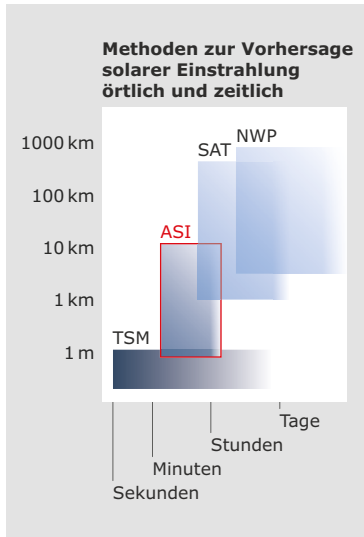
Hohe Luftströmungen können mehrere Male im Jahr Staub aus der Sahara bis in die Schweiz transportieren. Bei solchen Wetterlagen kann sich der Ertrag von Photovoltaikanlagen um bis zu 10 % verringern. (Bildquelle: Jan Remund)







«Clearness Index» CI über Europa: der «Clearness Index» ist definiert als das Verhältnis zwischen der am Boden gemessenen globalen Sonneneinstrahlung  $G$  und der am oberen Rand der Atmosphäre geschätzten Sonneneinstrahlung  $G_{ext}$ . Dieser wird für die Vorhersage der solaren Einstrahlung herangezogen. Die Abbildung stammt vom 5. Februar 2021, wobei es sich um eine Drei-Stunden-Vorhersage handelt, und stammt vom satellitenbasierten Nowcastsystem Cloudmove (Quelle: Meteotest AG).



Verschiedene Methoden zur Vorhersage der Solarstrahlung, örtlich und zeitlich, basieren auf statistischen Modellen mit verschiedenen Inputgrößen. ASI = All sky imagers: Wolkenkameras zur Modellierung von Wolkenbewegungen. SAT: Satellitenbilder zur Modellierung von Wolkenbewegungen. NWP = Numerical Weather Prediction: detaillierte Modellierung der Entwicklung in der Atmosphäre auf Grund von Boden-, Luft- und Satellitendaten. TSM = time-series models: die Vorhersage basiert einzig auf lokalen Messdaten (Strahlung oder elektrische Leistung) ohne physikalische Modelle (Quelle: nach IEA PVPS Task 16, Solar Resources Handbook, 2021).

Solarstromerträge lassen sich heute bereits recht zuverlässig prognostizieren. So lässt sich die Summe des in Deutschland produzierten Solarstroms für den Folgetag mit einer Genauigkeit von rund 5 % im Stundenmittel vorhersagen: wird etwa am Vortrag für den Folgetag im Zeitraum von 11 bis 12 Uhr ein landesweiter Solarertrag von 20 GWh prognostiziert, liegt der tatsächliche Ertrag im Bereich zwischen 19 und 21 GWh. Eine solche Prognose bezieht sich auf das ganze Land, für eine einzelne Solaranlage ist die Prognosegenauigkeit weniger gut. Im Vergleich zum nördlichen Nachbarn sind die Prognosefehler in der Schweiz tendenziell grösser, dies wegen der kleineren Landesfläche und der vielfältigen Topografie.

