

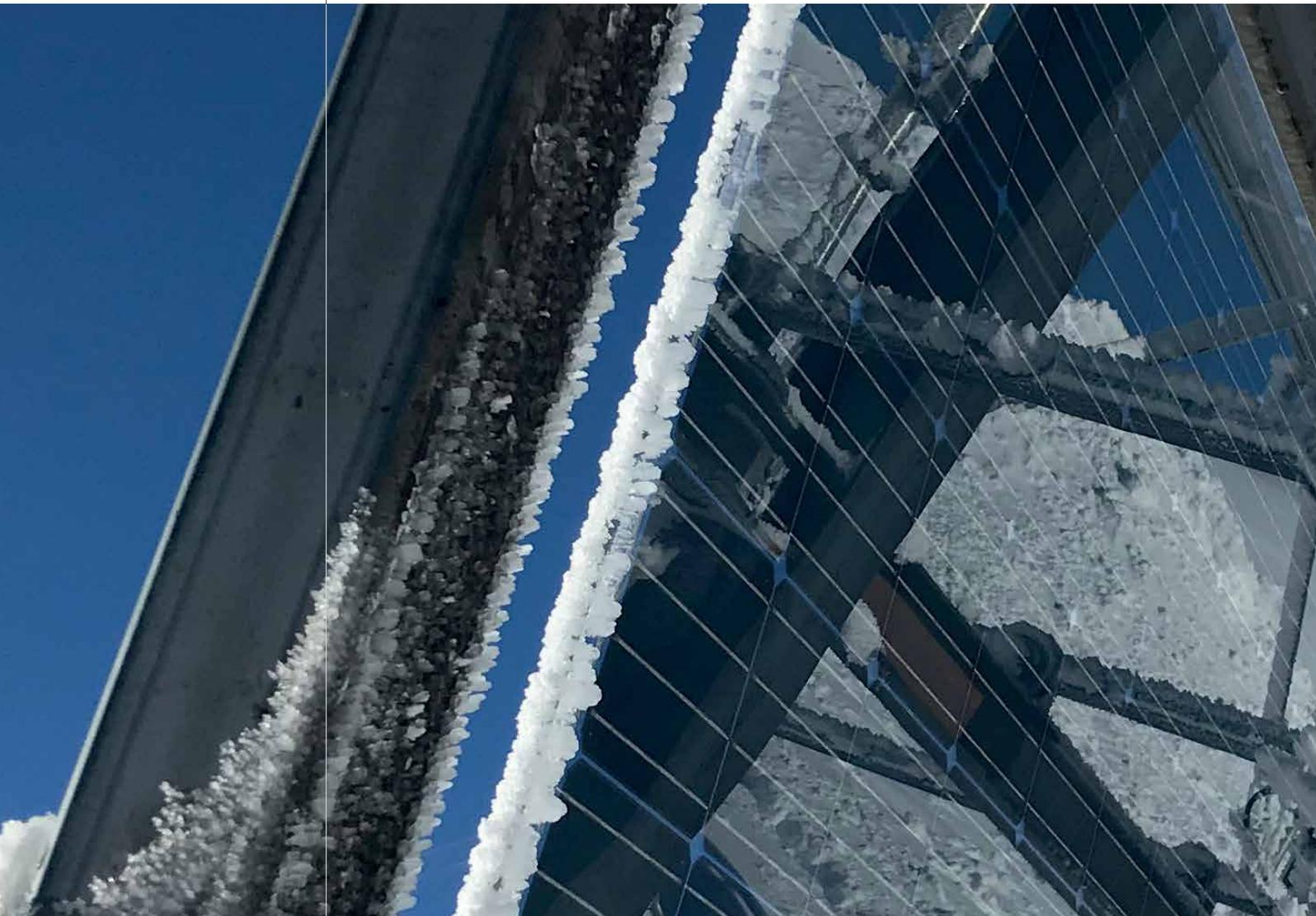


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Energieforschung und Innovation

Bericht 2017





Stärkung der erneuerbaren Energien, Anreize zur effizienten Energienutzung und Ausstieg aus der Kernenergie: im vergangenen Jahr wurden wichtige Weichenstellungen für eine nachhaltige und sichere Energieversorgung der Schweiz vorgenommen. Der eingeläutete Wandel des Energiesystems hält grössere Herausforderungen bereit, die von wirtschaftlichen und technologischen Entwicklungen, aber auch von politischen Entscheiden im In- und Ausland geprägt sind. So stellt etwa eine stärker dezentral ausgerichtete Stromversorgung höhere Anforderungen an die Flexibilität des elektrischen Netzes als bis anhin.

Dieser Wandel im Energiesystem ist jedoch weit mehr als eine Auflistung von Problemen und Herausforderungen: er beinhaltet enorme Chancen für wirtschaftliche Entwicklung und Innovation, reduziert Abhängigkeiten und trägt letztendlich zum Wohlstand dieses Landes bei. Die für Innovation unabdingbare Forschung wurde daher im Zusammenhang mit dem Aufgleisen der «Energiestrategie 2050» gezielt ausgebaut.

Forschung soll grundsätzlich frei sein von jeglichen Vorgaben. Nichtsdestotrotz kann im Energiebereich ein gewisses Mass an Koordination und Konstanz dazu dienen, dass Ziele und Bedürfnisse der Allgemeinheit im Fokus bleiben. Hier spielt das Bundesamt für Energie seit nunmehr 30 Jahren mit seiner programmatisch ausgerichteten Förderung eine zentrale Rolle.

Die in dieser Broschüre vorgestellten Beispiele stehen stellvertretend für eine Vielzahl von Projekten, welche das Bundesamt für Energie mitträgt und eng begleitet.



Benoît Revaz
Direktor BFE

Titelbild und Bild links: Solare Testanlage der ZHAW Wädenswil beim Totalpsee im Parsenengebiet oberhalb von Davos. An der Anlage sind herkömmliche monofaziale Module und bifaziale Module installiert, wobei letztere auch die Einstrahlung auf der Modulrückseite zur Stromerzeugung nutzen. Wie stark die Reflexion der Strahlung an der Schneeoberfläche die Stromproduktion der Solarmodule (Albedo-Effekt) beeinflusst, ist eine der Frage, welche in diesem Feldversuch angegangen wird (Quelle: ZHAW Wädenswil).

Inhalt

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

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

Zahlen & Fakten

Technologie- & Innovationsförderung des Bundesamts für Energie	5
Forschungsprogramme des Bundesamts für Energie	6
Herkunft und Verwendung der Mittel für die Energieforschung in der Schweiz	6

Effiziente Energienutzung

Geodaten unterstützen Trassenplanung von elektrischen Netzen	11
Klimaerwärmung und Kühlbedarf in Gebäuden	13
Kohlendioxid aus der Umgebungsluft	15
«E-Dumper»	17
«Memory Motor»	17
Intelligentes Energiemanagement in der Fabrik	17

Erneuerbare Energie

Solare Prozesswärme in der Schweiz	19
«Bohren mit der Flamme»	21
Intelligente Rotorsteuerung bei Windturbinen	23
Neues Antriebskonzept für Windenergieanlagen	25
Energetisches Potenzial von Hofdünger	25
Produktion von hoch effizienten Solarzellen	25

Sozioökonomische Aspekte

Wie können die Kapitalrisiken für erneuerbare Energieprojekte verringert werden?	27
--	----

Internationale Zusammenarbeit	30
-------------------------------------	----

3-MW-Windturbine in Haldenstein (GR)
(Quelle: www.suisse-eole.ch)



Technologie- & Innovationsförderung des Bundesamts für Energie

Im März 1988 fand unter Federführung des Bundesamts für Energie die erste Schweizer Energieforschungskonferenz statt. Diese ging zurück auf eine nationalrätliche Motion, welche unter dem Eindruck der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl die Förderung aussichtsreicher Forschungsprojekte für die Energiebereitstellung und -einsparung forderte. Bereits zwei Jahre zuvor wurde die ausserparlamentarische Eidgenössische Energieforschungskommission CORE (Commission de la recherche énergétique) ins Leben gerufen. Diese erarbeitet in regelmässigem Abstand das «Konzept der Energieforschung des Bundes» und vermittelt damit Leitplanken für Zielsetzungen und Fördermassnahmen. Das Bundesamt für Energie nimmt mit seinem programmatischen Förderansatz und seiner Koordinationsrolle die Funktion einer zentralen Drehscheibe in der Schweizer Energieforschungslandschaft ein.

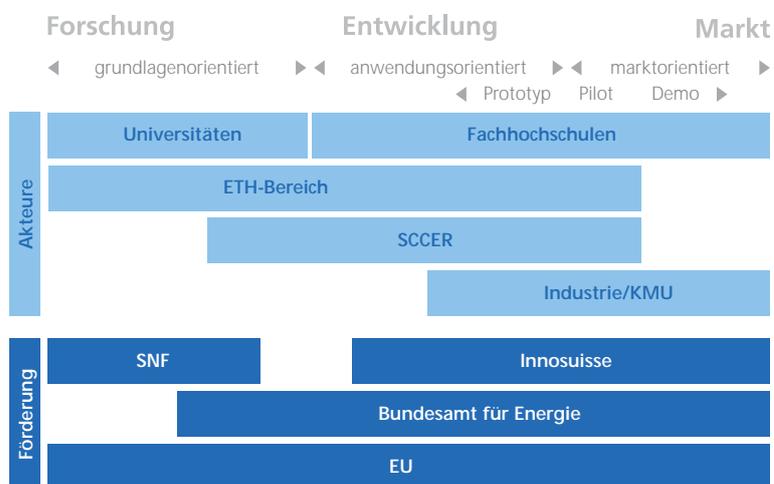
Das Bundesamt für Energie fördert und koordiniert die nationale Energieforschung und unterstützt den Aufbau neuer Märkte für eine nachhaltige Energieversorgung. Um eine solche Koordinationsaufgabe wahrzunehmen, werden die Fördermittel des Bundesamts für Energie dafür eingesetzt, neue Technologien und Konzepte nach einem programmatischen Ansatz gezielt weiter zu bringen. Dabei wird subsidiär dort gefördert, wo Lücken in der Förderlandschaft der Schweiz bestehen (Ab-

bildung 1). Auftragnehmer sind Private, der Bereich der Eidgenössischen Technischen Hochschulen, Fachhochschulen und Universitäten. Die unterstützten Projekte werden vom Bundesamt für Energie fachlich begleitet, wobei fallweise Experten und Vertreter anderer Förderstellen involviert sind.

Durch Stellungnahmen fliesst die Expertise des Bundesamts für Energie auch in die Beurteilung von Projektanträgen anderer Förderstellen ein.

Weiter wird der regelmässige Informationsaustausch zwischen verschiedenen nationalen Förderprogrammen gepflegt und Massnahmen zur allgemeinen Wissensvermittlung unterstützt. Damit ist das Bundesamt für Energie mit allen Fördersegmenten entlang der gesamten Wertschöpfungskette eng verzahnt und sorgt für einen kontinuierlichen Wissenszuwachs und dessen Umsetzung in konkreten Anwendungen.

Abbildung 1: Das Bundesamt für Energie koordiniert die Forschung und Innovation im Energiebereich über einen grossen Teil der Wertschöpfungskette. (Innosuisse = Schweizerische Agentur für Innovationsförderung, vormals Kommission für Technologie und Innovation KTI; EU = Europäische Union; SNF = Schweizerischer Nationalfonds).



Forschungsprogramme des Bundesamts für Energie

Die Herausforderung für die Energieforschung liegt im Spannungsfeld zwischen langfristigen Perspektiven und Visionen sowie kurzfristigen, wirtschaftlichen und politischen Realitäten. Die Entwicklung von Energietechnologien ist eher von langfristiger Natur: neue technologische Ansätze und Systeme benötigen viel Zeit bis zu deren Einführung. Die langjährigen Forschungsprogramme zusammen mit der Förderung über Pilot- und Demonstrationsprojekte sollen einen schnelleren Transfer hin zu marktreifen Technologien ermöglichen.

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

Herkunft und Verwendung der Mittel für die Energieforschung in der Schweiz

Seit 1977 erfasst das Bundesamt für Energie Daten zu Forschungs- und Entwicklungsprojekten und zu Pilot- und Demonstrationsprojekten. Dabei werden nur Projekte erhoben, die – ganz oder teilweise – von der öffentlichen Hand (Bund und Kantone), vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF), von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) (seit 2018 Innosuisse) oder von der Kommission der Europäischen Union (EU) finanziert werden.

