



Forschung für die Schweizer Energiezukunft

Resümee des
Nationalen Forschungsprogramms «Energie»

Zitiervorschlag

Balthasar, A., Schalcher, H.R. (2020):
Forschung für die Schweizer Energiezukunft.
Resümee des Nationalen Forschungs-
programms «Energie».

Hrsg.: Leitungsgruppen der Nationalen Forschungs-
programme «Energiewende» (NFP 70) und
«Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71),
Schweizerischer Nationalfonds, Bern.

Vorwort	3	
1 Übersicht und Empfehlungen	4 — 9	
2 Transformation des Energiesystems	10 — 31	2.1 Das künftige Energiesystem — 14 2.2 Akteure und ihre Handlungsspielräume — 14 2.3 Herausforderungen der Transformation des Energiesystems — 21 2.4 Entwicklungsdynamiken — 26
3 Handlungsfelder der Transformation und Lösungsansätze	32 — 81	3.1 Energieeffizienz – Schlüsselgrösse der Energiewende — 36 3.2 Erneuerbare Energieträger — 41 3.3 Verteilung und Kopplung der Energieträger — 48 3.4 Neue Finanzierungs- und Geschäftsmodelle — 54 3.5 Ein nachhaltiges Energiesystem — 60 3.6 Der Faktor Mensch — 65 3.7 Politische Steuerung – von den Zielvorgaben zur Umsetzung — 73 3.8 Der europäische Kontext — 78
4 Fazit	82 — 91	4.1 Brachliegende Potenziale im Gebäudepark — 86 4.2 Wasserkraft zwischen Investitionsbedarf und Nachhaltigkeit — 87 4.3 Motivierbare Bevölkerung — 88 4.4 Bedarf für Re-Regulierung und verstärkte Umsetzung — 89
5 Empfehlungen	92 — 102	
Literaturverzeichnis	104 — 107	
Anhang	108 — 109	

Impressum

Unter dem Titel «Nationales Forschungsprogramm Energie» werden die Resultate der Nationalen Forschungsprogramme «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71) zusammengeführt.

Das Programmresümee fasst die Ergebnisse der insgesamt 103 Forschungsprojekte und vier Ergänzungsstudien sowie sechs thematischen Synthesen und vier Verbundsynthesen des NFP «Energie» zusammen und leitet daraus Schlussfolgerungen und Empfehlungen ab. Es ist ein Beitrag der Wissenschaft zur Meinungsbildung, zur politischen und fachlichen Debatte sowie zur Strategie- und Massnahmenplanung für die Transformation des Energiesystems vor dem Hintergrund der Energiestrategie 2050 der Schweiz.

Entstanden ist das Programmresümee in einem mehrstufigen Prozess. Zahlreiche Expertinnen und Experten haben Textbeiträge geliefert, welche von einem Redaktor zusammengeführt und bearbeitet wurden. Eine Echogruppe von acht Fachpersonen aus Verwaltung und Praxis hat den Entwurf des Dokuments reflektiert und aus ihrer Perspektive beurteilt. Die Leitungsgruppen haben das Programmresümee weiterentwickelt und verabschiedet. Der vorliegende Text liegt in der Verantwortung der Autoren. Deren Einschätzungen und Handlungsempfehlungen müssen nicht notwendigerweise mit denjenigen der Echogruppe, der Expertinnen und Experten, die Textbeiträge geliefert haben, der Forschungsteams oder des Schweizerischen Nationalfonds übereinstimmen.

Zu allen im Folgenden genannten Forschungsprojekten des NFP «Energie» sind auf dem Webportal www.nfp-energie.ch weiterführende Informationen verfügbar.

Herausgeber

Leitungsgruppen der Nationalen Forschungsprogramme «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71)

Autoren

Prof. Dr. Andreas Balthasar
Präsident der Leitungsgruppe des NFP 71
Politikwissenschaftliches Seminar
Universität Luzern

Prof. Dr. Hans-Rudolf Schalcher
Präsident der Leitungsgruppe des NFP 70
ETH Zürich

Redaktion

Urs Steiger
dipl. Natw. ETH/SIA
Wissenschaftsjournalist
steiger texte konzepte beratung, Luzern

Textbeiträge

Prof. Dr. Matthias Finger
Management von Netzwerkindustrien
EPF Lausanne

Prof. Dr. David Gugerli
Professur für Technikgeschichte
ETH Zürich

Prof. Dr. Peter Hettich
Institut für Finanzwissenschaft und Finanzrecht
Universität St. Gallen

Dr. Stefan Hirschberg
Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen

Prof. Dr. Gabriela Hug
Power Systems Laboratory, ETH Zürich

Prof. Dr. Marco Mazzotti
Institut für Verfahrenstechnik
ETH Zürich

Prof. Dr. Frank Scheffold
Departement für Physik
Universität Freiburg

Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries
Mitglied der Leitungsgruppe des NFP 71
Integratives Institut Nachhaltige Entwicklung, Hochschule Bochum

Prof. Dr. Isabelle Stadelmann-Steffen
Institut für Politikwissenschaft
Universität Bern

Urs Steiger
dipl. Natw. ETH/SIA
Wissenschaftsjournalist
steiger texte konzepte beratung, Luzern

Dr. Jan van der Eijk
Mitglied der Leitungsgruppe des NFP 70
Technology and Business Innovation Consultant, Dordrecht

Prof. Dr. Frédéric Varone
Mitglied der Leitungsgruppe des NFP 71
Departement für Politikwissenschaften und internationale Beziehungen
Universität Genf

Prof. Dr. Hannes Weigt
Forschungsstelle für Nachhaltige Energie- und Wasserversorgung
Universität Basel

Prof. Dr. Rolf Wüstenhagen
Institut für Wirtschaft und Ökologie
Universität St. Gallen

Echogruppe

Dr. h.c. Lukas Bühlmann
EspaceSuisse, Rat für Raumordnung
ROR, Bern

Michael Frank
Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE, Aarau

Kurt Lanz
economiesuisse, Zürich

Roger Nordmann
Swissolar, Zürich

Benoît Revaz
Bundesamt für Energie BFE, Bern

Dr. Raimund Rodewald
Stiftung Landschaftsschutz Schweiz
Bern

Dr. Franziska Schwarz
Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern

Barbara Schwickert
Trägerverein Energiestadt, Biel

Gesamtkoordination

Dr. Stefan Husi
Programm-Manager NFP 70 und NFP 71, Schweizerischer Nationalfonds
Bern

Begleitung und Produktion

Dr. Andrea Leu
Wissens- und Technologietransfer
NFP 70 und NFP 71, SenarcLens, Leu + Partner AG, Zürich

Dr. Oliver Wimmer
Wissens- und Technologietransfer
NFP 70 und NFP 71, CR Kommunikation AG, Basel/Bern/Zürich

Übersetzung

STP Language Services GmbH, Stäfa

Gestaltung

CR Kommunikation AG, Basel/Bern/Zürich

Projektilustrationen

ikonaut GmbH, Brugg

Bildnachweis Umschlag

Vorderseite: Magazin
«Energie &» | Energie & NetzWelt
Illustration: Studio Wöt

Rückseite: Magazin «Energie &» |
Energie & Fiktion
Illustration: CR Kommunikation AG

Copyright

© 2020 Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen
Forschung

Korrigierte Digitalfassung
(Februar 2020)

Druck

ILG AG WIMMIS, Wimmis

Das Resümee wurde klimaneutral
gedruckt.



Mit dem Entscheid zur Revision des Energiegesetzes und damit zur Realisierung der Energiestrategie 2050 hat die Schweizer Stimmbevölkerung den Ausstieg aus der Kernkraft beschlossen. Sie hat damit die Transformation des schweizerischen Energiesystems in die Wege geleitet – eine Aufgabe von aussergewöhnlicher Tragweite. Mit den Nationalen Forschungsprogrammen «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71) – zusammengefasst NFP «Energie» – hat der Bundesrat den Schweizerischen Nationalfonds beauftragt, wissenschaftliche Erkenntnisse und innovative Lösungssätze zur Unterstützung dieser Transformation zu liefern und entsprechende Empfehlungen zu formulieren.

In über 100 Forschungsprojekten hat das NFP «Energie» eine grosse Vielfalt an Erkenntnissen und Innovationen hervorgebracht. Sie leisten wichtige und zukunftsweisende Beiträge sowohl für die Grundlagenentwicklung als auch für die praktische Umsetzung. In zahlreichen Bereichen haben die Forschungsarbeiten gesellschaftlich und politisch äusserst wertvolle Erkenntnisse hervorgebracht. Sehr deutlich kommt etwa zum Ausdruck, dass die Transformation des Energiesystems eine Aufgabe der gesamten Gesellschaft bleibt, die sich nur in der Kombination von technischen und sozialen Innovationen lösen lässt. Forschung und Innovation vermögen mit ihren Beiträgen Tore aufzustossen und Wege vorzubereiten, die einzelnen Akteure und die Politik in Vertretung der Gesellschaft entscheiden aber darüber, ob die vorgeschlagenen Lösungen adäquat und im Alltag akzeptanz- und tragfähig sind.

Die einzelnen Forschungsarbeiten betrachteten die Herausforderungen der Transformation aus sehr unterschiedlichen Perspektiven. In den teilweise nicht deckungsgleichen Aussagen kommen auch Zielkonflikte in der Transformation zum Ausdruck. In den Synthesen zu den thematischen Schwerpunkten hat das NFP «Energie» diese abgewogen und zu einem Gesamtbild verdichtet, soweit es die Forschungsergebnisse zulassen. Trotz der grossen Breite und Vielfalt kann das Programm keine umfassende Antwort auf die weit-

reichenden Herausforderungen der Transformation des Energiesystems geben. Wesentliche Bereiche wie die Mobilität oder die Rolle der Digitalisierung konnten nicht in der notwendigen Tiefe bearbeitet werden. Vor dem Hintergrund der Klimadebatte entwickelt sich zudem die Energiepolitik aktuell sehr dynamisch. Empfehlungen, die heute politisch noch kaum konsensfähig erscheinen, könnten morgen bereits Mehrheiten finden!

Mit ihren Arbeiten haben die Forschenden des NFP «Energie» zahlreiche Puzzlesteine zur grossen Aufgabe der Transformation des Energiesystems bereitgestellt. Die Synthesen zu den thematischen Schwerpunkten haben diese geordnet und für die Umsetzung vorbereitet. Alle Informationen zu den einzelnen Forschungsprojekten und den Synthesen finden sich auf dem eigens geschaffenen Webportal www.nfp-energie.ch.

An den von diesem Resümee angesprochenen Akteurinnen und Akteuren – Energieversorgern, Privathaushalten, Betrieben, Hauseigentümerinnen und Hauseigentümern, Kapitalgebern, öffentlichen Verwaltungen, Verbänden und NGO sowie an der Stimmbevölkerung und der Politik – liegt es nun, die geordneten Puzzlesteine aufzunehmen und die Transformation des Energiesystems voranzubringen.

Prof. Dr. Hans-Rudolf Schalcher
Präsident der Leitungsgruppe NFP 70

Prof. Dr. Andreas Balthasar
Präsident der Leitungsgruppe NFP 71

Vor dem Hintergrund der Umsetzung der Energiestrategie 2050 und der nächsten Stufen der Klimapolitik hat der Schweizerische Bundesrat 2012 die beiden Nationalen Forschungsprogramme «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71) lanciert. Während das NFP 70 insbesondere technologischen Fragestellungen unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte nachging, bearbeitete das NFP 71 spezifisch die gesellschaftliche und regulatorische Seite der Transformation des Energiesystems. Die Ergebnisse der beiden Forschungsprogramme werden unter dem Titel «Nationales Forschungsprogramm Energie» (NFP «Energie») zusammengeführt.

Die über 100 Forschungsprojekte des NFP «Energie» haben Hunderte von Einzelergebnissen hervorgebracht. Manche von ihnen haben technologische Innovationen befördert oder geschaffen, andere das wirtschaftliche oder gesellschaftliche Umfeld analysiert. Verschiedene Projekte haben sich sowohl mit technischen als auch wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekten der Transformation des Energiesystems befasst und die Nachhaltigkeit der Innovationen untersucht. Das vorliegende Resümee bietet in Kapitel 2 einen Überblick über die Herausforderungen, die sich mit der durch die Energiestrategie 2050 eingeleiteten Transformation des Energiesystems in der Schweiz stellen. Kapitel 3 präsentiert Handlungsfelder der Transformation und Lösungsansätze, die das NFP «Energie» entwickelt hat. Kapitel 4 hebt jene Aspekte hervor, die aus Sicht des NFP «Energie» für die Transformation von besonderer Relevanz erscheinen. Davon abgeleitet formuliert Kapitel 5 Empfehlungen. Mit den Lösungsansätzen und Empfehlungen spricht das Resümee insbesondere jene Schlüsselakteure an, die das Energiesystem in wesentlichem Masse prägen und entsprechend auch gestalten können.

Die aus dem NFP «Energie» gewonnenen Erkenntnisse unterstreichen einmal mehr, dass die gesellschaftlich-politischen Aspekte für die Transformation des Energiesystems ebenso wichtig sind wie die technischen; sie stellen den Schlüssel dar, damit technische Lösungen realisiert werden. Damit die einzelnen Menschen in ihren unter-

schiedlichen Rollen aktiv werden, müssen ihnen die jeweiligen konkreten Handlungsmöglichkeiten bekannt sein, und es muss ihnen möglich sein, diese umzusetzen.

Wesentliche Potenziale zur Realisierung der Energiestrategie 2050 bergen die Mobilität und der Gebäudepark. Im Bereich der Mobilität sind Beiträge insbesondere von energieeffizienten Fahrzeugen zu erwarten, aber auch von neuen Treibstoffen, innovativen Mobilitätskonzepten und freiwilligen Verhaltensänderungen. Der Gebäudepark bietet noch immer grosse Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung, zum Einsatz erneuerbarer Energien im Strom- und Wärmebereich, aber auch ein grosses Angebot an noch ungenügend genutzten Flächen für die Installation von Photovoltaikanlagen. Erfolgt die Sanierung des Gebäudeparks deutlich schneller und weitergehend, so kann er den erwarteten Beitrag – oder gar noch mehr – zur Transformation des Energiesystems leisten.

Die Wasserkraft spielt auch in Zukunft eine zentrale Rolle für das Energiesystem der Schweiz. Damit sie diese weiterhin erfüllen kann, bedarf sie grösserer Aufmerksamkeit. Sie verfügt zwar über Potenziale zur Steigerung der Effizienz, die Ausbaupotenziale dagegen bleiben ökonomisch und ökologisch eng begrenzt.

Zentrale Erkenntnis des NFP «Energie» ist jedoch, dass die Gesetzgebung als Gesamtes die Transformation nicht im notwendigen Masse unterstützt. Zudem bedarf die Umsetzung der gesetzlichen Aufträge einer verstärkten Koordination der staatlichen Akteure auf und zwischen allen staatlichen Ebenen. Schliesslich verfügen Städte und Gemeinden über einen Handlungsspielraum, den viele von ihnen noch aktiver nutzen könnten, um die Transformation voranzutreiben.

Übersicht und Empfehlungen



Vor dem Hintergrund der Umweltschutzziele der Energiestrategie 2050 und der nächsten Klimapolitik hat der Schweizerische Bundesrat 2012 die beiden Nationalen Forschungsprogramme «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71) lanciert. Das NFP 70 insbesondere technologische Innovationen unter Berücksichtigung ökonomischer und sozialer Aspekte nachging, bearbeitete das NFP 71 insbesondere die gesellschaftliche und regulatorische Dimension der Transformation des Energiesystems. Die Ergebnisse der beiden Forschungsprogramme sind in der Studie unter dem Titel «Nationales Forschungsprogramm Energie» (NFP «Energie») zusammengefasst.

Die über 100 Forschungsprojekte des NFP «Energie» haben Hunderte von Einzelergebnissen hervorgebracht. Manche von ihnen liefern neue technologische Innovationen befördert oder analysieren, andere das wirtschaftliche oder gesellschaftliche Umfeld analysiert. Verschiedene Projekte haben sich sowohl mit technischen als auch mit gesellschaftlichen Aspekten der Transformation des Energiesystems und die Nachhaltigkeit der Innovationen beschäftigt. Das vorliegende Resümee bietet einen Überblick über die Herausforderungen und die sich mit der durch die Energiestrategie eingeleiteten Transformation des Energiesystems in der Schweiz stellen. Kapitel 3 präsentiert Handlungsfelder der Transformation und Lösungsansätze, die das NFP «Energie» entwickelt hat. Kapitel 4 hebt jene Aspekte hervor, die für die Transformation des NFP «Energie» für die Transformation des Energiesystems besonderer Relevanz erscheinen. Das Resümee formuliert Kapitel 5 Empfehlungen. Kapitel 6 stellt Lösungsansätzen und Empfehlungen dar. Das Resümee insbesondere jene Schlüsse, die das Energiesystem in wesentlich prägen und entsprechend auch gesteuert werden müssen.

Die aus dem NFP «Energie» gewonnenen Erkenntnisse unterstreichen einmal mehr, dass die gesellschaftlich-politischen Aspekte der Transformation des Energiesystems ebenso wichtig sind wie die technischen; sie stellen dar, damit technische Lösungen realisiert werden können. Damit die einzelnen Menschen in ihrer

Der Bundesrat hat 2012 das Nationale Forschungsprogramm «Energie» vor dem Hintergrund der Energiestrategie 2050 und der Weiterentwicklung der Klimapolitik lanciert. Die Forschungsergebnisse und 15 darauf aufbauende Empfehlungen der Leitungsgruppe befruchten nun die Debatte.



15 Empfehlungen

1 – Mit gezielter Regulierung Energieeffizienz fördern und den Ausbau der erneuerbaren Energien voranbringen!

Viele der Technologien, die für die Transformation des Energiesystems notwendig sind, stehen bereit. Auf freiwilliger Basis allein werden sie aber insbesondere im Gebäudebereich und bei der Mobilität nicht genügend genutzt. Um die gesteckten Ziele zu erreichen, sind darum zusätzlich zu marktwirtschaftlichen Anreizen auch regulatorische Eingriffe nötig. Verschiedene der vor Kurzem getroffenen politischen Vorentscheide weisen in die richtige Richtung.

2 – Mit flexiblen und dynamischen Stromtarifen, Belohnungszielen und Information Anreize zum Energiesparen schaffen!

Energieverteiler sollen flexible und dynamische Stromtarifmodelle entwickeln und einsetzen, die den Anreiz schaffen, den Stromverbrauch und die Energiekosten zu senken. Die Kombination mit Bonus-elementen, die das Erreichen von Sparzielen belohnen, erhöht die Akzeptanz entsprechender Tarifmodelle.

3 – Den Ausbau der erneuerbaren Energien mit einer umfassenden und wirksamen CO₂-Lenkungsabgabe unterstützen!

Lenkungsmassnahmen sind wirksamer und kostengünstiger als Förderungsmassnahmen. Eine CO₂-Lenkungsabgabe auf allen fossilen Energieträgern ist deshalb besonders geeignet, die Transformation des Energiesystems voranzubringen.

4 – CO₂-freie urbane Logistik bis 2050 realisieren!

Erfolgt die Versorgung in den städtischen Agglomerationen CO₂-frei, lassen sich 7 Prozent der entsprechenden Effizienzziele der Energiestrategie 2050 und rund 9 Prozent der angestrebten Reduktion von Treibhausgasemissionen erreichen. Kantone, Städte und Gemeinden sollen deshalb die entsprechenden Rahmenbedingungen schaffen und mit den Logistikakteuren zusammenarbeiten.

5 – Dezentrale Multi-Energie-Systeme (DMES) realisieren!

Dezentrale Multi-Energie-Systeme (DMES) ermöglichen eine höchst effiziente Nutzung dezentral bereitgestellter Energie. Damit sie realisiert werden können, sind Energiebereitstellung und -versorgung lokal und regional als Ganzes zu betrachten. Selbstorganisation und staatliche Regulierung sollen sich bestmöglich ergänzen. Die Gemeinden, aber auch der Bund und die Kantone müssen planerische und gesetzliche Vorarbeiten erbringen.

6 – Die Wasserkraft auf ihre stabilisierende Funktion im Energiesystem fokussieren!

Die neuen erneuerbaren Energien sind mit dem Problem verbunden, dass Produktion und Nutzung zeitlich oft nicht zusammenfallen. Die Wasserkraft erfüllt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle: Sie stabilisiert das Versorgungssystem und gewährleistet die technische Versorgungssicherheit des schweizerischen Energiesystems. Diese Funktion kann auch als Grundlage für finanzielle Abgeltungen dienen.

7 – Wasserzinsen nach Erträgen ausrichten!

2024 muss eine neue Lösung für den Wasserzins beschlossen werden. Sie sollte auf dem Ertrag basieren und damit den Marktpreis sowie die Produktionskosten widerspiegeln. Die neue Lösung muss auch die Interessen der Berggebiete berücksichtigen. Für sie sind die Wasserzinsen wirtschaftlich weit wichtiger als für die Stromproduzenten.

8 – Restwasserregime den ökologischen Bedürfnissen anpassen!

Das Gewässerschutzgesetz wird heute hinsichtlich der ökologischen Ziele unzureichend umgesetzt. Die angestrebte biologische Vielfalt im Unterlauf der Stauwerke wird nicht erreicht. Die Kantone sollen deshalb den Vollzug so gestalten, dass die Restwasserführung die ökologischen Ziele sicherstellen kann. Entsprechende Massnahmen verlangen mehr Wasser und reduzieren die Stromproduktion.

