



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Energieforschung und Innovation

Bericht 2019





Editorial

Die künftige Energieversorgung der Schweiz und die Herausforderungen des Klimawandels gehören zu den wichtigsten Themen der schweizerischen Tagespolitik. Der Energieforschung kommt dabei eine wichtige Rolle zu, um das zunehmend komplexere Energiesystem mit verschiedenen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichsten Akteuren und verschiedenen Energiesektoren (Stichwort Sektorkopplung) zu analysieren und technologische Lösungen zu entwickeln.

In den letzten Jahren wurde hierzu starke Aufbauarbeit geleistet, insbesondere mit den verschiedenen Schweizer Kompetenzzentren für Energieforschung (SCCERs), welche 2020 nach acht Jahren enden werden. Das am Bundesamt für Energie BFE angesiedelte Förderprogramm «SWEET» wird entscheidend dazu beitragen, dass die aufgebauten Forschungskapazitäten nun gezielt auf die Energiestrategie ausgerichtet werden. Überhaupt spielt das BFE mit einer programmatisch ausgerichteten Forschungs- und Technologieförderung schweizweit eine zentrale Rolle, dies seit mehreren Jahrzehnten.

In dieser Broschüre werden einige Beispiele von Projekten vorgestellt, welche das BFE mitträgt und teilweise eng begleitet, dies stellvertretend für eine Vielzahl von Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekten. Die angegebenen QR-Codes leiten zu detaillierten Informationen (z. B. Schlussberichte) weiter. Speziell wurde in dieser Ausgabe dem Thema «Wärme» stärkere Aufmerksamkeit geschenkt, in dem gleich mehrere innovative Projekte zum Einsatz von Wärmepumpen vorgestellt werden.

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

(Titelbild) Schwimmende Photovoltaikanlage auf dem Wasserreservoir «Lac des Toules» auf 1810 m. ü. M., welche 2019 installiert wurde. Dank der Verwendung von bifazialen Modulen mit einem hohen Albedo im Winter und dank der höheren Einstrahlung im alpinen Raum wird eine um bis zu 50 % höhere Energieproduktion erwartet im Vergleich zu einer ähnlichen Anlage im Mittelland. Herausfordernd sind die extremen klimatischen Bedingungen (Schnee, Eis, starke Winde, Temperaturschwankungen) sowie die jahreszeitlichen Schwankungen des Wasserstands (0 bis 50 m) (Bildquelle: Romande Energie, www.solaireflottant-lestoules.ch).

(Links) Laufwasserkraftwerk des Energieerorgers Alpiq in Gösgen. Die Firma Hydrospeer nimmt hier eine 2-MW-Elektrolyseanlage in Betrieb, welche bis zu 300 Tonnen erneuerbaren Wasserstoff pro Jahr produziert und damit die Versorgung von 40 bis 50 Brennstoffzellenlastwagen sicherstellen kann. Wichtige Erfahrungen hierfür wurden mit einem mehrjährigen Pilotprojekt in Aarau gesammelt (siehe Beitrag: «Wasserstoff auf Schweizer Strassen», Seite 15) (Bildquelle: Alpiq/Patrick Lüthy, Imagopress).

(Folgeside) Nahaufnahme eines konzentrierenden Solarkollektors der Firma NEP Solar in der solaren Prozesswärmanlage bei der Lalaria Engiadinaisa SA in Bever, welche durch die ewz betrieben wird. Die 115 m²-Anlage ist seit 2011 in Betrieb und wird vom Institut für Solartechnik SPF an der Hochschule Rapperswil ausgewertet (Bildquelle: ewz).



Inhalt

Editorial 3

Inhalt 4

Technologie- und Innovationsförderung des Bundesamtes für Energie 5

Thematische Forschungsprogramme 6

Statistik der Schweizer Energieforschung 6

Energieeffizienz

«Netzfreundliche» Integration erneuerbarer Energie 11

Wärmepumpen mit der Sonne unterstützen 13

Wasserstoff auf Schweizer Strassen 15

Netzentlastung durch Flexibilität 17

Der Untergrund als Klimaanlage 17

Strom speichern mit komprimierter Luft 17

Erneuerbare Energie

Solare Treibstoffe für die Luftfahrt 19

«Biokohle» aus Abfällen 21

Eine Alternative zu Luft-Wasser-Wärmepumpen 23

Potenzial komplexer Windverhältnisse 25

Mehr Solarstrom bei gleicher Fläche 25

Aluminium verlängert den Sommer 25

Sozioökonomie

Soziale Faktoren bei Entscheidungen zugunsten von Solaranlagen 27

Internationales

Internationale Zusammenarbeit 29

Technologie-Kooperationsprogrammen der IEA 30

Teilnahme an ERA-NETs – European Research Area Networks 31

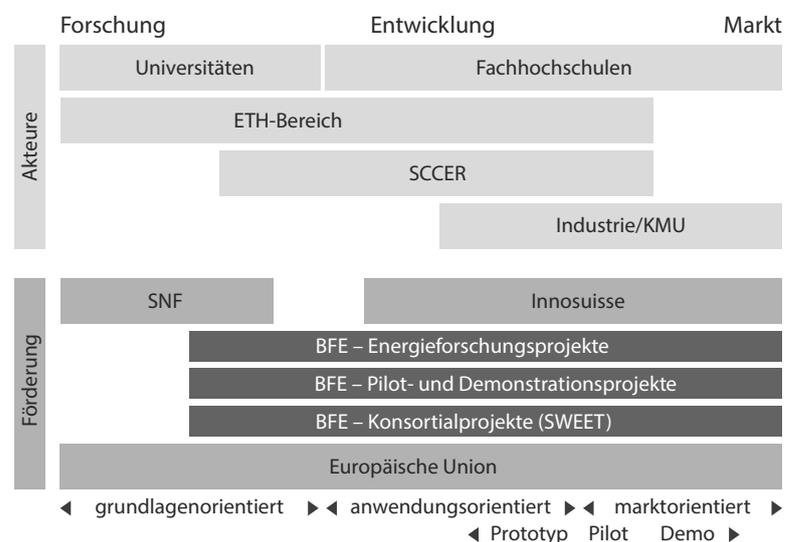
Weitere internationale Zusammenarbeit 31

Technologie- und Innovationsförderung des Bundesamtes für Energie

Mit dem von Bundesrat und Parlament im Jahr 2011 gefällten und vom Schweizer Volk mitgetragenen Grundsatzentscheid für einen sukzessiven Umbau des Schweizer Energiesystems bis ins Jahr 2050 kommt der Energieforschung des Bundes eine besondere Bedeutung zu. Das Bundesamt für Energie (BFE) deckt mit seinen Programmen das gesamte Spektrum der Energieforschung in den Bereichen Energieeffizienz und erneuerbare Energie ab und orientiert sich dabei an dem von der Eidgenössische Energieforschungskommission CORE erarbeiteten «Konzept der Energieforschung des Bundes». Dank eines programmatischen Förderansatzes und seiner Koordinationsrolle nimmt das BFE die Funktion einer zentralen Drehscheibe in der Schweizer Energieforschungslandschaft ein.

Die Energie- und Klimapolitik der Schweiz steht vor grossen Herausforderungen. Um die in der Energiestrategie 2050 des Bundesrats festgelegten Ziele zu erreichen, muss der Zubau erneuerbarer Energie stark forciert und die Energieeffizienz in Gebäuden, in der Industrie, im Verkehr und bei Elektrogeräten wesentlich erhöht werden. Auch Fortschritte in der Forschung werden nötig sein werden, um diese Zielsetzungen bis 2050 zu erreichen. Es sind daher auch gänzlich neue Denkweisen, neue Ansätze und neue Technologien gefragt. Aber gerade das Verlassen altbewährter Pfade verlangt eine Förderstrategie, die nicht in erster Linie den in die Forschung investierten Franken mit der damit unmittelbar eingesparten Kilowattstunde gleichsetzt. Forschung braucht einen Freiraum, der es erlaubt, grundsätzlich neue Ideen aufzugreifen und auszuprobieren.

Die Förderung des BFE mit seinen verschiedenen Instrumenten ermöglicht dies, indem sie neben umsetzungsorientierter Forschung auch anwendungsorientierte Grundlagenforschung und Pilot- und Demonstrationsprojekte unterstützt. Das BFE ist die einzige Förderstelle der öffentlichen Hand, welche Forschungsthemen im Energiebereich über national abgestützte Forschungsprogramme auch über län-



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).

gere Zeiträume von zehn und mehr Jahren unterstützt. Mit einem neuen Förderprogramm SWEET («Swiss energy research for the energy transition») ermöglicht das BFE zudem langfristig angelegte Konsortialprojekte zu ausgewählten Themen und stellt Finanzmittel für die Erforschung disruptiver Technologien zur Verfügung.

Nationale internationale und Zusammenarbeit verstärkt die Effizienz der eingesetzten Mittel und ermöglicht einen effektiven Wissensaustausch

zwischen den Forschenden. Die nationale und internationale Vernetzung der Schweizer Forschenden stellt daher neben der aktiven Unterstützung von wirtschaftlich risikoreichen Forschungsvorhaben und dem Schliessen von Lücken in der Innovationskette eine der Hauptaufgaben der Förderung des BFE dar.



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 Demons-

trationsprojekte und das neue 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 2017–2020», CORE (2016) und «Energieforschungskonzept des Bundesamtes für Energie 2017–2020», BFE (2016).