Die Erhebung erfolgt über Abfragen von Datenbanken des Bundes, des 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 ARAMIS des Bundes (www.aramis.admin.ch), des SNF

(p3.snf.ch), der EU (cordis.europa.eu) und den jeweiligen Webseiten der Institutionen eingesehen werden.

Abbildung 2 zeigt die Aufwendungen der öffentlichen Hand für die Energieforschung in der Schweiz seit 1980 (in Mio. Franken, teuerungskorrigiert) in den vier Hauptbereichen gemäss der Schweizerklassifikation. Im Zusammenhang mit der «Energiesτρα-

tegie 2050» und dem «Aktionsplan Energieforschung» wurde die Schweizer Energieforschung in den letzten Jahren allgemein ausgebaut. Stark dazu beigetragen haben: (1) der Aufbau von nationalen Kompetenzzentren in der Energieforschung durch die KTI/Innosuisse (Swiss Competence Center for Energy Research, SC-CER) seit 2013 (Abbildung 4), welche 2017 in die zweite Phase gestartet

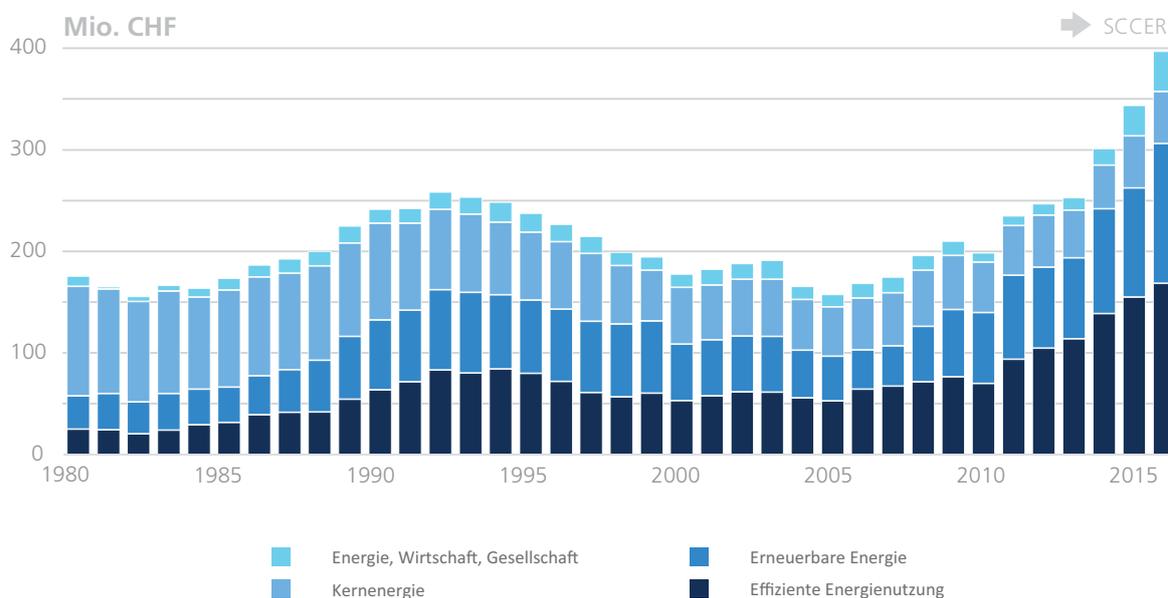


Abbildung 2: Langzeitüberblick über die für die Energieforschung aufgewendeten öffentlichen Mittel. Die Daten werden in Realwerten, d. h. teuerungskorrigiert, dargestellt. Die Werte bewegen sich zwischen 0,3 und 0,65 Promille des Bruttoinlandsprodukts.

sind; (2) neue Nationale Forschungsprogramme (NFP70 und 71) im Energiebereich des Schweizer Nationalfonds; (3) sowie ein gezielter Ausbau der Pilot- und Demonstrationsaktivitäten des Bundesamts für Energie. Innerhalb des ETH-Rats standen zusätzlich Mittel für den Infrastruktur und Kapazitätsausbau zur Verfügung, welche ebenfalls zum Zuwachs der Energieforschungsmittel beigetragen haben. Ein Teil des Anstiegs geht auch auf Anpassungen in der Datenerfassung zurück, so z. B. auf eine konsistente Berücksichtigung des «Overheads», welche die Eigenleistungen des ETH-Bereichs und von Universitäten ansteigen liessen.

Wie Abbildung 3 zeigt, wird ein grosser Anteil der eingesetzten öffentlichen Mittel für die Energieforschung (42 %) direkt über die strategischen Ziele des ETH-Rats festgelegt,

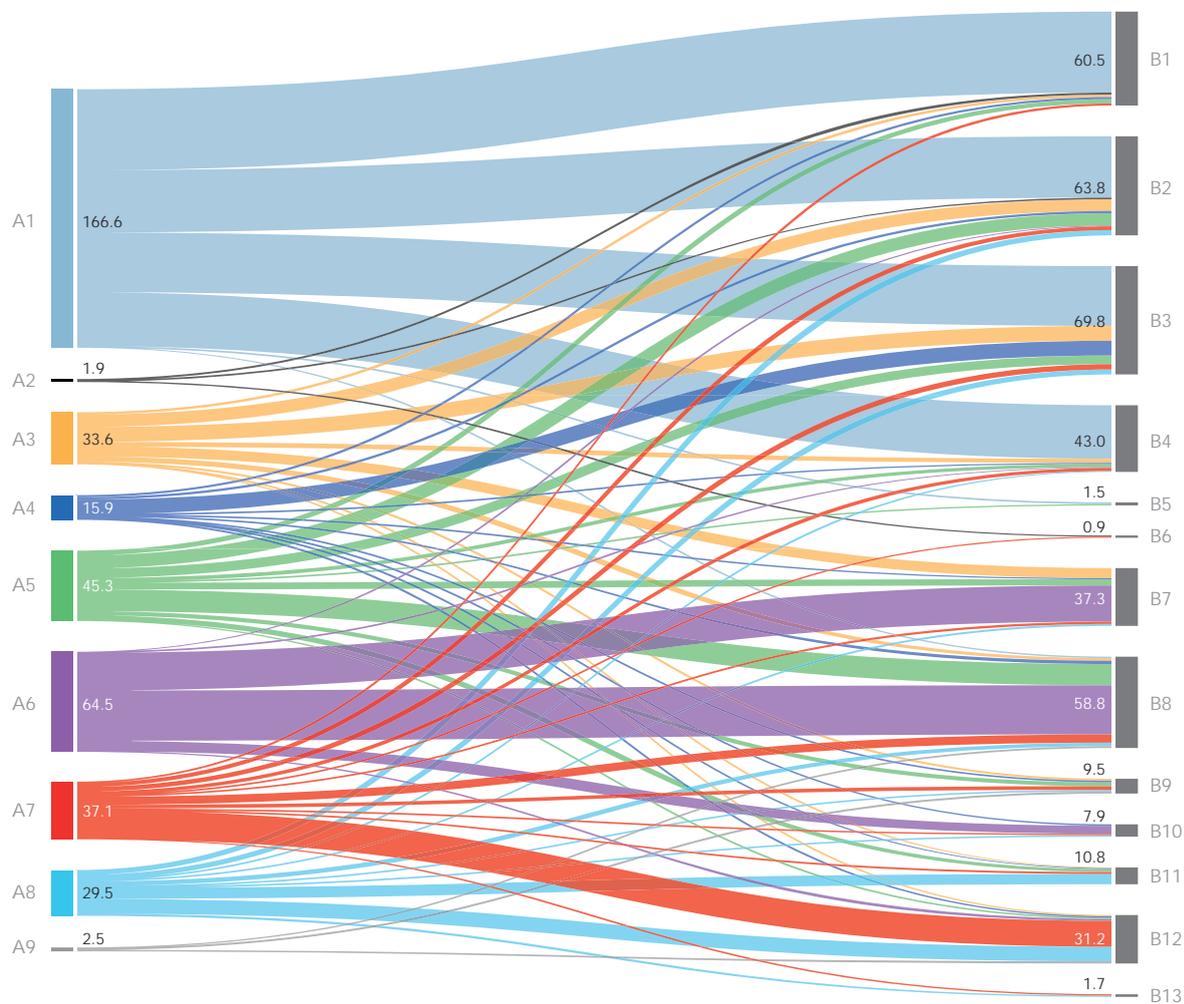
nach denen die Forschungsschwerpunkte und Mittel für die Eidgenössischen Technischen Hochschulen und die Institutionen des ETH-Bereichs festgelegt werden. Als Orientierungshilfe dient dabei das aktuelle Energieforschungskonzept des Bundes, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission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

Der Anteil (41 %) der Mittel, welche über die Kommission für Technologie und Innovation (KTI, neu Innovuisse), über den Schweizer Natio-

nalfonds, über das Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI) und die Europäische Union (EU), sowie über das BFE bereitgestellt werden, sind kompetitiver Natur. Die Projektmittel von EU und SBFI fliessen grossmehrheitlich in europäische Projekte, wobei der Anteil des SBFI künftig kleiner ausfallen wird, da ab 2017 Schweizer Partner in europäischen Projekten wieder direkt über die EU finanziert werden.

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

Stefan Oberholzer



Herkunft der Mittel:

- A1 ETH-Rat
- A2 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
- A3 Schweizerischer Nationalfonds SNF
- A4 Europäische Union EU
- A5 Kommission für Technologie und Innovation KTI
- A6 Kantone
- A7 Bundesamt für Energie BFE
- A8 Staatssekretariat für Bildung, Forschung & Innovation SBFI
- A9 Andere

Verwendung der Mittel:

- B1 Paul Scherrer Institut PSI
- B2 ETH Zürich
- B3 ETH Lausanne
- B4 Empa
- B5 Eawag/WSL
- B6 Internationale Organisationen
- B7 Universitäten
- B8 Fachhochschulen
- B9 Andere Bundesstellen
- B10 Andere kantonale Stellen
- B11 Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique CSEM
- B12 Privatwirtschaft
- B13 Gemeinden

Abbildung 3: Herkunft der öffentlichen Mittel für die Energieforschung in der Schweiz 2016 und deren Verwendung in Institutionen aus dem Energieforschungsbereich. Nicht berücksichtigt sind Mittel von privater Seite (z. B. grosse Eigenleistungen in KTI-Projekte und Pilot- und Demonstrationsprojekten des Bundesamts für Energie). Die Zahlen entsprechen Mio. CHF. (Empa: Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Eawag: Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, WSL: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft).

	2015	2016
1 Energy Efficiency	94.4	101.8
11 Industry	9.4	12.4
12 Residential and commercial buildings	33.7	33.9
13 Transport	40.1	39.9
14 Other energy efficiency	11.0	14.9
19 Unallocated energy efficiency	0.3	0.7
2 Fossil Fuels: Oil, Gas and Coal	13.2	9.8
21 Oil and gas	7.0	4.9
23 CO ₂ capture and storage	6.2	4.9
3 Renewable Energy	92.3	113.2
31 Solar energy	45.9	53.5
311 Solar heating and cooling	5.0	4.0
312 Solar photovoltaics	32.2	37.2
313 Solar thermal power (CSP/STE)	6.4	9.8
319 Unallocated solar energy	2.2	2.4
32 Wind energy	1.9	2.8
34 Biofuels (incl. biogases)	17.7	20.8
35 Geothermal energy	14.1	20.4
36 Hydroelectricity	12.5	15.4
39 Unallocated renewable energy sources	0.2	0.3

	2015	2016
4 Nuclear Fission and Fusion	51.2	51.3
41 Nuclear fission	25.6	24.8
42 Nuclear fusion	24.3	25.4
49 Unallocated nuclear fission and fusion	1.2	1.2
5 Hydrogen and Fuel Cells	27.9	29.3
51 Hydrogen	11.3	17.4
52 Fuel cells	6.4	5.5
59 Unallocated hydrogen and fuel cells	10.2	6.3
6 Other Power and Storage Technologies	39.6	56.4
61 Electric power generation	7.6	6.9
62 Electricity transmission and distribution	23.3	38.2
63 Energy storage (non-transport)	8.7	11.4
631 Electrical storage	4.5	6.5
632 Thermal energy storage	2.3	3.0
639 Unallocated energy storage	1.9	1.9
7 Other Cross-Cutting Research	26.5	35.1
71 Energy system analysis	24.9	32.9
72 Basic energy research (not specified)	1.0	0.4
73 Other	0.6	1.8
Total	345.1	396.9

Aufwendungen der öffentlichen Hand 2015 und 2016 für die anwendungsorientierte Energieforschung inklusive Pilot- und Demonstrations- und Leuchtturmprojekte in Millionen Franken (Nominalwerte).