9 – Optimale Bedingungen schaffen für Finanzierungsmodelle, an denen sich die Bevölkerung beteiligen kann!

Die finanzielle Beteiligung an Investitionen in Infrastrukturen für erneuerbare Energien schafft Identifikation. Lokal verankerte Organisationen wie Vereine, Genossenschaften oder Nachbarschaftsorganisationen schaffen Akzeptanz und helfen, den Ausbau der erneuerbaren Energien voranzubringen.

10 – Die Bevölkerung von Beginn an aktiv an der Planung von Infrastrukturprojekten beteiligen!

Mitgestaltung stärkt die Identifikation und fördert die Akzeptanz. Projektinitiantinnen und -initianten sollen deshalb Planungsprozesse für Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien von Beginn an partizipativ gestalten.

11 – Wissen vermitteln, und zwar zielgruppengerecht und neutral!

Die Wissens- und die Informationsvermittlung müssen den unterschiedlichen Wissensstand und die unterschiedliche Motivation verschiedener Bevölkerungsgruppen mit innovativ konzipierten Strategien nutzen. Die öffentlichen Verwaltungen von Bund, Kantonen, Städten und Gemeinden, die Verbände und die Wirtschaft sollen über die Funktionsweise von Technologien und Steuerungsmechanismen informieren und überzeugend kommunizieren, dass ein wesentlicher Teil des Energieeffizienzpotenzials ohne Verzicht und ohne Komforteinbussen realisiert werden kann: Mehr Energieeffizienz bedeutet nicht weniger Komfort.

12 – Die Verbände stärker in die Verantwortung nehmen!

Verbände stehen in engem Austausch mit ihren Mitgliedern und verfügen über branchenspezifische Kenntnisse, die die Transformation des Energiesystems voranbringen können. Sie sollten ihre wichtige Rolle im politischen Entscheidungsprozess auch dazu nutzen, ihre Mitglieder für die Unterstützung gemeinsam entwickelter Lösungen zu gewinnen!

13 – Städte und Gemeinden dazu motivieren, ihren Handlungsspielraum im Energiebereich verstärkt aktiv wahrzunehmen!

Städte und Gemeinden verfügen als Gebäudebesitzer, Eigentümer und Betreiber öffentlicher Werke und Betriebe, als politische Akteure oder Unterstüzende lokaler Initiativen über vielfältige Möglichkeiten, die Transformation des Energiesystems mitzugestalten. Sie können – nicht nur im Energiebereich – planerisch, organisatorisch und kommunikativ aktiv werden.

14 – Das Verhältnis der Schweiz zur EU im Interesse der Versorgungssicherheit im Strombereich rasch klären!

Durch Stromimporte gleicht die Schweiz die ausgeprägten saisonalen Schwankungen der Stromproduktion durch die Wasserkraftwerke aus. Die Beziehungen zur EU und damit zu den europäischen Energiemärkten bestimmen, wie und zu welchen Kosten dieser Ausgleich künftig gewährleistet werden kann. Ohne Stromabkommen sind die Kosten dafür deutlich höher.

15 – Bundeskonzept zur Transformation des Energiesystems erarbeiten!

Schlecht oder nicht koordinierte Planungs- und Bewilligungsverfahren bremsen viele Energieinfrastrukturprojekte aus. Bund, Kantone und Gemeinden sollen deshalb mit einem gemeinsam erarbeiteten Konzept eine verlässliche Grundlage schaffen, um die Interessen der verschiedenen Staatsebenen aufeinander abzustimmen und Blockaden abzubauen.

Vor dem Hintergrund der Umsetzung der Energiestrategie 2050 und der nächsten Stufen der Klimapolitik hat der Schweizerische Bundesrat im Juli 2012 die beiden Nationalen Forschungsprogramme «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71) lanciert und den Schweizerischen Nationalfonds (SNF) mit deren Durchführung betraut. Erwartet wurden vor allem Grundlagen im Hinblick auf das zweite Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050. Während das NFP 70 insbesondere technologischen Fragestellungen unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte nachging, bearbeitete das NFP 71 spezifisch die gesellschaftliche und regulatorische Seite der Transformation des Energiesystems. Die Ergebnisse der beiden Forschungsprogramme werden unter dem Titel «Nationales Forschungsprogramm Energie» (NFP «Energie») zusammengeführt.

Das NFP «Energie» stützte sich unter anderem auf den Referenzbericht «Aktionsplan Koordinierte Energieforschung Schweiz» des Bundes vom 24. April 2012 und die zugehörige Botschaft. Dort sind auch die Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER) definiert, die primär auf den Ausbau der Forschungskapazitäten im Energiebereich zielen und damit ähnliche Themen bearbeiten wie das NFP «Energie». Die beiden Forschungsinitiativen sind jedoch konsequent komplementär, sodass keine Doppelspurigkeiten auftreten.

Das NFP 70 verfügte über einen Finanzrahmen von 37 Millionen Franken, das NFP 71 über einen solchen von 8 Millionen Franken. 2013 wurden über 350 Forschungsskizzen eingereicht. Daraus wählten die Leitungsgruppen auf Basis eines zweistufigen, internationalen Evaluationsprozesses 15 Verbundprojekte mit insgesamt 62 Subprojekten und 7 Einzelprojekte für das NFP 70 sowie 19 Einzelprojekte für das NFP 71 aus. Bei der Beurteilung der Projekte standen der erwartete Beitrag an die Umsetzung der Energiestrategie 2050 und die wissenschaftliche Qualität im Vordergrund. Zu den gesamthaft 103 Forschungsprojekten kamen im Programmverlauf vier Ergänzungsstudien hinzu,

die mit praxisrelevanten Ergebnissen wichtige thematische Lücken im Forschungsportfolio des NFP «Energie» schliessen.

Das vorliegende Resümee bietet einen Überblick über die Herausforderungen (Kap. 2), die sich mit der Transformation des Energiesystems in der Schweiz stellen. Es präsentiert Handlungsfelder der Transformation und Lösungsansätze, die das NFP «Energie» entwickelt hat (Kap. 3). Es schliesst mit Aspekten, die aus Sicht des NFP «Energie» für die Transformation des Energiesystems von besonderer Relevanz erscheinen (Kap. 4), und daraus abgeleiteten Empfehlungen (Kap. 5). Das Resümee ergänzt die sechs thematischen Synthesen¹, die einen vertieften Einblick in einzelne Themenbereiche bieten. Mit den Lösungsansätzen und Empfehlungen spricht das Resümee insbesondere jene Schlüsselakteure an, die das Energiesystem in wesentlichem Masse prägen und entsprechend auch gestalten können.

¹ Die Synthesen zu den thematischen Schwerpunkten «Akzeptanz», «Energienetze», «Gebäude und Siedlungen», «Marktbedingungen und Regulierung», «Mobilitätsverhalten», «Wasserkraft und Markt» des NFP «Energie» sind in digitaler Form auf dem Webportal www.nfp-energie.ch verfügbar.

2

Transformation des Energiesystems



Vor dem Hintergrund der Umweltschutzziele der Energiestrategie 2050 und der nächsten Klimapolitik hat der Schweizerische Eidgenössische Forschungsrat (SERF) im Juli 2012 die beiden Nationalen Forschungsprogramme «Energiewende» (NFP 70) und «Energieeffizienz» (NFP 71) lanciert. Die beiden Programme sind dem Schweizerischen Nationalfonds (SNF) zur Durchführung betraut. Erwartet wird, dass die beiden Programme die Grundlagen im Hinblick auf die Umsetzung der Massnahmenpakete der Energiestrategie 2050 bilden. Während das NFP 70 insbesondere technische Fragestellungen unter Berücksichtigung sozialer Aspekte nachging, bearbeitet das NFP 71 spezifisch die gesellschaftliche und politische Seite der Transformation des Energiesystems. Die Ergebnisse der beiden Forschungsprogramme werden unter dem Titel «Nationales Forschungsprogramm Energie» (NFP «Energie») zusammengeführt.

Das NFP «Energie» stützte sich unter anderem auf den Referenzbericht «Aktionsplan Energieeffizienz Schweiz» des Bundesamtes für Energie (BFE) vom 24. April 2012 und die zugehörige Broschüre. Zudem sind auch die Swiss Competence Cells in Energy Research (SCCER) definiert, die den Ausbau der Forschungskapazitäten im Bereich zielen und damit ähnlich wie das NFP «Energie» arbeiten. Die beiden Forschungsinitiativen sind jedoch komplementär, sodass keine Doppelstrukturen auftreten.

Das NFP 70 verfügte über einen Finanzrahmen von 37 Millionen Franken, das NFP 71 über einen von 8 Millionen Franken. 2012 wurden 350 Forschungsskizzen eingereicht. Die Leitungsräte wählten die Leitungsgruppen auf Basis der wissenschaftlichen Qualität und der internationalen Evaluation. 15 Verbundprojekte mit insgesamt 6 und 7 Einzelprojekten für das NFP 70 und 7 Einzelprojekte für das NFP 71 aus. Bei der Auswahl der Projekte standen der erwartete Beitrag zur Umsetzung der Energiestrategie und die wissenschaftliche Qualität im Vordergrund. Von den gesamthaft 103 Forschungsprojekten wurden im Programmverlauf vier Ergänzungs-

Technologien prägen das Energiesystem ebenso wie die politischen Rahmenbedingungen und die Akteurinnen und Akteure, die am System beteiligt sind. Entsprechend vielfältig sind die Herausforderungen, die die Umgestaltung des Energiesystems mit sich bringt.

Magazin «E&E» | Energie & Mobilität, Illustration: Walkingframes Animation Studio



2.1 Das künftige Energiesystem

Sowohl das heutige als auch das künftige Energiesystem (vgl. Abb. 1) ist ein komplexes soziotechnisches System – komplex, weil offen, äusserst dynamisch und mit unzähligen Ungewissheiten verbunden, soziotechnisch, da es sowohl eine technische als auch eine sozialorganisatorische Dimension aufweist. Zur technischen Dimension gehören alle technischen Elemente der Energieinfrastruktur wie Kraftwerke, Verteilnetze, Speicher und Steuerungsanlagen sowie der Energiebezüger wie Haushaltsgeräte, Informatikgeräte, Produktionsmittel und Verkehrsmittel. Die privaten und öffentlichen Akteure des Energiesystems wie die Energieversorger, die Haushalte, die Betriebe und die Politik sind Teil der sozioorganisatorischen Dimension.

Zwischen diesen Elementen besteht ein vielfältiges und enges Netz von Beziehungen und Flüssen. Bei den Flüssen stechen die eigentlichen Energieflüsse (z. B. Elektrizität, Wärme und Gas), die Stoffflüsse (z. B. Kehrlicht, Biomasse), die Finanzflüsse (z. B. Gebühren, Kapitaldienste und Lenkungsabgaben) und die Informationsflüsse besonders hervor. Die Energie- und Stoffflüsse verbinden die technischen Elemente, die Finanz- und Informationsflüsse die Akteure. Weitere Beziehungen ergeben sich aus den Prozessen, die zwischen den Akteuren ablaufen, etwa der politische Prozess, der sich bis zur Bewilligung der Erhöhung einer bestehenden Staumauer entfaltet, oder die Prozesse der Zusammenarbeit und der Meinungsbildung. Auch zwischen dem Schweizer Energiesystem und dessen Umfeld bestehen zahlreiche, systemrelevante Beziehungen, wird doch das schweizerische Energiesystem auch in Zukunft auf eine starke, wenn auch sich im Laufe der Zeit verändernde Vernetzung mit Europa angewiesen sein.

Das künftige Energiesystem wird weit komplexer gestaltet sein als das heutige. Die Anzahl der Akteure – und damit auch die Anzahl der Beziehungen – wird zunehmen, immer mehr wird Energie unregelmässig bereitgestellt werden und die Systemverantwortung wird bei mehr Akteuren liegen. Diese Komplexität stellt die Akteure vor die Herausforderung, Massnahmen zur Entwicklung

des Energiesystems nicht mehr isoliert, sondern als koordiniertes Massnahmenbündel zu planen und zu realisieren, wobei sämtliche Auswirkungen auf das gesamte Energiesystem, die Umwelt, die Wirtschaft und die Gesellschaft zu berücksichtigen sind.

2.2 Akteure und ihre Handlungsspielräume

Das NFP «Energie» hat sich intensiv mit der Frage beschäftigt, wer das Energiesystem massgeblich beeinflusst. Insbesondere interessierte, welche Akteure innert nützlicher Frist etwas in Bewegung setzen können. An diese Hauptakteure richten sich die Kernbotschaften und Empfehlungen, die sich aus den Erkenntnissen des NFP «Energie» herleiten.

● **Energieversorger** – Zur Gruppe der Energieversorger zählen sowohl die Energiebereitsteller, insbesondere die Kraftwerkbetreiber und die Betreiber von Anlagen für erneuerbare Energien, als auch die Energieverteiler, die die Energiekonsumierenden mit leitungsgebundenen Energieträgern versorgen.

Allein für die Stromverteilung sind in der Schweiz rund 700 Unternehmen tätig (BFE 2019), an denen Kantone und Gemeinden teilweise massgeblich beteiligt sind. Nebst wenigen Grossunternehmen handelt es sich um eine Vielzahl lokal tätiger Stadt- und Gemeindewerke, die nebst der Stromverteilung auch für die Gasverteilung zuständig sind oder auch Fernwärmenetze betreiben. Viele der Unternehmen sind sowohl als Energiebereitsteller als auch als Energieverteiler aktiv. Entsprechend vielfältig sind ihre Einflussmöglichkeiten, die Transformation des Energiesystems mitzugestalten. So können sie ihre Investi-

Was ist Energie?

Energie kann nicht erzeugt werden und geht nicht verloren. Ist umgangssprachlich von «Energieverbrauch» die Rede, ist damit die Umwandlung eines Energiezustandes von Materie in einen anderen gemeint, so etwa die Verbrennung von Holz zu Rauch und Asche, wobei Wärme als Energie in einer für den Menschen oder die Technik nutzbaren Form freigesetzt wird.

Die Kernfusion in der Sonne steht am Anfang fast aller für den Menschen nutzbaren Energieformen. Dabei verschmelzen zwei Wasserstoffkerne zu Helium, wobei sich deren Masse um Δm verringert. Die freigesetzte Energie entspricht gemäss Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie $E = \Delta mc^2$. Die Energiedichte ist enorm: Aus einem Kilogramm Wasserstoff generiert die Sonne 100 Milliarden Mal mehr Energie als ein Ottomotor aus einem Kilogramm Benzin. Ein kleiner Teil der durch Kernfusion erzeugten Sonnenstrahlung erreicht die Erde als Licht.

Lebewesen erzeugen mithilfe der Sonnenstrahlung Biomasse, die in fossilen Energieträgern wie Erdöl und Kohle über lange Zeiträume gebunden ist. Die Sonnenenergie vergangener Zeiten ist in diesem Fall chemisch gespeichert und lässt sich

durch Verbrennen mit Sauerstoff wieder umwandeln und nutzbar machen. Die chemische Speicherung von Sonnenenergie kann aber auch schneller und direkter ablaufen, etwa über die Verwertung von Biomasse aus Abfällen oder über Kraftstoffe wie Bioethanol oder Biodiesel. Viele weitere erneuerbare Energiequellen basieren ebenfalls auf Sonnenenergie: Trifft die Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche, erwärmt sie diese und sorgt dadurch für den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. Die Sonnenenergie ist damit der Motor für alle Wetterphänomene und bewirkt zusammen mit der Erdrotation Wind, Wellen, Regen, Schnee, Seen und Flüsse, die alle schon für die Stromproduktion genutzt werden. Photovoltaikmodule wandeln bis zu einem Viertel der eintreffenden Sonnenstrahlung direkt in elektrische Energie um. Sonnenstrahlung kann aber auch Flüssigkeiten erhitzen, etwa in Solarmodulen auf Hausdächern oder in solarthermischen Kraftwerken.

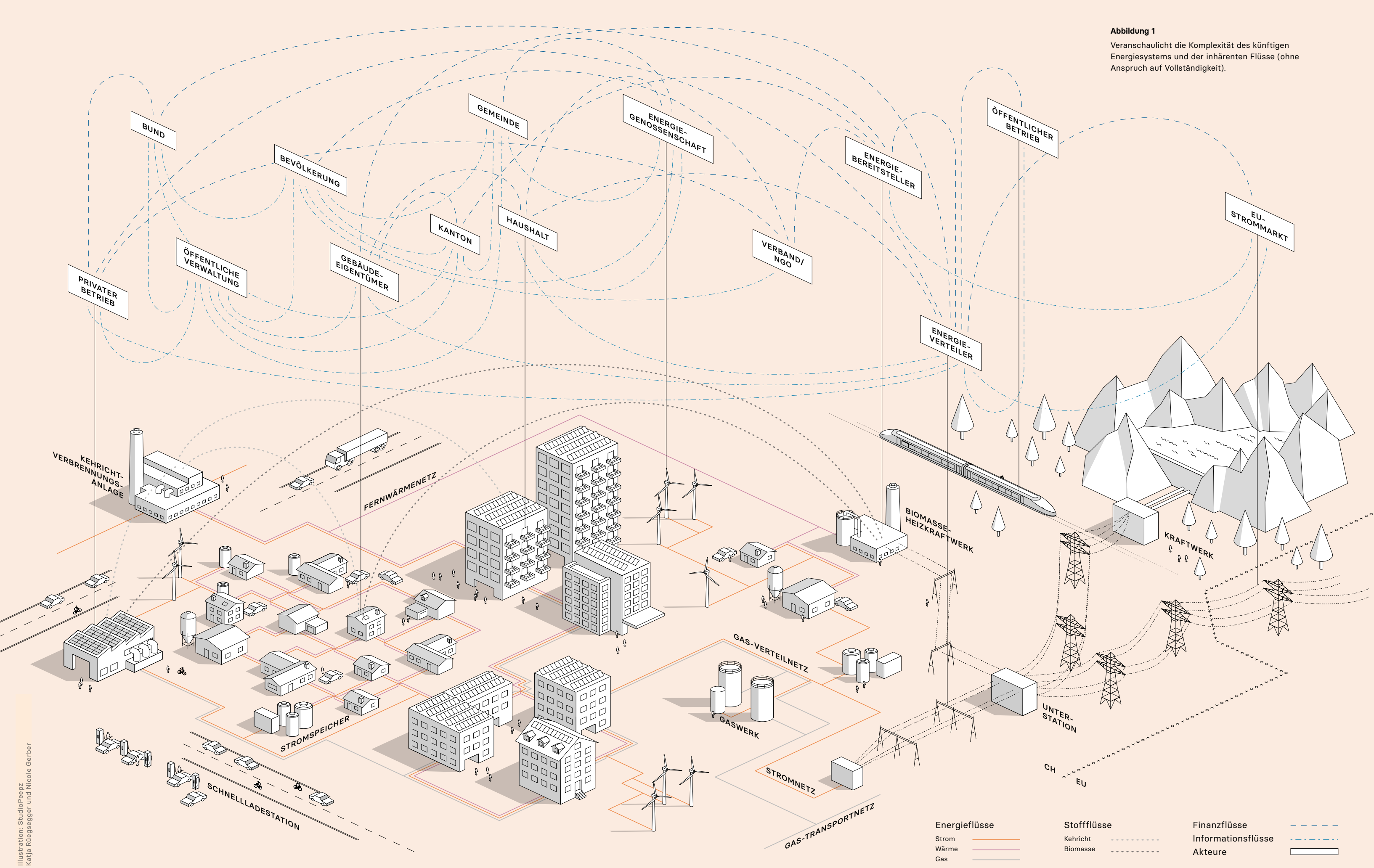
Nur wenige Energiequellen sind von der Sonne völlig unabhängig, nebst der Kernenergie beispielsweise die Geothermie, die im Erdinnern gespeicherte Wärmeenergie, oder die Gezeiten, die auf der Bewegungsenergie von Erde und Mond beruhen.