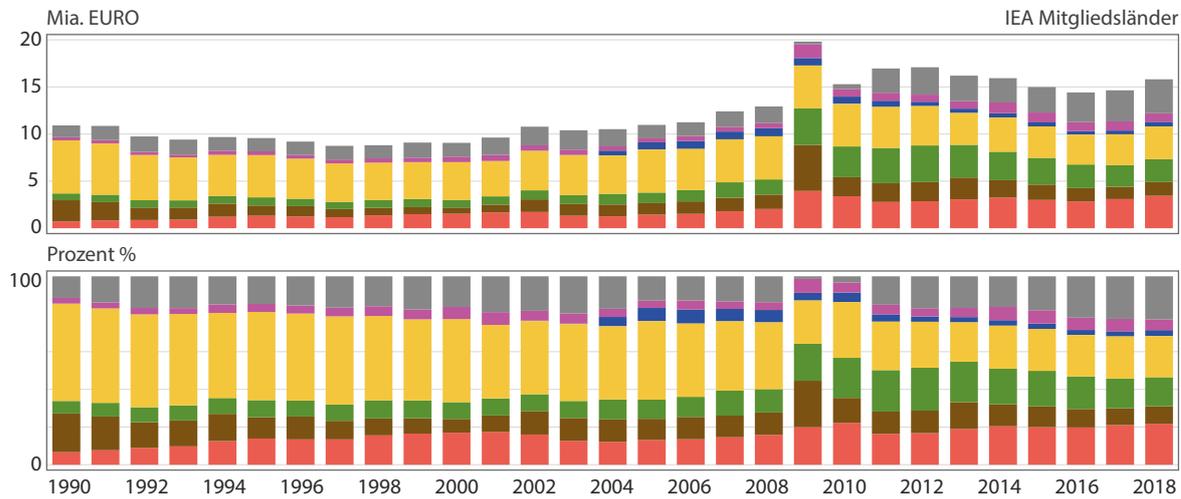
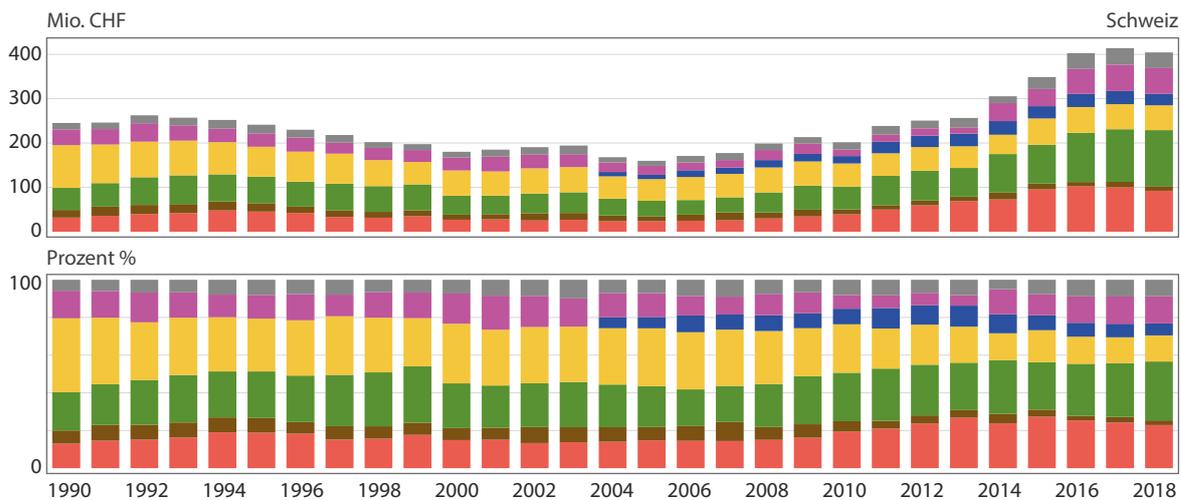
Statistik der Schweizer Energieforschung

Das BFE erfasst seit 1977 Daten 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), des SNF (p3.snf.ch),

der EU (cordis.europa.eu) und den jeweiligen Webseiten der Institutionen eingesehen werden.

Die Grafik oben zeigt die Aufwendungen der öffentlichen Hand für die Energieforschung in der Schweiz und in den Mitgliedsländern der Internationalen Energieagentur IEA seit 1990 (in Mio. Franken, teue-



- Energieeffizienz
■ Fossile Energieträger / CCS
- Erneuerbare Energie
■ Nukleare Kernspaltung & Fusion
- Elektrizität und Speicherung
■ Wasserstoff und Brennstoffzellen
■ Querschnittsforschung

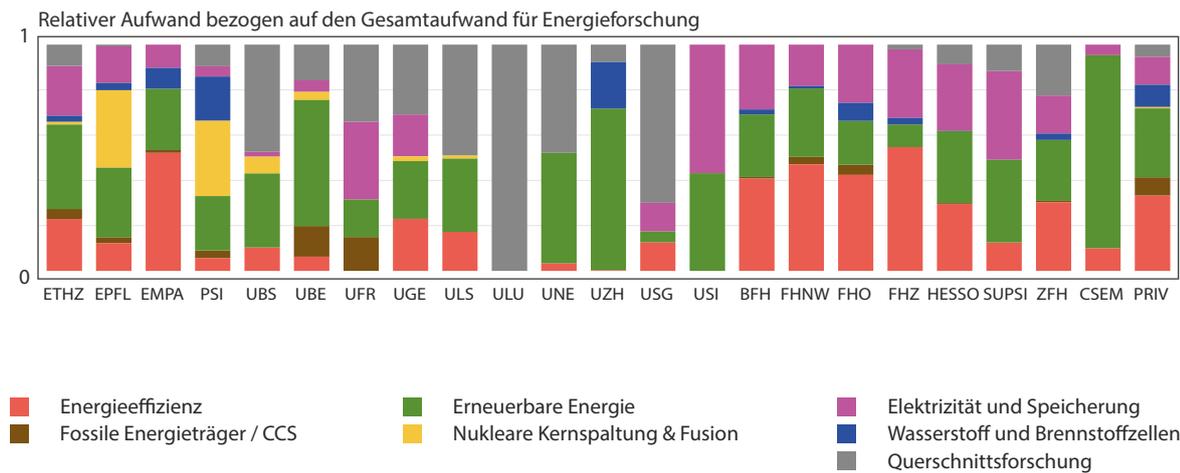
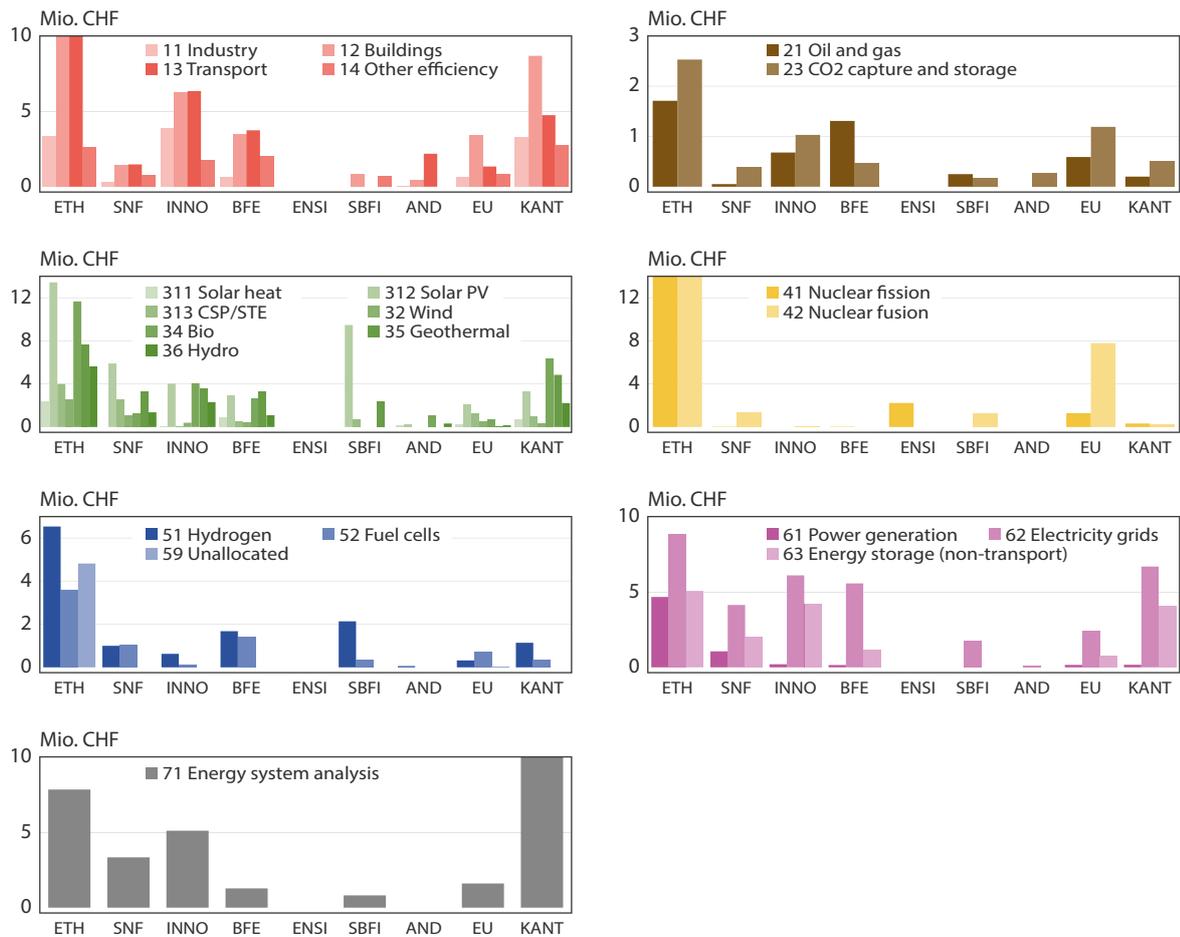
Langzeitüberblick über die für die Energieforschung aufgewendeten öffentlichen Mittel in der Schweiz und in den Mitgliedsländern der Internationalen Energieagentur IEA. Es sind Realwerte (teuerungskorrigiert) dargestellt, die sich für die Schweiz zwischen 0,3 und 0,65 Promille des Bruttoinlandsprodukts bewegen. Die eingesetzten Mittel sind nach der Klassifikation der Internationalen Energieagentur aufgegliedert.

rungskorrigiert bzw. in Mia. Euro) gegliedert nach der Klassifikation der Internationalen Energieagentur IEA.

2018 hat die öffentliche Hand 404 Mio. Franken für die Energieforschung aufgewendet. Davon steuerte mit 39 % 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 2018 durch das BFE aufgewendeten 35.3 Millionen Franken flossen rund 18.5 Millionen

Franken in Projekte aus dem Bereich Energieeffizienz, rund 16.9 Millionen Franken in Projekte im Zusammenhang mit erneuerbarer Energie und etwa 2 Millionen Franken für Projekte aus dem Bereich der Geistes- und Sozialwissenschaften.