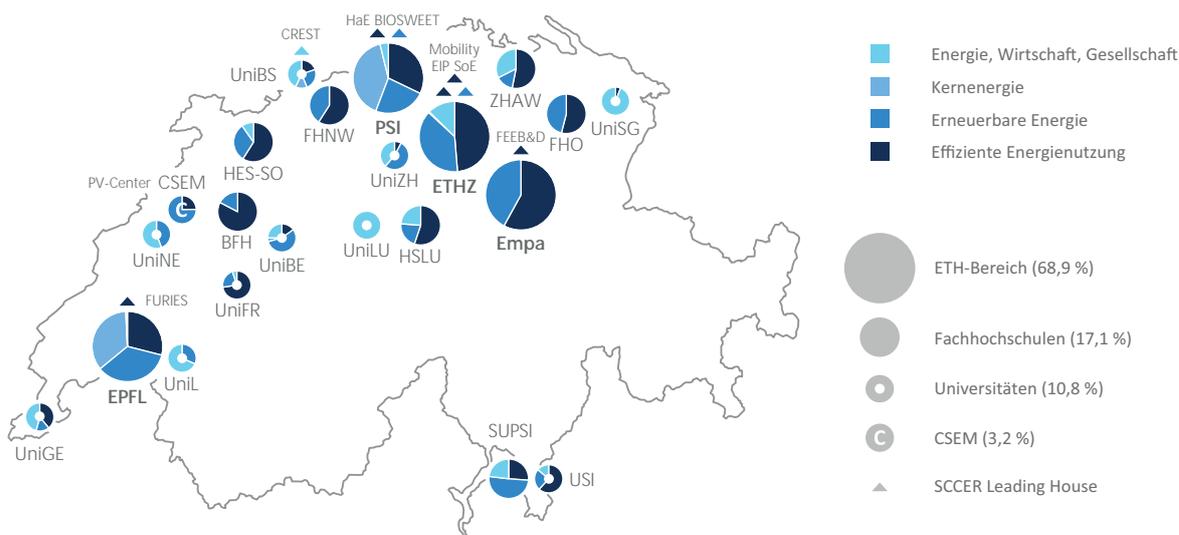


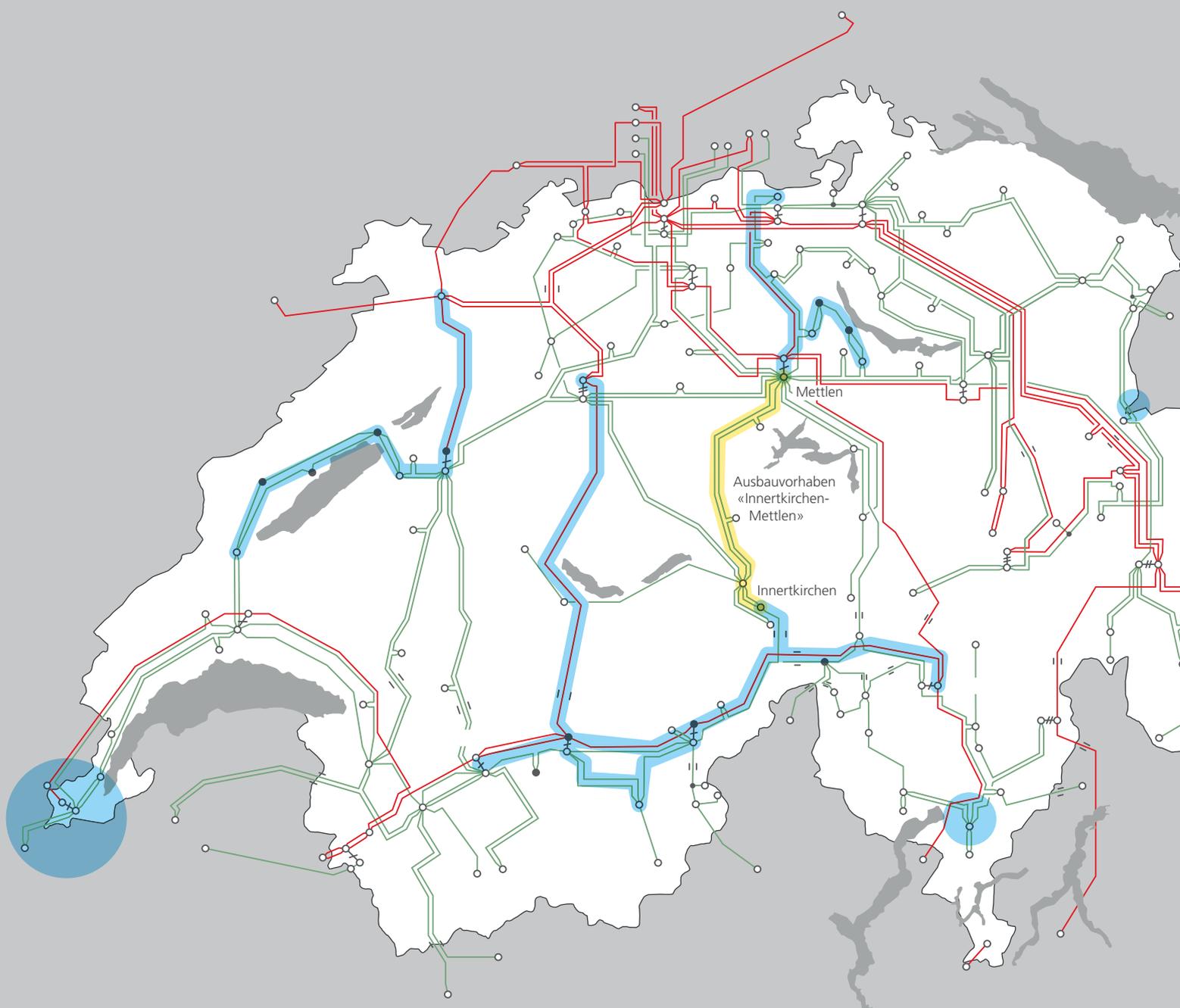
Abbildung 4: Energieforschung an Schweizer Hochschulinstitutionen (Daten 2016). ETH-Bereich: ETH Zürich und ETH Lausanne, Empa, Paul Scherrer Institut PSI, Eawag und WSL. CSEM = Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique, SCCER = Swiss Competence Centre in Energy Research.



Effiziente Energienutzung

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

en wesentlich gestärkt. In allen diesen Bereichen werden vorhandene Potenziale heute bei weitem noch nicht ausgenutzt. Die Energieforschung soll helfen, diese Potenziale zu identifizieren und zu ihrer Ausschöpfung technisch realisierbare und wirtschaftlich tragbare Lösungen zu finden.



Geodaten unterstützen Trassenplanung von elektrischen Netzen

Der Bau neuer Freileitungen erfordert eine Abwägung vielfältiger Interessen. Ein Forscherteam der ETH Zürich hat ein mit 3D-Visualisierung ausgestattetes Softwarewerkzeug entwickelt, das Planer bei ihrer Arbeit unterstützt und die Kommunikation über geeignete Trassenführungen erleichtert.

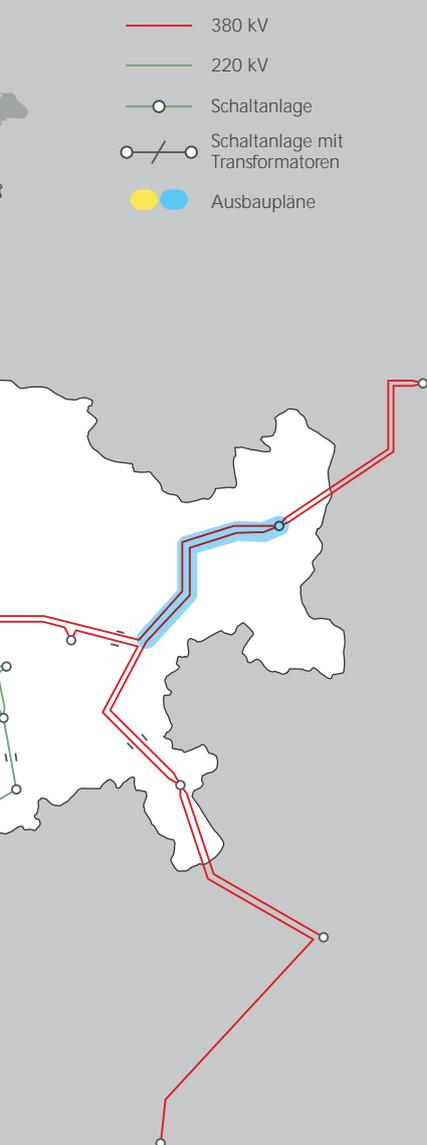
Die Schweiz verfügt heute über ein leistungsfähiges Höchstspannungsnetz. Es befindet sich in einem Spannungsfeld verschiedener externer Faktoren, welche die nationale Netzgesellschaft Swissgrid nicht beeinflussen kann. Darunter fallen die «Energiestrategie 2050» des Bundes, die Energiepolitik der europäischen Nachbarländer, die Kraftwerksbewirtschaftung, der Energieaustausch mit Europa oder auch die Technologieentwicklung. Anhand verschiedener Szenarien wurden neun Ausbauprojekte sowie vier juristisch begründete Projekte identifiziert, die zusammen das «Strategische Netz 2025» ausmachen.

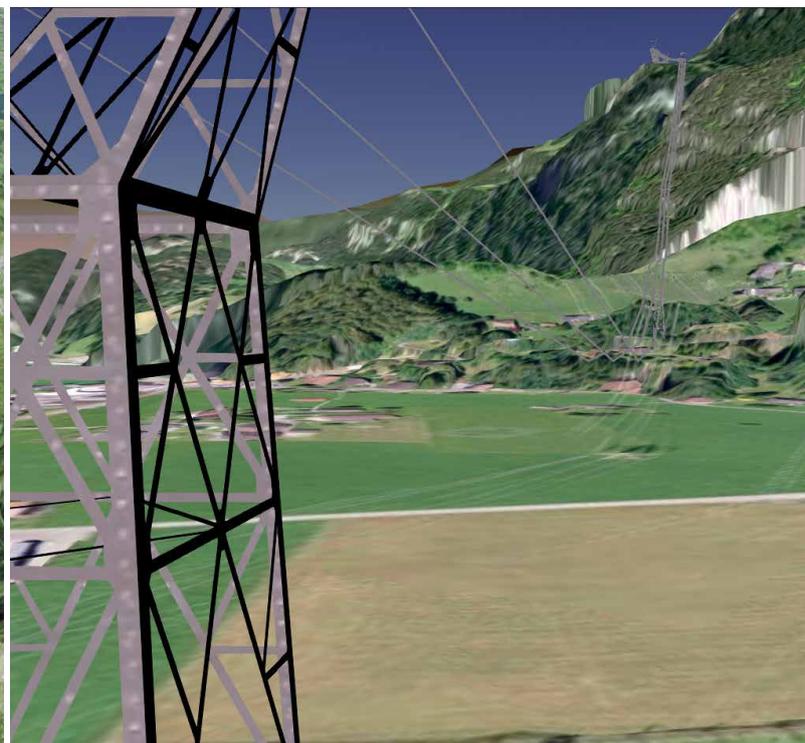
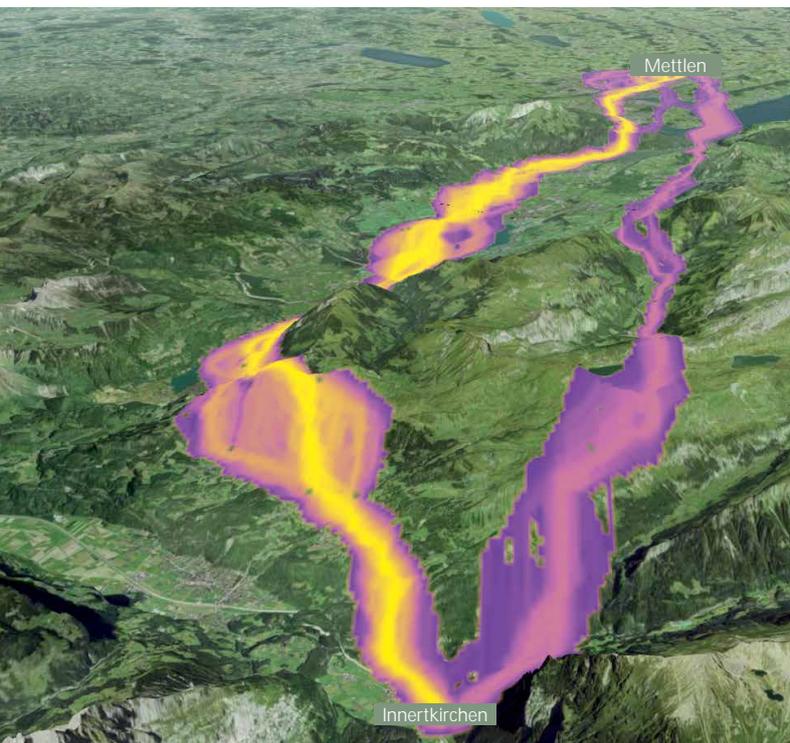
Zur Ausführungsplanung der Projekte will Swissgrid künftig auf ein sogenanntes «3D Decision Support System» zurückgreifen, das Forscher der Institute für Kartografie und Geoinformation resp. für Raum- und Land-

schaftsentwicklung der ETH Zürich im Rahmen eines dreijährigen Forschungsprojekts entwickelt haben. Das Planungstool nutzt Daten aus Geoinformationssystemen und leitet daraus geeignete Varianten von Planungsgebieten, Leitungskorridoren und -trassen ab. Ziel sind Trassenführungen, die Mensch und Umwelt möglichst wenig belasten sowie eine verbesserte Kommunikation zwischen den im Projekt involvierten Akteuren.