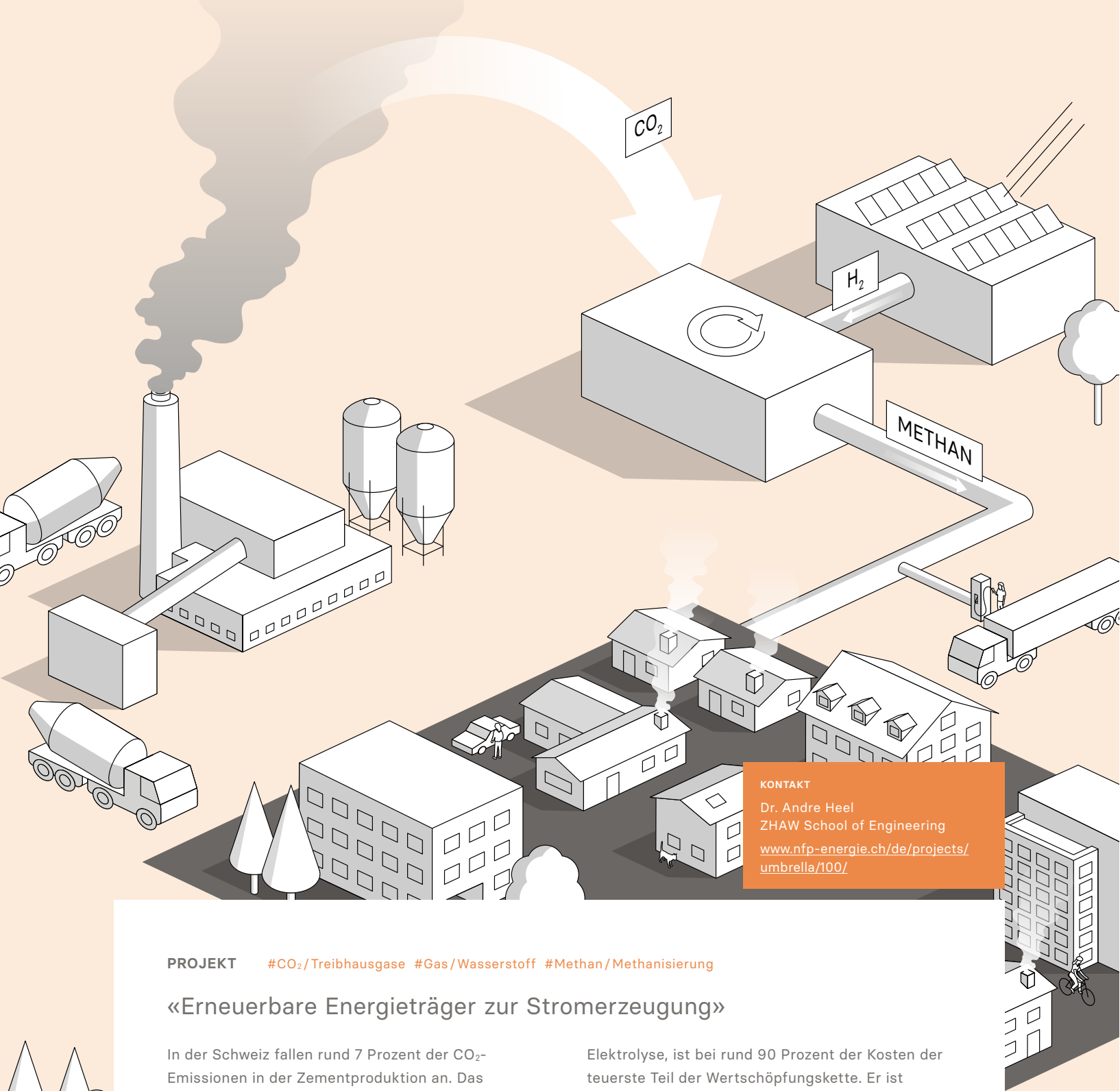
tionstätigkeiten und ihre Betriebskonzepte darauf ausrichten. Die Energieverteiler sind aber auch in engem Kontakt mit den Energiekonsumenten (Haushalte, Betriebe, Gebäudeeigentümerinnen und Grundeigentümer) und können über die Produkte- und Preisgestaltung, aber auch durch Informationen auf deren Verhalten einwirken.

Die Gruppe der Energieversorger wird künftig immer enger mit jener der Energiekonsumenten zusammenwachsen, da die Zahl der Gebäude, die gleichzeitig Energie erzeugen und konsumieren, stark zunehmen wird. Der Aufbau von dezentralen Multi-Energie-Systemen in Verbindung mit

der Kopplung der verschiedenen Energieträger (Sektorkopplung, vgl. Kap. 3.3), beispielsweise durch die Integration von Elektromobilität oder die Anbindung an Abwärme aus Industriebetrieben, mischt die Rollen im Energiesystem ebenfalls neu auf. Noch kaum abschätzbar ist die Rolle bisher branchenfremder Dienstleistungsunternehmen (z. B. Google oder Amazon), die sich dank web-basierten Instrumenten, der Nutzung von «Big Data», «Blockchain» und weiteren digitalen Technologien auf den Energiemärkten zu positionieren beginnen.

Abbildung 1
Veranschaulicht die Komplexität des künftigen
Energiesystems und der inhärenten Flüsse (ohne
Anspruch auf Vollständigkeit).





PROJEKT #CO₂/Treibhausgase #Gas/Wasserstoff #Methan/Methanisierung

«Erneuerbare Energieträger zur Stromerzeugung»

In der Schweiz fallen rund 7 Prozent der CO₂-Emissionen in der Zementproduktion an. Das Forschungsteam untersuchte, wie das konzentriert anfallende CO₂ zu synthetischem Methan umgewandelt und eine neue Wertschöpfungskette aufgebaut werden könnte. **Durch die Methanisierung der 2,5 Millionen Tonnen CO₂ aus der Schweizer Zementproduktion liesse sich ein Drittel aller Gasimporte ersetzen.** Das Team suchte nach effizienteren, langlebigeren und kostengünstigeren Technologien für die entsprechenden Umwandlungsprozesse. Der erste Prozessschritt, die Produktion von Wasserstoff (H₂) durch

Elektrolyse, ist bei rund 90 Prozent der Kosten der teuerste Teil der Wertschöpfungskette. Er ist der Grund dafür, dass synthetisches Methan derzeit rund dreimal mehr kostet als fossiles. Damit die Konkurrenzfähigkeit steigt, müssen der für die H₂-Herstellung eingesetzte Solarstrom und das entsprechende Elektrolyseverfahren billiger oder photoelektrochemische Zellen (PEC) effizienter werden. Ein im Projekt neu entwickelter Sorptionskatalysator ermöglicht eine 100-prozentige Umwandlung des CO₂ zu Methan, wodurch der kostenintensive Wasserstoff vollständig umgesetzt wird.

● **Privathaushalte** – Privathaushalte – die Menschen, die gemeinsam in einer Wohnung leben – sind entscheidende Akteure des Energiesystems. 2017 gab es in der Schweiz 3,72 Millionen Privathaushalte (BFS 2018), gut 6 Prozent mehr als 2013. Ihre Zahl ist weiter im Wachsen begriffen. Jede fünfte Wohnung steht meist leer (BFS 2018a). Viele davon werden dennoch geheizt und Warmwasser wird bereitgehalten. Als Folge des demografischen Wandels sinkt zudem die Zahl der Personen pro Haushalt. Entsprechend steigt die Energiebezugsfläche pro Person.²

Privathaushalte verbrauchen 236 PJ (BFE 2018) pro Jahr und sind für 27,8 Prozent des Schweizer Energieverbrauchs verantwortlich. Nicht eingeschlossen ist deren Anteil an der Mobilität. Der Energieverbrauch der Privathaushalte ist somit höher als jener der Industrie (18,5 %). In der Energiestrategie 2050 spielen sie denn auch eine zentrale Rolle: Trotz eines prognostizierten Bevölkerungswachstums (+8,5 % bis 2050) soll der Energieverbrauch der Privathaushalte bis 2050 auf knapp die Hälfte (124 PJ) gegenüber heute gesenkt werden.

Privathaushalte sind in verschiedenen Rollen gefordert: Sie handeln in der Schweiz in der Rolle als Stimmbürgerinnen und Stimmbürger mit den weitreichenden Mitbestimmungsrechten der direkten Demokratie. Es stellen sich ihnen oft auch Herausforderungen als Eigentümerinnen und Eigentümer selbst genutzter Liegenschaften. Als Mitarbeitende oder gar als Führungskräfte von Betrieben oder öffentlichen Verwaltungen können sie die Transformation des Energiesystems auf wiederum andere Weise unterstützen. Vor allem sind die Menschen aber in ihrem privaten Haushalt gefordert als Konsumentinnen und Konsumenten von Energie.

● **Private und öffentliche Betriebe** – Zusammen gerechnet sind die rund 145 000 Industrie- und die rund 457 000 Dienstleistungsbetriebe (Stand: 2016; BFS 2018b) die grössten Energiebezüger der Schweiz. Sowohl die privaten als auch die öffentlichen Betriebe konsumieren Energie für ihre

betrieblichen und administrativen Prozesse sowie für die Gebäude, in denen sie ihre Unternehmen betreiben. Im Jahr 2017 betrug der Energieverbrauch der Betriebe 296,3 PJ oder 35 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs (Industrie 18,5 % und Dienstleistungsbereich 16,4 %). Dies ist etwas weniger als der Verbrauch des Verkehrs (36,3 %), jedoch in der Summe bedeutend mehr als jener der Privathaushalte (27,8 %). Betriebe setzen in erster Linie Strom ein, gefolgt von Erdölprodukten, Gas und Holz. Verwendet werden diese Energieträger rund zur Hälfte für Prozesswärme, rund ein Viertel für Antriebe und rund ein Siebtel für Raumwärme (Prognos 2012).

Mit der Energiestrategie 2050 sehen sich die Betriebe mit grossen Herausforderungen konfrontiert: Bei einer prognostizierten Zunahme des Bruttoinlandproduktes (BIP) von knapp 30 Prozent ab heute bis ins Jahr 2050 sollen sie ihre Energienachfrage gemäss dem Szenario «Neue Energiepolitik» der Energiestrategie 2050 bis dahin um knapp 30 Prozent auf 211 PJ senken.

● **Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer**
 In der Schweiz gibt es rund 2,5 Millionen private und öffentliche Gebäude (Rütter & Staub 2018) mit einer Geschossfläche von insgesamt rund 940 Millionen Quadratmetern und einem Gebäudeversicherungswert von rund 2540 Milliarden Franken. Rund 1,7 Millionen der Gebäude sind Wohngebäude. Davon sind 89 Prozent der Gebäude und 73 Prozent der Wohnungen im Eigentum von Privatpersonen (Rütter & Staub 2018). Von den rund 3,7 Millionen Wohnungen in der Schweiz sind rund 57 Prozent Mietwohnungen (BFS 2018a), die gut zur Hälfte im Eigentum von Privatpersonen sind. Etwa einen Viertel besitzen institutionelle Anleger, rund 8 Prozent Genossenschaften. Von den betrieblich genutzten Liegenschaften sind 69 Prozent im Eigentum der Betriebe, der Rest ist meist langfristig angemietet. Wertmässig nur gut ein Siebtel des gesamten Immobilienbestands, entsprechend 350 Milliarden Franken, ist im Besitz der öffentlichen Hand. Privatpersonen und Betriebe sind demnach die wichtigsten Gebäudeeigentümer in der Schweiz.

Der Gebäudepark beansprucht einen Grossteil der Schweizer Energiebezüge. Der Endenergieverbrauch aller Gebäude betrug 2012 insgesamt

² [Energiesparpotenziale in Haushalten von älteren Menschen]

366 000 TJ (Prognos 2013) oder 41,5 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs. Dieser Anteil liegt über dem Endenergieverbrauch des Verkehrs. Die Raumheizungen sind für über 70 Prozent des Endenergieverbrauchs der Gebäude verantwortlich. Entsprechend wichtig ist die Energiebezugsfläche als Indikator. Sie belief sich 2016 auf rund 745 Millionen Quadratmeter, wovon 67 Prozent auf Wohngebäude, 21 Prozent auf Dienstleistungsgebäude und 12 Prozent auf Industriegebäude entfielen (EnDK 2014).

Nebst der Herausforderung, die Energieeffizienz ihrer Gebäude massiv zu steigern, bieten Dach- und zunehmend auch Fassadenflächen Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümern die Chance, Photovoltaikanlagen zu installieren. Bei der Realisation entsprechender Anlagen können sie dabei unterschiedliche Rollen einnehmen, je nachdem, ob sie selbst in Photovoltaikanlagen investieren oder die Flächen Dritten zur Nutzung abtreten.

● **Fremdkapitalgeber** – Die Transformation des Energiesystems verlangt nach erheblichen Investitionen in Infrastrukturen für die Bereitstellung erneuerbarer Energie (Wasserkraft, Sonnen- und Windenergie), aber auch für Speicher und Verteilanlagen. Angesichts der Lebensdauer der Anlagen handelt es sich dabei – insbesondere bei der Wasserkraft – zum Teil um sehr langfristige Investitionen mit einem Zeithorizont von mehreren Jahrzehnten. Mit ihren Investitionsentscheiden bestimmen die Kapitalgeber wesentlich über die Ausgestaltung und die Dynamik der Transformation des Energiesystems.

Als Investoren infrage kommen institutionelle Investoren wie Fonds, Pensionskassen und Versicherungen. Im Bereich «Energieeffizienz» und beim Ausbau erneuerbarer Energien entscheidet zunehmend auch eine grosse Zahl von Kleinanlegern (Retail-Investoren) über die Investitionen, beteiligt durch entsprechende Investitionsangebote oder organisiert beispielsweise in Energiegenossenschaften oder Vereinen. Banken spielen in allen Bereichen von Energieinvestitionen vor allem als Intermediäre und Fremdkapitalgeber eine wichtige Rolle.

● **Öffentliche Verwaltungen** – Die öffentlichen Verwaltungen von Bund, Kantonen, Städten und Gemeinden sind zentrale Akteure der Energiepolitik. Sie sind für den Vollzug der politischen Vorgaben zuständig. Sie verwenden dabei eine breite Palette von Instrumenten: regulative (technische Normen für Geräte, Gebäude oder Fahrzeuge, Planungen, Baubewilligungen usw.), anreizorientierte (Gewährung von Subventionen und Steuervergünstigungen, Erhebung von Lenkungsabgaben usw.) und persuasive (Energie-Label, Sensibilisierungskampagne usw.) (Balthasar & Walker 2015). Sie verfügen damit über ein erhebliches Potenzial, die Transformation des Energiesystems in ihrem Wirkungskreis voranzutreiben.

Als Verwalter und Betreiber des öffentlichen Immobilienparks nehmen Verwaltungen auf allen Ebenen auch die Rolle von Gebäudeeigentümern und Betrieben ein, als (Mit-)Eigentümer von Energieunternehmen auch jene von Energieversorgern. Zudem können sie die Entwicklung der Mobilität, beispielsweise mittels Vorgaben für die Planung oder als Besteller öffentlicher Verkehrsdienstleistungen, massgeblich beeinflussen.

● **Verbände und andere Nichtregierungsorganisationen** – Vereine, Wirtschaftsverbände und beschwerdeberechtigte Organisationen, die sich für Brancheninteressen und das Gemeinwohl einsetzen, engagieren sich für die Ausgestaltung der Energiepolitik oder wollen darauf Einfluss nehmen. Diese Interessengruppen spielen eine wichtige Rolle für die Akzeptanz energiepolitischer Vorlagen und Projekte bei ihren Mitgliedern, aber auch bei Vernehmlassungsverfahren, parlamentarischen Debatten oder Referendumskampagnen. Wirtschaftsorganisationen und Umweltverbände setzen sich im politischen Prozess oder im Rahmen von Bewilligungsverfahren immer wieder zur Wehr – beispielsweise gegen Lenkungsabgaben die einen, gegen den Bau von Kleinwasserkraftwerken die anderen. Berufsverbände organisieren die Aus- und Weiterbildungen in ihrem Berufsfeld. Mehrere unter ihnen (Ingenieure, Architektinnen, Elektroinstallateure usw.) übernehmen aufgrund ihres technischen Fachwissens Regulierungsaufgaben und definieren technische Normen und Zertifizierungsverfahren, die in der Gesetzgebung übernommen werden.

● **Stimmbevölkerung** – Im direktdemokratischen Kontext der Schweiz spielt die Bevölkerung in ihrer Funktion als Souverän eine wichtigere Rolle als in anderen Ländern, wo praktisch ausschliesslich Regierung und Parlament über die Energiepolitik entscheiden. Auch kleine Schritte auf dem Weg zum Ziel brauchen in der Schweiz die Unterstützung breiter Bevölkerungskreise. Dies gilt für nationale, kantonale oder kommunale Volksabstimmungen ebenso wie für Beschlüsse an Landsgemeinden und Gemeindeversammlungen. Die Rolle als Stimmbürgerin und Stimmbürger ergänzt als «zweite Seele in der Brust» jene der Energiekonsumierenden.

● **Politik (Bund, Kantone, Gemeinden)** – Die Politik in Form der Legislative, der Exekutive und der Stimmbevölkerung setzt die Rahmenbedingungen, innerhalb deren die Transformation des Energiesystems ablaufen kann. Die Politik bestimmt nicht nur die Energiepolitik im engeren Sinne, sondern über die übrigen Sektoralpolitiken (Umwelt, Landwirtschaft, Regionalpolitik usw.) auch darüber, welche Interessen bei der Transformation mitzuberücksichtigen sind. Die Politik von Bund, Kanton und Gemeinden gestaltet auch die Planungs- und Bewilligungsverfahren, die die Realisation von Energieinfrastrukturprojekten massgeblich beeinflussen. Darüber hinaus sind Kantone und Gemeinden zum Teil wesentlich an den Energieversorgungsunternehmen beteiligt und bestimmen in dieser Rolle beispielsweise deren Investitions- und Preisstrategien mit.

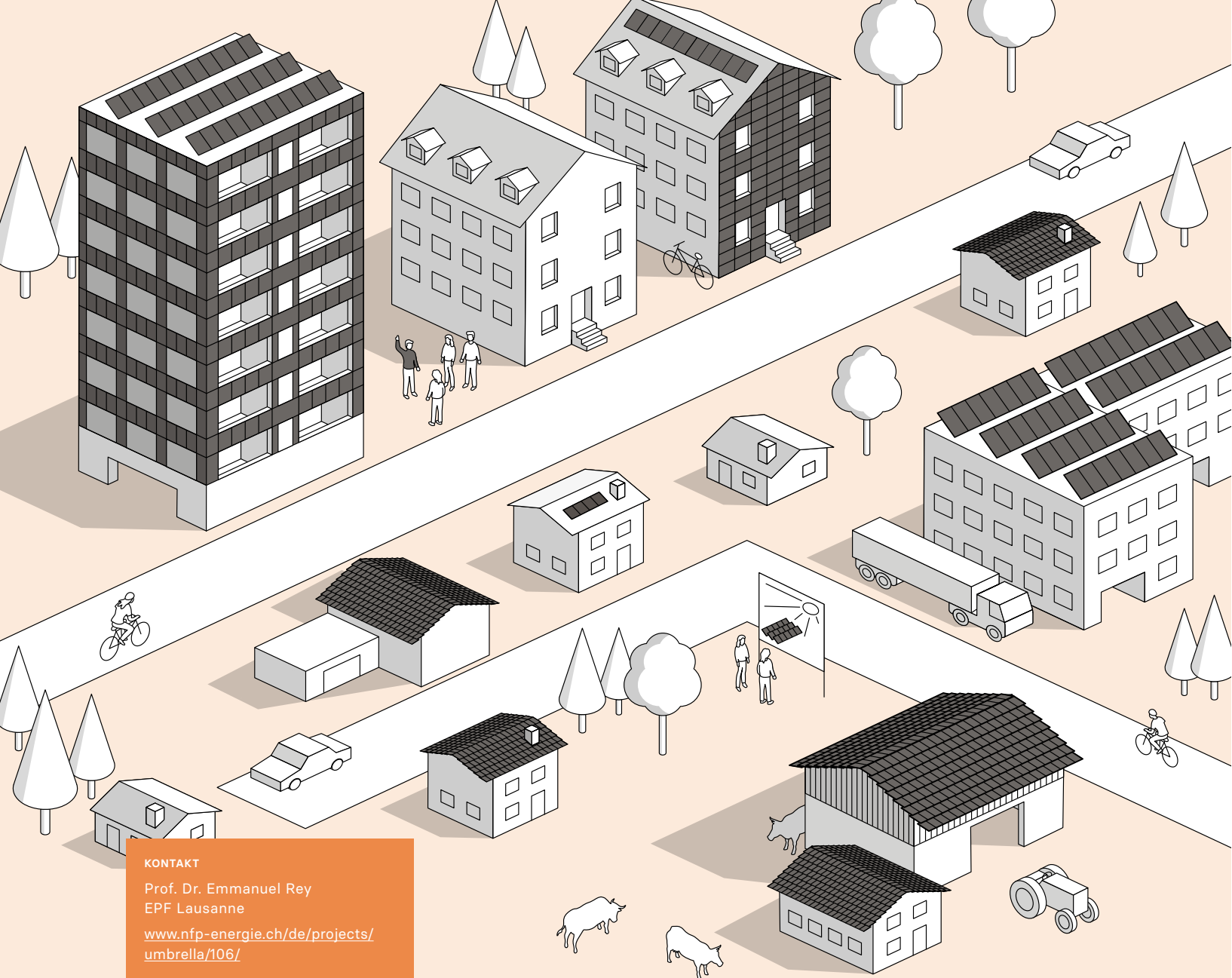
2.3 Herausforderungen der Transformation des Energiesystems

Mit der Energiestrategie 2050 soll in der Schweiz ein Energieregime entstehen, das unter Berücksichtigung des Klimawandels, der demografischen Entwicklung und konjunktureller Schwankungen sowohl Nachhaltigkeitszielen entspricht als auch den Ausstieg aus der Kernkraft und den Ausbau der

erneuerbaren Energieträger ermöglicht sowie das kreative Spiel von technischer und marktwirtschaftlicher Entwicklung nutzt. Angesichts dieser Anforderungen an die Transformation stellen sich in verschiedenen Bereichen Fragen und Herausforderungen.

Energie – eine ökonomische Knacknuss?