(Oben) Herkunft der öffentlichen Mittel 2018 aufgeteilt auf die Forschungsgebiete gemäss der Klassifikation der Internationalen Energieagentur IEA (in Mio. Franken, nicht teuerungskorrigiert). ETH = ETH-Bereich, SNF = Schweizerischer Nationalfonds, INNO = Innosuisse, BFE = Bundesamt für Energie, ENSI = Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, SBFI = Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation, AND = Andere, EU = Europäische Union, KANT = Kantone.

(Unten) Relative Ausgaben im Jahr 2018 für Energieforschungsaktivitäten an Schweizer Universitäten (siehe Legende im Diagramm auf der nächsten Seite) gemäss der IEA-Klassifikation.



Aufwand 2018 für Energieforschungsaktivitäten an verschiedenen Schweizer Hochschulen: ETHZ = ETH Zürich, EPFL = ETH Lausanne, EMPA = Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, PSI = Paul Scherrer Institut, UBS = Univ. Basel, UBE = Univ. Bern, UFR = Univ. Freiburg, UGE = Univ. Genf, ULS = Univ. Lausanne, ULU = Univ. Luzern, UNE = Univ. Neuenburg, UZH = Univ. Zürich, USG = Univ. St. Gallen, USI = Universität der italienischen Schweiz, BFH = Berner Fachhochschule, FHNW = Fachhochschule Nordwestschweiz, FHO = Fachhochschule Ostschweiz, FHZ = Fachhochschule Zentralschweiz, HESSO = Westschweizer Fachhochschule, SUPSI = Fachhochschule der italienischen Schweiz, ZFH = Zürcher Fachhochschule, CSEM: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, PRIV = Privatwirtschaft.

Energieeffizienz



«Netzfrequente» Integration erneuerbarer Energie

Als in sich geschlossene lokale Stromnetze können «Microgrids» zur Unterstützung des Verteilungsnetzes dienen, indem sie Schwankungen in der Produktion erneuerbarer Energie ausgleichen. Die Effizienz innerhalb eines «Microgrids» sollte zunehmen, wenn auf Umwandlungen zwischen Gleichstrom (DC) und Wechselstrom (AC) verzichtet werden kann. Zu dieser Thematik laufen in der Schweiz verschiedene Projekte, teilweise in europäischer Zusammenarbeit, wo die dazu notwendigen Technologien entwickelt und erprobt werden.

«Microgrids» sind in sich geschlossene Stromnetze mit Energieerzeugern, Speichern und Verbrauchern. Sie können als lokale Inselnetze oder als autonome Netze aufgebaut sein. Mit der zunehmenden Stromproduktion aus erneuerbarer Energie gewinnen «Microgrids» an Bedeutung: Anstatt beispielsweise lokal produzierten Solarstrom ins öffentliche Netz einzuspeisen, wird er direkt lokal verbraucht oder gespeichert. Damit werden Übertragungs- und Verteilnetze weniger durch Produktionsschwankungen belastet. Forschende schätzen, dass sich mit solchen Inselnetzen erneuerbare Energien bis zu einem Anteil von 50 % des jährlichen Gesamtenergieverbrauchs einbinden lassen, ohne das Stromnetz auszubauen.

Photovoltaikmodule erzeugen Gleichstrom; dieser wird üblicherweise in Wechselstrom gewandelt und Verbrauchern zugeführt oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Doch insbesondere in der

Industrie sind viele Gleichstrommotoren oder andere Gleichstromverbraucher wie LED-Beleuchtungen installiert. Weshalb also den Solarstrom zuerst in Wechselstrom wandeln, um ihn dann wieder gleichzurichten? Jede Umwandlung hat Verluste zur Folge. Forschende befassen sich deshalb zunehmend mit «DC-Microgrids».

Bis anhin wird die Technik der Gleichstromübertragung in der Schweiz erst wenig genutzt und es sind kaum Standardsysteme auf dem Markt erhältlich. Dies möchten Forschende der westschweizer Fachhochschule HES-SO Valais Wallis ändern. Bereits im Jahr 2015 wurde ein halbautonomes «DC-Microgrid» als Demonstrator aufgebaut. Das System wurde seither laufend ergänzt und neu entwickelte Komponenten, Regelalgorithmen und Kommunikationsschnittstellen wurden implementiert. Heute bietet dieser Demonstrator alle nötigen Funktionen für vielfältige Anwen-

An der westschweizer Fachhochschule im Wallis (HES-SO Valais Wallis) wird ein voll funktionsfähiges Mikronetz demonstriert, in welchem die Komponenten für Stromerzeugung, Speicherung und Verbrauch integriert sind. Gekoppelt sind diese Komponenten über einen innovativen Zwischenkreis (Bus), der auf 700 V Gleichspannung (DC) basiert. Die über Photovoltaik erzeugte Spitzenleistung von 20 kW ist so dimensioniert, dass für industrielle Anwendungen relevante Leistungsniveaus untersucht werden können. (Quelle: Christoph Ellert, HES-SO Valais Wallis).

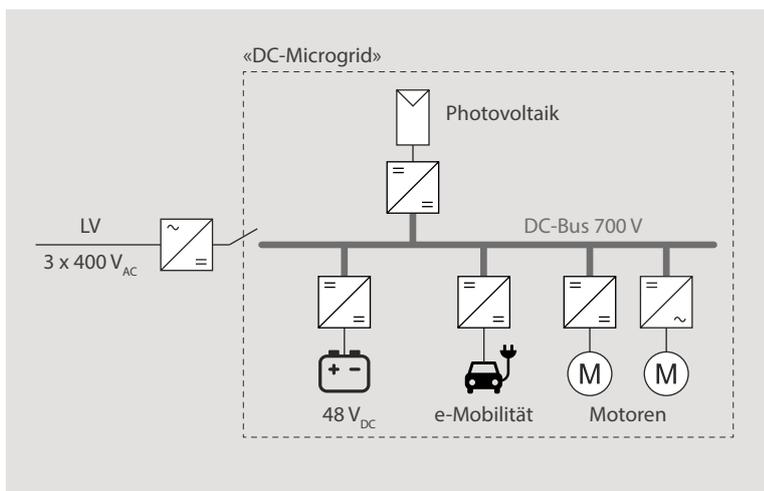
dungen im industriellen Umfeld und erlaubt damit, weitere neue Entwicklungen und Komponenten zu testen.

Auch im europäischen Projekt «DCSMART» dreht sich alles um Gleichstrom. Hier sollen Gleichstromtechnologien für den Einsatz in sogenannten intelligenten Netzen («Smart Grids») entwickelt werden. Schweizer Forschende sind Partner in diesem Projekt und konzentrieren sich auf die Integration von Photovoltaik, Batteriespeicher und Industriemotoren. Im Rahmen eines dazu gehörigen Pilotprojektes bauten Forschende des Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) ein kleines «DC-Microgrid»

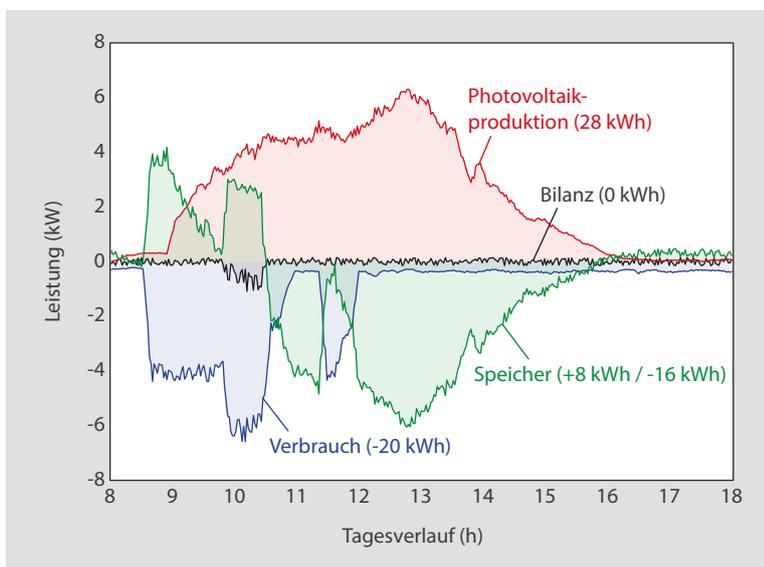
bei der Abwasserreinigungsanlage (ARA) von Neuenburg auf: ein interessanter Standort, da hier viele Prozesse mit einem hohen Energieverbrauch miteinander verbunden sind und die ARA lokal Strom erzeugt. Das Microgrid in Neuenburg hat im Testbetrieb aufschlussreiche Daten geliefert. So konnte der Eigenverbrauch gesteigert und Produktionsspitzen geglättet werden. Diese Lösung könnte so auch wirtschaftlich interessant sein.



DC/DC-Wandler für einzelne Photovoltaikmodule auf dem Dach der HES-SO Valais Wallis. Jedes der 45 verfügbaren Module ist mit dem DC-Bus über einen eigenen Wandler mit integriertem Maximum Power Point Tracker verbunden. Der Wirkungsgrad der einzelnen Wandler liegt bei 97 bis 98 % (Quelle: HES-SO Valais Wallis).



In der Regel arbeiten elektrische Niederspannungsverteilssysteme mit Wechselstrom (AC)-Technologie. Insbesondere für industrielle Anwendungen sind auf Gleichstrom (DC) basierende Systeme mit Spannungen zwischen 300 und 750 V interessant. Ein DC-«Bus» ist mit einer einzelnen «Front-End»-Einheit an das lokale AC-Verteilnetz angeschlossen. Durch das Wegfallen von zusätzlichen AC/DC-Wandlungen zwischen DC-Quellen (Photovoltaik) und DC-Lasten (drehzahlvariable Antriebe für Motoren, Pumpen, Kompressoren) oder Speichern (Batterien, Elektrolyse) wird die Effizienz gesteigert (Grafik nach HES-SO Valais Wallis).



In einem Projekt an der Fachhochschule in Sion (HES-SO Valais Wallis) werden die technischen und wirtschaftlichen Vorteile eines DC-Mikronetzes im industriellen Massstab demonstriert. Meteorologische und Verbrauchsprognosen ermöglichen eine Glättung des Leistungsprofils. Das Beispiel zeigt die Leistungsfähigkeit des Regelalgorithmus, der trotz stark schwankender PV-Leistungserzeugung eine vollständige Glättung der DC/AC-Bilanz erreicht. Die vertikale Achse zeigt die Leistung in kW an. Die kWh-Zahlen in Klammern geben die integrierte Leistung über den Tag an (Grafik nach Daten der HES-SO Valais Wallis).