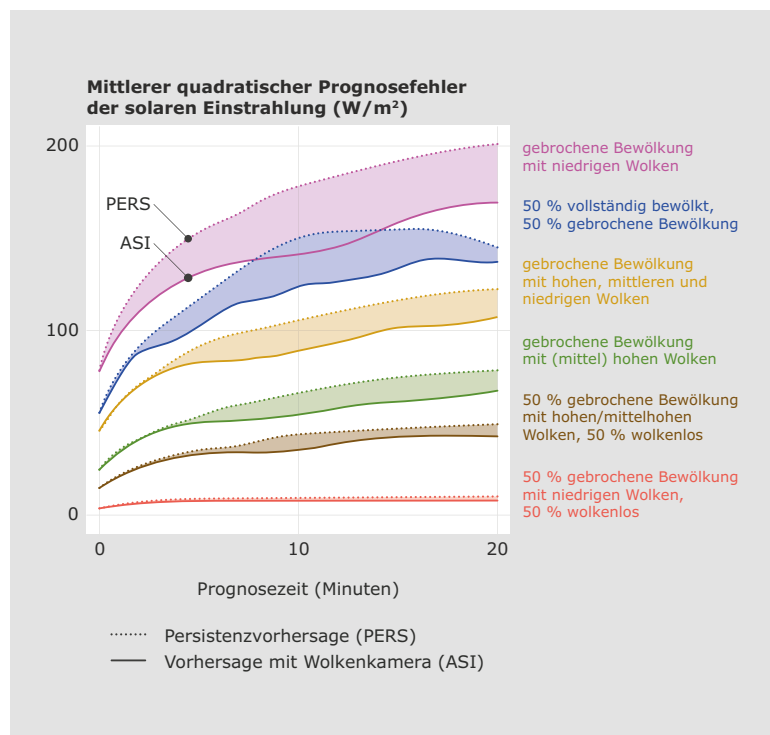
Im Jahr 2017 hat sich unter dem Dach der internationalen Energieagentur (IEA) das Expertengremium «Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications» mit Fachpersonen aus 21 Staaten gebildet, welche das Ziel verfolgt, die Ver-

lässlichkeit von Wetterprognosen für Anwendung von Photovoltaik und konzentrierenden Solarkraftwerken zu verbessern. Ein kürzlich abgeschlossenes Projekt dieser Expertengruppe untersuchte die Qualität von Einstrahlungsprognosen basierend auf Wolkenkameras («All Sky Imager» ASI) in einem Quervergleich verschiedener Systeme. Bei dieser Methode wird der Himmel in kurzen Abständen abphotographiert und eine Software analysiert die Wolkenbilder, um aus deren Veränderungen eine Prognose der Solareinstrahlung abzuleiten. Solche kurzzeitigen Prognosen können etwa dazu dienen, in Hybridanlagen mit Photovoltaik und Dieselgeneratoren letztere automatisch zu drosseln, wenn in Kürze mit einer hohen Solarstromproduktion gerechnet wird.

Beim Quervergleich sechs verschiedener ASI-Systeme – alles Prototypen – auf einem Testgelände im südspanischen Almería, wurde gezeigt, dass aussagekräftige Vorhersagen der Solareinstrahlung für den Zeit-

raum von wenigen Minuten möglich sind. Bei allen Systemen war der Fehler in der Vorhersage immer kleiner im Vergleich zur Persistenzvorhersage («Solarstrahlung bleibt gleich»). Zwei der bei diesem Test beteiligten Systeme wurden in der Schweiz entwickelt, eines vom Wetterdienstleister Meteotest in Zusammenarbeit mit dem Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique CSEM, das andere von der École polytechnique fédérale de Lausanne.

Die IEA-Expertengruppe beschäftigt sich auch mit Prognosen für Zeiträume von mehreren Tagen. Dafür werden detailliertere Modelle zur numerischen Wettervorhersage (engl. «Numerical Weather Prediction» NWP) herangezogen. Diese modellieren die zeitliche Veränderung der Einstrahlung in der Erdatmosphäre auf der Grundlage von Messdaten zahlreicher bodengestützter Wetterstationen, von Wetterballonen und -satelliten. Kürzlich untersucht wurden verschiedene NWP-Modelle zur Abschätzung regionaler Solarstromerträge mit Anwendungsfällen auf eine Grossregion in Italien und eine andere Region in den Niederlanden, jeweils in der Grösse des Kantons Zürich. Dabei wurden Modelle verglichen, welche maschinelles Lernen einsetzen, mit sogenannten analogen Vorhersagen, die Prognosen aus einem Vergleich der aktuellen Wetersituation mit ähnlichen Situationen in der Vergangenheit ableiten. Modelle auf Basis von maschinellem Lernen liefern tendenziell akkuratere Prognosen. Die besten Vorhersagen werden jedoch mit der Kombination verschiedener Modelle erzielt.