Die Energiewirtschaft ist wie alle Wirtschaftsbereiche durch Kosten, Preise und Märkte geprägt. Eine Transformation des Energiesystems ist daher massgeblich von ökonomischen Treibern und Zusammenhängen beeinflusst und hat entsprechende ökonomische Konsequenzen. Bei jährlichen Ausgaben für Energie von rund 25 Milliarden Franken (BFS 2019) und damit einem Anteil am Bruttoinlandprodukt (BIP) von 4 bis 5 Prozent ist die Energiewirtschaft in der Schweiz ein massgeblicher Wirtschaftsbereich. Über die Hälfte dieser Ausgaben resultiert aus dem Import fossiler Energieträger. Die wirtschaftliche Bedeutung allein macht aus dem Energiesystem allerdings noch keine «ökonomische Knacknuss». Dafür ist vielmehr seine enorme Komplexität verantwortlich. Dies zeigt sich etwa in der Vielzahl energierelevanter Entscheidungen: Auf den Schweizer Strassen beispielsweise verkehren rund 4,6 Millionen Autos (BFS 2019), die alle gekauft, abgestellt, bewegt und betankt werden müssen. Zur Wärmeversorgung der rund 1,7 Millionen Wohngebäude (BFS 2018a) müssen Heizungen gekauft, gewartet und betankt oder anderweitig mit Energie versorgt werden. Die über 1000 Schweizer Wasserkraftwerke und rund 700 Energieversorger (BFE 2019) sind – ein weiteres Beispiel – eng mit den Entwicklungen des europäischen Strommarkts und entsprechenden Entscheidungen verbunden. Jede Änderung des Energiesystems hat demnach Auswirkungen auf eine Vielzahl von Akteuren – vom Haushalt über Unternehmen bis zum Staat –, die wiederum Investitions- oder Betriebskosten zur Folge haben.



Energie – eine ökologische Herausforderung?

Die Bereitstellung und die Nutzung von Energie sind in ökologischer Hinsicht von grosser Relevanz. Die damit verbundenen Prozesse und Produkte beanspruchen natürliche Ressourcen wie Baustoffe, Biomasse, insbesondere fossile Rohstoffe wie Kohle und Erdöl, oder Raum. Sie erzeugen Emissionen wie CO₂, Feinstaub oder Lärm, beeinträchtigen Lebensräume von Pflanzen, Tieren und Menschen, können die Gesundheit schädigen und das menschliche Wohlbefinden mindern.

Arbeiten an der Zukunft eines nachhaltigen Energiesystems heisst, Lösungen zu entwickeln, die die Energiebereitstellung und -nutzung mit minimalen ökologischen Konsequenzen ermöglichen. Diese Herausforderung verlangt neben einer optimierten CO₂-Bilanz unter anderem ein Denken und Handeln in Kreisläufen. Technologien zur Energiebereitstellung sollen nur zum Einsatz kommen, wenn die dafür beanspruchten Ressourcen möglichst weitgehend und zu vertretbaren Kosten in einen Zustand zurückgeführt werden können, von dem keine Gefährdung der Umwelt mehr ausgeht.

Dieses Ziel ist in weiter Ferne, wie folgende Beispiele illustrieren: Die Elektromobilität gilt zwar als hoffnungsvoller Beitrag zur Minderung der Klimaerwärmung. Für das vollständige Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, dem Kernstück dieser Technologie, existiert allerdings noch keine wirtschaftlich vertretbare Lösung. Ähnlich verhält es sich bei der Windenergie: Für die Rotorblätter und die tonnenschweren Gondeln von Windrädern, die aus einem Verbund von Glas- oder Kohlefasern mit Holz bestehen, ist echtes Recycling nicht möglich. Besser, aber noch nicht ideal, präsentiert sich die Situation bei den Photovoltaikmodulen. Diese werden bei der Entsorgung vorerst noch in die einzelnen Bestandteile zerlegt und gereinigt. Die siliziumhaltigen Komponenten werden geschreddert und für neue elektronische Grundplatten (Wafer) verwendet. Dabei wird eine Wiederverwertungsrate von 90 Prozent erzielt. Dieser Prozess ist allerdings energieintensiv und es fallen Ätzlösungen an, die neue Umwelt Risiken in sich bergen. Bis das Energiesystem als

echte Kreislaufwirtschaft gestaltet ist, bleibt viel zu tun. Als grundlegende Dilemmata gestalten sich zudem Boden- und Raumbeanspruchung durch die Energieinfrastruktur, aber auch Auswirkungen auf die Biodiversität – diese Aspekte lassen sich zwar optimieren, aber nicht aus der Welt schaffen.

Technologie und Innovation – Hürden vom Wissen zur Anwendung

Die Transformation des Energiesystems bedingt Technologien, die den Verbrauch fossiler Energie reduzieren und die knappen natürlichen Ressourcen schonen. Die bisherigen wissenschaftlichen und unternehmerischen Entwicklungen haben bereits spektakuläre Kostenreduktionen für erneuerbare Energien ermöglicht. Besonders relevant waren und sind die Fortschritte in zwei äusserst dynamischen Wissenschaftsbereichen – den Materialwissenschaften und den Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). Die Materialwissenschaft, insbesondere die Manipulation von Materie auf atomarer Ebene, steht im Mittelpunkt der Entwicklung in den Bereichen «Windenergie» (immer grössere Rotorblätter), «Elektrische Mobilität» (Batterien mit höherer Energiedichte und Lebensdauer), «Photovoltaik» (höhere Solareffizienz) und «(Bio-)Kraftstoffe» (bessere Katalysatoren und Sensoren). Dank der rasanten Fortschritte in der IKT-Branche in Bereichen wie «Datenmanagement und -speicherung», «Analyse von Big Data» oder «Echtzeitkonnektivität» kommt derzeit eine Vielzahl neuer Produkte und Dienstleistungen auf den Markt. Diese reduzieren den Energieverbrauch in der Industrie und beim Wohnen, ermöglichen die Nutzung erneuerbarer Energien über Smart Grids und unterstützen energieeffizientere Formen der Mobilität.

Radikal neue Produkte und Leistungen gehen häufig auf die Initiative kleiner Start-up-Unternehmen zurück. «Inkubatoren» und «Co-Location» in einem Wissenschaftspark sind bekannte Instrumente, eine starke Verbindung zwischen diesen Start-up-Unternehmen und der Wissenschaftsgemeinde zu fördern. Eine Herausforderung für viele dieser Unternehmen liegt beim Zugang zu

KONTAKT
Prof. Dr. Emmanuel Rey
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/de/projects/umbrella/106/

PROJEKT #Photovoltaik #Gebäude #Akzeptanz

«Gebäudeintegrierte Photovoltaik»

Solarpanels generieren nicht nur Strom. Als gebäudeintegrierte Photovoltaikanlagen (GiPV) können sie auch als Fassadenverkleidungen eingesetzt werden. Sie senken dadurch nicht nur den Verbrauch an fossilen Energieträgern, sondern bewirken auch Einsparungen bei Material und Stromkosten. Gebäudeintegrierte Photovoltaikanlagen sind allerdings erst vereinzelt anzutreffen. Das Team des Projekts «Gebäudeintegrierte Photovoltaik» untersuchte, wie sich die aktuellen technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Hürden von der Produktion bis zur lokalen Umsetzung reduzieren lassen. In Be-

fragungen von Architekten und Hauseigentümern ermittelten die Forschenden Beweggründe und Widerstände für den Einsatz von gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen. Im Projekt wurden neue Strategien für das architektonische Design bei Gebäuderenovierungen und Neubauten entwickelt, die die neue Generation von Solarpanels und innovative GiPV-basierende Fassadensysteme mit architektonischer Qualität verbinden. Letztere liefern Architekten, Installateuren, Bauherren und Behörden eine Palette von Lösungen, die die Eigenheiten und Ansprüche jedes Gebäudes berücksichtigen.

Finanzmitteln. Die Bereitstellung von Kapital ist deshalb zentral, um die Gründungsphase zu überwinden und vielversprechende Konzepte zur Marktreife zu bringen. Unternehmen werden aber nur dann in die Entwicklung neuer Technologien investieren, wenn sie erwarten, dass eine erhebliche Marktnachfrage besteht und sie kurz- bis mittelfristig Gewinne erwirtschaften können. Noch ist es nicht einfach, eine substanzielle Nachfrage nach umweltverträglichen Produkten zu erzeugen. Der jüngste starke Rückgang der Kosten für erneuerbare Energien zeigt aber, dass staatliche Massnahmen zur Marktöffnung die Unternehmen motivieren, die Produktion zu steigern und die Preise zu senken.

Geschwächte Position in Europa

Das Schweizer Stromnetz ist eng mit jenen der Nachbarländer verknüpft. Dies ermöglicht sehr hohe Kapazitäten für Import, Export und Transit von Elektrizität. Die Schweiz hatte traditionell ein relativ grosses Gewicht in den Organisationen, die die Standards des europäischen Netzes festsetzten und das Netz weiterentwickelten. Aufgrund der fortschreitenden Integration der europäischen Energiemärkte und der unsicheren Beziehungen zur EU hat die Schweiz in den letzten Jahrzehnten aber an Einfluss verloren. Als Folge der Liberalisierung und Harmonisierung der EU-Energiemärkte unterstehen heute verschiedene Organisationen europäischer Rechtshoheit. Die Schweiz wird dadurch zunehmend marginalisiert.

Das Stromabkommen mit der EU wird schon seit 2007 verhandelt. Vonseiten der EU wird klar signalisiert, dass ohne institutionelles Rahmenabkommen die Verhandlungen über das Stromabkommen oder über weitere Marktzugangsabkommen nicht zu einem Abschluss gebracht werden können. Unabhängig von einem Stromabkommen und der Angleichung der Rechtsvorschriften wirken sich die europäischen Märkte direkt auf die Preisbildung im vernetzten Elektrizitätsmarkt der Schweiz aus. Die fehlende institutionalisierte Anbindung beeinträchtigt deshalb die Gewährleistung der Netzstabilität und den Marktzugang; sie schliesst die Schweiz von einer Mitsprache bei den europäischen Entwicklungen in den nicht technischen Gremien aus.

Politische Legitimation und Koordinationsbedarf

Mit der Zustimmung zum neuen Energiegesetz als Teil der Energiestrategie 2050 hat die Schweizer Stimmbevölkerung der Energiepolitik die Legitimation für die Transformation des Energiesystems verschafft. Aufgabe der Politik ist es, diese in demokratisch legitimierten Verfahren vorgegebenen Ziele zu realisieren und die dazu notwendigen Instrumente einzusetzen. Das Energiesystem weist zudem Charakteristiken auf, die staatliches Eingreifen notwendig machen – neben dem Versagen des Energiemarktes etwa die hohen Kosten für das Energienetz oder die Monopolsituation der Energieversorger. Auch die externen Effekte der Energieproduktion können staatliches Handeln erfordern, beispielsweise wenn Windturbinen das Landschaftsbild beeinträchtigen oder die Finanzierung für die Folgekosten von Kernenergieanlagen sicherzustellen ist. Die staatlichen Vorgaben können alle Dimensionen des klassischen Nachhaltigkeitsdreiecks betreffen, etwa die Gewährung der Versorgungssicherheit, die Vermeidung negativer Umwelteinflüsse oder die Sicherstellung bezahlbarer Energiepreise.

Der Föderalismus ist ein wesentliches Element der schweizerischen Energiepolitik. Tabelle 1 vermittelt eine Übersicht über die wichtigsten Interventionsbereiche der verschiedenen staatlichen Ebenen. Sie zeigt die Bedeutung der vertikalen (z.B. Unterstützung der erneuerbaren Energien durch Bund und Kantone) und der horizontalen Koordination (z.B. Transfer von bewährten Praktiken zwischen Gemeinden). Die internationale, insbesondere die europäische, Ebene (vgl. Kap. 3.8) ergänzt die drei Stufen des schweizerischen Föderalismus.

Die Instrumente der direkten Demokratie ermöglichen es Bürgerinnen und Bürgern, Interessengruppen und politischen Parteien, sich aktiv an energiepolitischen Entscheidungen zu beteiligen. In der Energiepolitik die politische Akzeptanz der Massnahmen sicherzustellen, bedeutet eine ständige Herausforderung für die Behörden (vgl. Kap. 3.7), aber auch die Parteien, die divergierenden und sich oft widersprechenden Ansprüche zu bündeln.

Wichtige Bereiche der Energiestrategie 2050		Beispiele für Koordinationsaufgaben
Bund	– Energiestandards für Geräte und Fahrzeuge – CO₂-Abgabe – Subventionen und Vergütungen für Ökostrom – Regulierung des Strommarktes und der Stromnetze – Nukleare Sicherheit einschliesslich radioaktiver Abfälle	Programmleitung von <i>EnergieSchweiz</i> , der Plattform, die auch die Massnahmen der Kantone, der Gemeinden und des Privatsektors begleitet
Kantone	– Gebäudesanierung – Nutzung der Abwärme – Förderung der erneuerbaren Energien einschliesslich Wasserkraft	Harmonisierung der kantonalen Normen gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE)En
Gemeinden	– Energiestädte einschliesslich Mobilität und nachhaltigere Quartiere	Gemeindeübergreifende Zusammenarbeit auf regionaler Ebene

Tabelle 1
Handlungsfelder der öffentlichen Behörden

Die Transformation des Energiesystems – eine Aufgabe der Gesellschaft!

Ob als Konsumentin oder Konsument, Wirtschaftsakteure oder als Stimmbürgerin und Stimmbürger, mit ihrem Verhalten beeinflussen alle das Energiesystem. Mit energiesparendem Verhalten im Alltag oder einem entsprechenden bewussten Kauf- und Investitionsverhalten tragen alle individuell zum Energieverbrauch bei. Sie sind nicht völlig unabhängig in ihren Entscheidungen. Entsprechend ihrer Rolle und Lebenssituation – etwa als Jugendliche, als Familie oder als Pensionierte – unterscheiden sich ihre Bedürfnisse und als Teil einer Gruppe orientieren sie sich an deren Verhalten. Als Konsumierende können sie energieeffizient hergestellte Produkte oder Geräte

mit geringem Energieverbrauch wählen, sofern sie über die dazu notwendigen Informationen verfügen. Bei der Wahl des Energieträgers ist ihr Handlungsspielraum oft begrenzt. Aufgrund des beschränkt freien Marktes kann ein Haushalt vorderhand noch nicht wählen, bei wem er Strom beziehen will. Ähnliches gilt beim Wärmebezug: Mieterinnen und Mieter sind in Bezug auf das Heizsystem oder die Wärmeisolation von den Entscheidungen der Immobilieneigentümer abhängig. Unter Umständen besteht auch eine Anschlusspflicht an ein Gas- oder Fernwärmenetz seitens Gemeinde. Bei entsprechenden Entscheidungen kommt hingegen die Rolle der Individuen als Stimmbürgerinnen und Stimmbürger zum Tragen. Mit ihrem Abstimmungsverhalten legitimieren sie staatliches Eingreifen und lenken es in die von ihnen gewünschte Richtung.

Insgesamt erweist sich die Mobilisierung der Gesellschaft als ein Schlüsselinstrument für die Transformation des Energiesystems, sei es, um die Bereitschaft der Einzelnen zu erreichen, ihre Energieverbrauchsmuster zu ändern, das Interesse an energiesparenden Produkten und Dienstleistungen zu fördern, lokale Energieprojekte zu unterstützen oder Akzeptanz für öffentliche Investitionen, Energieinfrastrukturen oder neue Regulierungen zu schaffen.

2.4 Entwicklungsdynamiken

Abwechslungsreiche Schweizer Energiegeschichte

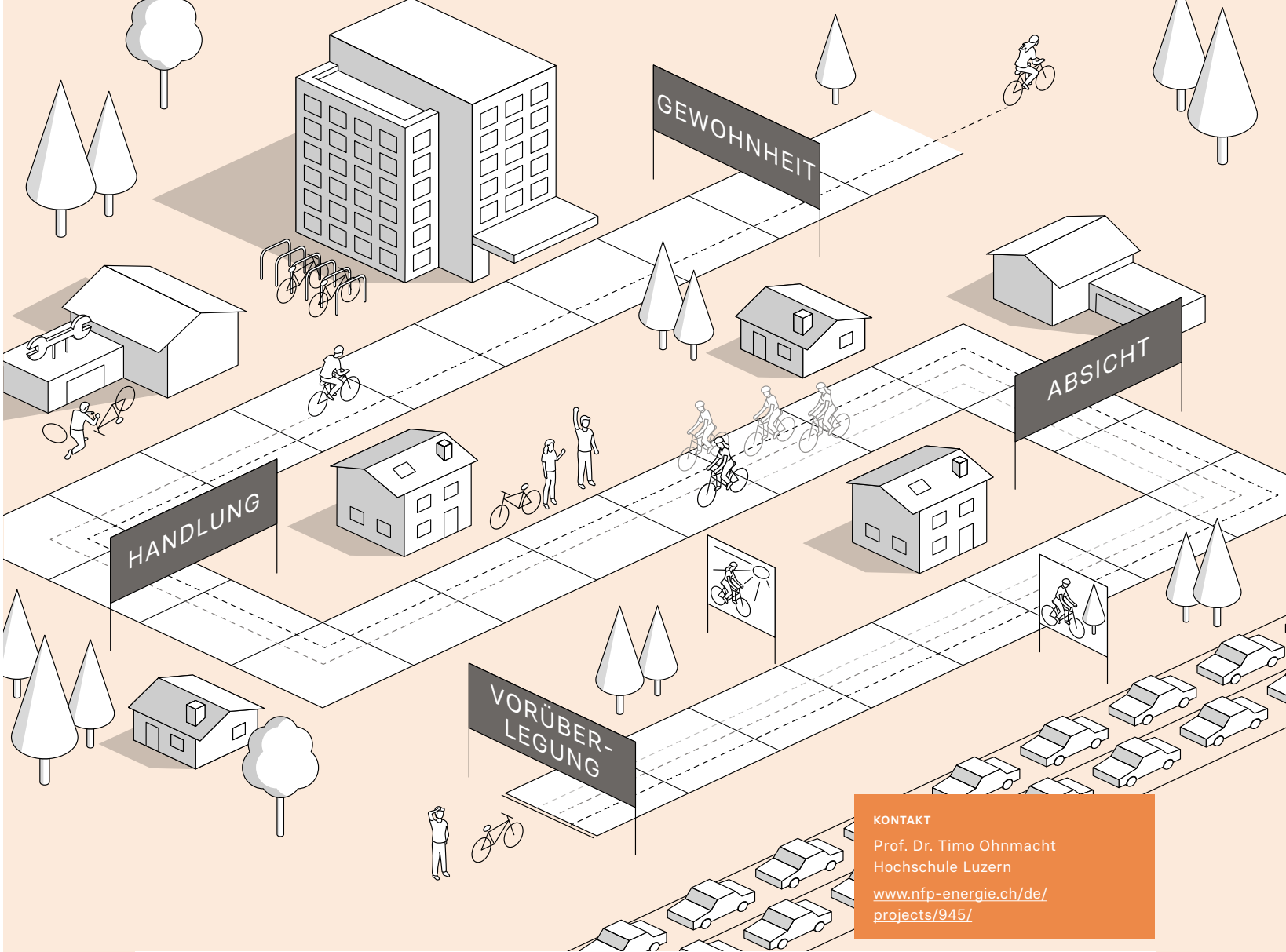
Mit der Energiestrategie 2050 hat die Schweiz in einem aufwendigen politischen Prozess ausgehandelte Ziele konsensfähig formuliert. Sie schreibt damit ein neues energiegeschichtliches Kapitel – nicht zum ersten Mal, sondern vor dem Hintergrund einer reichen Energiegeschichte (vgl. S. 30–31), in der man sich immer wieder einigermassen einig war, wie das Energieregime der unmittelbaren Zukunft aussehen wird. Solche Phasen verfügten über stabile Regeln der Nutzung, der Tarifgestaltung und der apparativen Normierung. Sie waren jeweils charakterisiert durch den Einsatz neuer Energieträger: Das herkömmliche Regime von Brennholz und direkter Wasserkraftnutzung wurde in der Schweiz um 1860 durch ein Regime mit rasant steigendem Verbrauch an Kohle und Koks abgelöst. Das späte 19. Jahrhundert erweiterte das Energieregime mit aus Wasserkraft und Kohle generierter Elektrizität, die für Beleuchtung und chemische Verfahren, später für Antriebe und schliesslich auch für Wärmeapplikationen zum Einsatz kam. Im 20. Jahrhundert erweiterte Erdöl diesen Energiemix, insbesondere in der Schifffahrt, in der Massenmotorisierung, im Flugverkehr und in der Gebäudebeheizung. Noch während des Erdölregimes entfalteten sich Pläne für ein kernenergetisches Energieregime, deren Umsetzung jedoch weit hinter den ursprüng-

lichen Erwartungen zurückblieben. Hingegen wandelte sich das schweizerische Energieregime in den letzten zwei Jahrzehnten mit einem ganzen Bündel neuer Formen von Energieträgern und -technologien: Photovoltaikanlagen und Windturbinen ergänzten die Generierung von Elektrizität, für die Gebäudewärme begannen Geothermie, Erdgas und Isolationstechniken eine grosse Rolle zu spielen und im motorisierten Individualverkehr tauchten Biotreibstoffe und Elektrofahrzeuge aller Art auf. Diese neuen Nutzungsformen werden – mit Ausnahme von Erdgas – unter dem Label der erneuerbaren Energieträger diskutiert (Kupper & Pulla 2016).

Energiemärkte – Gegenstand der politischen Verhandlung

Energiemärkte sind nicht erst heute Gegenstand politischer Debatten. Ob in der Vergangenheit, der Gegenwart oder in der Zukunft: Alle Energienutzungsformen benötigen regulatorische Schutzmechanismen, damit sie sich entwickeln können. Sie sind auf Quersubventionierungen angewiesen und stehen in unterschiedlichem Mass unter dem Schutz kommunaler, kantonaler und bundesstaatlicher Regulierungen. Ein politisch austariertes Energieregime ermöglicht, die Zukunft des Energiesystems auf konsensfähige Weise zu gestalten.