Wärmepumpen mit der Sonne unterstützen

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ist ein zentrales Anliegen der «Energierategie 2050». Zu diesem Zweck bieten Wärmepumpen, die heute bereits Standard in Neubauten sind, ein großes Potenzial. Wie lassen sie diese effizient betreiben und mit Solarenergie ergänzen? Die Fachhochschule Nordwestschweiz hat verschiedene Ansätze für Wärmepumpen untersucht, die ohne Erdsonden arbeiten.

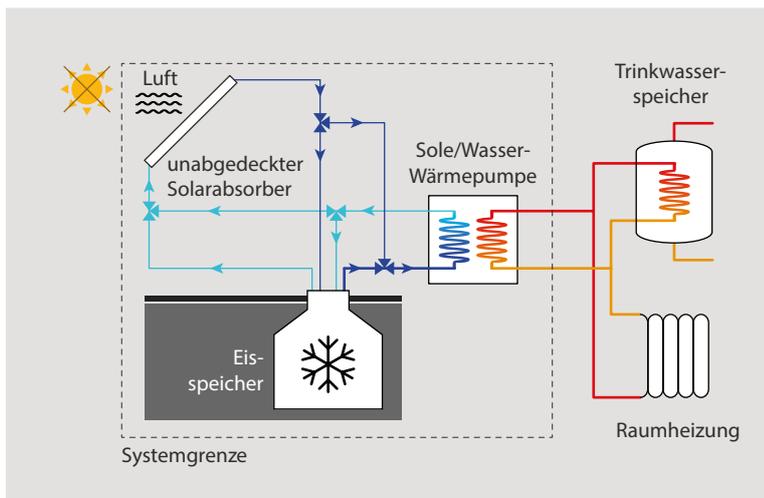
Bereits weit verbreitet in Einfamilienhäusern und kleinen Mehrfamilienhäusern ist die Kombination von Photovoltaik (PV) und Wärmepumpe. Zur besseren Nutzung des eigenen PV-Stroms kann das System mit einem grösseren Wärmespeicher oder einer Batterie ergänzt werden.

Mit einer Batterie lässt sich die Wärmepumpe auch dann mit eigenem Strom betreiben, wenn die Sonne nicht scheint. Zudem sinkt der Strombezug vom Netz. Noch besser sieht die Bilanz aus, wenn ein intelligentes Energiemanagement-System (EMS) zum Einsatz kommt. Es

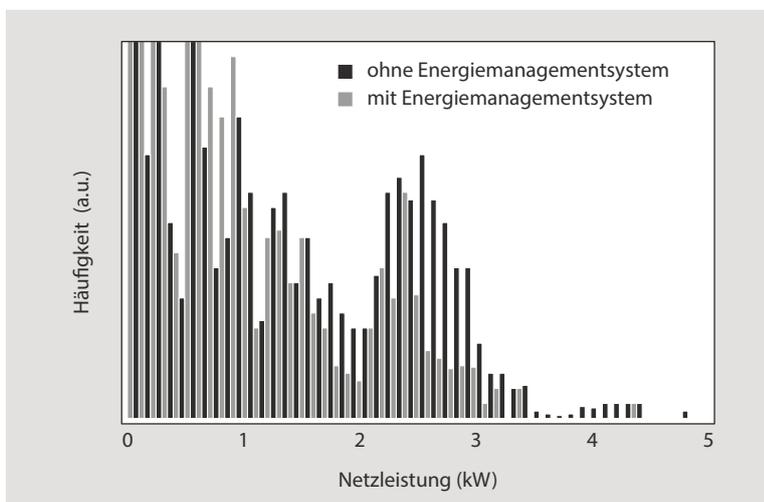
steuert die Wärmepumpe nach dem Solarstromangebot anstatt nach dem Wärmebedarf: scheint die Sonne, wird der Wärmespeicher geladen. Zur Erhöhung seiner Kapazität wird der Speicher zudem stärker als gewöhnlich aufgeheizt. Simulationen der Forschenden der



Unterirdisches Eisspeicher-System mit einer Wärmesenken-Kapazität von 30 000 kWh. Eisspeicher sind Latentwärmespeicher mit Wasser als Speichermedium, wo die Latentwärme beim Phasenübergang von Eis zu Wasser und umgekehrt als Speicher genutzt wird. Im Temperaturbereich über 0 °C können diese auch als sensible Wärmespeicher dienen (Quelle: SCHNEPF Planungsgruppe Energietechnik, Nagold, Deutschland).



Versuchsanordnung, bei der die Wärmepumpe mit Wärme aus einem Solarabsorber (ungedeckter Röhrenabsorber) und einem Eisspeicher versorgt wird. Der Eisspeicher fungiert gleichzeitig als Wärmespeicher für Solarwärme (Grafik nach FHNW).



In einem Heizsystems mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, einer Photovoltaikanlage und einer Batterie entlastet eine intelligente Steuerung das Netz. Ein Energiemanagement-System reduziert die Häufigkeit hoher Bezugs- und Einspeiseleistungen, eine relevante Grösse für den Netzbetreiber (Grafik nach Daten der FHNW).

Fachhochschule Nordwestschweiz ergaben, dass ein Wohngebäude mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe dank EMS weniger Strom vom Netz bezieht. Der Gesamtstromverbrauch ist jedoch grösser, weil der Wirkungsgrad der Wärmepumpe zur Erreichung der höheren Temperatur im Wärmespeicher geringer ist. Aus Sicht der Netzbetreiber hat ein EMS Vorteile, weil weniger häufig hohe Bezugs- und Einspeiseleistungen auftreten.

Eine Möglichkeit zur Nutzung der Solarwärme sind Solarabsorber in Kombination mit einem Eisspeicher, einen um einige Meter im Boden versenkten Betontank ohne Isolation. Interessant ist, dass das darin enthaltene Wasser stärker über das umgebende Erdreich und zu einem

kleineren Teil durch die Solarabsorber erwärmt wird. In der kalten Jahreszeit wird diese Wärme über ein eingelegtes Rohrsystem durch die Wärmepumpe entzogen. Erreicht das Wasser um diese Rohre die Nullgradgrenze, bilden sich Eiskristalle. Bei diesem Phasenübergang von flüssig zu fest wird latente Wärme freigesetzt. Solange der Eisspeicher nicht ganz gefriert, kann die Wärmeenergie des Phasenübergangs genutzt werden. Wie Modellrechnungen zeigen, bezieht die Wärmepumpe dennoch nur einen geringen Teil der Wärme aus dem Eisspeicher, der grösste Teil kommt direkt aus dem Solarabsorber.

Im Vergleich zu einer Luft-Wasser-Wärmepumpe weist das System mit Solarabsorber und Eisspeicher

eine signifikant höhere Jahresarbeitszahl auf, die einem System mit Erdsonden gleichkommt. Der Effizienzgewinn ist nicht allein dem Speicher zu verdanken, sondern vor allem der Tatsache, dass beim Solarabsorber kein Ventilator zum Ansaugen der Umgebungsluft notwendig ist. Dies senkt ganz nebenbei auch die Lärmemissionen. Der Effekt des Eisspeichers liegt in der Wärmegegewinnung aus dem Erdreich, ein positiver und wichtiger Nebeneffekt. Er wirkt damit wie eine «Erdsonde».



Wasserstoff auf Schweizer Strassen

Zur Erreichung der Klimaziele ist eine Dekarbonisierung der Mobilität unumgänglich, denn der Verkehr verursacht in der Schweiz rund ein Drittel der Treibhausgasemissionen. Die Wasserstoffmobilität ist neben der Batterie-Elektromobilität eine klimafreundliche Alternative zu fossilen Antriebstechnologien, dies insbesondere im Schwerverkehr. Schweizer Akteure leisten hier wichtige Pionierarbeit.

Entweicht aus dem Auspuff lediglich Wasserdampf, so ist ein Brennstoffzellenfahrzeug unterwegs: Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) werden hier in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt, der wiederum einen Elektromotor antreibt. Erfolgt die Herstellung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse mit erneuerbarem Strom («grüner Wasserstoff»), birgt diese Technologie grosses Potenzial für eine CO_2 -freie Mobilität. Dies gilt insbesondere für den Strassengütertransport, da mit Wasserstoff im Vergleich zu Batterien höhere Energiespeicherdichten erreicht werden.

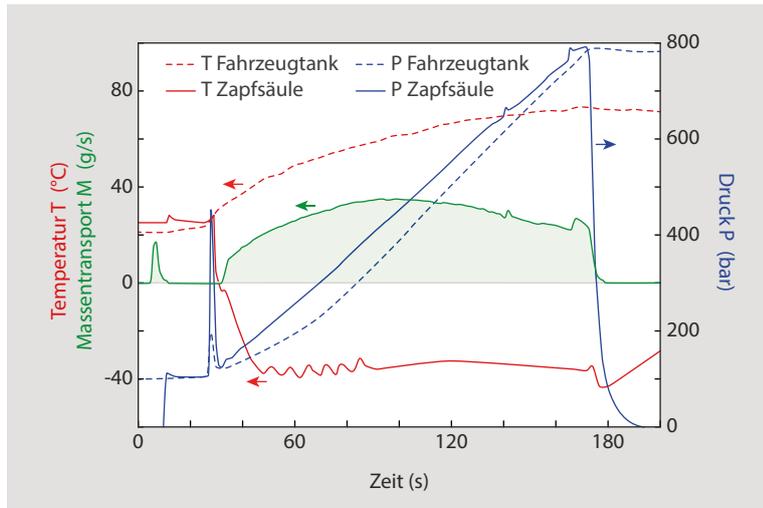
Die Wasserstoffmobilität in der Schweiz wird aktuell auf privater Initiative vorangetrieben. 2018 wurde der Förderverein «H2-Mobilität» gegründet, wo sich eine Vielzahl wichtiger Akteure aus der Transportbranche sowie Tankstellenbetreiber mit dem Ziel zusammenschlossen, eine landesweite Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff zu etablieren. Dank Brennstoffzellenlastwagen, deren Wasserstoffverbrauch um einen Faktor 30 bis 50 höher liegt im Vergleich zu Personenwagen, ist hier eine Rentabilität bei den Tankstellen möglich. Zum Einsatz kommen Brennstoffzellenlastwagen, welche im Rahmen

eines Joint-Ventures zwischen dem koreanischen Hersteller Hyundai und der Schweizer Firma H2energy in die Schweiz eingeführt werden. Die ersten von bis zu 1000 Lastwagen treffen 2020 in der Schweiz ein.