Aktuell berücksichtigt das Planungstool 33 Datenkategorien aus den drei Hauptbereichen Umwelt- und Landschaftsschutz (Moore, Natur- und Vogelschutzgebiete usw.), menschlicher Lebensraum (Wohn- und Erholungszonen, historische Areale usw.) und technische Machbarkeit (Seen, Naturgefahrenzonen, schwer erschließbares Gelände usw.). Die Datenkategorien können für jedes Projekt ent-

«Strategisches Netz 2025» der Swissgrid-Netzplanung mit berücksichtigten Ausbauprojekten. Der Netzausbau beträgt total 370 km mit einem gleichzeitigen Netzurückbau von 270 km (485 Strangkilometer) im Übertragungsnetz sowie von 145 km (211 Strangkilometer) im Verteilnetz. Damit kompensieren sich Netzausbau und -rückbau. Das Ausbauprojekt «Innertkirchen-Mettlen» diente als Fallstudie für das entwickelte 3D Decision Support System (Quelle: Swissgrid).





(Links) Visualisierung eines möglichen Planungsgebiets für die Leitung von Innertkirchen nach Mettlen. Die Karte zeigt die relativen Raumkosten für den Bau von Leitungen auf, die sich aus dem Einbezug des Raumwiderstands aus allen Kategorien ergeben. Je dunkler violett die Flächen sind, desto höher sind die Raumkosten zur Durchquerung der Flächen. (Rechts) Visualisierungen als Hilfe für die Entscheidungsfindung zur Erneuerung bzw. zum Neubau von Überlandleitungen (Quelle: ETH Zürich).

sprechend angepasst werden. Das Werkzeug ist so konzipiert, dass der Anwender jeweils definieren muss, wie stark jede Kategorie einem Leitungsbau entgegensteht.

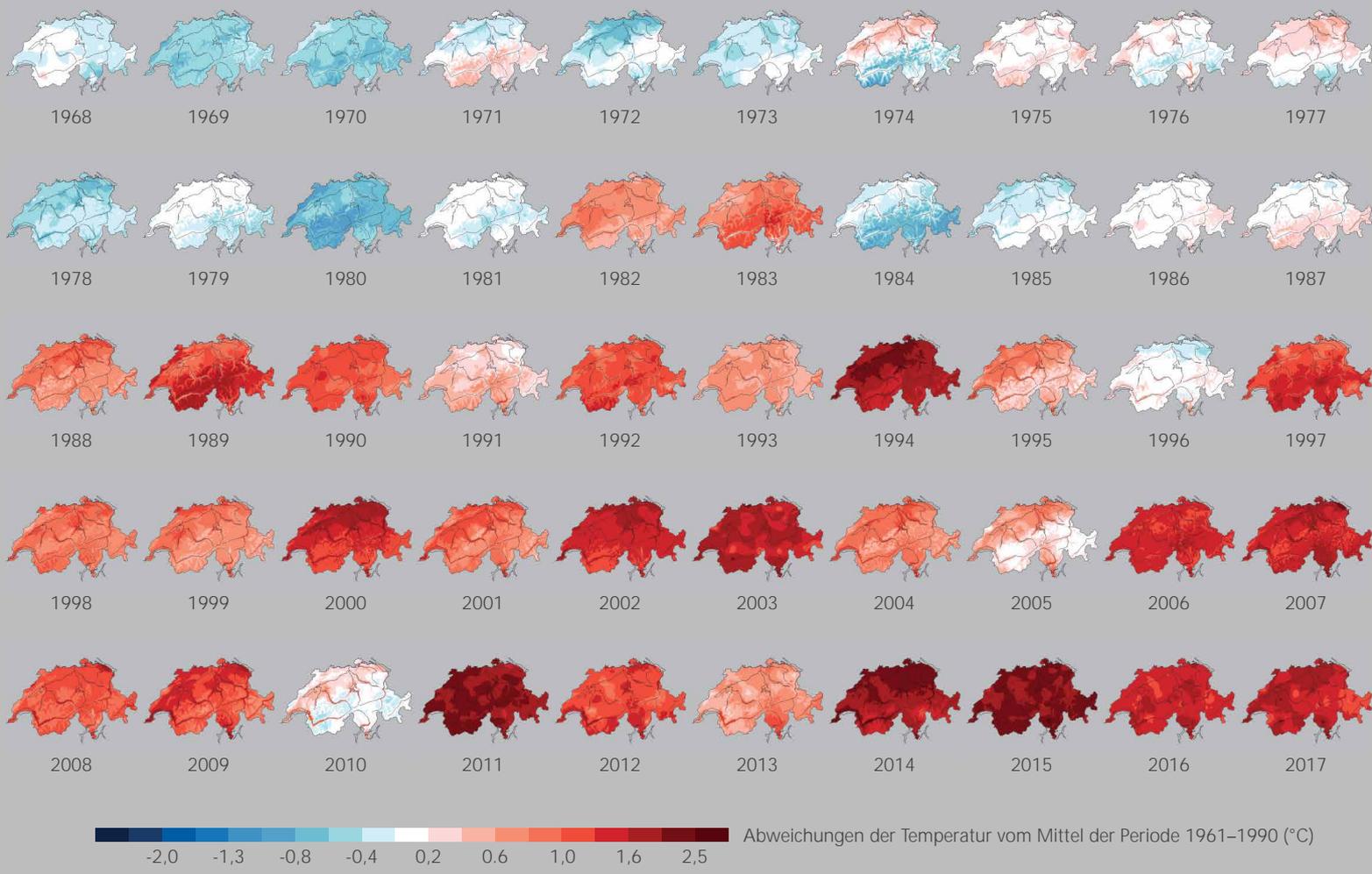
Im Ergebnis stellt die Software dreidimensionale Visualisierungen von möglichen Leitungstrassen zur Verfügung. Planer der österreichischen Netzgesellschaft APG, die am Projekt ebenfalls beteiligt war, wollen die Ergebnisse unter anderem bei der Trassenfestlegung einer 380-kV-Ringleitung im Bundesland Kärnten einsetzen. Swissgrid wiederum möchte das Tool vor allem als Kommunikationsinstrument für Diskussionsprozesse nutzen, in denen Fachleute oder die interessierte Öffentlichkeit

im Rahmen des Sachplanverfahrens mögliche Leitungstrassen erörtern. Mit dem Werkzeug sind verschiedene Trassenführungen in Echtzeit darstellbar.

In einem Folgeprojekt wollen die ETH-Forscher auch Ansätze von «Augmented» oder «Virtual Reality» einbeziehen: Interessierte könnten diese Lösungen in Zukunft nutzen, um sich mögliche Trassenverläufe in der Landschaft direkt auf einem Handy oder Tablet anzeigen zu lassen, wenn sie sich an einem bestimmten Punkt in der Landschaft positionieren. Mit dem Ziel, eine Konsenslösung zu finden, können die vorgeschlagenen Varianten von den verschiedenen Akteuren bewertet und diskutiert wer-

den. Die neue Lösung soll auch Erdkabelleitungen umfassen. Diese sind im aktuellen Tool jedoch noch nicht enthalten, da deren Modellierung bedeutend komplexer ist als jene von Freileitungen. Das 2017 in Zürich gegründete ETH-Spin-off-Unternehmen Gilytics GmbH ist im Begriff, das Softwarewerkzeug zu kommerzialisieren und so zu erweitern, dass auch dezentrale Energiesysteme wie Wind- und Solaranlagen geplant und deren Auswirkungen auf Landschaft, Wirtschaft und Umwelt modelliert werden können.

Benedikt Vogel und Michael Moser



Abweichung der Temperatur in der Schweiz vom Mittel 1961–1990 (Quelle: MeteoSchweiz).

Klimaerwärmung und Kühlbedarf in Gebäuden

Mit einer signifikanten Erwärmung bis Ende des Jahrhunderts wird einerseits im Winter weniger geheizt, andererseits wird im Sommer der Kühlbedarf zunehmen. In einer Studie der Hochschule Luzern wurde an konkreten Beispielen untersucht, mit welchen Auswirkungen in den nächsten Jahren zu rechnen ist und welcher Einfluss die Bauweise und das Nutzerverhalten auf die Temperaturen in Gebäuden insbesondere im Sommer haben wird.

Als Grundlage für die Simulationsrechnungen der Studie mussten in einem ersten Schritt Temperaturdaten im Stundensschritt vorbereitet werden. Dazu wurden für verschiedene Standorte in der Schweiz Klimadaten aus Messungen verwendet und mit Projektionen aus zehn verschiedenen Klimamodellen kombiniert. Bei den Untersuchungen beschränkten sich die Forscher auf Wohngebäude. Der Schweizer Gebäudepark wurde durch vier verschiedene Typen von

Wohngebäuden repräsentiert: zwei Alt- und zwei Neubauten.

Die Veränderung der Aussentemperaturen hat einen starken Einfluss auf die Häufigkeit sogenannter Überhitzungsstunden, während der die Raumlufttemperatur über 26,5 °C liegt. Wurden im Durchschnitt «1995» der Normwertperiode 1980–2009 für den Standort Basel lediglich 27 Stunden berechnet, steigt deren Anzahl für den Durchschnitt «2060»

in der Periode 2045–2074 auf nahezu 900 Stunden an. Unter Berücksichtigung des zusätzlichen Wärmeinseleffekt in engen Stadtgebieten erhöht sich die Anzahl an Überhitzungsstunden in «2060» auf 1200 Stunden, am Standort Lugano auf 1400 Stunden.

Soll die Raumlufttemperatur im Sommer mit technischen Mitteln auf einem normalen Niveau gehalten werden, steigt der dazu nötige Energiebedarf für die Klimatisierung je nach



«Altbau standard» (Quelle: HSLU)



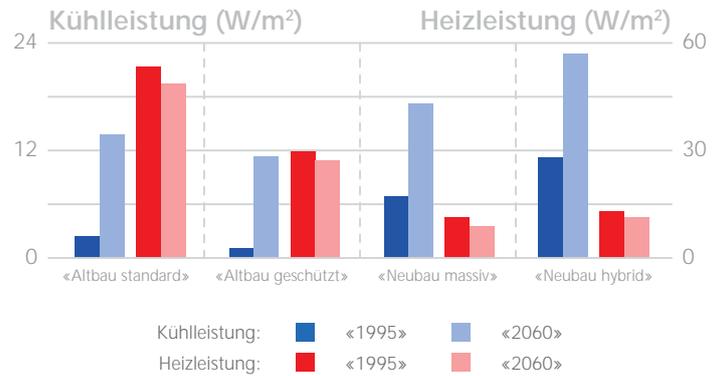
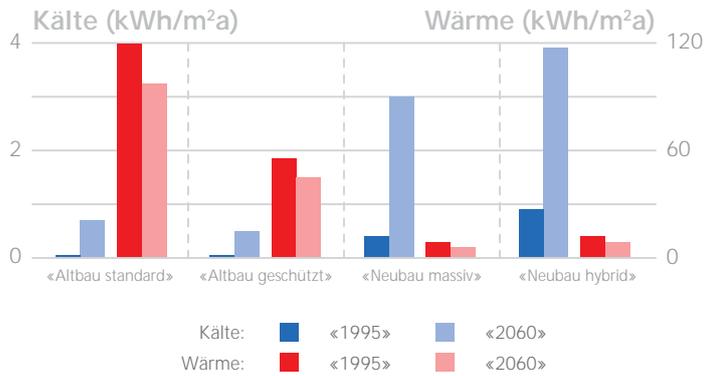
«Neubau massiv» (Quelle: Implenia Schweiz AG & BüroB, Bern)



«Altbau geschützt» (Quelle: HSLU)



«Neubau hybrid» (Quelle: Renggli AG)



In einer Simulation wurde in vier Fallstudien für vier verschiedene Gebäudetypen Heizwärmebedarf und -leistung sowie Klimakältebedarf und Kühlleistung für die künftige klimatische Entwicklung in der Schweiz abgeschätzt (Datenquelle: HSLU).