Engpässe in der Versorgung mit Energie sind in der Moderne eine Ausnahme. Im 20. Jahrhundert ist der Erdölpreis dank Fördermengen stets gesunken. Das Phänomen langfristig sinkender Preise gilt – von kriegsbedingten Zwischenhochs abgesehen – auch für Kohle und ist bei den erneuerbaren Energieträgern absehbar. Energiemärkte können nur dann gut funktionieren, wenn die Versorger mit steigender Nachfrage und sinkenden Gesteungskosten rechnen können und beim Konsum keine Engpässe entstehen. Wer Energie verkauft, muss dazu auch in absehbarer Zukunft in der Lage sein und wird deshalb die Kapazität laufend ausbauen und die Bereitstellung effizienter gestalten wollen.



PROJEKT #Bevölkerung #Energieeffizienz #Nachhaltigkeit

«Nachhaltige Lebensstile und nachhaltiger Energieverbrauch»

Wie erfolgreich die Transformation des Energiesystems vorangebracht werden kann, hängt auch davon ab, wie gut es gelingt, die Einzelnen für energiesparsame Lebensstile zu gewinnen. Ob sich jemand entsprechend verhält, wird wesentlich von sozialpsychologischen Einflussfaktoren bestimmt. Basierend auf dem sogenannten Phasenmodell führte das Forschungsteam eine breit angelegte Befragung durch. Das Phasenmodell geht davon aus, dass Menschen vier Phasen durchlaufen, bis ein neues Verhalten zur Gewohnheit wird – von der Vorüberlegung über die Absicht und die Handlung zur Gewohnheit. Das Forschungsteam konnte nachweisen: Unterschiedliche Zielgruppen lassen sich mit individuell geeigneten Informationen und Massnahmen für

einen energiesparsamen Lebensstil gewinnen. **Die Informationen und Massnahmen müssen jedoch genau der Phase entsprechen, in der sich jemand bezüglich eines Entscheids befindet.** Haben sich Personen noch nie Gedanken zu energiesparendem Verhalten gemacht, lassen sie sich beispielsweise mit emotionaler Kommunikation dazu bewegen, Überlegungen über eine Verhaltensänderung anzustellen. Wer dagegen schon den Entschluss gefasst hat, energieeffizienter zu wohnen, braucht konkretes Wissen, um diese Absicht umzusetzen. Das Forschungsteam hat für sechs untersuchte Lebensbereiche je einen Leitfaden entwickelt, der konkret illustriert, wie entsprechende Kampagnen gestaltet werden können.

Antizipation – eine Notwendigkeit

Die Antizipation künftiger Nachfrage ist nicht nur ökonomisch, sondern auch technisch notwendig. Ein Stromversorgungsnetz, dessen Kapazität die Nachfrage nicht vollständig decken kann, bricht sofort zusammen – mit verheerenden Folgen für alle Verbraucher. Die Bereitstellungskapazität muss deshalb immer grösser sein als die aktuelle Nachfrage. Um das prekäre Verhältnis von Angebot und Nachfrage auszugleichen, haben die Elektrizitätsgesellschaften seit dem späten 19. Jahrhundert die Kapazität ihrer Wasserkraftwerke zunächst mit Verträgen für besonders stromintensive Anwendungen und für den Stromexport versehen und dann schrittweise für die Allgemeinversorgung genutzt. Erleichtert wurde das Vorgehen durch günstige Finanzierungsbedingungen für kommunale, staatliche und gemischtwirtschaftliche Unternehmen sowie spezialisierte Banken der Ausrüstungsgüterindustrie für privatwirtschaftliche Kraftwerke (Gugerli 1996).

Über Tarifieren (Nachstrom) und gezielte Apparatesteuerung (Boiler, Waschmaschinen) steuerten die Kraftwerksbetreiber den Stromverbrauch und damit ihre Netzladung. Bei der Bereitstellung betrieben sie durch Kombinationen der verschiedenen Kraftwerktypen ein verbundwirtschaftliches Lastenmanagement. Die Elektrizitätsgesellschaften förderten mit energieintensiven Anwendungen wie Elektroherden oder elektrischen Speicherheizungen ab den 1990er-Jahren durch den Verkauf energieeffizienter Geräte wiederum jene Nachfrage, die ihnen die Vorwegnahme des Nachfragewachstums ermöglichte.

Gesellschaftliche Wertvorstellungen prägen Regulierungsbedarf

Auch in wirtschaftsliberalen Kontexten zeichnen sich Energieregime der Moderne durch einen hohen Regulierungsbedarf aus. Über Fragen der Sicherheit, der Tarifgestaltung, der vertretbaren Gewinne und Subventionen, über Fragen der Monopolbildung, der kartellistischen Organisation, der technischen Normierung von Infrastrukturen und Apparaten bis hin zu den akzeptablen Nutzungsformen oder Umweltschäden muss je ein tragfähiger, aber auch anpassungsfähiger Konsens erarbeitet und durchgesetzt werden. Je mehr Voraussetzungen ein Energieregime benötigt, desto grösser ist der Regulierungsbedarf, je grösser der technische Aufwand, desto voraussetzungsreicher das regulatorische Umfeld. Die Ausgestaltung der Regeln, die ein Energieregime prägen, sind eng verknüpft mit dem Wandel von Wahrnehmungs- und Deutungsmustern. Besonders anschaulich zeigt sich dies bei der Kernenergie. Diese war am Ende des Zweiten Weltkriegs ein Problem der Physik mit einer militärisch nutzbaren Lösung. Die «Zivilisierung der Bombe» musste die hohen Erwartungen an die «Atomtechnologie» und gleichzeitig die damit verbundenen Ängste so abbauen, dass Kernkraftwerke zum wichtigsten Anwendungsfall dieser Technologie wurden.

Kernkraftwerke eröffneten in der Schweiz für den Bund ein neues wissenschaftspolitisches Feld, mit dem sich auf einen Schlag umweltpolitische, energiepolitische, regional- und wirtschaftspolitische und möglicherweise sogar militärische Ziele gestalten liessen. Bund und Kernenergie schienen um 1960 eine perfekte Partnerschaft eingehen zu können: Friedenspolitisch entsprach ein solches Programm dem Motto «Schwerter zu Pflugscharen» und belebte auch energiepolitische Autarkieträume, reduzierten sich dadurch doch die energiewirtschaftlichen Abhängigkeiten von Kohle und Erdöl. Die Kernenergie war somit ein technologiepolitischer Leuchtturm des Bundes (Gugerli et al. 2000; Gugerli 2004).

Insgesamt ergab sich eine sehr positive Einschätzung der Kernenergie. Ihre Umsetzung spaltete jedoch nicht nur Uran, sondern auch die Gesellschaft. Der Misserfolg mit dem eidgenössischen Versuchsreaktor in Lucens VD, der nur einen Tag in Betrieb war, kümmerte weder die Industrie noch das politische System (Wildi 2003). Die über fast zwei Jahrzehnte dauernden Konflikte rund um das geplante Kernkraftwerk Kaiseraugst verknüpften jedoch eine ganze Reihe von Problemlagen mit der kernenergetischen Zukunft der Schweiz. Die Kernenergie, das technologiepolitische Flaggschiff des Bundes, wurde mit Ängsten vor dem Atomstaat, mit ruchloser Gewinnmaximierung, gewaltigen Sicherheitsproblemen, drohenden Umweltschäden sowie technokratischer Blindheit assoziiert und zum Sinnbild einer Dystopie der 1970er- und 1980er-Jahre umgedeutet (Kupper 2003). Unfälle in Three Mile Island (1979) und Tschernobyl (1986) relativierten die Beruhigung durch sicherheitstechnische Regulierung oder durch das Probability Risk Assessment (Carlisle 1997). Das Restrisiko blieb und wurde zwar auf Komponenten, Akteure und Betroffene verteilt, nicht aber eliminiert (Beck 1986).

Die Korrektur der Nachfrageprognosen nach Energie nach unten, steigende Gestehungskosten kernenergetisch produzierter Elektrizität, die Evidenz ganz normaler Katastrophen sowie eine starke Verbreitung ökologischer Sensibilität auch gegenüber dem Abfallproblem des Kernkraftwerkbetriebs führten in der Schweiz zur Annahme der «Moratoriumsinitiative» (1990). Das «Moratorium» bildete in der Folge die Grundlage eines brüchigen Konsenses, an den man sich zu gewöhnen begann. Mit der unter dem Druck des Klimawandels wachsenden Wahrnehmung der CO₂-Problematik mutierte Kernenergie nach der Jahrtausendwende zum zweiten Mal zur attraktiven Alternative für fossile Brennstoffe. Das Ereignis von Fukushima (2011) veränderte die kollektive Beurteilung der Kernkraft allerdings nochmals so stark, dass die Transformation des Energiesystems und der Ausstieg aus der Kernenergie konsensfähig wurden. Gleichzeitig verschärfte sich die Klimaproblematik. Mit der Genehmigung des Übereinkommens von Paris hat sich die Schweiz 2017 zu einer

Reduktion der Treibhausgasemissionen um 50 Prozent bis 2030 gegenüber 1990 verpflichtet und ein Gesamtreduktionsziel von 70 bis 85 Prozent angekündigt. Dieser klimapolitische Entscheid bedeutet zusätzlich den Ausstieg aus den fossilen Energieträgern und soll unter anderem mit der Totalrevision des CO₂-Gesetzes umgesetzt werden.

Der lange Weg energiepolitischer Wenden

Die Geschichte der Energienutzung macht deutlich: Der Übergang von einem Energieregime zum nächsten hat jeweils länger gedauert, als die Rede vom «Siegeszug» der elektrischen Energie, vom «1950er-Syndrom», von der «1970er-Diagnose» (Kupper 2003a) und von der «Wende» zu den erneuerbaren Energieträgern suggeriert. Jedes der Energieregime hat sehr viel Vergangenheit mitgeschleppt und die Übergänge lösten intensive Debatten aus. Selbst grosse Substitutionsprozesse führten nie dazu, dass ein Energieträger vollständig von der Bildfläche verschwunden wäre. Hingegen waren neue Energieträger immer mit konfliktträchtigen Verdrängungsprozessen, mit überschüssenden Erwartungen und Ängsten, mit einer Veränderung der relativen Preise, mit neuen staatlichen Regulierungen, apparativen Innovationen und veränderten Nachfragen verbunden. Die Schweizer Energiestrategie 2050 ist zwar ein nach wirtschafts-, umwelt-, energie-, industrie- oder wissenschaftspolitischen Gesichtspunkten abgefedertes und im Härtestest der Referendumsabstimmung von 2017 auf Konsensfähigkeit geprüftes Projekt. Sie wird für einige Jahre einen Referenzpunkt bilden, der verständigungsorientiertes Handeln ermöglicht. Auch diese neueste Energiewende wird aber viel Zeit in Anspruch nehmen und nur dann erfolgreich sein, wenn sie laufend neue Vorteile anzubieten hat.

Mensch und Energie – ein untrennbares Gespann

Seit mehr als zwei Millionen Jahren versucht der Mensch, die Energie, über die er dank seiner Muskelkraft verfügt, mit zusätzlichen Energieträgern zu verstärken und mittels verschiedenster Technologien nutzbar zu machen. Als erste Energiequelle bot sich das Feuer an, das ausgelöst durch Blitzschlag, Erdbrände oder Vulkanausbrüche schon immer verfügbar war. Die ältesten, vor über 1,5 Millionen Jahren zweifelsfrei durch Menschen angelegten Feuerstellen fanden sich in der Wonderwerk-Höhle in Südafrika. Erste Nachweise von Feuerstellen in Europa stammen aus England, Südfrankreich und Ungarn; sie sind rund 400 000 Jahre alt. Zwei nächste Meilensteine sind Windmühlen in Babylon um 1700

v. Chr. und Wasserräder, die griechische Ingenieure im 4. und 3. Jahrhundert v. Chr. für die Bewässerung in der Landwirtschaft entwickelten. Erste Mahlmühlen hat der Architekt Vitruv im 1. Jahrhundert v. Chr. beschrieben. Bereits im Altertum verbreitet war auch die direkte Nutzung von Erdwärme, vor allem zum Baden, aber auch für die Gebäudeheizung.

In der Neuzeit nahm der technische Fortschritt rasant an Fahrt auf: Ende des 17. Jahrhunderts entwickelte Denise Papin eine erste, später von James Watt verbesserte Dampfmaschine. Als Energiequelle kam in erster Linie Holz zum Einsatz, zunehmend aber auch Kohle, die seit vor-

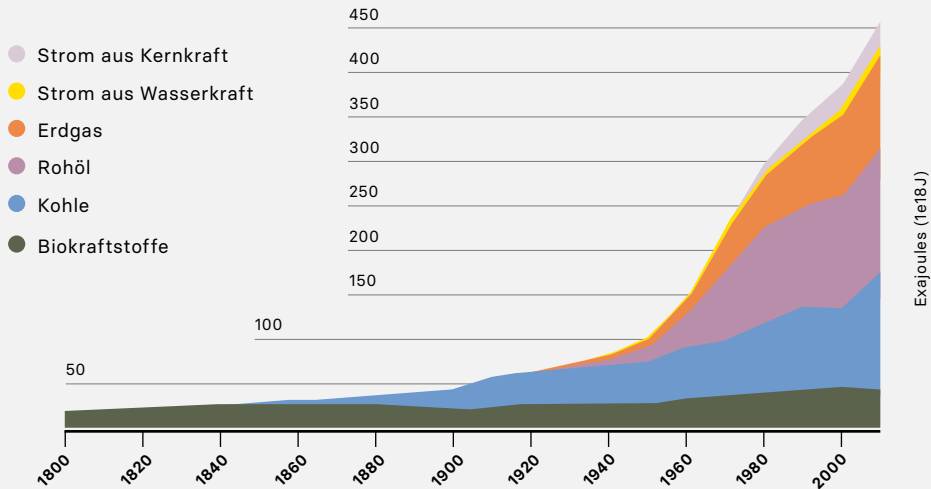


Abbildung 2
Globaler Energieverbrauch von 1800 bis 2010 nach Energieträgern (Bice o.J.)

christlicher Zeit bekannt war. Im 18. Jahrhundert wurden der Magnetismus und die Elektrizität als Energiequellen systematisch erforscht. 1859 stellte Étienne Lenoir den ersten funktionierenden Gasverbrennungsmotor vor. Dies leitete schliesslich über zur verstärkten Nutzung von Erdöl. Kurz vor dem Zweiten Weltkrieg entdeckte eine Forschergruppe um Otto Hahn das Phänomen der Kernspaltung auf Basis von Uran.

Die enorme Entwicklungsdynamik seit Ende des Zweiten Weltkrieges basierte vor allem auf einem explosionsartig zunehmenden Verbrauch an fossilen Energieträgern (Kohle, Gas, Öl; vgl. Abb. 2). Die massgeblichen Treiber dieser Entwick-

lung waren und sind die Bevölkerungsentwicklung und das wirtschaftliche Wachstum (vgl. Abb. 3). Die hohe und günstige Verfügbarkeit dieser Energieträger hat ihrerseits die Entwicklung vorangetrieben. Es ist offensichtlich, dass die Entwicklung nicht in dieser Weise fortgesetzt werden kann – das Bevölkerungswachstum muss verlangsamt und der Energiekonsum vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden. Mit anderen Worten: Das Gespann muss gelockert werden. Dies stellt die Gesellschaften und Wirtschaften rund um den Globus vor gewaltige Herausforderungen. Vordringlich gilt es, die Energieeffizienz zu steigern und fossile durch neue erneuerbare Energieträger zu ersetzen.

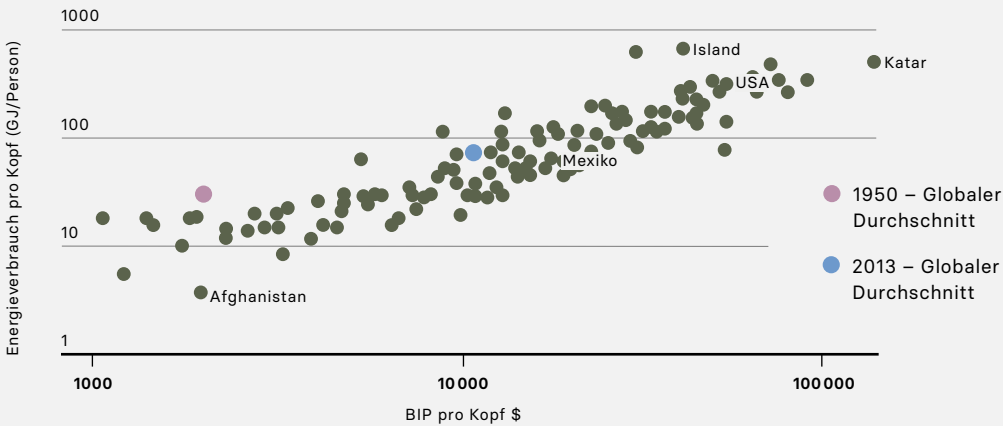


Abbildung 3
Verhältnis zwischen BIP (Bruttoinlandsprodukt) und Energieverbrauch (Bice o.J.)

Die Transformation des schweizerischen Energiesystems, wie sie mit der Energiestrategie 2050 eingeleitet ist, erfordert Aktivitäten in zahlreichen – technischen, ökonomischen, gesellschaftlichen oder politischen – Bereichen. Nachfolgend werden zentrale Herausforderungen skizziert, die sich dabei stellen, und ausgewählte Ergebnisse des NFP «Energie» vorgestellt, die zu ihrer Bewältigung beitragen.

Handlungsfelder der Transformation und Lösungsansätze

3



Die Transformation des schwedischen Energiesystems, wie sie mit der Energiestrategie 2050 eingeleitet ist, erfordert zahlreiche – technischen, ökonomischen, gesellschaftlichen oder politischen – Herausforderungen. Nachfolgend werden zentrale Herausforderungen skizziert, die sich dabei stellen, und ausgewählte Ergebnisse des NFP «Energieeffizienz», die zu ihrer Bewältigung beitragen.

Die Forschungsprojekte des NFP «Energie» entwickelten zahlreiche Lösungsansätze, die die Transformation des Energiesystems beitragen können. Innovative technische Entwicklungen zur Steigerung der Energieeffizienz gehören ebenso dazu wie Empfehlungen zur Ausgestaltung des politisch-rechtlichen Rahmens oder zur Akzeptanz neuer Technologien und Verhaltensweisen.

Magazin «E&E» | Energie & Veränderung, Illustration: Lucia Hunziker, Diana Fischer mit Anna Hickl



3.1 Energieeffizienz – Schlüsselgrösse der Energiewende

Die Steigerung der Energieeffizienz ist eine der Möglichkeiten, den Energieverbrauch zu drosseln. Effiziente Energienutzung heisst nicht nur mit weniger Energieeinsatz dieselbe Wirkung erzeugen, sondern auch, unnötigen Energieverbrauch zu vermeiden. Ein anderer Ansatz ist die Suffizienz, das heisst die Änderung des menschlichen Verhaltens beispielsweise durch Einschränkungen der Mobilität, das Absenken der Raumtemperatur in der Heizperiode oder den Verzicht auf gewisse Haushaltgeräte (vgl. S. 66).

Ansätze zur Effizienzsteigerung

Im Jahr 2017 wurden in der Schweiz 850 000 TJ Energie konsumiert. Haushalte und Dienstleistungen generieren zusammen 44 Prozent dieses Gesamtenergieverbrauchs, insbesondere zum Betrieb der Gebäude, gefolgt vom Verkehr mit 36 Prozent (vgl. Abb. 4).

Möglichkeiten, die Energieeffizienz von Gebäuden in Bezug auf Wärme und Kälte zu steigern, bieten sich vor allem im Bereich der Gebäudehülle (Dach, Wände und Fenster). Die Isolation, die Tageslichtnutzung und die Beschattung spielen eine zentrale Rolle. Bei Leuchten, Haushalts- und Bürogeräten und Personenwagen haben sich im letzten Jahrzehnt Energielabel durchgesetzt, die eine zuverlässige Entscheidungshilfe für Konsumentinnen und Konsumenten zur Wahl energieeffizienter Produkte bilden.

Energieeffizienz und Wirkungsgrad

Die Energieeffizienz bezieht sich in der Regel auf einen Prozess einer technischen Anlage oder eines Gerätes und entspricht dem Verhältnis zwischen der zugeführten Energie und der Nutzenergie. Sie ist damit eng verknüpft mit dem Wirkungsgrad, der das Verhältnis zwischen der eingespeisten Leistung und der Nutzleistung erfasst. Eine traditionelle Glühlampe beispielsweise wandelt lediglich rund 5 Prozent des verbrauchten Stroms in Licht um. Den allergrössten Teil – rund 95 Prozent – gibt sie als Wärmestrahlung an

die Umgebung ab. Erreicht die Glühlampe somit einen Wirkungsgrad von 5 Prozent, beträgt jener einer LED-Leuchtquelle etwa 30 bis 40 Prozent. Bei Leuchten ist jedoch die Lichtausbeute (Lumen/Watt) und damit die Effizienz die geeignetere Vergleichsgrösse. Sie beträgt bei einer Glühlampe etwa 10 bis 20 lm/W. Eine moderne LED-Lichtquelle hat dagegen eine Lichtausbeute von etwa 80 bis 180 lm/W und ist demnach rund acht- bis zehnmal effizienter.