(Oben) SkyCam-Installation am CSEM Neuenburg (Bildquelle: CSEM). (Unten) Modelle zur Vorhersage der Solarstrahlung auf Basis von Wolkenbildern (All Sky Imager ASI) liefern zeitlich und örtlich hochaufgelöste Kurzfristprognosen für die nächsten 15–20 Minuten. Solche Vorhersagen sind nützlich, etwa zur Erkennung steiler Leistungsrampen der Photovoltaikproduktion und der Möglichkeit, Batteriespeichersysteme schonend zu betreiben, zur Regelung von Stromnetzen und für die Betriebssteuerung von Hybridkraftwerken (Photovoltaik plus Dieselgeneratoren, Photovoltaik plus Pumpspeicher). Der mittlere Quadratische Fehler der Prognose für die solare Einstrahlung bei ASI-Modellen kleiner im Vergleich zur Persistenzvorhersage (PERS: «Solarstrahlung bleibt gleich») (Quelle: nach IEA PVPS Task 16, Solar Resources Handbook, 2021).





Im Bedretto-Felslabor der ETH Zürich treibt ein Bohrgerät eine mehrere hundert Meter lange Bohrung von 22 cm Durchmesser in den Granit des Gotthardmassivs. Mit solchen Bohrungen wurde ein neues, schonendes Stimulationsverfahren zur Gewinnung von tiefer Geothermie erprobt, mit dem das Risiko für ungewollte Erdbeben bei Tiefenbohrungen minimiert wird. Teil des Forschungsprojekts waren sehr empfindliche Schallmessungen, bei denen die ETH Zürich über grosse Erfahrung verfügt. Die Messanlagen der ETH können Erschütterungen zehn Millionen mal kleiner als ein spürbares Erdbeben registrieren (Quelle: Schweizerischer Erdbebendienst der ETH Zürich, 2019).

## Wärme aus der Tiefe

Unter unseren Füßen schlummert ein fast unerschöpflicher Vorrat an Energie: Erdwärme ist praktisch überall vorhanden und steht jederzeit zur Verfügung. Aus oberflächennahen Erdschichten wird sie mit Wärmepumpen heute schon intensiv genutzt. Um Erdwärme in tiefen Erdschichten sicher nutzen zu können, ist die Forschung gefragt. Das Felslabor der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH Zürich) im Tessiner Bedrettototal leistet einen Beitrag zu dieser Forschung.

In fünf Kilometern Tiefe ist das Erdgestein bis zu 160°C heiss. Lässt sich diese Wärme an die Oberfläche befördern, kann damit die Versorgung mit erneuerbarer und CO<sub>2</sub>-freier Energie in Form von Heizwärme

und Strom massgeblich unterstützt werden. Als Methode steht in der Schweiz die sogenannte petrothermale Geothermie im Vordergrund. Dabei wird über eine Bohrung Wasser mit hohem Druck in das Felsge-

stein gepresst. Das Wasser dringt in vorhandene Felsritzen ein und weitet diese auf. Diese sogenannte Stimulation schafft im Felsgestein Hohlräume, in denen das zirkulierende Wasser die Wärme aus dem um-



liegenden Fels aufnehmen kann. Als heisser Dampf gelangt diese Erdwärme durch eine zweite Bohrung zurück an die Erdoberfläche und kann als Wärme oder allenfalls auch zur Stromproduktion genutzt werden

Im Jahr 2005 traten bei einer solchen Geothermiebohrung in Basel mehrere spürbare Erdbeben auf und das Projekt musste danach abgebrochen werden. Um solche Erschütterungen zu vermeiden, wurde seither ein schonenderes Stimulationsverfahren entwickelt und 2012 für die Schweiz patentiert. Bei diesem neuen Verfahren wird mit der Wasserinjektion nicht mehr der gesamte untere Teil des Bohrlochs unter Druck gesetzt, wie seinerzeit in Basel. Vielmehr wird das Bohrloch mit Gummimanschetten in mehrere Ab-