Fall stark an, auf bis zu 50 % des Heizbedarfs. Gleichzeitig muss im Winterhalbjahr weniger geheizt werden: Der durchschnittliche Heizwärmebedarf bei den Altbauten reduziert sich zwischen den betrachteten Perioden um 20 %, bei den Neubauten um 30 %.

In einem zweiten Teil der Simulationen wurde der Einfluss einzelner Gebäudeeigenschaften an einem Referenzmodell untersucht. Es zeigte sich, dass die Behaglichkeit (maximal empfundene Temperatur und Anzahl Überhitzungsstunden) in Wohnbau-

ten wesentlich vom Verhalten der Bewohner abhängig ist. Bei nicht optimalem Einsatz von Sonnenschutz und ungenügender Nachtkühlung wurden für «2060» maximale Raumtemperaturen von über 40 °C und nahezu 2000 Überhitzungsstunden ermittelt. Dabei hängen Behaglichkeit und Klimakältebedarf wesentlich vom Fensteranteil und von der Speicherfähigkeit der Räume ab. Bei guten Voraussetzungen und bestmöglichem Nutzerverhalten können auch in warmen Jahren künftig weitgehend behagliche Raumtemperaturen sichergestellt werden.

Damit Wohnbauten mit den grösseren Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel mithalten können, müssen diese heute so konzipiert werden, dass eine einwandfreie Bedienung des Sonnenschutzes und effiziente Nachtkühlung sichergestellt werden können. Dabei sollte der Fensteranteil in einem «vernünftigen» Verhältnis gehalten werden. Alternativ wird es in Zukunft je nach Ausbau der erneuerbaren Energien möglich sein, Gebäude mit Strom aus Photovoltaikanlagen zu kühlen.

Rolf Moser



Anlage in Hinwil zur Gewinnung von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft der Schweizer Firma Climeworks AG (Bildquelle: Climeworks AG).

Kohlendioxid aus der Umgebungsluft

Im Verkehrsbereich – insbesondere in der Luftfahrt – fehlt es teilweise bis heute an Alternativen für die Energieversorgung. Eine zukunftssträchtige Lösung könnten synthetische Kraftstoffe darstellen, die zudem eine langfristige Speicherung erneuerbarer Energie erlauben. Die Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen als Treibstoffe für Luft- oder Strassenfahrzeuge erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst muss ausreichend reines Kohlendioxid (CO_2) für die Reaktion mit Wasserstoff und damit für die Bildung von Kohlenstoffketten gewonnen werden.

Die Herstellung synthetischer Treibstoffe (Kohlenwasserstoffe) in grossen Mengen ist zurzeit noch nicht möglich. Hingegen kommt reines CO_2 in zahlreichen industriellen Anwen-

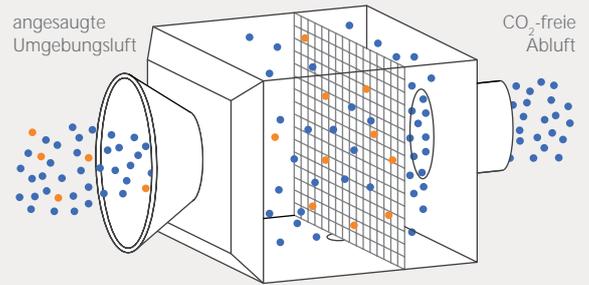
dungen zum Einsatz, beispielsweise bei der Herstellung kohlenstoffhaltiger Getränke, beim Schweißen oder bei der Konservierung von Nahrungsmitteln. Dieses CO_2 stammt heute

mehrheitlich aus der Ammoniakproduktion und muss per Lastwagen, Schiff oder Zug bis zu seinem Verwendungsort transportiert werden.



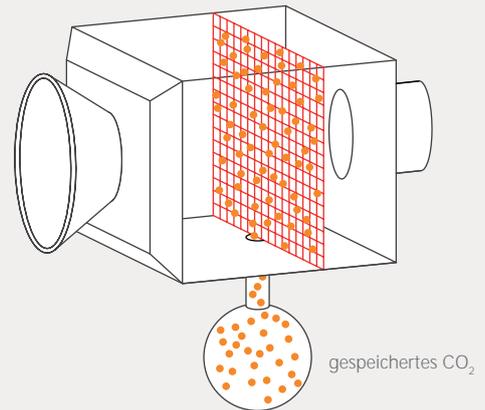
1. Schritt:

CO₂ wird am Filter adsorbiert



2. Schritt:

Filter wird auf 100 °C erwärmt und gebundenes CO₂ wird frei



Die Schweizer Firma Climeworks scheidet mit ihrem Verfahren CO₂ in hoher Reinheit (> 99,9 %) aus der Atmosphäre ab. Ein Ventilator saugt dazu die Umgebungsluft ein und leitet diese auf einen Zellulosefilter, welcher das CO₂ adsorbiert. Der mit CO₂ gesättigte Filter wird anschliessend auf rund 100 °C erwärmt und gibt das reine CO₂ frei. In einer Pilotanlage in Hinwil können 18 solcher Kollektoren bis zu 2,5 Tonnen CO₂ pro Tag abscheiden (Bildquelle: Climeworks AG).

Die Schweizer Firma Climeworks AG hat in den letzten Jahren eine Anlage im industriellen Massstab zur CO₂-Abscheidung entwickelt. Diese kann in unmittelbarer Nähe zum Verbraucher errichtet werden, weil sie das CO₂ aus der Umgebungsluft bezieht. Im Rahmen eines Demonstrationsprojekts wird das gewonnene CO₂ von einem Gewächshausbetrieb genutzt. Das aus der Umgebungsluft abgeschiedene CO₂ wird von der Firma Primanatura AG direkt in die Gewächshäuser injiziert, wo es als Dünger wirkt. Der Standort der Anlage in Hinwil wurde bewusst gewählt, denn die dort ansässige Kehrrechtverbrennungsanlage KEZO (Zweckverband Kehrrechtverwertung Zürich Oberland) liefert die für die Abscheidung erforderliche Prozesswärme. Beim CO₂-Abschei-

dungsprozess muss der Adsorptionsfilter auf 100 °C erwärmt werden, damit das CO₂ von der Membran abgetrennt wird. Nach der Rückgewinnung des konzentrierten CO₂ ist der Filter regeneriert und kann für einen weiteren Zyklus eingesetzt werden.

Die Anlage wird gegenwärtig optimiert mit dem Ziel, die Leistung zu steigern. Angestrebt wird eine Abscheidung von 750 bis 1000 Tonnen CO₂ pro Jahr. Damit dieses Verfahren sinnvoll ist, muss der Energiebedarf möglichst tief gehalten werden. Als Ziel wird ein Verbrauch pro Tonne CO₂ von weniger als 300 kWh Strom und 2200 kWh Abwärme von geringer Qualität (d. h. aufgrund der niedrigen Temperatur industriell nicht nutzbar) anvisiert. Im Moment dient

diese Technologie in erster Linie als Ausgangspunkt für die Rückführung von CO₂ in den Kohlenstoffkreislauf. Die Schliessung dieses Kreislaufs – beispielsweise durch die Herstellung synthetischer Kraftstoffe – ermöglicht eine insgesamt neutrale CO₂-Bilanz. Durch die Sequestrierung des abgeschiedenen CO₂ würde sogar eine insgesamt negative Bilanz möglich, das heisst, eine Verringerung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre. Dieses Verfahren wurde an der COP22 als vielversprechender Weg zur Erreichung der Klimaziele bezeichnet.

Jean-Philippe Crettaz



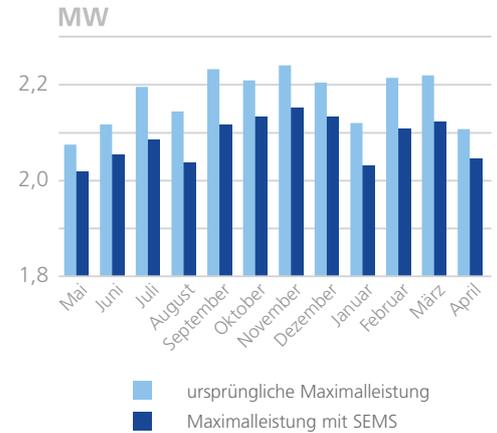
Effiziente Energienutzung: kurz berichtet...

Intelligentes Energiemanagement in der Fabrik

Bei der Verrechnung des Stromverbrauchs von Industriebetrieben wird auf die Spitzenleistung abgestellt, um die Kosten der dafür erforderlichen zusätzlichen Infrastruktur zu decken. Die Usines Métallurgiques de Vallorbe entschieden sich, ein neues System zur Steuerung von Anlagen zu testen, die flexibel eingesetzt werden können (hauptsächlich Öfen und Kompressoren). Dank dem von der

Firma Stigenergy entwickelten «Smart Energy Management System» (SEMS) kann die viertelstündliche Spitzenleistung je nach Monat um drei bis sechs Prozent reduziert werden. Grund für dieses relativ bescheidene Resultat sind die strengen Bedingungen, die anfänglich für den Betrieb des Systems definiert wurden, um die Produktionsprozesse nicht zu beeinträchtigen. Durch eine schrittweise Lockerung dieser Bedingungen sind grössere Einsparungen möglich.

Jean-Philippe Crettaz



«Memory Motor»

Konventionelle Permanentmagnetmotoren verfügen in der Regel über einen begrenzten Arbeitsbereich. Mit einer dynamischen Magnetisierung und Entmagnetisierung der Permanentmagnete durch kurze Stromimpulse können der Arbeitsbereich erweitert und der Wirkungsgrad gesteigert werden. Nach diesem Prinzip hat die Fachhochschule Yverdon erstmals einen sogenannten «Memory Motor» entwickelt und getestet, der auf einem herkömmlichen Stator aufgebaut. Zur Steuerung wird ein konventioneller Frequenzumrichter verwendet,

der der nichtlinearen Magnetisierungscharakteristik angepasst wurde. Speziell im höheren Drehzahlbereich konnte die höhere Energieeffizienz eines solchen «Memory Motors» im Vergleich zu herkömmlichen Synchronmotoren demonstriert werden.

Roland Brüniger

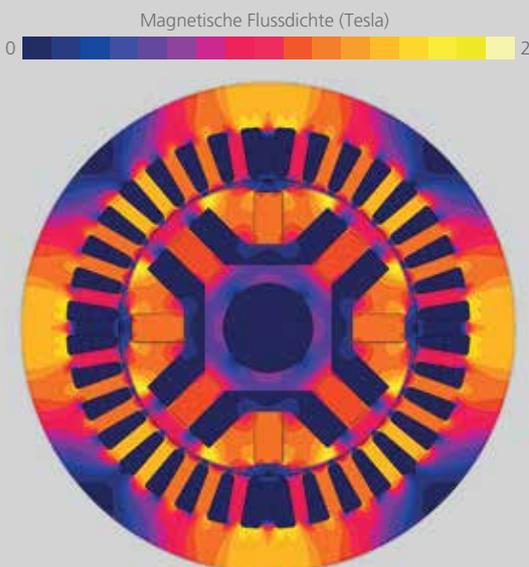
«E-Dumper»

Bei der Zementherstellung müssen enorme Mengen an Material transportiert werden. Um den Energiebedarf der Bergbaumaschinen möglichst gering zu halten, werden Zement-

werke daher häufig unterhalb von Steinbrüchen errichtet. Dank einem von der Firma Arbeitsgemeinschaft «E-Dumper» in der Schweiz hergestellten Kipper mit Elektroantrieb kann das vorhandene Energiepotenzial besser genutzt werden. Der Dumper rekurert die Bremsenergie, die bei der Talfahrt des beladenen Lastwagens anfällt. Die zentrale Herausforderung dieses Projekts ist der Betrieb einer mobilen 600-kWh-Batterie, denn angesichts der hohen Lade- und Entladeströme kann nur ein leistungsfähiges Kühlsystem die Lebensdauer der Batterie gewährleisten.