Bei industriellen Prozessen wird Energie am häufigsten in Form mechanischer Energie oder Wärme/Kälte benötigt. Die Energieeffizienz lässt sich hier mittels energiesparender Prozesse steigern – beispielsweise durch kontinuierliche Produktion anstelle von Chargenfertigung – oder durch die Rückgewinnung von Prozessabwärme. Beide Ansätze beinhalten ein hohes Potenzial, erfordern jedoch oft eine Umstellung bewährter Produktionsprozesse und hohe Investitionen.

Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz im Verkehr bestehen auf der Verhaltensebene, im organisatorischen und im technischen Bereich. Das grösste öffnet sich beim Mobilitätsverhalten, in erster Linie durch den Umstieg vom Individual- auf den öffentlichen Verkehr, den Erwerb energiesparender Fahrzeuge, die Erhöhung der Fahrzeugbelegung oder durch Carsharing³. Im technischen Bereich gilt es vor allem, das Gewicht der Fahrzeu-

ge zu reduzieren, energieeffiziente Antriebe einzusetzen sowie Bewegungsenergie zurückzugewinnen und zu speichern. Diese technischen Potenziale können die Fahrzeugnutzenden bei ihren Kaufentscheidungen realisieren, sofern die Fahrzeughersteller diese Potenziale in absehbarer Zeit anbieten.

Harzende Sanierungsrate gefährdet Zielerreichung im Gebäudebereich

Angesichts der Bedeutung hinsichtlich des Endenergieverbrauchs und der real vorhandenen Handlungsmöglichkeiten sind Massnahmen, um die Energieeffizienz zu steigern, kurz- und mittelfristig vor allem im Bereich der Gebäude umzusetzen. In Übereinstimmung mit der Energiestrategie 2050, wonach der Endenergieverbrauch der Gebäude zwischen 2010 und 2050 halbiert werden soll, bilden Gebäude und Siedlungen deshalb

³ Synthese zum Themenschwerpunkt «Mobilitätsverhalten» des NFP «Energie», SNF

- Übrige – 9550 TJ (inkl. Landwirtschaft)
- Haushalte – 235 820 TJ
- Industrie – 157 080 TJ
- Dienstleistungen – 139 230 TJ
- Verkehr – 308 110 TJ

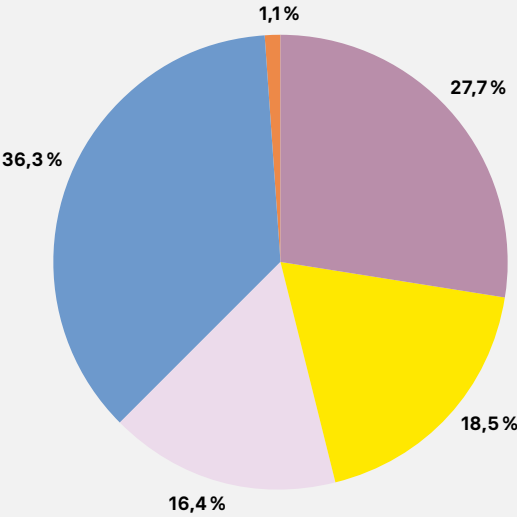


Abbildung 4
Endenergieverbrauch der Schweiz im Jahr 2017 (BFE 2018)



einen Schwerpunkt des NFP «Energie».⁴ Infolge der Klimaerwärmung wird der Energieaufwand für Lüftung und Klimatisierung der Gebäude noch zu nehmen. Entsprechend stark soll jener für die Heizung gesenkt werden. Neubauten stellen hinsichtlich der Energieeffizienz und der Reduktion des CO₂-Ausstosses heute kein Problem mehr dar. Mit vertretbaren Mehrkosten lässt sich bei neuen Gebäuden der Energiebedarf substantiell reduzieren und der verbleibende Strom- und Wärmebedarf für den Betrieb zu einem grossen Teil selbst und ohne CO₂-Emissionen produzieren. Was bei Neubauten «state of the art» ist, wird bei Altbauten nur zögerlich realisiert. Wie das Projekt «Determinanten von Investitionen in Energieeffizienz» feststellt, beträgt die allgemeine Sanierungsrate bei Wohn- und Bürobauten lediglich rund 1,5 Prozent pro Jahr (Ott et al. 2013).⁵ Im Gebäudebereich ist deshalb die rechtzeitige Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 stark gefährdet. Bei Altbauten, die vor der Jahrtausendwende erstellt wurden, besteht entsprechend grosser Handlungsbedarf.

Massnahmen zur Effizienzsteigerung im Gebäudebereich

Soll die Energieeffizienz des Gebäudeparks erhöht werden, braucht es vor allem Massnahmen in zwei Bereichen: bei der energieoptimierten Gebäudehülle und bei der intelligenten Steuerung von Energieangebot und -nachfrage.

Mit einer konsequenten Dämmung der Gebäudehülle (Dach, Fassade und Decke über unbeheiztem Untergeschoss) und mit Fenstern mit einem niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten lässt sich der Wärme- und Kältebedarf insbesondere bei Neubauten erheblich reduzieren. Damit solche Massnahmen auch wirklich umgesetzt werden, braucht es verbindliche Zielwerte. Dank entsprechender herausfordernder Zielwerte konnte der Wärmebedarf bei Neubauten in den letzten 40 Jahren auf einen Sechstel reduziert werden (vgl. Abb. 5). Erhebliche Potenziale zur Effizienzsteigerung

eröffnen sich bei der Verglasung, insbesondere bei Bürobauten. Aktuelle Entwicklungen im Swiss Competence Center for Energy Research – Future Energy Efficient Buildings & Districts (SCCER FEEB & D)⁶ ermöglichen dynamische Verglasungen, die den Lichteinfall in Abhängigkeit vom Sonnenstand automatisch steuern und gleichzeitig die Wärmeeinstrahlung und damit auch den Kühlungsbedarf reduzieren. Andere innovative Verglasungen zielen auf die Belüftung der Zwischenräume der Glasschichten, um die eingebrachte Strahlungswärme abzuführen. Sofern die Erstellungskosten noch substantiell gesenkt werden können, weisen diese Technologien ein erhebliches Effizienzsteigerungspotenzial auf. Die künstliche Beleuchtung von Arbeitsplätzen soll sich künftig danach richten, welche Lichtintensität erforderlich ist. Die dazu notwendige Lichtsteuerung erfolgt automatisch mittels Sensoren, die mit einer Anwesenheitsüberwachung und der Fensterbeschattungsanlage verbunden sind.

Mit einer im Projekt «Nachfrage und Speicherung in Stromnetzen» entwickelten Methode lässt sich der Energieverbrauch von Gebäuden und den mit ihnen verbundenen Geräte so verwalten, dass Energie in einem breiten zeitlichen Spektrum – also kurz- bis langfristig – gespeichert werden kann.⁷ Dies ermöglicht, die laufenden Energiekosten – ohne Komforteinbusse für die Gebäudenutzenden – um rund einen Viertel zu senken und den Bedarf nach dezentralen Batterien deutlich zu reduzieren.

Im Projekt «Regulierung im Gebäudebereich» wurden Methoden entwickelt, die die Energieeffizienz, die CO₂-Reduktion und die Gewinnung erneuerbarer Energien in einer Gesamtsicht am einzelnen Gebäude oder in ganzen Siedlungen maximieren. Dies setzt eine umfassende Berücksichtigung aller bauphysikalischen und technischen Aspekte voraus, auf die die Energievorschriften einwirken.⁸ Die Kantone sind gefordert, diese Aspekte im Zusammenhang mit den aktuellen Mustervorschriften (MuKE n) zu implementieren.

⁴ Synthese zum Themenschwerpunkt «Gebäude und Siedlungen» des NFP «Energie», SNF
⁵ [Determinanten von Investitionen in Energieeffizienz]

⁶ www.sccer-fee bd.ch
⁷ [Nachfrage und Speicherung in Stromnetzen]
⁸ [Regulierung im Gebäudebereich]

KONTAKT
Dr. Bruno Michel
IBM Research GmbH
www.nfp-energie.ch/de/projects/umbrella/104/

PROJEKT #Kälte/Wärme #Wärmepumpe #Gebäude

«Wärmenutzung durch Sorptionstechnologie»

Thermisch betriebene Adsorptionswärmepumpen verwenden anstelle eines flüssigen einen festen, sehr porösen Wärmetauscher mit Wasser oder Methanol als Kältemittel. Als Antriebsenergie dient (Ab-)Wärme. Die heutigen Adsorptionswärmepumpen sind in der Anschaffung zu teuer und daher gegenüber herkömmlichen Wärmepumpen nicht konkurrenzfähig. Dem Forschungsteam ist es gelungen, die Technologie massiv zu verbessern, sodass diese Systeme billiger und effizienter werden. Mit diesen neuen Adsorptionswärmepumpen kann in Zukunft die Abwärme von Industrieanlagen oder Photovoltaikanlagen genutzt werden, um Büro- und Wohngebäude kostengünstig und emissionsfrei zu heizen oder Rechenzentren

mit ihrer eigenen Abwärme zu kühlen. Das Forschungsteam analysierte Einsatzmöglichkeiten und Marktbedingungen von Adsorptionswärmepumpen in der Schweiz und entwickelte System- und Materialtechnologien, unter anderem Verfahren zur Herstellung von Hochleistungs-Adsorptionsschichten in Wärmetauschern. **Das Projekt hat zudem das technische, ökologische und wirtschaftliche Potenzial von Adsorptionswärmepumpen verdeutlicht.** Demnach könnte diese Technologie die Kapazität und Energieeffizienz von Wärmenetzen erhöhen. Bei Gebäudeheizungen und Kühlanlagen liessen sich Betriebskosten und Emissionen reduzieren.

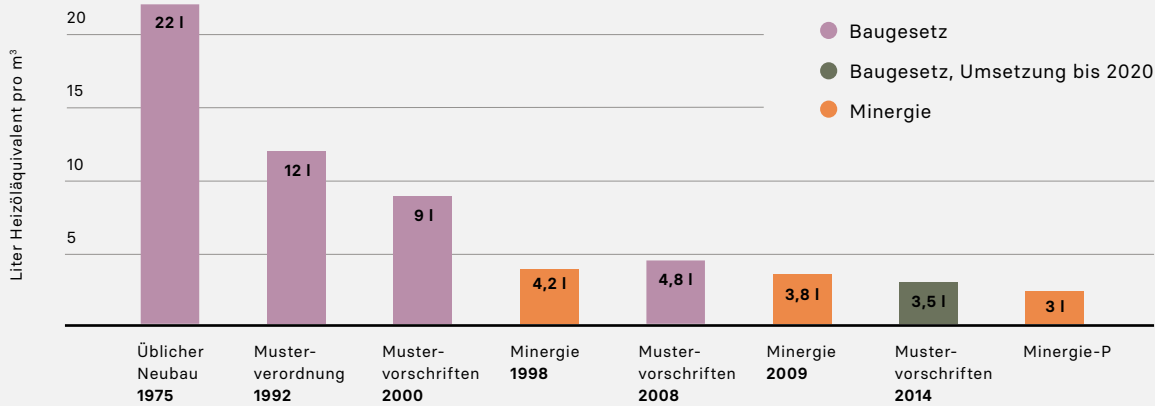


Abbildung 5
Entwicklung der Vorschriften und Standards für den Wärmebedarf von Neubauten (Heizung und Warmwasser) in den letzten 40 Jahren (Cieslik & Knüsel 2018)

Nicht ausgeschöpfte Effizienzpotenziale in Betrieben

Mit der Energiestrategie 2050 sehen sich die Betriebe mit grossen Herausforderungen konfrontiert (vgl. Kap. 2.2). Energieintensive Betriebe⁹ in der Schweiz haben ihren Energiebezug seit 1990 um bis einen Drittel reduziert¹⁰, primär um ihre Marktstellung zu verbessern. Trotzdem bestehen noch substanzielle Einsparpotenziale – je nach Branche beim Strom von bis 15 Prozent (Zement) und bei den Brennstoffen von bis 60 Prozent (Nahrungsmittel), wie eine SCCER-EIP-Studie ermittelte (Wallerand et al. 2018). Einsparungen liessen sich vor allem in den Branchen «Nahrungsmittel», «Zellstoff und Papier» und «Chemie» durch konsequente Wärmerückgewinnung und

durch den Einsatz von Wärmepumpen und ORC-Prozessen (Organic Rankine Cycles) realisieren.

Potenziale für die Steigerung der Energieeffizienz eröffnen sich Unternehmen zudem nicht nur bei ihren betrieblichen Prozessen, sondern auch bei ihren Betriebsliegenschaften.

Energiemanagement: Schlüssel zum Erfolg

Im Projekt «Determinanten von Investitionen in Energieeffizienz» wurden gut 300 Schweizer Betriebe zu den Themen «Energiemanagement» und «Energiesparende Investitionen» befragt.¹¹ Dabei zeigte sich: Grosse Unternehmen, insbesondere solche mit hoher Energieintensität und globaler Ausrichtung, betreiben in der Regel ein professionelles Energiemanagement, haben einen qualifizierten Energiemanager eingesetzt

und Einsparziele formuliert. Zudem verfügen sie über entsprechende Budgets. Ein derart stringentes Energiemanagement führt unmittelbar zu substanziellen Energieeinsparungen. Für kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) ist der Energiebezug zwar ebenfalls ein wichtiges Thema, das jedoch meist nur in Zusammenhang mit anderen betrieblichen Investitionen angegangen wird. Bei den meisten Unternehmen besteht Handlungsbedarf beim systematischen Monitoring und bei der Erfolgskontrolle getätigter Energiesparmassnahmen.

Mit Bezug auf ein stringentes Energiemanagement und die Umsetzung von Energiesparmassnahmen kommt der Unterstützung durch das Topmanagement grösste Bedeutung zu (Iten et. al. 2017). Die Energiethematik in Betrieben muss deshalb auf der obersten Managementebene angesiedelt und mit der entsprechenden Management-Attention behandelt werden. In anderen Ländern sind auch regulatorische Massnahmen in Kraft. So haben in den Niederlanden alle Unternehmen einen Energiesparplan zu erarbeiten.

Effizienzpotenziale bei Energieversorgern und der urbanen Logistik

Potenziale zur Effizienzsteigerung bestehen nicht allein bei den Energiekonsumentinnen und -konsumenten, sondern beispielsweise auch bei der Energiebereitstellung und -übertragung oder im Bereich der Logistik.

Bei Wasserkraftwerken etwa führen Sedimente zu Abrasion der hydraulischen Anlagen. Ungenügende Entsandungsanlagen verursachen in der Schweiz bei Mitteldruck- und Hochdruckkraftwerken einen jährlichen Produktionsausfall von geschätzten 160 GWh. Das Projekt «Sedimentierung in Stauanlagen» hat aufgezeigt, dass sich mit Verbesserungen dieser Anlagen die Sedimentbelastung begrenzen lässt.¹²

Gemäss Schätzungen des Projekts «Intelligente urbane Logistik» könnte eine intelligente städtische Frachtlogistik, die sämtliche Transport-, Umschlag- und Lagerprozesse im Zusammenhang mit Waren, Paketen und Kurierdiensten umfasst, bis 2050 rund 7 Prozent zum Erreichen der energiepolitischen Ziele und 9 Prozent zu den klimapolitischen Zielen der Schweiz beitragen.¹³ Notwendig wären dazu koordinierte Massnahmen seitens der Logistikunternehmen, insbesondere auch der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen, aber auch der Städte und der Kantone im Bereich der «Raumplanung» und der «Verkehrsinfrastruktur» mit dem Ziel, die Logistikinfrastruktur zu optimieren.

3.2 Erneuerbare Energieträger

Die Energiestrategie 2050 setzt stark auf den Ausbau der erneuerbaren Energien, um den Ausstieg aus der Kernenergie und den fossilen Energieträgern zu ermöglichen. Bis 2020 sollen diese Ressourcen, exklusive Wasserkraft, mindestens 4400 GWh und bis 2035 mindestens 11400 GWh erzeugen.^{14/15}

Optimierungs- und Ausbaumöglichkeiten der Wasserkraft¹⁶

Stromerzeugung durch Wasserkraft ist kostengünstig, effizient, klima- und in vieler Hinsicht umweltfreundlich. Dank ihrer Topografie und den beträchtlichen durchschnittlichen Niederschlagsmengen bietet die Schweiz ideale Bedingungen für die Nutzung der Wasserkraft. Diese deckt heute rund 60 Prozent des schweizerischen Stromverbrauchs.

¹³ [Intelligente urbane Logistik]
¹⁴ Schweizerische Bundesverfassung (BV; SR 101): Art. 89 Abs. 2 BV
¹⁵ Energiegesetz (EnG; SR 730.0): Art. 2
¹⁶ Synthese zum Themenschwerpunkt «Wasserkraft und Markt» des NFP «Energie», SNF

⁹ Unternehmen mit Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung von mehr als 15 Prozent; vor allem aus den Branchen «Zement», «Eisen- und Stahlerzeugung», «Chemie», «Nahrungsmittel» sowie «Zellstoff und Papier»

¹⁰ www.eneff-industrie.info

¹¹ [Determinanten von Investitionen in Energieeffizienz]

¹² [Sedimentierung in Stauanlagen]

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 soll die Wasserkraft einen Beitrag leisten, den Strom aus Kernkraftwerken zu ersetzen.

Die Möglichkeiten zum Ausbau der Wasserkraft sind in der Schweiz jedoch begrenzt. Entsprechend steht die optimierte Nutzung der bestehenden Wasserkraftwerke im Vordergrund. Hydrometeorologische Vorhersagen über die Zeitskala der Wettervorhersage hinaus – über mehr als zwei bis zu vier Wochen – können dazu beitragen. Prognosen für den Zu- und Abfluss von Wasser lassen sich nämlich mit den zu erwartenden Preisentwicklungen am Energiemarkt kombinieren. Diese Kombination erlaubt, den Betrieb und die Wirtschaftlichkeit von Speicherkraftwerken zusätzlich zu optimieren. Der Einbezug dieser hydrometeorologischen Vorhersagen in die Betriebsplanung von Kraftwerken ermöglicht eine Produktionssteigerung von 4 bis 6 Prozent pro Jahr.¹⁷

Der Rückzug der Gletscher gibt in alpinen Gebieten neue Gebiete frei, die sich als Speicherstandorte eignen und damit neue Nutzungsmöglichkeiten für die Wasserkraft bieten könnten. Erste neue Glazialstauseen bilden sich schon heute. Um das bis 2035 erwartete Stromdefizit von 1,1 TWh/a zu decken, würden mindestens sieben neue Wasserkraftwerke in gletschernahen Regionen benötigt.¹⁸ Solche könnten – als positiver Nebeneffekt – die Winterstromproduktion mit einer Speicherkapazität von rund 1,3 TWh unterstützen. Die meisten infrage kommenden Standorte liegen jedoch in Gebieten, die einem Schutzstatus unterliegen.