Ein zweites Joint-Venture zwischen H2energy, dem Energieunternehmen Alpiq und dem Industriekonzern Linde garantiert die Produktion von «grünem Wasserstoff», mit dem die Tankstellen in der Schweiz beliefert werden – für 2020 sind sechs neue Wasserstofftankstellen vorgesehen. Dazu geht eine 2 MW-Elektrolyseanlage beim Lauf-



Prototypen-Brennstoffzellenlastwagen entwickelt von der Firma Esoro in Zusammenarbeit mit Swiss Hydrogen: Erfolgreicher Anfahrversuch bei einer Steigung von 30 % und einem Gesamtgewicht (Lastwagen plus Anhänger) von 35 Tonnen (Quelle: Esoro).



Seit 2016 können in der Schweiz Brennstoffzellenfahrzeuge mit 700 bar Wasserstoff betankt werden. Eine solche Betankung erfolgt gemäss dem Protokoll SAE J2601 in wenigen Minuten. Damit die Temperatur im Tank des Fahrzeuges nicht zu stark ansteigt, muss der Wasserstoff an der Zapfsäule vorgekühlt werden. Der Massenfluss bei einer solchen Betankung entspricht einem Leistungsfluss von mehr als 5 MW (Bildquelle: Empa, Grafik nach Daten der Empa).

wasserkraftwerk «Gösgen» der Alpik demnächst in Betrieb.

Die Kette – Produktion von «grünem Wasserstoff», Aufbau und Betrieb einer öffentlichen Wasserstofftankstelle und der Einsatz eines Brennstoffzellenlastwagens – wurde in den letzten Jahren auf Pilotskala im Rahmen von grösseren, durch das Bundesamt für Energie geförderten Projekten demonstriert. So ging



In 2020 geht eine 2MW-Elektrolyseanlage von Hydrospider beim Laufwasserkraftwerk «Gösgen» in Betrieb zur Produktion von «grünem Wasserstoff» für Brennstoffzellen-LKWs. Hier sind Tankcontainern zu sehen, wo produzierter Wasserstoff zwischengelagert wird und der dazu dient, die Tankstellen in der Schweiz mit Wasserstoff zu beliefern (Bildquelle: Hydrospider).

2016 die erste öffentlich zugängliche Wasserstofftankstelle in Hunzenschwil in Betrieb, wo Fahrzeuge mit Wasserstoff bei 350 (für Lastwagen) und 700 bar (für Personenwagen) in wenigen Minuten betankt werden können. Im Zeitraum 2017 bis 2019 lag der Wasserstoffkonsum im Schnitt bei 80 Kilogramm pro Woche. Im Rahmen dieses Projektes entstand eine weitere Tankstelle für 700 bar-Betankung an der Empa aufgebaut. Weiter wurde ein Schweizer Leitfaden für Wasserstofftankstellen erarbeitet, wo der Genehmigungsprozess für künftige Tankstellen abgebildet ist.

Als Weltneuheit ist seit 2016 im Rahmen eines weiteren BFE-Projektes ein Brennstoffzellenlastwagen mit einer Zulassung über 35 Tonnen bei Coop im Einsatz. Dieser wurde von der Firma Esoro entwickelt in enger Zusammenarbeit mit Swiss Hydrogen, welche die Integration eines 100 kW-Brennstoffzellenstapels entwickelt hat. Als Pufferspeicher ist eine Lithium-Ionen-Batterie von 120 kWh verbaut. Mit diesem Fahrzeug können auch anspruchsvolle Routen mit bis zu 375 km Länge und mit mehreren Mittelland-Pässe durchgeführt werden.

In einem dritten Pilotprojekt wurde die Produktion von «grünem Wasserstoff» am Laufwasserkraftwerk der Eniwa in Aarau auf einer Skala von 180 kW Elektrolyseleistung erprobt. Der dort produzierte Wasserstoff wird mittels eines Trailers mit einem Speichervolumen von 223 kg Wasserstoff bei 200 bar zur rund 20 km entfernten Tankstelle in Hunzenschwil transportiert, im Schnitt alle 20 Tage. Dort wird dieser in einem stationären Tank bei 50 bar zwischengespeichert. Da sich gezeigt hat, dass die begrenzte Grösse eines solchen Zwischenspeichers für den Betrieb der Tankstelle limitierend sein könnte, wird man künftig mit mobilen Speichereinheiten mit 350 bar Nenndruck arbeiten, die sich als normierte Container transportieren lassen. Neben den allgemeinen Betriebserfahrungen ging es in diesem Projekte auch darum, während den 5600 h Betriebsstunden eine dynamische Steuerung der Elektrolyse nachzuweisen, um damit bei künftigen Anlagen auch Regelenergie für Systemdienstleistungen erbringen zu können.



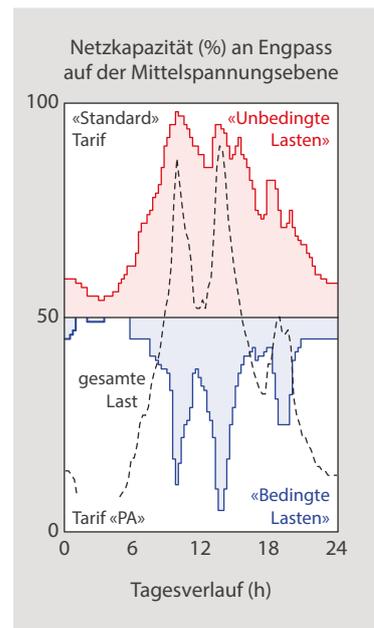
Netzentlastung durch Flexibilität

Der Ausbau der erneuerbarer Energie bringt das bestehende Stromnetz teilweise an seine Grenzen. Anstatt die Netzinfrastruktur auszubauen, nutzt das Projekt «PowerAlliance (PA)» die redundante Kapazität des Mittelspannungsnetzes, um Anlagen zu versorgen, die eine tiefere Versorgungssicherheit tolerieren. Dazu zählen z. B. «Power-to-X»-Anlagen, die abgeschaltet werden können, sobald die Reservekapazität im Netz benötigt wird. Kunden legen in einem Fahrplan für den Folgetag diese bedingten Lasten fest und profitieren im Gegenzug von einem günstigeren Tarif. In einem weiteren

Projekt («Optiflex») wurde ein lokaler Markt für dezentrale Flexibilitäten technisch erprobt, in den Biogas- und Photovoltaik-Anlagen und Speicher intelligent integriert werden. Ein spezielles Tarifsystem belohnt netzdienliches Verhalten.



Netzkapazität im Bereich «Unbedingte Lasten» (rot) mit hoher Versorgungssicherheit und «Bedingte Lasten» (blau), welche mit einer niedrigeren Versorgungssicherheit auskommen und damit von einem tieferen Tarif profitieren (z. B. Elektrolyseure oder Batterien). Durch diese Aufteilungen werden brachliegende Netzreserven intelligent genutzt.



Strom speichern mit komprimierter Luft

Bei Druckluftspeichern treibt der zu speichernde Strom treibt einen Kompressor an, welcher Aussenluft verdichtet, die dann in einer Kavertne gespeichert wird. Beim Entladen des Speichers expandiert die Druckluft in einer Turbine und ein angehängter Generator erzeugt Strom. Bei adiabatischen Druckluftspeichern wird zusätzlich die Kompressionswärme in einem thermischen Speicher mitgespeichert, wodurch sich die Gesamteffizienz erhöht. Mit solchen Druckluftspeichern lassen sich Schwankungen bei der Stromproduktion effizient ausgleichen – vorausgesetzt, die Zyklen von Kompression und Expansion sind nicht

zu kurz. Dies zeigt ein von der Fachhochschule der Südschweiz (SUPSI) und der ETH Zürich gemeinsam mit Industriepartnern entwickeltes Simulationsmodell. Da marktübliche kombinierte Verdichter-Expander-Einheiten relativ ineffizient sind, müssen diese beiden Komponenten unabhängig voneinander optimiert werden.



Der Untergrund als Klimaanlage

In der Schweiz sind über 100 000 Erdwärmesonden im Einsatz, in erster Linie, um Gebäude zu heizen.

Werden diese im Sommer zur Kühlung eines Gebäudes verwendet, spricht man von «Geocooling». Als willkommener Nebeneffekt wird das Erdreich nach dem winterlichen Wärmeentzug regeneriert und ein grosser Teil der Heizenergie kann so zurückgegeben werden. Dabei wird der grosse Temperaturunterschied zwischen hoher Innentemperatur und tiefer Untergrundtemperatur ausgenutzt. Die verfügbare Kälte entspricht in etwa 30 Mal der eingesetzten Energie, wie Untersuchungen der Fachhochschule der Südschweiz (SUPSI) an einer Liegenschaft in Lugano zeigen.



Impeller eines 3-stufigen Luftkompressors (Quelle: MAN, Augsburg).



Ein Gebäude an zentraler Lage in Lugano wird über Erdwärmesonden geheizt und gekühlt (Quelle: SUPSI).