Jean-Philippe Crettaz

(Links) Magnetische Flussdichte des Rotor eines «Memory Motors» (Quelle: HEIG-VD). (Rechts) «E-Dumper»: 111-Tonnen-Kipper mit Elektroantrieb und einer 600-kWh-Batterie zum Transport von 60 Tonnen Kalk- und Mergelgestein (Quelle: Kuhn Schweiz AG).





Erneuerbare Energie

Der Anteil erneuerbarer Energiebereitstellung nimmt weltweit kontinuierlich zu. Insbesondere im Stromsektor lagen die jährliche Zubauraten in jüngster Vergangenheit oftmals im zweistelligen Prozentbereich, so für Wind und für Photovoltaik. Andere Technologien wie Wasserkraft, Biomasse und Geothermie werden ebenfalls ausgebaut mit hunderten von GW an zusätzlicher Kapazität weltweit. Im Be-

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





Solare Prozesswärme in der Schweiz

Etwa die Hälfte des Schweizer Endenergiverbrauchs erfolgt in Form von Wärme. Vermehrt wird diskutiert, diese Wärme durch erneuerbaren elektrischen Strom zu erzeugen, mittels Wärmepumpen oder auch durch eine einfache Widerstandsheizung. Wir sprechen dann von sogenannter Sektorkopplung und der Elektrifizierung des Wärmesektors. Es lohnt sich aber auch zu prüfen, in welchen Anwendungen die direkte Wärmeerzeugung mit solarthermischen Kollektoren der effizientere Weg ist, den Einsatz von fossilen Brennstoffen zu reduzieren.

In der Schweiz werden 19 % des gesamten Energieverbrauchs zur Versorgung der Industrie verwendet. Davon wird etwa die Hälfte zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt. Diese industrielle Prozesswärme, die aktuell zum Grossteil durch die Verbrennung von Öl und Gas erzeugt wird, kann teilweise mit thermischen Kollektoren aus Solarstrahlung gewonnen werden. Auch in der Schweiz bietet diese Anwendung ein grosses Potenzial zur Reduktion unseres CO₂-Ausstosses.

Weltweit existieren gemäss der EU-Studie «Solar Payback» mehr als 500 Anlagen zur Bereitstellung von solarer Prozesswärme für industrielle Zwecke mit einer Gesamtkapazität von 280 MW_{th} (400 000 m² Kollektorfläche). Die Effizienz solcher solarthermischen Prozesswärmeanlagen hängt insgesamt vom Verbrauch der ausgewählten Prozesse, deren Temperaturbedarf und vor allem von der solaren Einstrahlung am jeweiligen Standort ab. Die am besten geeigneten Verfahren für den Einsatz dieser Technologie, die in verschiedenen Industrie-

zweigen gefunden werden können, sind das Vorwärmen von Rohmaterialien, das Pasteurisieren, Sterilisieren und Waschen, das Trocknen, die Vorwärmung von Kesselspeisewasser und die Zufuhr von heissem Wasser oder Dampf, sowie das Heizen von industriellen Räumen oder Gewerbeeinrichtungen. Ein besonders hohes Potenzial für solare Prozesswärme zeigen die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie (einschliesslich der Tabakindustrie), Textil- und Lederindustrie, sowie Papier- und Pharmaindustriezweige. Konventionelle solarthermische Kollektoren, die aus dem Gebäudebereich zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung bekannt sind, decken problemlos den Temperaturbereich bis etwa 100 °C ab. Bei Temperaturen über 100 °C bis 250 °C können konzentrierende Kollektoren eingesetzt werden.

In den vergangenen Jahren haben einige Schweizer Unternehmen solare Prozesswärmesysteme installiert, um Wärme für verschiedene industrielle Prozesse bereitzustellen (siehe Ta-

Solare Prozesswärmeanlage der Emmi AG in Saignelégier (JU) mit Parabolrinnenkollektoren der Firma NEP Solar AG (Bildquelle: SPFINEP Solar).

	Emmi	Crema	Lesca	Colas	Zehnder	HUG
Ort	Saignelégier (JU)	Fribourg (FR)	Bever (GR)	Yverdon (VD)	Gränichen (AG)	Genf (GE)
Höhe (m)	992	703	1710	438	420	381
Koordinaten (CH1903)	567 246, 234 605	576 015, 183 151	787 952, 158 421	539 278, 179 204	650 557, 244 957	500 325, 116 436
Industriebranche	Milch- verarbeitung	Milch- verarbeitung	Milch- verarbeitung	Strassenbau	Heizkörper- produzent	Krankenhaus
Prozessnutzung	Produktion	Produktion	Produktion	Bitumen, Gebäude	Lackieranlage	Sterilisation
Temperaturen (°C)	117	120/160	190	90/160	90/110	110/180
Kollektortyp	Parabolrinnen- kollektor	Parabolrinnen- kollektor	Parabolrinnen- kollektor	Vakuumflach- kollektor	Vakuümrohren- kollektor	Vakuümrohren- kollektor
Wärmeträgermedium	Wasser-Glykol	Wasser	Thermoöl	Thermoöl	Wasser	Thermoöl
Grösse (m ²)	627	581	115	360	184	462
2013	Einstrahlung (kWh/m ²)	-	-	1162 (DNI)	-	-
	Energieertrag (kWh/m ² /a)	-	-	353	-	-
	Effizienz (%)	-	-	30	-	-
2014	Einstrahlung (kWh/m ²)	945 (DNI)	928 (DNI)	833 (DNI)	-	-
	Energieertrag (kWh/m ² /a)	344	340	195	-	-
	Effizienz (%)	36	37	23	-	-
2015	Einstrahlung (kWh/m ²)	1138 (DNI)	976 (DNI)	-	747 (GHI)	876 (GHI)
	Energieertrag (kWh/m ² /a)	418	380	-	92	340
	Effizienz (%)	37	39	-	12	39
2016	Einstrahlung (kWh/m ²)	928 (DNI)	843 (DNI)	-	1198 (GHI)	-
	Energieertrag (kWh/m ² /a)	297	336	-	83	-
	Effizienz (%)	32	40	-	7	41



Übersicht zu den solaren Prozesswärmeanlagen in der Schweiz, welche in den letzten Jahren realisiert und intensiv ausgewertet wurden. Die Balken unten illustrieren die Kostenverteilung für die Realisierung der Anlagen, verteilt auf Dachkonstruktion, Solarkollektoren, Systemintegration und diverse Kosten. Für konzentrierende Kollektoren ist der Anteil der gesamten Solarstrahlung (GHI = «Globale Horizontal Irradiance») massgebend, welcher direkt von der Sonne einfällt (DNI = «Direct Normal Irradiance») (Datenquelle: SPF).

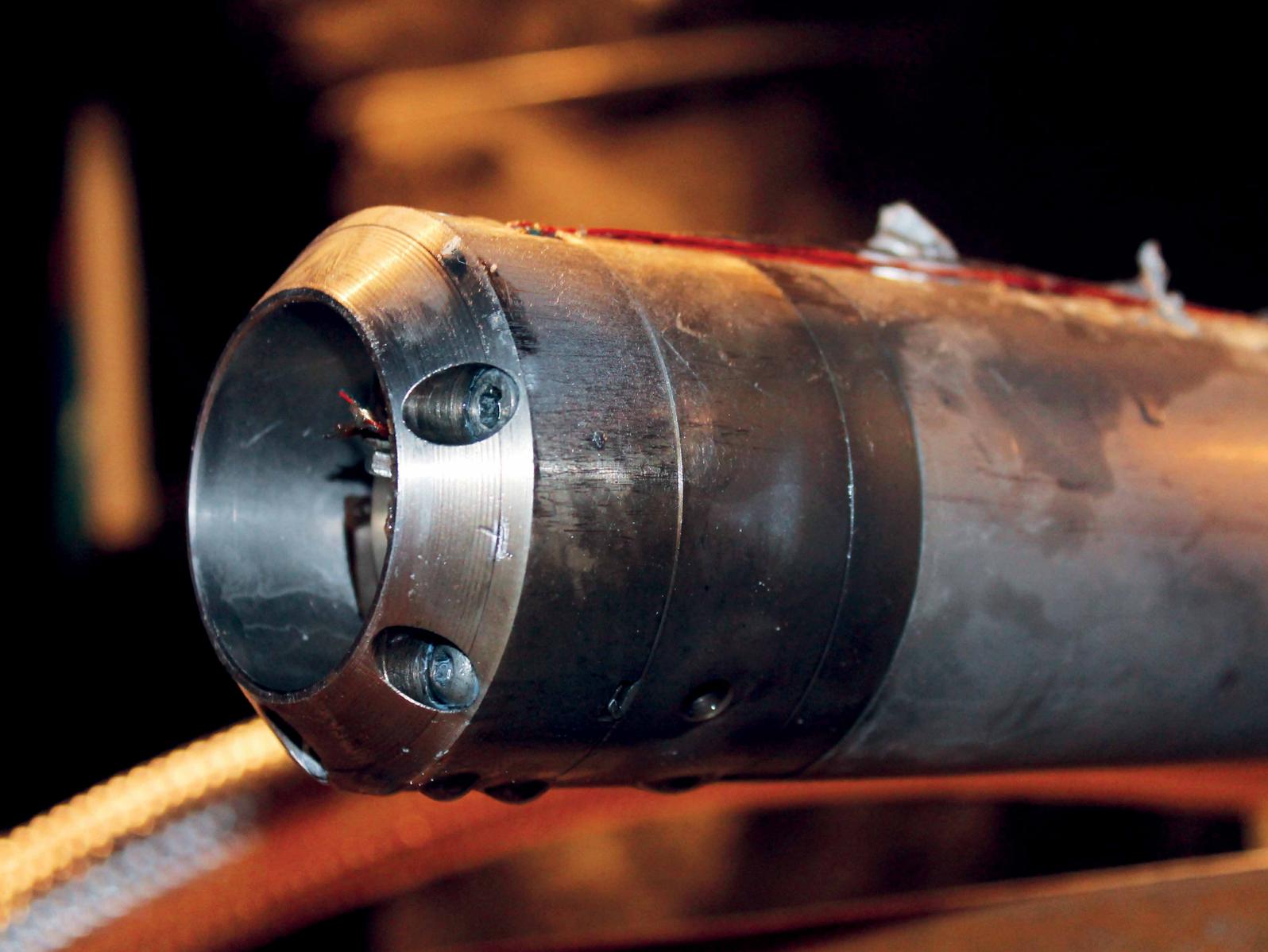
belle). Im Rahmen der Evaluationsstudie «EvaSP» wurden diese Anlagen vom SPF Institut für Solartechnik der HSR Hochschule für Technik Rapperswil über mehrere Jahre begleitet. Ziel dieser Studie ist es, ein besseres Verständnis nicht nur der Kollektoranlagen, sondern der gesamten Systemintegration und des Steuerungssystems zu erlangen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen im Allgemeinen eine gute thermische Leistung der Solarwärmeanlagen. Beispielsweise liefern beim Emmi-Werk in Saignelégier konzentrierende Parabolrinnenkollektoren Wärme bei 117 °C und tragen

durchschnittlich 12 % (220 MWh pro Jahr) zum Gesamtwärmebedarf des Betriebs nur durch Solarwärme bei.

Solare Prozesswärmeanlagen haben in vielen Fällen ihre Leistungsfähigkeit dokumentiert: sie können hohe Temperaturen liefern und erzeugen sauber und CO₂-neutral Wärme. Dennoch sind für eine grössere Verbreitung und einen verstärkten Einsatz der Technologie noch einige Herausforderungen zu überwinden. Die Systemintegration ist in der Regel technisch komplex und die Anlagen sind ohne finanzielle Förderung nicht wirt-

schaftlich wettbewerbsfähig. Daher konzentrieren sich Forschende und Entwickler, die vom Zukunftspotenzial der Solarwärme für die Industrie überzeugt sind, auf die Weiterentwicklung von Lösungen, welche die Systemeffizienz erhöhen und die Kosten senken. Der Fokus der Arbeiten liegt dabei auf der Verbesserung von Kollektoren, dem Anlagendesign und der Entwicklung einer standardisierten einfachen Systemintegration.

Mercedes Hannelore Rittmann-Frank,
Marco Caffisch und Andreas Häberle



Bohrkopf für hydrothermales Flammbohren (Quelle: ETH Zürich).