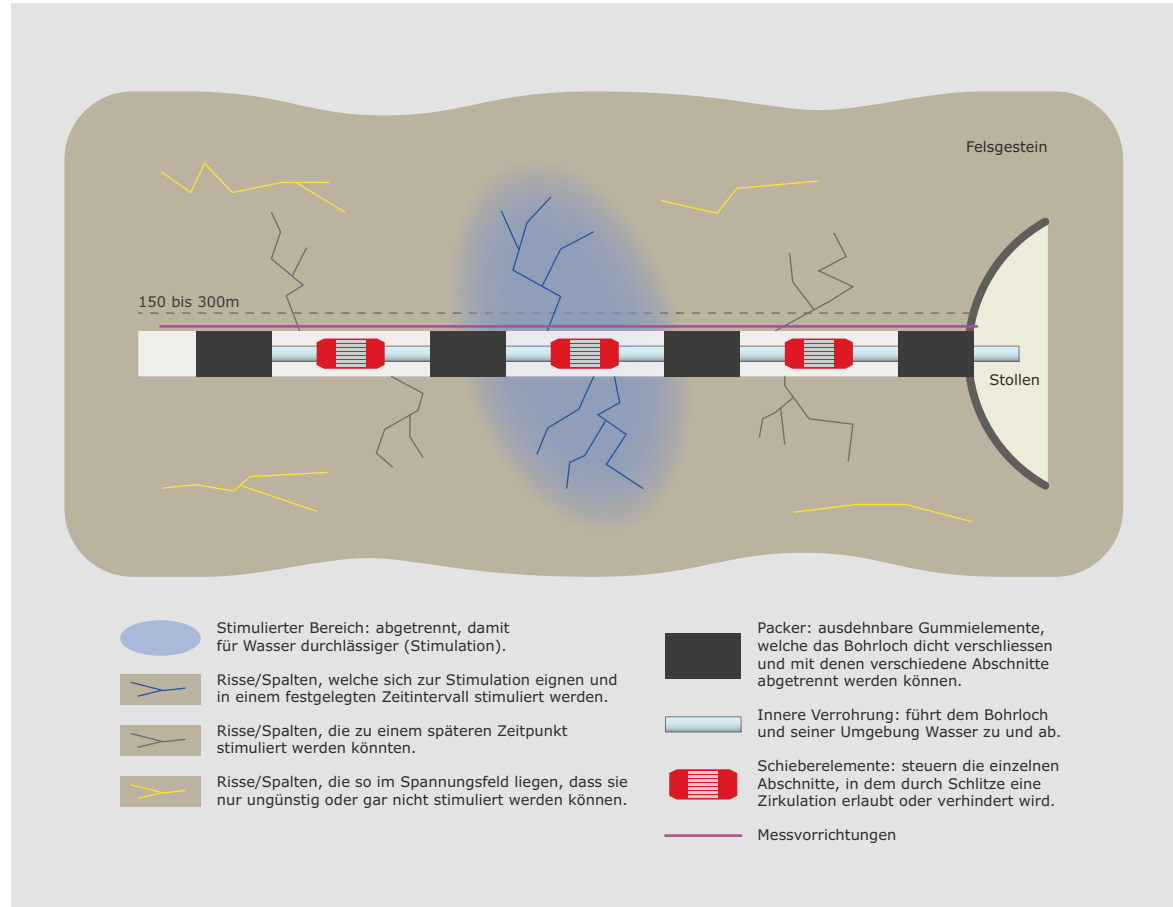
schnitte unterteilt. So lässt sich das Wasser räumlich und zeitlich gestaffelt injizieren. Unkontrolliert starke Erdbeben sollten sich damit vermeiden lassen.

Demonstriert wurde dies in einem vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projekt im Bedretto-Felslabor der ETH Zürich mit zahlreichen Tests. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Verfahren die Wasserdurchlässigkeit des Gesteins so stark erhöht werden kann, wie es für eine wirtschaftliche Wärmenutzung erforderlich ist. Gleichzeitig kann das Erdbebenrisiko bei Tiefengeothermiebohrungen auf ein Minimum reduziert werden. Zwar führten auch die Stimulationen im Bedretto-Labor zu Erschütterungen des Gesteins, aber diese fielen etwa hun-

dertausendmal schwächer aus als beim stärksten Beben beim Basler Geothermieprojekt.