Ökologisch stellen sich rund um die Wasserkraft weitere Herausforderungen. Infolge noch ausstehender Restwassersanierungen sind Produktionseinbussen zu erwarten. Im Projekt «Nachhaltiges Auenmanagement und Wasserkraft» zeigt sich zudem, dass die Umsetzung der Restwasserbestimmungen nicht ausreichend ist, um die Biodiversität unterhalb von Staumauern und Wasserfassungen zu erhalten (vgl. S. 43).¹⁹

17 [Hydrometeorologische Vorhersage]
18 [Periglazialzonen und Wasserkraft]
19 [Nachhaltiges Auenmanagement und Wasserkraft]

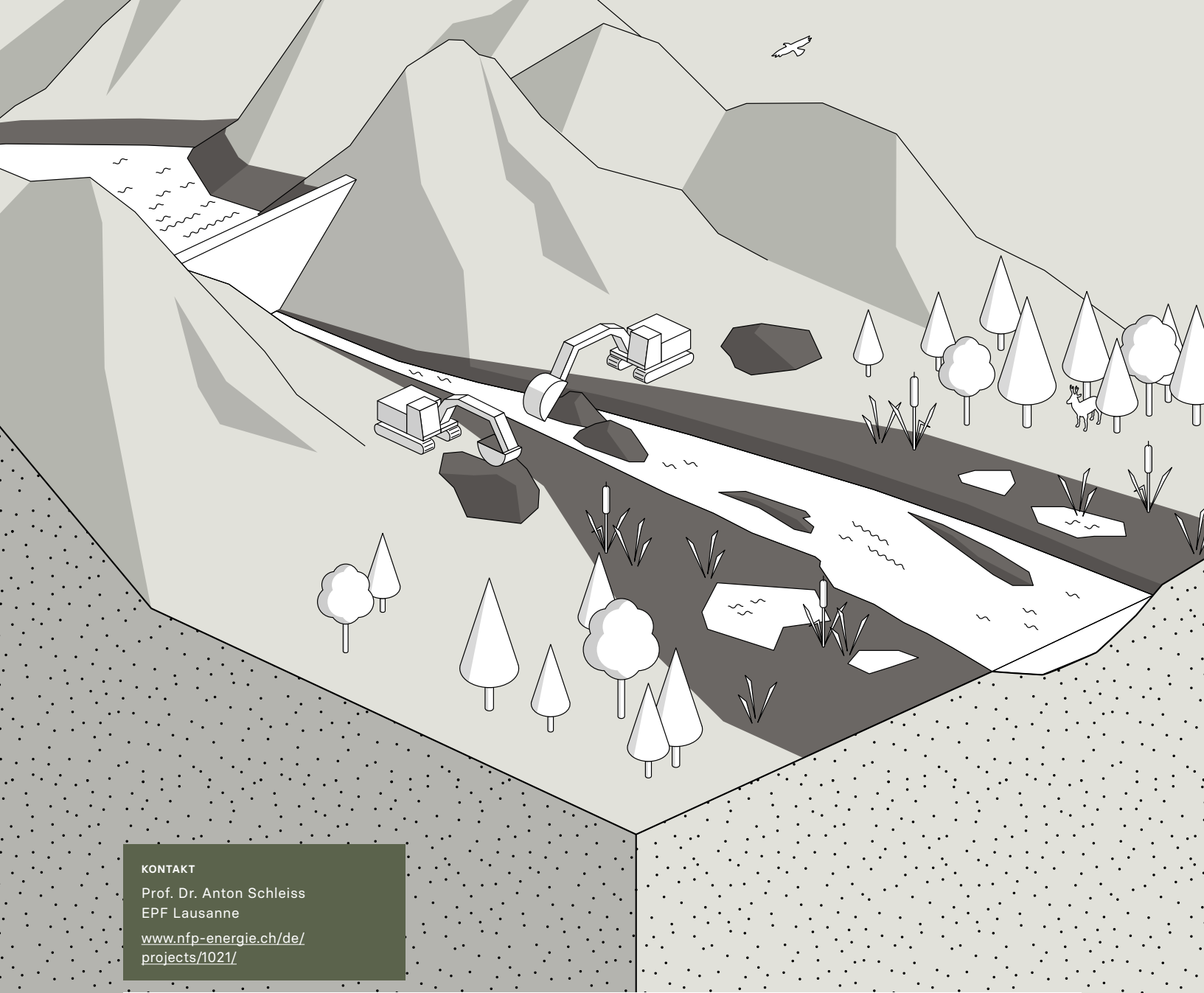
Technologische und gestalterische Fortschritte bei der Solarenergie

Sonnenstrahlung oder eben Solarenergie lässt sich direkt in Wärme oder elektrische Energie umwandeln. Zur Nutzung als Wärmeenergie wird Solarenergie von Sonnenkollektoren absorbiert. Ein Speichermedium wird mit dieser Energie erwärmt und stellt diese Wärme über einen Wärmetauscher zur Aufbereitung von Warmwasser oder zum Heizen zur Verfügung.

Photovoltaikanlagen (PV) und Solarwärmekraftwerke sind die beiden Konzepte, die sich für die Umwandlung von Solarenergie in elektrische Energie anbieten. Photovoltaikanlagen bestehen aus Solarzellen, die aus Halbleiterschichten aufgebaut sind und beim Auftreffen von Photonen einen Gleichstrom erzeugen. Ein Wechselrichter wandelt diesen in Wechselstrom um. In Solarwärmekraftwerken wird die Wärmeenergie über Kollektoren absorbiert. Mittels eines Wärmetauschers wird diese genutzt, um Dampf zu erzeugen und einen konventionellen Generator zu betreiben. Das NFP «Energie» leistete im Rahmen des Verbundprojekts «Photovoltaik der nächsten Generation» wichtige Beiträge zur Weiterentwicklung von Solarzellen, insbesondere zum Einsatz neuer Materialien und damit zur Steigerung des Wirkungsgrads der Zellen (vgl. S. 45 und S. 64).²⁰

Im Jahr 2017 wurden in der Schweiz rund 700 GWh Wärmeenergie aus Sonnenkollektoren gewonnen (Eicher & Pauli 2018). Tragender Bestandteil der Energiestrategie 2050 ist aber die Photovoltaik. Ende 2017 erreichte deren installierte Leistung 1906 MW, die Jahresproduktion betrug 1683 GWh (BFE 2018a). Der Zubau der installierten Leistung war zwischen 2005 und 2013 stark angewachsen, stagnierte danach und nahm sogar etwas ab.²¹ Es wird jedoch damit gerechnet, dass der Zubau wieder wachsen wird. Nebst Anlagen auf Dächern

20 [Photovoltaik der nächsten Generation]
21 www.swissolar.ch



KONTAKT
Prof. Dr. Anton Schleiss
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/de/projects/1021/

PROJEKT #Wasserkraft #Landschaft #Ökologie/Umwelt

«Nachhaltiges Auenmanagement und Wasserkraft»

In Flussabschnitten unterhalb von Staumauern und -dämmen fliesst – wie vom Gesetz verlangt – kontinuierlich Wasser in kleinen Mengen, sogenanntes Restwasser. Es fehlen aber die natürlichen Hochwasser. Im Flussbett setzen sich deshalb Algen fest und es kommt zu einer Abpflasterung der Sohle. Die Gewässer verarmen und es kommt Wald auf. Die Mauern und Dämme unterbrechen zudem den Transport von Kies und Sand. In einem Experiment untersuchte das Forschungsteam in der Saane flussabwärts der Staumauer Rossens FR, wie sich ein künstlich erzeugtes Hochwas-

ser auf die Lebensgemeinschaften im Unterlauf auswirkt. Die Flut spülte die überwuchernde Vegetation von den Kiesbänken und brachte Wasser in zuvor trockengelegte Seitengerinne. Damit wirkte sich das künstlich erzeugte Hochwasser positiv auf die Auenlandschaft auf. Der Eintrag von Geröll mit künstlichen Depots in der Saane spielte dabei eine wesentliche Rolle. **Für einen langfristigen Nutzen für die Ökologie der Auenlandschaft ist es notwendig, regelmässig Hochwasser mit Geschiebeschüttungen auszulösen.**

bietet sich auch ein Potenzial an gebäudeintegrierten PV-Anlagen – also Solarzellen als Fassadenteile oder Dachziegel, die bisher ein Nischendasein fristeten. Das Projekt «Beschleunigung der Anwendung von PV» identifizierte in der Stadt Neuenburg bei 45 Prozent der Baubewilligungen ein gutes Potenzial für die Realisation gebäudeintegrierter PV-Anlagen. Fehlendes Wissen, geringer gesellschaftlicher Druck und hohe Kosten erweisen sich dabei als Hindernisse (vgl. S. 22).²² Wie die Ergebnisse des Projekts «Energiewälder» zeigen, geniessen Photovoltaikanlagen im Siedlungsgebiet jedoch hohe Akzeptanz.²³

Windenergie mit Akzeptanzproblemen

Windenergieanlagen nutzen für die Stromerzeugung die kinetische Energie des Windes. Vorherrschend im Einsatz sind Windkraftanlagen mit horizontaler Achse und drei Rotorblättern. Mit der Winkelstellung der Rotorblätter kann die produzierte Leistung beeinflusst werden. Die Turbine treibt einen Generator an, der die mechanische Rotationsenergie in elektrische Energie umwandelt. 2017 wurden in der Schweiz mittels Windenergieanlagen mit einer Kapazität von 75 MW rund 132 GWh elektrische Energie produziert (BFE 2018a).

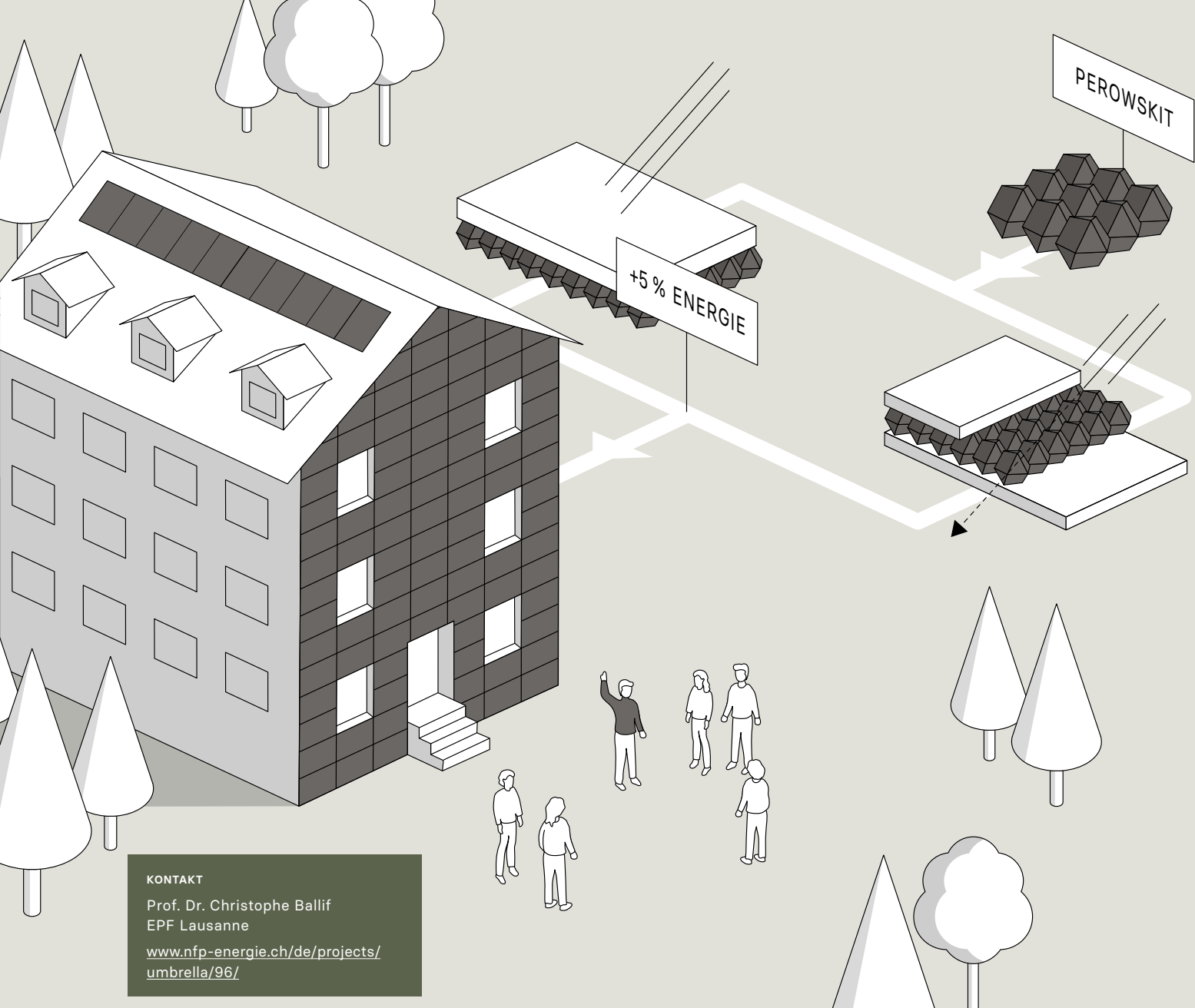
Die Realisierung von Windenergieanlagen, insbesondere grösserer Windparks, hat allerdings eine grosse Zahl von Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, beispielsweise den Lärmschutz oder Konflikte mit Vogelzuggebieten. Das «Konzept Windenergie» des Bundes (ARE 2017) definiert unter anderem die wichtigsten Bundesinteressen, die bei der Planung zu berücksichtigen sind. Windenergieanlagen haben aber auch in anderer Hinsicht mit erheblichen Akzeptanzproblemen zu kämpfen. So werden diese Anlagen umso weniger akzeptiert, je mehr Windturbinen in einer Landschaft sichtbar sind.²³ In Kombination mit Photovoltaikanlagen fällt die Beurteilung etwas besser aus, in Kombination mit Hochspannungsfreileitungen etwas schlechter. Festzustellen ist eine Abhängig-

keit vom Landschaftstyp. So sind Windenergieanlagen in bereits vorbelasteten Gebieten, etwa im siedlungsgeprägten Mittelland oder in Gebieten mit bestehender Tourismusinfrastruktur, besser akzeptiert als in anderen Landschaften. Auch im landwirtschaftlich geprägten Flachland werden wenige Windanlagen, kombiniert mit Photovoltaikanlagen, auf Gebäuden insgesamt nur mässig bevorzugt, doch im Vergleich zu anderen Landschaften wie Jura, Voralpen und Berggebiete relativ gut bewertet. Die Landschaftsräume, in denen erneuerbare Energien bevorzugt werden, sind vielerorts nicht deckungsgleich mit den vom Bund ermittelten Windpotenzialgebieten. Letztere berücksichtigen Gebiete mit hohen Windenergieerträgen, die wichtigsten Bundesinteressen und eine ausreichende räumliche Konzentration der Anlagen.

Neue Perspektiven für die Tiefengeothermie

Geothermie nutzt die Wärme der Erdkruste zur Heizung von Gebäuden via Wärmepumpen oder zur Stromproduktion mittels Dampfturbinen und Generatoren. Dazu wird eine Flüssigkeit im Untergrund erwärmt. Die dadurch gewonnene Wärme wird in einem Wärmetauscher oder einer Wärmepumpe an eine andere Flüssigkeit abgegeben und kann so für die Gebäudeheizung genutzt werden. Bereits ab wenigen Metern unter der Erdoberfläche lässt sich mit Erdkollektoren die Erdwärme zum Heizen nutzen. Erdsonden zur Bereitstellung von Wärme oder Kälte kommen ab einer Bohrtiefe von rund 50 Metern zum Einsatz. Analog lässt sich Wärme auch aus anderen Umweltmedien nutzen, etwa aus der Luft, aus dem Grundwasser oder aus Seen. Erdwärme mittels Wärmepumpen zu Heizzwecken zu nutzen, ist in der Schweiz stark verbreitet. Rund 15 Prozent der Gebäudeheizungen werden von Geothermie-Wärmepumpen gespeist (EnergieSchweiz & BFE 2018a).

Bei einem Geothermiekraftwerk treibt der entstehende Dampf eine Turbine an. Dies bedingt, dass die Temperatur im Wärmekreislauf mindestens 100 Grad erreicht, was in der Schweiz meist erst ab ein paar Tausend Metern Tiefe gegeben ist (EnergieSchweiz & BFE 2017). Aufgrund des Erdbebenrisikos durch Tiefenbohrung ist in der



KONTAKT
Prof. Dr. Christophe Ballif
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/de/projects/umbrella/96/

PROJEKT #Photovoltaik #Gebäude #Akzeptanz

«Photovoltaik der nächsten Generation»

Zu den bisher bekannten Photovoltaiktechnologien auf Basis von kristallinem Silizium und Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) gibt es Alternativen, die die Solarenergiephotonen effizienter umwandeln. Eine höhere Stromausbeute kann beispielsweise erzielt werden mit Tandemzellen, bei denen unterschiedlich aufgebaute Zellen kombiniert werden. **Das Forschungsteam entwickelte voll funktionsfähige Systeme für neuartige Tandemzellen, die kristalline Siliziumzellen mit Perowskitzellen (vgl. S. 64) kombinieren.** Diese können mit zusätzlichen Schichten versehen werden, die beispielsweise ein optimales Lichtma-

nagement ermöglichen. Insgesamt können damit Wirkungsgrade von 27 bis 30 Prozent erzielt werden – mehr als 5 Prozentpunkte mehr als konventionelle Zellen erreichen. Obwohl noch zahlreiche Hürden zu überwinden sind, verfügen diese Solarzellen über ein grosses industrielles und energetisches Potenzial. Werden in der Schweiz ideal ausgerichtete Dächer und Fassaden damit ausgerüstet, könnten sie das heutige Basispotenzial auf Gebäuden von 67 TWh Strom dank des besseren Wirkungsgrades um 13 bis 14 TWh erhöhen.

²² [Beschleunigung der Anwendung von PV]

²³ [Energiewälder]

Schweiz bisher kein Geothermiekraftwerk in Betrieb genommen worden. Der Mangel an Techniken, die seismischen Konsequenzen zu kontrollieren, bleibt eine der Haupthürden für die geothermische Stromproduktion in der Schweiz. Angemessenes Risikomanagement und datenbasierte Echtzeitstrategien können das technische Risiko reduzieren, seismische Vorgänge zu provozieren. Die Schäden durch sogenannte Mikrobeben, wie sie aufgrund von Wasserinjektionen tief im Gestein ausgelöst werden können, waren bisher kaum abschätzbar. Neu entwickelte Methoden des Projekts «Risikomanagement für Geothermie und Wasserkraft» tragen dazu bei, mögliche Schäden durch Mikrobeben abzuschätzen. Dadurch entsteht ein präziseres Bild des Gesamtrisikos an Geothermie- und Wasserkraftstandorten, sodass das Risiko-Kosten-Nutzen-Verhältnis fundierter beurteilt werden kann. Kommunikationsmittel helfen zudem, die Wünsche und Befürchtungen der Öffentlichkeit besser zu verstehen und somit die soziale Komponente zu adressieren.²⁴

Neue Perspektiven eröffnen Erkenntnisse aus dem Projekt «Tiefengeothermie» am Grimselpass: Tektonische Bruchzonen in den Zentralalpen und im Gebiet des Rhonetals könnten vielversprechende Quellen für Hochtemperaturgeothermie und damit für die Strom- oder Wärmeherzeugung darstellen (vgl. S. 75).²⁵

Fortschritte bei Erzeugung und Einsatz von Wasserstoff

Wasserstoff (H₂) steht zwar nicht direkt als Energiequelle zur Verfügung. Mittels Power-to-Gas-Technologie (vgl. S. 53) unter Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt, eröffnet er Chancen für zahlreiche Anwendungen, insbesondere in Brennstoffzellen und damit auch für den Antrieb von Elektrofahrzeugen. Wie nachhaltig ein derartiger Antrieb gestaltet werden kann, ist elementar von den verwendeten Ressourcen bei der H₂-Erzeugung abhängig. Sofern die eingesetzte elektrische Energie tatsächlich aus erneuerbaren

Ressourcen stammt, können bei einer Produktion via Elektrolyse die Treibhausgasemissionen im Gesamtzyklus deutlich reduziert werden.²⁶ Materialcharakterisierung in dreidimensionalen Modellen und mathematische Modellierungen des Projekts «PEM-Brennstoffzellen» erlauben, den Umwandlungsprozess von H₂ in Brennstoffzellen besser zu analysieren und diese effizienter zu gestalten. PEM-Brennstoffzellen zeichnen sich aus durch ein günstiges Verhältnis zwischen dem thermischen und dem elektrischen Wirkungsgrad sowie eine schnellere Umwandlungsdynamik. Das Projekt «Technologie dezentraler Energiesysteme» zeigte, dass sich sogenannte PEM-Brennstoffzellen für den Einsatz bei privaten Wärme-Kraft-Kopplungssystemen am besten eignen.²⁷

Bisher ist die Wasserstoffherstellung allerdings noch sehr kostspielig. Für einen verbreiteten Einsatz braucht es Technologien, um H₂ effizienter und kostengünstiger herzustellen. Der aktuelle Stand der Technik, die Generierung mittels Halbleitermaterialien aus Sonnenlicht und Wasser, ist für grosse Anlagen und Produktionsmengen noch nicht geeignet. Der Einsatz neuer Materialien im Projekt «Photokatalytische Wasserspaltung» ermöglicht jedoch eine Steigerung des Wirkungsgrades.²⁸

Nutzungspotenziale bei Holz und Abfall

Aus vergorener Biomasse (organisches Material wie Ernteabfälle, Mist, Kompost usw.) gewonnenes Biogas lässt sich zur Bereitstellung von Wärme und Strom nutzen. Auch Holz zählt zur Kategorie «Biomasse». Ebenso dienen die organischen Anteile des Abfalls (z. B. Kompost, Holz usw.) als erneuerbare Energiequellen (VSE 2018).

Holz wird zum grössten Teil verbrannt. Die entstehende Wärme kann direkt für die Heizung von Gebäuden eingesetzt werden. Kraftwerke, die Biogas verwerten, und Kehrlichtverbrennungsanlagen werden hingegen als kombinierte Wärme-

²⁶ [Nachhaltigkeit der Methanisierung]

²⁷ [Technologie dezentraler Energiesysteme]

²⁸ [Photokatalytische Wasserspaltung]



PROJEKT #Recycling #Industrie #Politik (Bund, Kanton, Gemeinde)

«Abfallmanagement als Beitrag zur Energiewende»

Im Abfall steckt sowohl direkt als auch indirekt viel Energie. So werden in der Schweiz pro Jahr Siedlungsabfälle mit einem Energiegehalt von rund 30 PJ verbrannt. Der direkte Beitrag der Abfallverbrennung an die Schweizer Stromproduktion liegt bei 3 Prozent. Der Beitrag an die Wärmeversorgung von Haushalten und Industrie kann über das Fernwärme- oder Dampfnetz einer Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) lokal weit über 80 Prozent liegen. Mithilfe von Szenarien zeigte das Forschungsteam: **Das grösste Potenzial der Abfallwirtschaft liegt aber meist darin, beim Recycling sekundäre Rohstoffe zurückzugewinnen und so indirekt die energieintensive**

Produktion primärer Rohstoffe zu vermeiden. Die Energieeinsparungen sind jedoch erheblich von der Qualität des gesammelten Materials abhängig. Zudem erweist sich die thermische Verwertung bei einer Vollkostenrechnung in der Regel als wirtschaftlich interessanter. Möglichkeiten, die Energieeffizienz zu steigern, sieht das Forschungsteam auch bei den KVA. Diesen fehlen zudem zum Teil die Energieabnehmer in der Nähe, die die Wärme optimal nutzen könnten. Energieeffizienter arbeiten kann die Abfallwirtschaft zudem, wenn sie sich vermehrt entlang der Wertschöpfungsketten organisiert und die Zusammenarbeit der föderalistisch organisierten Akteure stärkt.

und Stromproduktionsanlagen betrieben. 2017 lieferte die energetische Verwertung von Biomasse (inkl. Holz) und Abfall rund 10 400 GWh Wärmeenergie und 1720 GWh elektrische Energie. Dies entspricht rund 65 Prozent der aus erneuerbaren Energien erzeugten Wärme und etwa der Hälfte der elektrischen Energie (ohne Wasserkraft) (BFE 2018a).