«Bohren mit der Flamme»

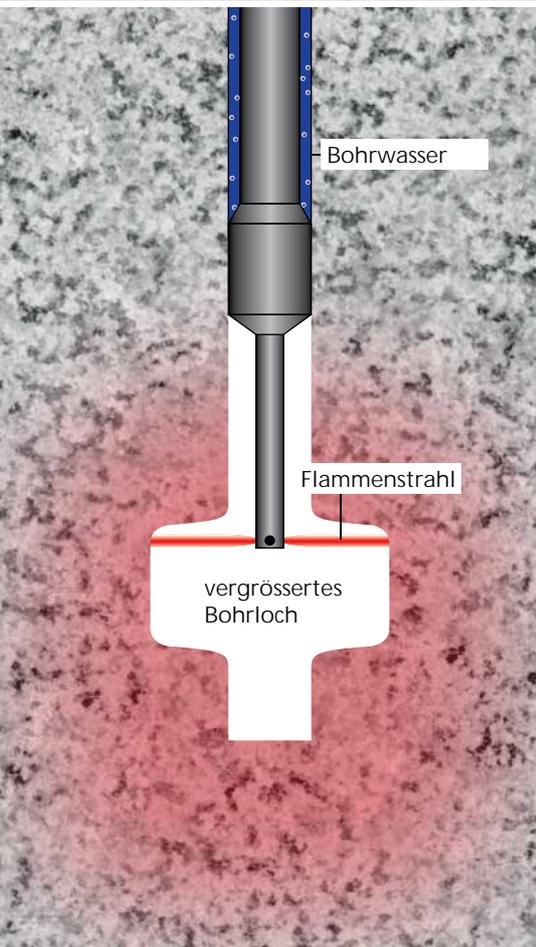
In der Tiefengeothermie wird Wärme aus 3000–6000 m Tiefe an die Oberfläche transportiert, um die Bevölkerung mit klimaneutraler und nachhaltiger Energie zu versorgen. Geothermiekraftwerke unterliegen keinen wetter-, tages- oder jahreszeitabhängigen Schwankungen und stellen damit eine unbegrenzte Alternative zu Kraftwerken mit nicht erneuerbaren Brennstoffen dar.

Um diese Energie aus der Erde effektiv extrahieren zu können, muss im Fall einer ungenügenden Durchlässigkeit des Gesteins – tief im Untergrund – durch «hydraulisches Stimulieren» ein Netzwerk aus Rissen erzeugt werden. Dieser Prozess, bei dem Wasser unter hohem Druck in das Bohrloch gepumpt wird, ist entscheidend für ein funktionierendes tiefengeother-

misches Kraftwerk. Forscher der ETH Zürich haben nun ein neues Verfahren entwickelt, um die Effizienz des Stimulationsprozesses zu steigern und können damit helfen, das gewaltige Potenzial der Tiefengeothermie zu entfalten.

Die Forscher nutzen einen Flammenstrahl, der im Gestein hohe ther-

mische Spannungen erzeugt, die durch Splintern des Gesteins abgebaut wird. Dieses «Thermal Spallation Drilling»-Verfahren wird genutzt, um den Durchmesser eines bestehenden Bohrloches tief im Untergrund lokal zu vergrößern. Durch das lokale Erweitern des Bohrloches können Position und Orientierung der Risse, die während des darauffolgenden Stimu-



lationsvorganges erzeugt werden, genauer kontrolliert werden. Dadurch wird ein grösseres Rissnetzwerk an der idealen Stelle erzeugt und der gesamte Stimulationsvorgang wird effizienter, kostengünstiger und sicherer.

Die Machbarkeit dieser neuen Technologie konnte in einem Feldtest im «Felslabor Grimsel», einem unterirdischen Forschungslabor der NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) in der Nähe des Grimselpasses demonstriert werden. In nur drei Monaten wurde ein speziell konzipierter 50 m langer Prototyp entwickelt, der Flammen mit einer Temperatur von 1500 °C produziert und damit effektiv durch das

harte Gestein des Felslabors bohren kann. Mit diesem Prototyp wurde in einer Tiefe von 15 m der Durchmesser eines bestehenden, wassergefüllten Bohrlochs an verschiedenen Stellen erfolgreich mehr als verdoppelt. Dadurch vervielfacht sich die Kontaktfläche zwischen Bohrloch und dem umgebenden Gestein. Nach dieser viel versprechenden Demonstration der Machbarkeit wollen die Forscher nun den nächsten Schritt wagen und die Technologie in einem mitteltiefen Bohrloch einsetzen, um damit die Revolution der Geothermie weiter voranzutreiben.

Michael Kant, Edoardo Rossi und Philipp Rudolf von Rohr

(Oben) Testbohrung mit dem «Thermal Spallation Drilling»-Verfahren im NAGRA-Felslabor am Grimsel (Quelle: ETH Zürich). (Links) Bei diesem Bohrverfahren wird das Gestein rund um ein bestehendes Bohrloch mittels einer heissen Flamme erhitzt und durch thermische Rissbildung vergrössert.



Modell einer Windturbine zur Untersuchung der individuellen Steuerung der Rotorblätter (Quelle: ETH Zürich).

Intelligente Rotorsteuerung bei Windturbinen

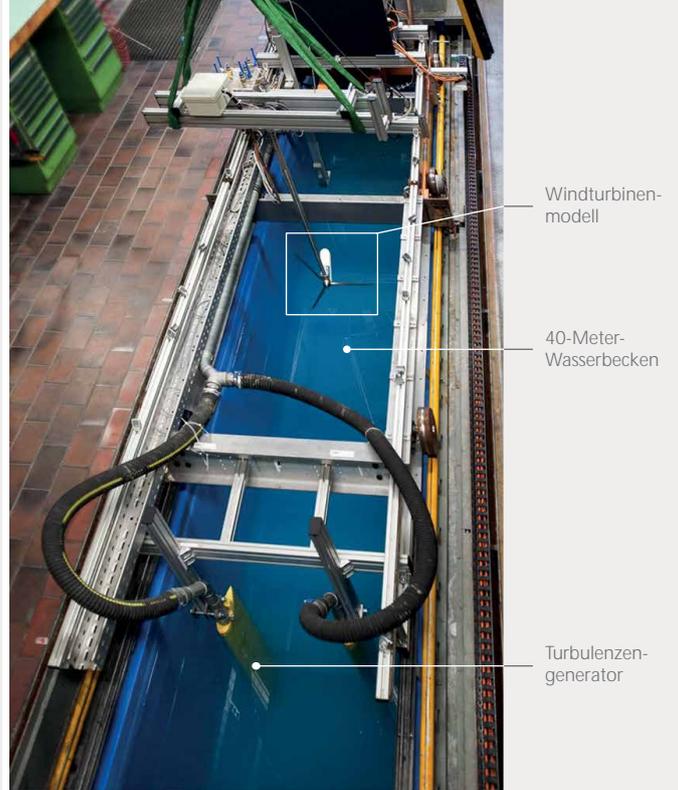
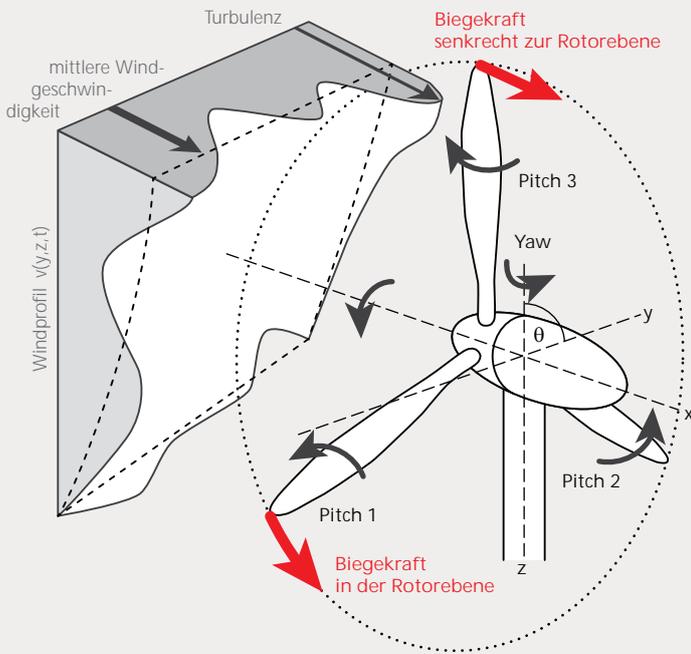
Die Stromproduktion mittels Windenergie ist ein integraler Bestandteil der Energiestrategie und soll bis 2050 auf rund 4,3 TWh pro Jahr ausgebaut werden. Damit würde Windenergie – nach der Photovoltaik – den zweitgrössten Beitrag zum Ausbau der «neuen erneuerbaren Energien» leisten. Im Jahr 2016 waren hierzulande 37 grosse Windenergieanlagen in Betrieb, welche mit bescheidenen 0,2 % zur gesamten Stromproduktion beitrugen (im Vergleich zu den Nachbarländern Österreich mit 7,5 und Deutschland mit 12,9 %). Neben Akzeptanzfragen und langwierigen Bewilligungsverfahren stellt die komplexe Topographie der Schweiz auch technische Herausforderungen an den Einsatz von grossen Multimegawattanlagen.

Der Rotor einer Windkraftanlage dreht sich durch die Auftriebskraft des Windes an den Rotorblättern. Dabei nimmt die aufgenommene Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zu. Um die Nennleistung des Generators nicht zu überschreiten, wird die Leistungsaufnahme des Rotors ab einer gewis-

sen Windgeschwindigkeit durch das Verdrehen der Rotorblätter um die Längsachse («Pitch») limitiert: ein geringerer Anstellwinkel der Rotorblätter gegenüber der Windrichtung führt zu kleineren Auftriebskräften und somit zu einer reduzierten Leistung. Eine aktive Anpassung des Anstellwinkels der Rotorblätter erfolgt

auch im Teillastbetrieb, um eine maximal mögliche aerodynamische Effizienz zu erreichen.

Mit dem Trend zu immer grösseren Windturbinen nehmen die Herausforderungen an das Design laufend zu. Je grösser der Durchmesser des Rotors, desto stärker sind die Inhom-



(Links) Inhomogenitäten im Windfeld führen bei grossen Windanlagen zu starken Belastungen der Rotorblätter. Durch eine individuelle Steuerung des Anstellwinkels der Rotorblätter (IPC = «Individual Pitch Control») können diese Belastungen reduziert werden (Quelle: BFE). (Rechts) An der ETH Zürich werden zu diesem Thema aufwendige experimentelle Tests an einer Modellturbinen durchgeführt, womit sich Ergebnisse aus Simulationen für IPC-Steuerungsalgorithmen experimentell validieren lassen (Quelle: ETH Zürich).

genitäten im auftreffenden Windfeld, welche die Rotorblätter mechanisch stark beanspruchen. Beispiele von Inhomogenitäten im Windfeld sind geringere Windexwindigkeiten in Bodennähe, der Nachlauf benachbarter Windkraftanlagen oder Turbulenzen auf Grund einer speziellen Topographie, wie z. B. in der hügeligen Schweiz. Auch ist die Horizontalachse des Rotors typischerweise leicht geneigt, um den Abstand zwischen den Rotorblättern und Turm zu vergrössern, was zu einer asymmetrischen Belastung der Rotorblätter führt.

Ermüdungsbelastungen lassen sich minimieren, indem die Anstellwinkel der Rotorblätter nicht nur kollektiv, sondern auch individuell angepasst werden (IPC = «Individual Pitch Control»). Damit soll eine höhere Lebensdauer und geringere Wartungskosten erzielt werden. Die Algorithmen für eine individuelle Steuerung des Anstellwinkels der einzelnen Rotorblätter basieren dabei hauptsächlich auf Simulationen.

Das Labor für Energieumwandlung der ETH Zürich untersucht in diesem Themenfeld den Nutzen von IPC experimentell. Dazu wurde in aufwendiger Arbeit ein einmaliges skaliertes Modell einer modernen, drehzahlvariablen Multimegawattturbine mit individueller Pitchregelung entwickelt und in der Windturbinentestanlage des ETH-Labors getestet. Die Testanlage besteht aus einem 40 m langen Wasserbecken. Darin wird das Turbinenmodell auf einem Schlitten im Wasser nachgezogen und so die Strömung um die Windturbinen simuliert. Mit Wasser als Testmedium erreicht man eine bessere Annäherung an die Strömungsverhältnisse (Reynoldszahl) einer realen Turbine im Vergleich zu einem Modellversuch mit Luft als Medium. Vor dem Turbinenmodell können zusätzlich aktiv Turbulenzen im Wasser generiert werden, um so ein turbulentes Windfeld vor dem Rotor zu simulieren.