Erneuerbare Energie

Solare Treibstoffe für die Luftfahrt

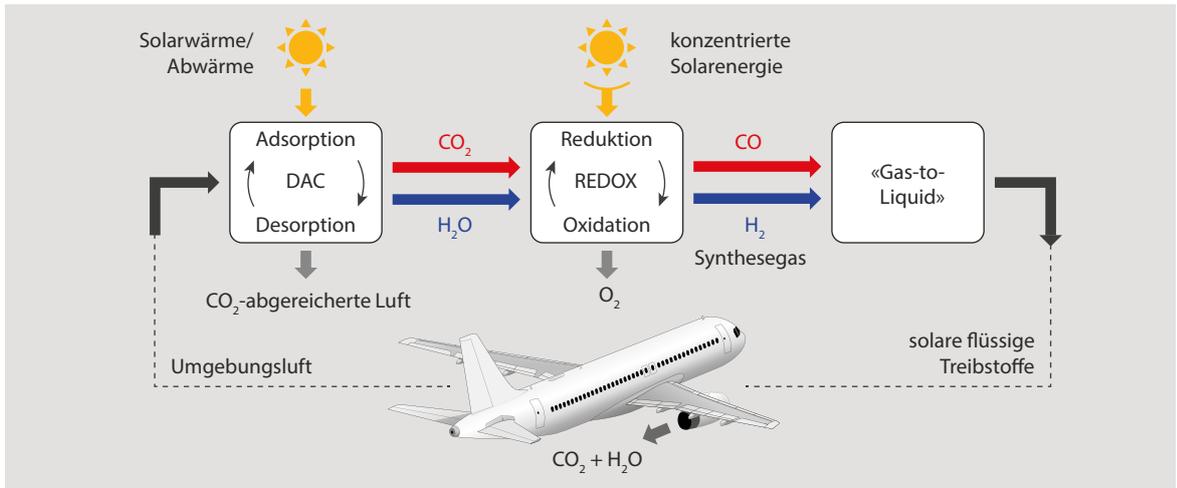
Zusammen mit dem internationalen Luftverkehr trägt der Verkehrssektor mit rund 40 % zu den Treibhausgasemissionen der Schweiz bei. Auch wenn heutige Flieger mindestens 50 % effizienter sind als noch vor 30 Jahren, stellt dieser Sektor auf Grund des grossen Wachstums die Energie- und Klimapolitik vor grosse Herausforderungen. Im Bereich der Entwicklung erneuerbarer flüssiger Treibstoffe mit konzentrierter Solarenergie sind Schweizer Akteure weltweit führend und werden dabei vom BFE in ihren Arbeiten unterstützt. Die Luftfahrtindustrie zieht hier grosses Interesse, wie kürzliche gemeinsame Absichtserklärungen mit der Lufthansa-Gruppe unterstreichen.

Forschende der Professur für erneuerbare Energieträger der EHT Zürich (Prof. Steinfeld) konnten 2019 erstmals die Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen – aus denen alle gängigen Treibstoffe bestehen – aus konzentriertem Sonnenlicht und Umgebungsluft unter realen Feldbedingungen demonstrieren. In einer solaren Mini-Raffinerieanlage auf dem Dach der ETH Zürich spaltet dabei ein Hochtemperatur-Solarreaktor direkt aus der Luft gewonnenes Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) auf und erzeugt Synthesegas – ein Gemisch aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO). Dieses kann über etablierte «Gas-to-Liquid»-Verfahren zu flüssigen Kohlenwasserstoffen wie Methanol oder Kerosin verarbeitet werden. Die solarbetriebene Prozesskette (siehe Abbildung auf der Folgeseite) nutzt das gesamte Sonnenspektrum und bietet einen thermodynamischen günstigen Weg zur Herstellung von solaren Treibstoffen.

Die Technologie zur direkten Gewinnung von CO₂ und H₂O aus der Umgebungsluft basiert auf einer

thermisch getriebenen zyklischen Adsorption und Desorption, wo ein mit Aminen funktionalisiertes Sorptionsmittel angewendet wird. Die Produktion des Synthesegases erfolgt dann in einer solaren Redox-Einheit, die CO₂ und H₂O thermochemisch über einen Reduktion-Oxidation-Zyklusprozess (Redox) unter Verwendung von Cerium als Redoxmaterial spaltet. Dabei wird in einem ersten (solaren) Schritt oxidiertes Cerium mit konzentrierter Solarenergie thermisch reduziert, wobei Sauerstoff frei wird. In einem zweiten (nicht solaren) Schritt reagiert das reduzierte Cerioxid dann mit CO₂ und H₂O, um Synthesegas zu erzeugen. Das Cerium wird dabei zurück oxidiert und steht für weitere Zyklen zur Verfügung. Bei der solaren Mini-Raffinerieanlage der ETH Zürich erfolgen die Absorption der Solarenergie (Receiver) und die thermochemischen Reaktion jeweils im selben Reaktor. Zwei identische Solarreaktoren kommen zum Einsatz, um beide Reaktionen – die solare Reduktion und die nicht-solare Oxidation – wechselseitig parallel durchzuführen.

Solare Mini-Raffinerie auf dem Dach der ETH Zürich zur Produktion solarer Treibstoffe aus Luft und Solarenergie (Quelle: ETH Zürich).



Die ETH Zürich konnte 2019 erstmals die Herstellung von solaren flüssigen Treibstoffen auf Basis von der Luft gewonnenem Wasser und Kohlendioxid und mit Einsatz von konzentrierter Solarenergie demonstrieren. Die an der ETH entwickelte Technologie wurde sowohl in einer Mini-Raffinerie direkt auf dem Dach der ETH als auch auf grösserer Skala an einer solaren Turmanlage in Madrid im Rahmen eines EU-Projektes demonstriert. Erneuerbare flüssige Treibstoffe sind insbesondere für den Flugverkehr wichtig, da es dort wenige bis keine technischen Alternativen gibt (Grafik nach ETHZ-PREC).

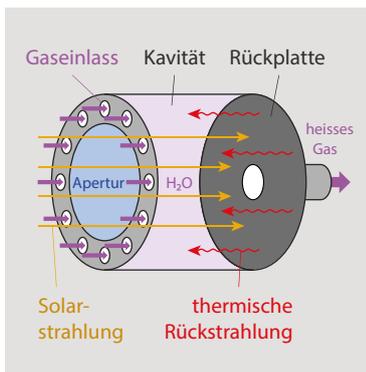
Aus der Forschungsgruppe von Aldo Steinfeld sind zwei ETH-Spin-offs hervorgegangen: Climeworks und Synhelion. Die Firma Climeworks hat in den letzten Jahren erfolgreich das oben beschriebene Verfahren zur Abscheidung von CO₂ aus der Luft in ein Produkt entwickelt. Die Firma Synhelion arbeitet daran, die Technologie zur Herstellung von Solartreibstoffen auf den Markt zu bringen. Um dieses Verfahren technologisch umzusetzen, verfolgt Synhelion den Ansatz, die Absorption der Solarenergie, die Speicherung der Hochtemperaturwärme und die thermochemische Reaktion voneinander zu trennen,

um damit die Gesamteffizienz zu optimieren. In einem neu entwickelten Hochtemperatur-Solarreceiver wird das Prinzip des «Treibhauseffekts» ausgenutzt: das Gasvolumen in einer Kavität absorbiert die thermische Rückstrahlung der durch konzentrierte Solarstrahlung aufgeheizten schwarzen Rückplatte und wird dadurch stark erhitzt. Das Gas selbst (z.B. Dampf oder CO₂) dient als Wärmeträger und kann gekoppelt mit einem thermischen Speicher kontinuierlich die notwendige thermische Energie für die thermochemische Spaltung von CO₂ und H₂O in einem nicht solaren Reaktor liefern.

Nachdem dieses neuartige Receiver-Konzept zusammen mit Forschenden der Fachhochschule Tessin (SUPSI) eingehend theoretisch untersucht worden ist, wurde 2019 ein erster Pilotreaktor auf der Skala von 200 kW am 300 kW-Solarsimulator des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) äusserst erfolgreich getestet. Mit Dampf als Absorbergas werden Dampftemperaturen von über 1550 °C erreicht.



Neuartiges Solar-Receiver-Konzept der Firma Synhelion AG mit Strahlungsübertragung an Gas als Wärmeträger (Grafik nach Synhelion). Ein 200 kW-Pilotreaktor (Quelle: Synhelion) wurde 2019 am Solarsimulator des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (rechts, Quelle: DLR/M. Hauschild) erfolgreich getestet und es werden Temperaturen von über 1550 °C erreicht.



«Biokohle» aus Abfällen

Bei der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) wird Biomasse unter Hitze und Druck verkohlt. So lassen sich organische Reststoffe energetisch nutzen und Pflanzennährstoffe an die Böden zurückgeben.

In der Schweiz fallen grosse Mengen organischer Reststoffe wie Klärschlamm, Gülle, Grünabfälle oder Speisereste an, welche nährstoffreich sind und sich sowohl stofflich als auch energetisch verwerten lassen. Weit verbreitet sind Vergärungsanlagen, die aus feuchter Biomasse Biogas produzieren. Bei diesen wird organisch gebundener Kohlenstoff meist nicht vollständig zum Energieträger Biogas umgewandelt.

Wird eine vollständige energetische Nutzung der organischen Substanz angestrebt, so bietet sich HTC als Alternative an. Bei diesem Verfahren, welches im Prinzip einer beschleunigten Entstehung von Braunkohle entspricht, wird feuchte Biomasse umweltfreundlich und klimaschonend in ein seuchenhygienisch unbedenkliches, hydrophobes und kohleähnliches Produkt umgewandelt. So steht nahezu der gesamte Kohlenstoff für eine mögliche energetische Nutzung in einer Verbren-

nung oder Vergasung zur Verfügung. Alternativ kann die Kohle aufgrund ihrer hohen Adsorptionskapazität als Bodenverbesserer und als landwirtschaftlicher Hilfsstoff eingesetzt werden. In Abhängigkeit des Ausgangssubstrates verbleibt Phosphor dabei entweder mehrheitlich in der Kohle oder wird ins Prozesswasser verfrachtet. Bei der HTC-Behandlung von Klärschlamm bietet sich eine Möglichkeit zur effektiven Phosphor-Rückgewinnung an.



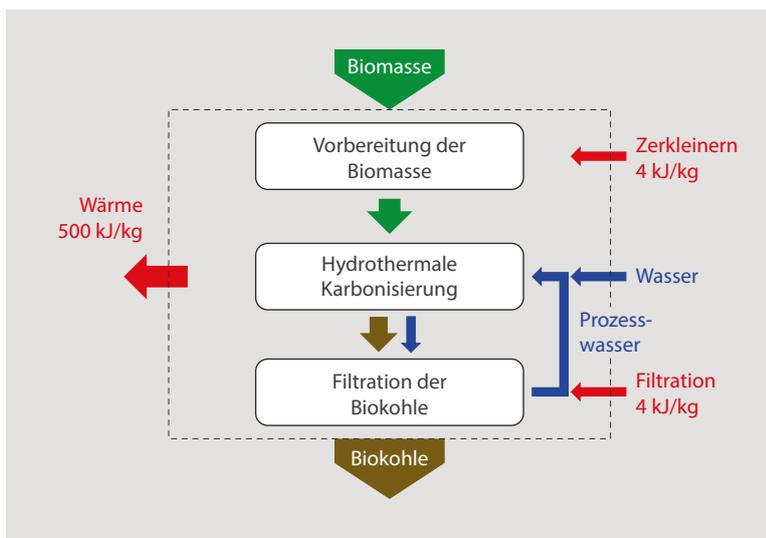
Mittels hydrothermalen Karbonisierung können organische Reststoffe auf eine umweltfreundliche, klimaschonende und hygienische Weise umgewandelt werden, um eine energetische Nutzung oder eine Verwendung als Pflanzennährstoffe für die Landwirtschaft zu ermöglichen. Die Abbildung zeigt Karbonisate aus Gülle in pelletierter Form mit einer Energiedichte von 10–12 GJ/m³ (Quelle: FHNW).