Die Forschungsergebnisse aus dem Bedretto-Felslabor bilden eine wichtige Grundlage für ein geplantes Geothermie-Pilotprojekt im jurassischen Haute-Sorne. Dort soll in den nächsten Jahren in mehreren Etappen ein Kraftwerk entstehen, das Erdwärme aus einer Tiefe von bis zu 5000 Metern fördert und diese direkt oder allenfalls für die Stromproduktion nutzbar machen soll. Mit einer erfolgreichen Umsetzung dieses Pilotprojekts stünde eine Technologie bereit, die in vielen Gebieten der Schweiz zur Förderung der tiefen Geothermie eingesetzt werden könnte.

«Packer»-System im Bedretto-Felslabor der ETH Zürich, mit dem ein neues Verfahren zur schonenden Stimulation erprobt wird für die Erdwärmenutzung mit tiefer Geothermie (Grafik: BFE, nach Info ETH Zürich).





Photovoltaikpilotanlage am Agroscope-Versuchsstandort Conthey (VS), wo Module mit modulierbarer Transparenz über einer Himbeerkultur installiert sind, so dass die darunter wachsenden Pflanzen mehr oder weniger stark beschattet werden. Die Solarmodule wurden von der Schweizer Firma Insolight speziell für solche Anwendungen konzipiert (Quelle: Agroscope).

## Doppelte Ernte mit Photovoltaik in der Landwirtschaft

Die Schweiz verfolgt ambitionierte Ziele für den Ausbau der Photovoltaik. Neben Photovoltaikstrom aus Anlagen auf Hausdächern und -fassaden könnte dieser künftig auch auf Landwirtschaftsflächen geerntet werden. Aktuell wird hierzu das Potenzial abgeschätzt und es werden Vor- und Nachteile untersucht. Diese Grundlagen dienen auch für regulatorische Anpassungen, damit landwirtschaftliche Flächen für die Produktion von Solarstrom genutzt werden können.

Die Schweiz will die Solarstromproduktion kräftig ausbauen, 2050 sollen mindestens 40 % des Schweizer Bedarfs durch Photovoltaik gedeckt werden. An Flächen für Solaranlagen ist kein Mangel. Dächer und Fassaden von Gebäuden bieten noch reichlich Platz, denn erst ein geringer Teil ist mit Photovoltaikmodulen belegt. Darüber hinaus könnten vermehrt auch Infrastrukturflächen wie Parkplätze oder Abwasserreinigungsanlagen genutzt werden.

Werden landwirtschaftliche Flächen für die Solarstromproduktion mit

genutzt, wird von «Agri-Photovoltaik» (Agri-PV) gesprochen. Während am Boden Beeren, Gemüse oder Obst wachsen, produzieren darüber oder daneben installierte Photovoltaikmodule Strom. Agri-PV existiert in verschiedenen Formen. So lassen sich die Module mit ausreichend Abstand über den Agrarflächen installieren oder sie werden zwischen den landwirtschaftlich genutzten Flächen aufgestellt. In diesem Fall können die Module auch senkrecht stehen. In letzterem Fall wird die Solarstrahlung in sogenannten bifazialen Modulen beidseitig genutzt.

Weltweit hat sich die Solarstromgewinnung über Landwirtschaftsflächen im letzten Jahrzehnt etabliert. Gemäss Angaben des deutschen Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme sind weltweit Agri-PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von mehr als 14 Gigawatt in Betrieb, was etwa dem Fünffachen an installierter Photovoltaikleistung in der Schweiz entspricht. Die meisten solcher Anlagen stehen in Asien, darunter eine chinesische Agri-PV-Anlage über einer Beerenkultur am Rande der Wüste Gobi mit einer Gesamtleistung von 700 Megawatt.