In ersten Tests konnte demonstriert werden, dass eine individuelle sinusoidale Pitchregelung (1. Harmoni-

sche), welche fest an die Phase der Rotordrehung θ gekoppelt ist, je nach Gierwinkel (Yaw) der Turbine eine Leistungssteigerung von 10–16 % ergeben kann. In der Literatur werden auch IPC-Algorithmen simuliert, mit denen höhere Harmonische kompensiert werden. Ziel dabei ist es, neueste Messtechnologien zur Bestimmung von Inhomogenitäten im Windfeld in Echtzeit wie etwa LIDAR (light detection and ranging) für die dynamische Steuerung von Windturbinen nutzbar zu machen. Hier können experimentelle Untersuchungen wie an der ETH Zürich wichtige Beiträge liefern. In laufenden Arbeiten werden die Auswirkungen von erhöhten Turbulenzen auf die Belastung experimentell weiter quantifiziert.

Stefan Oberholzer



Energetisches Potenzial von Hofdünger

Hofdünger (Gülle und Mist verschiedener Nutztiere) ist wegen der schlechten Vergärbarkeit ein bisher kaum genutztes Substrat zur Gewinnung von Biogas. Mit einem verbesserten Vergärungsprozess soll eine signifikante Erhöhung der Biogasausbeute aus diesem Rohstoff erreicht werden, um einen wirtschaftlichen

Betrieb einer Biogasanlage allein auf Hofdüngerbasis zu ermöglichen. Hierbei wird die Gülle in-situ während der anaeroben Vergärung mit aeroben Mikroorganismen behandelt. Polymere Substanzen in der Gülle werden von diesen Mikroorganismen in wasserlösliche Zwischenprodukte aufgespalten, die vom mikrobiellen Biogaskonsortium simultan zu Methan und Kohlendioxid umgewandelt werden.

Sandra Hermle

Neues Antriebskonzept für Windenergieanlagen

Eine Windkraftanlage erleidet durchschnittlich 0,13 Ausfälle pro Jahr. Rund 30 % der Betriebskosten entfallen auf Wartung und Unterhalt. Ausgehend von diesen Feststellungen haben das Schweizer Unternehmen GDC, die Fachhochschule Nordwestschweiz und die Brusa Elektronik AG ein neues, modulares Antriebssystem entwickelt. Das Konzept sieht ein innovatives Verteilgetriebe und mehrere kleinere Generatoren anstelle eines einzigen vor. Diese Generatoren lassen sich je nach Windstärke unabhängig voneinander ein- und ausschalten, wodurch die Effizienz im Teillastbereich gesteigert werden kann. Der Vorteil dieses Turbinentyps liegt in

erster Linie darin, dass Wartung und Unterhalt vereinfacht werden.

GDC Urs Giger GmbH

Produktion hoch effizienter Solarzellen

Eine neue Methode zur Herstellung von hoch effizienten kristallinen Siliziumsolarzellen, vorgestellt von einem Forscherteam der EPFL und des CSEM in Neuchâtel, hat 2017 für grosse Aufmerksamkeit gesorgt. Um die Effizienz solcher Zellen weiter zu steigern, werden alle elektrischen Kontakte auf der Rückseite der Zelle positioniert, um so die Verschattung auf der Vorderseite gänzlich zu eliminieren. Die Produktion solcher Zellen ist jedoch normalerweise sehr aufwen-



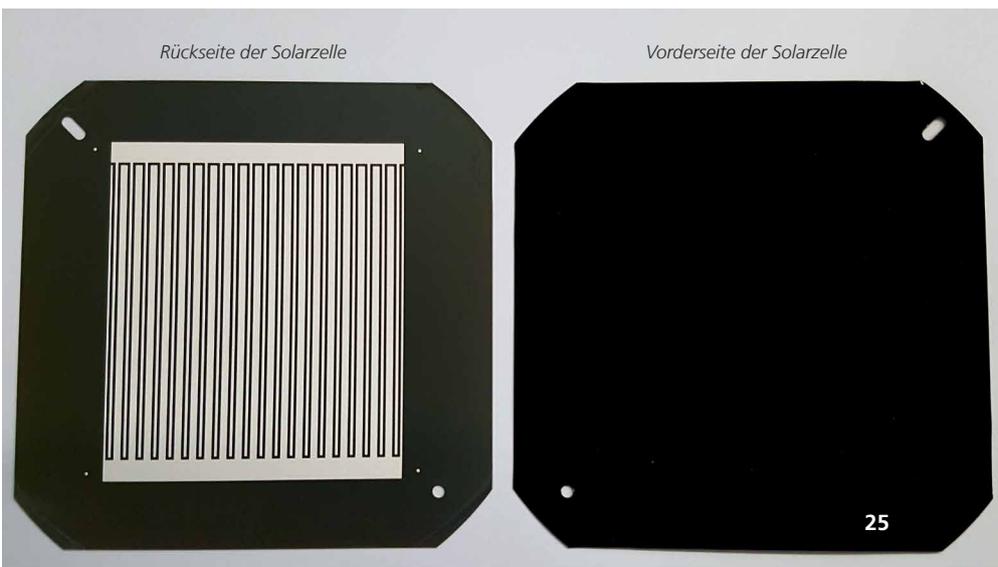
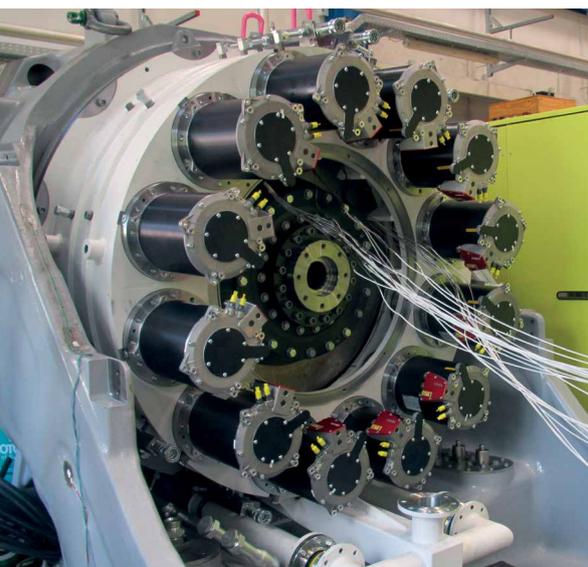
Pilotreaktor für die aerobe mikrobielle Behandlung von schlecht vergärbare Biomasse (Quelle: BFH)

dig, da positive und negative elektrische Kontakte sehr genau nebeneinander liegen müssen, was verschiedener lithographischer Schritte bedarf. Die Innovation des neuens Ansatzes aus Neuchâtel liegt darin, dass sich positive und negative Kontakte selbständig ausrichten. Mit diesem stark vereinfachten Herstellungsverfahren war es auf Anhieb möglich, Zellwirkungsgrade von 23 % zu erreichen. Die Forschenden arbeiten dabei eng mit dem Schweizer Photovoltaikunternehmen Meyer-Burger zusammen.

(A. Tomasi et al. Nature Energy, 2017).

Stefan Oberholzer

(Links) Innovatives Antriebskonzept für Windenergieanlagen (Quelle: GDC). (Rechts) Bei hoch effizienten kristallinen Siliziumsolarzellen werden alle elektrischen Kontakte auf der Rückseite positioniert, so dass die Frontseite gänzlich frei ist von verschattenden Kontakten (Quelle: CSEM).





Sozioökonomische Aspekte

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

energiepolitischer Instrumente. Im Jahr 2017 wurde eine breite Palette von Forschungsprojekten zu so unterschiedlichen Themen wie dem Verhalten der Energieverbraucher, Investitionen in Erneuerbare Energien, Energiemarktdesign und Mobilität unterstützt.





Wie können die Kapitalrisiken für erneuerbare Energieprojekte verringert werden?

Die Umsetzung der «Energiestrategie 2050» bedingt einen sukzessiven Umbau des Schweizer Energiesystems. Einen wesentlichen Pfeiler bildet dabei der Ausbau der erneuerbaren Energien. Somit ist die ausreichende Bereitstellung von Kapital zur Finanzierung erneuerbarer Energieprojekte wesentlich für die erfolgreiche Implementierung der Energiestrategie.

Eine aktuelle Studie¹ der Hochschule St. Gallen (HSG) hat untersucht, wie die Finanzierung erneuerbarer Energien erleichtert werden kann und somit die Ziele der Energiestrategie mit niedrigeren gesellschaftlichen Kosten zu erreichen sind. Dank immer günstigerer Technologien (Photovoltaik und Wind) wird die Wirtschaftlichkeit erneuerbarer Energieprojekte zunehmend durch sogenannte «Soft Costs» bestimmt. In der Studie der HSG standen zwei wesentliche Elemente dieser «Soft Costs» im Vordergrund: die Prämie für politisches Risiko und die Kapitalkosten.

Im Hinblick auf das politische Risiko konzentrierte sich das Projekt auf die Windenergie. Ziel war die Identifikation, Kategorisierung und Quantifizierung der verschiedenen Komponenten einer angemessenen Risikoprämie, um Investitionen in Schweizer

Windenergieprojekte wirtschaftlich zu gestalten. Die zweite Komponente der «Soft Costs», die Kapitalkosten, wurden in zweierlei Hinsicht untersucht: erstens wurde der Entscheidungsprozess Schweizer Investoren im Hinblick auf in- versus ausländischer Energieprojekte analysiert – dies im Hinblick darauf, dass die Verringerung des Kapitalabflusses ins Ausland die Kapitalverfügbarkeit für Schweizer erneuerbare Energieprojekte verbessern könnte. Zweitens wurde die Risiko-Rendite-Präferenzen bestehender und neuer Investoren in erneuerbare Energien untersucht, um herauszufinden, ob und unter welchen Bedingungen der Einbezug institutioneller Investoren die Finanzierungskosten inländischer Projekte senken könnte.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass typische Komplikationen im Pla-

¹ R. Wüstenhagen, Y. Blondiau, A. Ebers Broughel, S. Salm: «Lowering the financing cost of Swiss renewable energy infrastructure: Reducing the policy risk premium and attracting new investor types», SFOE Final Report 2017 (www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36929)



Das Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) testet das System «Skycam» auf Basis günstiger 360°-Industriekameras, mit dem über Softwarealgorithmen Wolken erkannt werden können und sich deren Bewegung bestimmen lässt. Damit kann die Sonneneinstrahlung direkt lokal bestimmt und über das Verfolgen der aktuellen Wolkenbewegung die Veränderung der Sonneneinstrahlung kurzfristig präzise voraussagesagt werden (Quelle: CSEM).

nungs- und Genehmigungsprozess die Kosten eines durchschnittlichen Windprojekts um 13 bis 49 % erhöhen können. Eine weitere Herausforderung stellt die Kombination aus langwierigen Genehmigungsverfahren und dem gemäss «Energiestrategie 2050» vorgesehenen Auslaufen des heutigen Fördersystems nach 2022 dar. Dies könnte die Realisierung zahlreicher Windenergieinvestitionen gefährden.

Bezüglich der Entscheidung, im In- oder Ausland zu investieren, zeigt sich, dass 70 % des von Schweizer Investoren bereitgestellten Kapi-

tals in Energieprojekte ins Ausland fliesst. Eine Ex-Post-Analyse der 20 Fallstudien von Schweizer Investitionen in Wind- und Gas-Kraftwerksprojekte (2004–2015) zeigt jedoch, dass die Rentabilität realisierter Projekte im Ausland nicht systematisch höher ist als jene von Investitionen in der Schweiz.

Ein Ansatz zur Reduktion der Kapitalkosten könnte in der Kooperation zwischen Energieversorgern (EVU) und institutionellen Investoren liegen. Eine Befragung von Investoren aus beiden Bereichen zeigt allerdings, dass es gewisse Risiken gibt, die bei

beiden Investorentypen zu hohen Kapitalkosten führen. Wenn sie dem vollen Strompreisrisiko ausgesetzt sind, verlangen sowohl EVU als auch Pensionskassen eine Risikoprämie von 5,98 bzw. 7,94 Prozent.

Die Ergebnisse der Studie deuten darauf hin, dass eine Senkung der politischen Risiken sowie ein gewisses Mass an Absicherung gegen schwankende Strompreise dazu führen kann, dass mehr Kapital zur Finanzierung erneuerbarer Energieprojekte in der Schweiz bereitgestellt wird.

Anne-Kathrin Faust

Mehrfamilienhauskonzept «swisswoodhouse» als Holzhybrid mit hohem Vorfertigungsgrad (Quelle: Renggli AG, Sursee).





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.

Impressum

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

*Der Windpark «Mont Crosin» ist der grösste Windpark der Schweiz
(Quelle: Loïc Schlüchter, © Suisse Eole, www.suisse-eole.ch).*





Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern

www.energieforschung.ch
www.bfe.admin.ch/cleantech