Auf dem Innovationscampus «Rheinmühle» in Chur wurde im Rahmen eines BFE-Pilotprojekts ein kontinuierlich arbeitender HTC-Reaktor realisiert. Darin wird Biomasse, die hauptsächlich aus Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasser besteht, unter Druck bei Temperaturen von 180 bis 240 °C karbonisiert. Lange, organische Kohlenwasserstoffmoleküle werden in kürzere gespalten. Die Reaktionen setzen Wärme frei, die als Prozesswärme nutzbar ist. Zudem entsteht Prozesswasser, das anaerob vergärt werden kann.

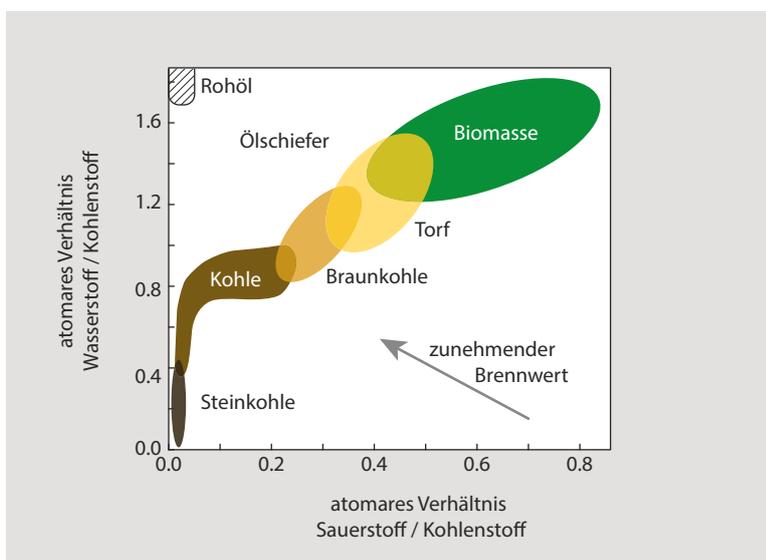
Mit dieser Pilotanlage soll ein strom- und wärmeerzeugender Verarbei-

tungspfad für Gülle, Klärschlamm und Speiseabfälle erstmals in der Schweiz aufgezeigt werden. Die Optimierung der einzelnen Prozessschritte wird dabei wissenschaftlich begleitet und dokumentiert. Seit Januar 2018 verarbeitet die Anlage täglich 10 Tonnen Biomasse. Jährlich sollen auf diese Weise ca. 1000 m³ Gülle eines Viehbetriebs und rund 100 Tonnen Klärschlamm der ARA Chur separat aufbereitet werden. Die so hergestellte HTC-Kohle dient als lagerbarer Brennstoff für Vergasungs- und Verbrennungssysteme. Nach einigen Anfangsschwierigkeiten läuft die Anlage nun stabil. Zur Zeit werden bei Verbrennungs-

versuchen in Laboranlagen mit der HTC-Kohle die Abgasgrenzwerte (NO_x und SO₂) noch überschritten. Bei einer Nutzung in einer modernen Kehrichtverbrennungsanlage oder in einem Zementwerk würden diese Schadstoffe ohnehin in Rauchgasfilter eliminiert. So gewonnene HTC-Kohle stellt aufgrund des mit Holz vergleichbaren Heizwerts einen interessanten Festbrennstoff dar.



Die hydrothermale Karbonisierung (HTC) ist ein exothermer chemischer Prozess, um feuchte Biomasse in Biokohle umzuwandeln. Dabei wird der Anteil an Kohlenstoff und damit der Brennwert stark erhöht. Der Prozess läuft unter Druck (20 bar) und bei Temperaturen um 200 °C ab. Kohlenstoffbilanz: bis zu 90 % des Kohlenstoffs aus der Ausgangsbiomasse kann in Form von Biokohle thermisch verwertet werden. Energiebilanz: je nach Ausgangssubstanz ist 60–90 % des Bruttoheizwertes des Inputmaterials in der resultierenden HTC-Kohle verfügbar (Quelle: nach ZHAW/Aqua und Gas 2014).



Verschiedene Stadien der Inkohlung (Bildung von Kohle) von Biomasse (Cellulose/Holz) über Torf und Braunkohle bis zu Steinkohle und Anthraziten im van-Krevelen-Diagramm, wo das atomare Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff gegen das atomare Verhältnis Sauerstoff zu Kohlenstoff aufgetragen ist.

Eine Alternative zu Luft-Wasser-Wärmepumpen

Photovoltaik-Thermie-Systeme (PVT) nutzen die Dachfläche eines Gebäudes optimal aus: sie erzeugen sowohl Strom als auch Wärme, die sich in einer Wärmepumpe nutzen lassen. Die Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW hat diese ökologisch und ökonomisch sinnvolle Kombination in einem Projekt untersucht.

Bei Erneuerungen von Heizungen in Einfamilienhäusern setzen Hauseigentümerschaften oft auf Luft-Wasser-Wärmepumpen – ein wichtiger Beitrag zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung, vorausgesetzt, es wird erneuerbarer Strom eingesetzt. Solche Systeme haben aber den Nachteil, dass sie insbesondere im Winter bei tiefen Aussentemperaturen wenig effizient arbeiten und Geräusche verursachen.

Forschende der Gruppe «Erneuerbare Energien» an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) untersuchten im Projekt «L-Sol» ein neuartiges System, bei dem PVT-Hybridmodule sowohl den Strom als auch die Wärme für die Wärmepumpe liefern.

Solche Module bestehen aus einer Kombination von Photovoltaik (PV)- und solarthermischen (T)-Modu-

len. Die Wärmepumpe nutzt einen Niedertemperatur-Pufferspeicher als Wärmequelle, der mit Wärme von ungedeckten (ungedämmten) PVT-Kollektoren beladen werden kann. Dadurch wird Wärme auf tiefem Temperaturniveau effizient genutzt und die PV-Module haben dank tieferer Temperaturen einen höheren Wirkungsgrad. Erste Systemsimulationen sind vielversprechend: in Neubauten und energie-



Hybride Photovoltaik-Thermie-Module (PVT) auf dem Dach der linth-arena sgu (Quelle: ZHAW).

tisch sanierten Einfamilienhäusern ist der Strombedarf rund 5 bis 30 % geringer verglichen mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe. Die PVT-Module arbeiten geräuschlos und stören somit keine Nachbar. Da keine Erdarbeiten notwendig sind, eignet sich das System insbesondere für bestehende Bauten und für Standorte, wo keine Erdsonden oder Grundwasserentnahmen möglich sind.

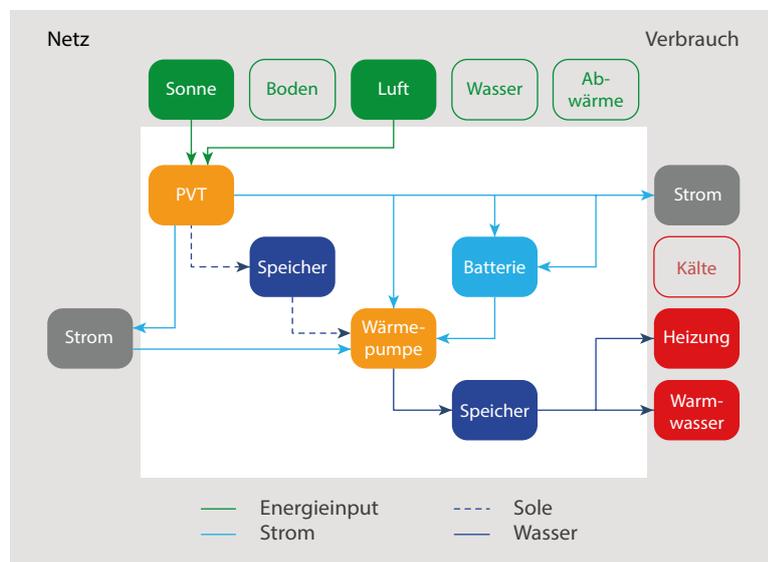
Günstig ist sie nicht, diese innovative Technik. Die Gesamtkosten lassen sich über 20 Jahre jedoch auf das Niveau eines Luft-Wasser-Wärmepumpensystems senken, wenn ganz normale PV-Module rückseitig mit Wärmetauschern nachgerüstet werden. Diese erbringen zwar einzeln betrachtet eine um 20 % geringere Wärmeleistung als originale PVT-Module, im Gesamtsystem kommt dies jedoch wegen der entsprechend längeren Laufzeit kaum

zum Tragen – somit überwiegen die Vorteile der wesentlich geringeren Investitionskosten.

Sinn macht das System bei gut gedämmten Gebäuden: Wird beispielsweise die Ölheizung in einem Einfamilienhaus im Schweizer Mittelland mit einem jährlichen Ölverbrauch von 1000 Litern durch das «L-Sol»-System ersetzt, kann eine PVT-Anlage von 48 m² den gesamten Wärmebedarf und rund 20 % des jährlichen Strombedarfs der Wärmepumpe selbst erzeugen. Wird das System geschickt gesteuert, damit die Wärmepumpe dann arbeitet, wenn die Sonne scheint, kann das Gebäude rund 45 % des Strombedarfs der Wärmepumpe zeitgleich produzieren. Zudem lässt sich das Gebäude über den hydraulischen Kreislauf der Bodenheizung im Sommer passiv kühlen. Die abgeführte Gebäudewärme wird für Brauchwas-

ser verwendet oder nachts über die PVT-Module abgegeben.