Auch in der Schweiz wächst das Interesse an einer Landwirtschaft, die neben Obst und Gemüse Solarstrom erntet. Am Versuchsstandort des Schweizer Kompetenzzentrums für landwirtschaftliche Forschung Agroscope in Conthey (VS) wurde Mitte 2021 eine 165 Quadratmeter grosse Agri-PV-Anlage vom Energieunternehmen Romande Energie als Pilot gebaut und in Betrieb genommen. Bei dieser Anlage, welche über einer Himbeerplantage installiert ist, wurden Photovoltaikmodule der Schweizer Firma Insolight verbaut. Diese sind speziell für eine solche Anwendung entwickelt worden. Die Transparenz der Insolight-Module kann dynamisch zwischen 30

und 80% geregelt werden. Damit lassen sich die darunter wachsenden Pflanzen mehr oder weniger stark beschatten und das Sonnenlicht kann wahlweise mehr für das Pflanzenwachstum oder stärker für die Stromproduktion genutzt werden. Diese Agri-PV-Anlage ersetzt herkömmliche Folientunnels, die für den Schutz der Beerenkulturen eingesetzt werden.

Das Thema Agri-PV ist auch Gegenstand eines Projektes der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften. Darin werden agronomische, raumplanerische, rechtliche und technologische Aspekte untersucht. Nach einer provisorischen

Schätzung gibt es in der Schweiz ein Agri-PV-Potenzial von 10 bis 18 Gigawattstunden pro Jahr. Neben der Stromproduktion werden auch ökologische Gründe zugunsten von Agri-PV angeführt. Je mehr sich die Folgen des Klimawandels in Form von Hitze oder Starkregen bemerkbar machen, desto mehr könnten Agri-PV-Anlagen ihre Vorteile ausspielen, in dem etwa eine Beschattung durch Solarmodule den Bewässerungsbedarf senkt. Auch Biodiversität und Ressourcenschutz in der Landwirtschaft können durch Agri-PV verbessert werden, weil weniger Agrochemikalien eingesetzt und Nährstoffverluste durch Nitratauswaschung reduziert werden.

Photovoltaikanlagen können landwirtschaftliche Flächen zur Stromproduktion in verschiedenen Formen nutzen, (1) senkrecht aufgestellt mit bifazialen Modulen, welche das Sonnenlicht sowohl von der Vorder- wie von der Rückseite nutzen, (2) als Schutzelement für empfindliche Kulturen oder (3) integriert in Gewächshäusern.





## Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit in der Energieforschung hat in der Schweiz einen hohen Stellenwert. Das Bundesamt für Energie (BFE) 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.

Dachbegrünung mit gleichzeitiger Nutzung für Photovoltaik führt zu einem Zielkonflikt. Diesem Thema widmet sich ein vom Bundesamt für Energie gefördertes interdisziplinäres Pilotprojekt in Winterthur, wo mit vertikal aufgeständerten Photovoltaikmodulen und speziellen Substratschichten die Biodiversität und das Wasserretentionspotenzial im Detail studiert wird (Bildquelle: ZHAW).








## Beteiligung in Technologie-Kooperationsprogrammen der IEA

	Energy Conservation through Energy Storage (iea-ecses.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		

(Rechts) Das im Bereich der Kehrrechtverwertung und Abwasserreinigung tätige Unternehmen Limeco betreibt am Standort in Dietikon eine für die Schweiz in diesem Massstab einzigartige Power-to-Gas-Anlage mit kontinuierlicher Methanisierung (powertogas.ch). Die Anlage wurde durch Swisspower AG mitinitiiert und wird von verschiedenen Schweizer Stadtwerken mitgetragen. Mit Strom aus der Kehrrechtverwertungsanlage wird Wasserstoff produziert, der mit CO<sub>2</sub> aus dem Klärgas einer Abwasserreinigungsanlage in einem biologischen Reaktor methanisiert und ins Erdgasnetz eingespeist wird. Abgebildet ist eine der beiden Elektrolyseeinheiten, ein Proton Exchange Membrane (PEM)-Elektrolyseur von Siemens (SILYZER 200) mit einer Nennleistung von 1,25 MW und einem Wasserstoffausgangsdruck von 35 bar (Bildquelle: S. Oberholzer).



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



2

Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern

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