Hilfe bei der Planung bietet eine im Projekt erarbeitete Dimensionierungsmatrix: Sie zeigt den Einsatzbereich auf und erlaubt eine erste, grobe Dimensionierung der Komponenten. Ein typisches System für ein Einfamilienhaus umfasst 15 bis 30 PVT-Module, einen Pufferspeicher, eine Wärmepumpe und einen 600-Liter-Speicher.



Übersicht des Systems «L-Sol»: Als Umgebungswärmequellen dienen Sonne und Luft (grün), PVT-Hybridkollektoren erzeugen Strom und gewinnen Wärme, eine Wärmepumpe erzeugt das erforderliche Temperaturniveau (orange). Thermische Speicher sind in dunkelblau und elektrische Energie in hellblau dargestellt. Die Option zur Kühlung wurde der Übersichtlichkeit halber weggelassen. (Darstellung gemäss der Klassifikation des IEA Programms SHC Task 44 «Solar- und Wärmepumpensysteme» nach Daten der ZHAW).



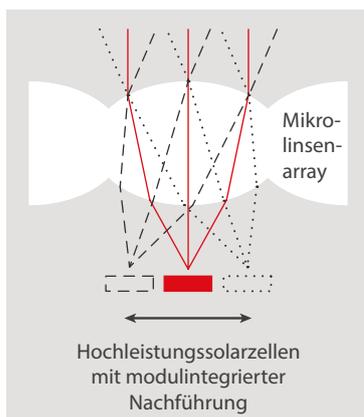
Strom und Wärme für die Wärmepumpe: Hier wurde ein herkömmliches PV-Modul nachträglich mit einem Wärmetauscher ausgerüstet (Quelle: ZHAW).

Mehr Solarstrom bei gleicher Fläche

Das «Start-up»-Unternehmen Inso-light entwickelt Photovoltaikmodule, bei denen optische Mikrolinsen das Sonnenlicht konzentrieren und dieses auf Hochleistungszellen fokussieren. Damit die gebündelten Lichtstrahlen die Zellen unter jedem Einfallswinkel treffen, wird die Modulrückwand mit den integrierten Solarzellen im Tagesverlauf um wenige Millimeter nachgeführt. Diese innovative Lösung ist zwar technisch aufwendig, für den gleichen Stromertrag sind jedoch deutlich weniger Module nötig. Die Energiegestehungskosten könnten deshalb deutlich tiefer liegen. Auf Dächern mit beschränktem Platz lässt sich mit solchen Modulen deutlich mehr Energie produzieren im Vergleich zu Standardmodulen.



Direkte Sonnenstrahlung wird mit einem planaren optischem Konzentratoren-system mit einer Vielzahl von Einzellinsen auf Hochleistungszellen gebündelt (Quelle: InsoLight).



Potenzial komplexer Windverhältnisse

Generell werden Windverhältnisse durch grossräumige Wetterphänomene bestimmt. In der Schweiz werden diese jedoch auch stark durch die komplexe lokale Topographie geprägt. So bläst der Wind in Teilen der Schweiz oft dann, wenn in anderen Regionen Europas Flaute herrscht – und umgekehrt. Ob solche Korrelationen allenfalls gezielt genutzt werden können, um die sonstige Produktion durch Wind und andere variable Erneuerbare auszuglei-



In der Schweiz sind die Windverhältnisse stark durch die komplexe Topographie geprägt (Quelle: pixabay.com).

chen, untersuchen Forschende der ETH Zürich mit Modellrechnungen. Analysen zeigen, dass beispielsweise die Windstärken in der Léman-Region und am Rhoneknief im Wallis bei hochdruckdominierten Wetterlagen deutlich höher sind als in angrenzenden flacheren Regionen. Antizyklischen Produktionsmuster können einen Anreiz für den Bau neuer Windturbinen in der Schweiz liefern, auch wenn die durchschnittliche Windgeschwindigkeit allein dagegensprechen würde.



Aluminium verlängert den Sommer

Sie ist so etwas wie der «Missing link» einer erneuerbaren Energieversorgung: die Speicherung des sommerlichen Solarstrom-Überschusses, der zukünftig anfallen wird. Ein Projekt am Institut für Solartechnik (SPF) der Hochschule Rapperswil setzt dazu auf einen chemischen Energiespeicherzyklus auf der Basis von Aluminium: Mit der Schmelzflusselektrolyse lässt sich Aluminiumoxid zu elementarem Aluminium reduzieren. Dank der hohen chemischen Energiespeicherdichte kann Aluminium als Speichermaterial in Granulatform verlustfrei über Monate gelagert und transportiert werden. Durch die oxidative Umsetzung mit Wasser(dampf) kann aus Aluminium Energie gewonnen werden.

(Rechts) Laborprototyp eines Aluminiumkonverters zur Wasserstoffproduktion in Kombination mit einer 12-W-Brennstoffzelle (Quelle: SPF).

Dabei wird Wasserstoff freigesetzt, der in einer Brennstoffzelle Strom und Wärme erzeugt.

Erste Tests mit einem Funktionsmuster am SPF verliefen vielversprechend.



Sozioökonomie



Soziale Faktoren bei Entscheidungen zugunsten von Solaranlagen

Um den Anteil erneuerbarer Energie massgeblich zu erhöhen, ist es zentral, dass sich viele Einzelne dafür entscheiden, ihre Energie selbst zu produzieren. Eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt dabei das, was die Nachbarn tun.

Angesichts des ehrgeizigen Zeitplans der «Energierategie 2050» gilt es, neue Wege zu finden, um die Bevölkerung für erneuerbare Energiequellen zu begeistern. Bereits frühere Studien haben gezeigt, dass neben finanziellen Anreizen über Subventionen oder Steuern auch eine «soziale Ansteckung» einen Einfluss darauf hat, dass neue Photovoltaikanlagen entstehen. Unter «sozialer Ansteckung» versteht man das Phänomen, dass Menschen bewusst oder unbewusst eine Verhaltensweise oder Denkart übernehmen, die sie bei anderen beobachten. Dabei werden zwei Formen unterschieden: Mundpropaganda und Nachahmung. Bei der Mundpropaganda vermitteln Eigentümerinnen und Eigentümer von Photovoltaikanlagen Informationen. Diese helfen, die Verunsicherung zu überwinden, die mit einer Investition einhergeht. Nachahmung ist eine subtilere Form der Ansteckung, bei der man sich unter Druck sieht, mit der Norm zu gehen.

Bisherige Untersuchungen zu «sozialer Ansteckung» im Bereich der Solarenergie beschränkten sich auf Privathaushalte. Nun nahm die Fachhochschule Genf (HES-SO Genève) neben Haushalten auch Unternehmen und Landwirtschaftsbetrie-

be unter die Lupe und unterschied zwischen verschiedenen Typen von Photovoltaikanlagen (Auf-Dach-Anlagen, gebäudeintegrierte Anlagen und Freilandanlagen). Es wurden rund 60 000 Anlagen in der ganzen Schweiz untersucht, die zwischen 2006 und 2015 installiert wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich nicht nur Privatpersonen, sondern auch Unternehmen und Landwirtschaftsbetriebe durch «soziale Ansteckung» von Photovoltaik überzeugen lassen. Bei Privatpersonen ist die Ansteckungswirkung jedoch am höchsten. Unternehmen und Landwirtschaftsbetriebe lassen sich eher durch Anlagen von anderen Unternehmen beeinflussen als durch solche auf privaten Dächern. Wichtige Faktoren sind die Nähe, die Grösse und das Alter der «Vorbild-Anlagen»: Neue Installationen kommen insbesondere zustande, wenn in ihrer unmittelbaren Nähe Anlagen gebaut werden. Grosse Anlagen haben eine grössere Ausstrahlungskraft. Und gebäudeintegrierte Installationen bewirken einen stärkeren Nachahmungseffekt als Auf-Dach-Installationen – möglicherweise, weil sie besser sichtbar sind.



Entwicklung und Erprobung einer neuartigen und wintertauglichen Photovoltaiksystemtechnik für den alpinen Raum auf einem Dach in St. Moritz. Mit vertikal angeordneten Bifazialmodulen können die Nachteile von standardmässig geneigt aufgeständerten Photovoltaiksystemen vermieden werden: der Ausfall der Stromproduktion im Winter (wenn sie am meisten benötigt wird) aufgrund Abdeckung durch Schnee, massive Stützstrukturen und das Risiko von Schäden an PV-Modulen und Montagestruktur durch hohe Schneelasten (Quelle: reech).

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).

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) existiert eine intensive multilaterale Zusammenarbeit mit ausgewählten Ländern.

(Links) Teil des Innenraumes der Wasserstoffankstelle an der Empa in Dübendorf mit Wasserstoff-Armaturen, zwei Verdichterstufen (rechts 440 bar, links 900 bar), Wasserstoff-Pufferspeicher für die Elektrolyse und zwei Wasserstoff-Endspeicher für die Betankung bei 440 bzw. 900 bar (Bildquelle: Empa).

(Seite 31 oben) Im Rahmen eines vom BFE mitunterstützten Projektes entwickeln Forschende der Empa zusammen mit der Firma Solaronix SA ein neues Verfahren, um Perowskit-Solarzellen mit einem Schlitzdüsenverfahren grossflächiger herstellen zu können. In solchen Solarzellen hat die Licht-absorbierende Schicht eine Perowskit-Kristallstruktur der Form ABX₃. Bei der Herstellung von Perowskit-Solarzellen müssen fünf verschiedene Schichten bestehend aus unterschiedlichen Materialien abgeschieden werden. Mit der Methode der Empa können diese direkt nacheinander aufgetragen werden, während beim bisherigen Siebdruck Verfahren die verschiedenen Schichten jeweils einzeln getrocknet und verdichtet werden mussten (Bildquelle: Empa).

(Seite 31 unten) Die den Perowskit-Kristall bildenden Komponenten werden als Vorläuferlösung (Tinte) infiltriert. Typischerweise erfolgt dies durch halbautomatisches Pipettieren, was nicht sehr präzise ist. An der Empa wurde deshalb eine «drop on demand»-Infiltration der Vorläuferlösung mittels Tintenstrahlentwicklung entwickelt, die eine bessere Kontrolle der Prozessparameter bei der Infiltration erlaubt (Bildquelle: Solaronix SA, Empa).

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)
	Demand Side Management (ieadsm.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)		

Weitere internationale Zusammenarbeit

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



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

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

www.energieforschung.ch