In den Schweizer Wäldern wächst mehr Holz, als derzeit genutzt wird. Ein Teil davon liesse sich nutzen, um beispielsweise Wohnbauten zu heizen. Mit der Verbrennung entweichen gesundheitsschädigende Schadstoffe in die Luft. Sollen Holzheizungen öfter in Siedlungen zum Einsatz kommen, müssen deshalb geeignete Feuerungstypen zum Einsatz kommen, und die Anlagen müssen optimal betrieben werden. Zwei Projekte des NFP «Energie» haben sich mit diesen Aspekten auseinandergesetzt. Sie kommen zum Schluss, dass automatisch betriebene Feuerungen eindeutig zu bevorzugen sind. Bei optimalen Betriebsbedingungen stossen sie bis zu 2400-mal weniger Schadstoffe aus als manuell betriebene. Da vor allem beim Start des Verbrennungsprozesses viele Schadstoffe entweichen, hilft eine gute Planung des Wärmebedarfs, die Feuerungen möglichst dauerhaft laufen zu lassen und so die Schadstoffemissionen tief zu halten.²⁹

Im Abfall der Schweiz steckten im Jahre 2012 insgesamt rund 35 000 GWh. Diese lassen sich wie dargelegt durch Verbrennung und die Bereitstellung von Wärme und Strom direkt nutzen oder über das Recycling und den Ersatz von Primärmaterialien Energie an anderer Stelle indirekt einsparen. Bei hohen Abfallmengen liesse sich die direkt und indirekt zurückgewonnene Energie bis 2050 mehr als verdoppeln.³⁰ Auch bei einem Rückgang der Abfallmengen um 40 Prozent könnten immer noch 10 Prozent mehr Energie zurückgewonnen werden. Eine sehr wichtige Rolle spielt zudem das Recycling, sofern dieses tatsächlich Primärmaterial ersetzt (vgl. S. 47).

²⁹ [Holzfeuerung zur Energiegewinnung in Gebäuden]
³⁰ [Abfallmanagement als Beitrag zur Energiewende]

3.3 Verteilung und Kopplung der Energieträger

Der höhere Anteil an Solar- und Windenergie im Energiesystem der Zukunft führt zu grösseren Schwankungen im Energieangebot. Zudem wird es immer mehr dezentrale Energiebereitsteller geben. Um das Energiesystem bei der notwendigen Flexibilität trotzdem stabil zu halten, bedarf es in der Verteilung Strategien, die den Austausch in räumlicher und zeitlicher Hinsicht sowie zwischen den verschiedenen Energieträgern (Konvergenz) sicherstellen. Nebst den eigentlichen Infrastrukturen (Übertragungs- und Verteilleitungen, Speicher) sind auch organisatorische Massnahmen in Form neuer Netzsteuerungs- und Lastmanagementsysteme notwendig, die die verschiedenen Lasten möglichst flexibel ausgleichen. Durch die wachsende Komplexität des Energiesystems kommt dieser Aufgabe eine enorme Bedeutung zu, die ohne umfassende Digitalisierung nicht zu bewältigen ist.³¹

Geplanter Elektrizitätsnetzausbau – Voraussetzung für Versorgungssicherheit

Um die hohen Anforderungen, denen das Elektrizitätsnetz der Zukunft ausgesetzt ist, erfüllen zu können, müssen das Übertragungsnetz und die Verteilnetze integriert geplant und betrieben werden. Die integrale Betrachtung der beiden Ebenen bietet auch vielfältige neue Möglichkeiten, etwa hinsichtlich der Flexibilität. Das Projekt «Energieinfrastrukturen der Zukunft» zeigte, dass die bereits geplanten Ausbauten des schweizerischen Übertragungsnetzes (vgl. Abb. 6) notwendig sind, um die Versorgungssicherheit – bei verschiedenen Entwicklungsszenarien – zu gewähr-

³¹ Synthese zum Themenschwerpunkt «Energienetze» des NFP «Energie», SNF

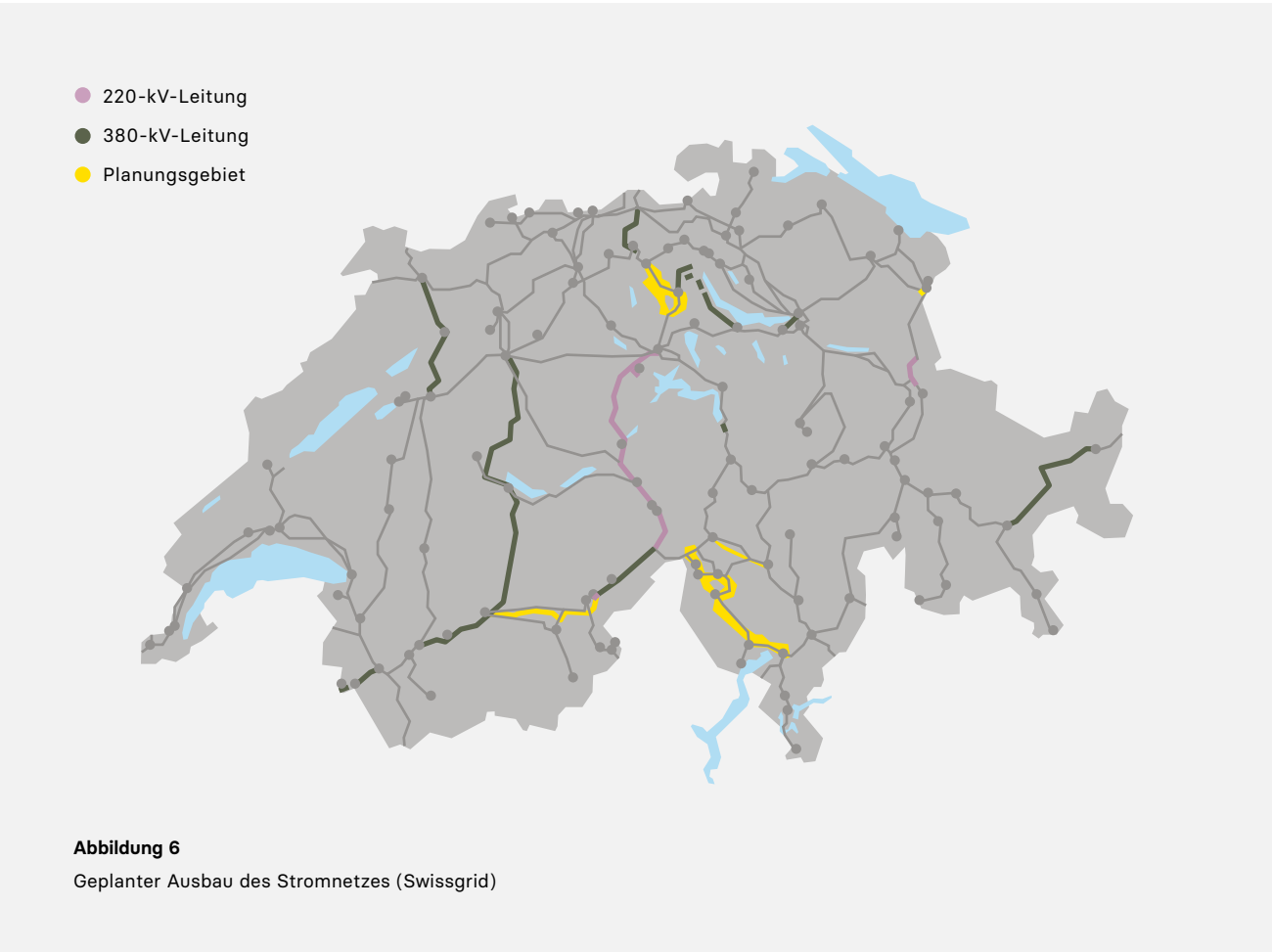


Abbildung 6
Geplanter Ausbau des Stromnetzes (Swissgrid)

leisten. Mit diesem Ausbau wird das Netz in der Lage sein, die künftigen Energieflüsse zu bewältigen. Ein darüber hinausgehender Ausbau wird hingegen nicht notwendig sein.³²

Das Projekt «Hybride Freileitungen» zeigt zudem, dass eine Kombination von Wechselstrom-(AC-) und Gleichstrom-(DC-)Leitungen in einem gemeinsamen Leitungskorridor – sogenannte hybride Freileitungen – dazu beitragen könnte, die Übertragungskapazität zu erhöhen und die Netzsicherheit zu stärken. Eine optimale Konfiguration erlaubt, die mit den Leitungen verbundenen Immissionen – das Rauschen und die Stärke der elektromagnetischen Felder – zu vermindern.³³

³² [Energieinfrastrukturen der Zukunft]
³³ [Hybride Freileitungen]

Weiterentwicklung von Speichertechnologien

Speicher spielen in der Stromversorgung der Schweiz seit langer Zeit eine zentrale Rolle, vor allem um nachts die überschüssige Bandenergie aus Kernkraftwerken aufzunehmen und tagsüber bei hohem Strombedarf wieder einzuspeisen. Das derzeitige Interesse an Speichermöglichkeiten liegt jedoch auch bei der Flexibilität, die notwendig ist, um kurzfristige und saisonale Schwankungen auszugleichen.

Die Vielfalt an Speichertechnologien ist immens. Pumpspeicher- und Wasserkraftwerke mit Stauseen sind die mit Abstand am weitesten verbreitete Stromspeichertechnologie. Sie verfügen über vergleichsweise grosse Energie- und Leistungska-

pazitäten. Ihr Ausbaupotenzial ist allerdings sehr begrenzt. Vermehrt zum Einsatz kommen Batteriespeicher. Vor allem Hausbesitzer mit Photovoltaikanlagen nutzen sie. Doch auch Energieversorger beginnen, Batteriespeicher zu installieren, etwa um Regelernergie bereitstellen zu können (EKZ 2018). Ein vielversprechendes Potenzial eröffnet sich mit Metall-Luft-Batterien, die in der Lage sind, auf gleicher Fläche bis zu 30-mal so viel Energie zu speichern wie herkömmliche Akkumulatoren (vgl. S. 59).³⁴ Allerdings ist der Weg dieser Technologie bis zur Anwendung noch lang und voller Ungewissheiten.

Das Projekt «Stromspeicherung über adiabatische Luftkompression» hat die praktische Machbarkeit der Druckluftspeichertechnologie nachgewiesen (vgl. S. 55). Dabei wird Luft mit einem Kompressor verdichtet und in einer Kaverne gespeichert. Mit der komprimierten Luft wird zu einem späteren Zeitpunkt wieder Strom erzeugt.³⁵

Weitere Speichertechnologien sind Schwungradspeicher und Kondensatoren, die in der Schweiz jedoch weniger Aufmerksamkeit erhalten. Als Speicherstrategie der Zukunft von besonderer Bedeutung ist die Kopplung der verschiedenen Energieträger («Power-to-X»-Speicher, vgl. S. 52). Mit der zunehmenden Vernetzung des Energiesystems gewinnt auch die optimale Kombination von Kurz- und Langzeitspeichern an Bedeutung. Sie hängt wesentlich von dem verfolgten Ziel (z.B. Kostenoptimierung, Minimierung CO₂-Emissionen) sowie der Konfiguration des jeweiligen Systems ab, beispielsweise vom Anteil an erneuerbaren Energiequellen.³⁶

34 [Neue Materialien für die Batterien der Zukunft]

35 [Stromspeicherung über adiabatische Luftkompression]

36 [Nachhaltige dezentrale Stromerzeugung]

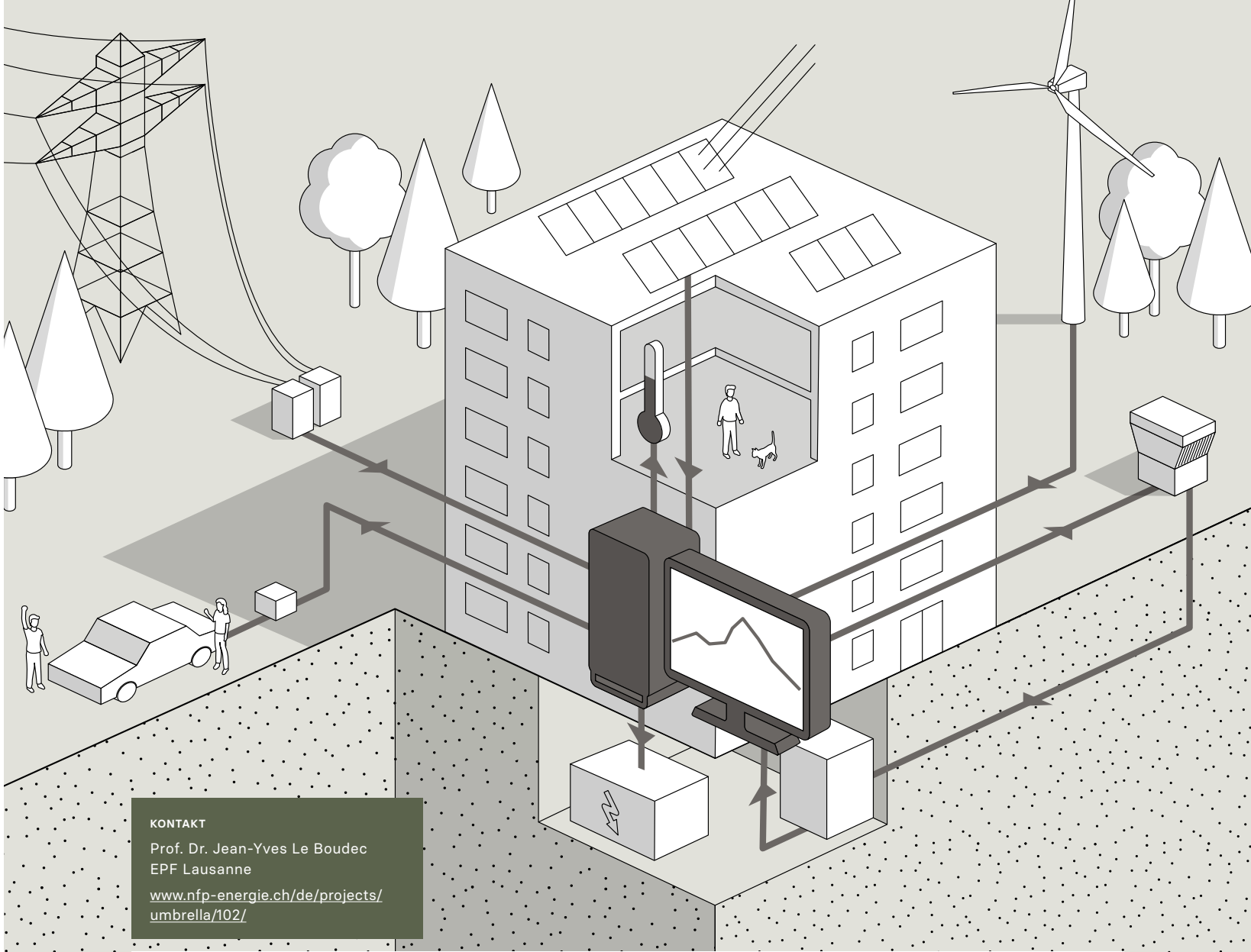
Zukunftsaufgabe Lastmanagement

Durch die zunehmende Anzahl an dezentralen Energiebereitstellern wächst im Energiesystem der Zukunft der Dezentalisierungsgrad der Stromversorgung. Dezentrale Bereitsteller – sogenannte Prosumers – verändern das Spannungs- und Lastflussprofil im Netz. Dem Lastmanagement kommt die Aufgabe zu, das System bei der wachsenden Komplexität und Vernetzung zu steuern und den elektrischen Leistungsbedarf an die vorhandenen Kraftwerkskapazitäten anzupassen, beispielsweise mittels differenzierter Tarife (Hoch- und Niedertarif), Sperrzeiten oder situativen Zu- oder Abschaltens von Strombezügern.

Eine sehr vereinfachte Form von Lastmanagement wird mit dem Hoch-und-Niedertarif-Regime erreicht. Es schafft einen Anreiz, den Verbrauch von den Tages- auf die Randstunden oder auf Wochenenden zu verschieben. Intelligente Messsysteme, sogenannte «Smart Meters», ermöglichen mehr zeitliche Flexibilität in der Steuerung, beispielsweise eine viertelstündliche Messung des individuellen elektrischen Energieverbrauchs. «Smart Meters» können auch Signale entgegennehmen. Der Vorschlag des Bundesrats, bis 2027 80 Prozent der traditionellen Stromzähler durch diese neue Generation zu ersetzen, schafft die Möglichkeit, die Verbraucherinnen und Verbraucher stärker in das Ausbalancieren von Energiebereitstellung und Verbrauch zu integrieren. Verschiedene Unternehmen bieten bereits Produkte an, die diese Flexibilität bei den Kundinnen und Kunden nutzen sollen.

Eine im NFP «Energie» entwickelte Methode ermöglicht es, den Stromfluss eines Gebäudes in Echtzeit zu regulieren, also mit Reaktionszeiten unter einer Sekunde. Sie integriert unterschiedliche elektrische Ressourcen im Verteilnetz wie Photovoltaikmodule, Batterien, Brennstoffzellen, Wärmepumpen und Ladestationen für Elektrofahrzeuge (vgl. S. 51).³⁷

37 [Softwarebasierte Netzsteuerung in Echtzeit]



KONTAKT
Prof. Dr. Jean-Yves Le Boudec
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/de/projects/umbrella/102/

PROJEKT #Energienetze #Steuerung #Versorgungssicherheit

«Softwarebasierte Netzsteuerung in Echtzeit»

Die erhöhte Bereitstellung dezentraler erneuerbarer Energien und die zunehmende Nutzung von Elektrizität für die Heizung mittels Wärmepumpen sowie die Mobilität erhöhen das Risiko von Kapazitätsengpässen in Teilen der Verteilnetze. Starke Schwankungen bei der Bereitstellung von Solar- und Windenergie gefährden zudem die Netzstabilität. Eine Möglichkeit, diese Probleme zu bewältigen, bieten Speicherkraftwerke, die innert sehr kurzer Zeit zu- und abgeschaltet werden können. Andere herkömmliche Methoden erfordern kostspielige Infrastrukturinvestitionen, nutzen treibstoffbetriebene Generatoren und arbeiten nicht in Echtzeit. **Das Forschungsteam entwickelte und patentierte eine Methode,**

die es erlaubt, den Stromfluss mittels Software-Agenten in Echtzeit zu steuern, das heisst mit Reaktionszeiten unter einer Sekunde. Die Methode, die im realen Massstab umgesetzt wurde, integriert unterschiedliche elektrische Ressourcen im Verteilnetz wie Photovoltaikmodule, Batterien, Brennstoffzellen, Wärmepumpen und Ladestationen für Elektrofahrzeuge. Sie unterstützt das Hauptnetz und gewährleistet die Stabilität des Verteilnetzes. Zudem entwickelte das Team eine Methode, mit der sich der Energieverbrauch eines Gebäudes und damit verbundener Geräte so verwalten lässt, dass Energiespeicherungsleistungen in einem Spektrum verschiedener Zeitskalen ermöglicht werden.

Sektorkopplung – erweiterte Chancen für erneuerbare Energien

Die Verbindung verschiedener Energiesektoren – Strom, Mobilität und Wärme –, die sogenannte Sektorkopplung, spielt für die Gestaltung eines nachhaltigen Gesamtenergiesystems eine zentrale Rolle. Die Elektrifizierung der Sektoren «Mobilität» und «Wärme» bietet die Möglichkeit, vermehrt erneuerbare Energien auch in diesen Sektoren zu nutzen. Die Sektorkopplung erlaubt es zudem, überschüssige elektrische Energie bei Bedarf in Energieformen umzuwandeln, deren Speicherung einfacher möglich ist.

Mittels Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) erzeugen Heizkraftwerke sowohl Strom als auch Wärme. Über Fernwärmenetze lassen sich nahe gelegene Siedlungen mit Wärme versorgen. Da der grösste Teil des Strombedarfs von Wasser- und Kernkraftwerken gedeckt wird, sind WKK-Anlagen in der Schweiz bisher allerdings noch nicht stark verbreitet. Aber auch die Abwärme von Kernkraftwerken wird beispielsweise beim KKW Beznau via Fernwärmenetz zu Heizzwecken genutzt. Insgesamt ist der Anteil der Haushalte, die Fernwärme beziehen, mit rund 4 Prozent relativ klein (BFS 2017). Die Zahl der Wärmepumpen, mit denen mittels Strom Wärme aus der Umgebungsluft oder dem Untergrund für die Gebäudeheizung genutzt wird, ist im Steigen begriffen; bei Neubauten sind diese Anlagen inzwischen die Regel. Insgesamt steht in fast einem Fünftel der Gebäude der Schweiz heute eine entsprechende Anlage (BFS 2017). Durch den Einsatz neuer Technologien bei Wärmepumpen könnten die Kapazität und die Energieeffizienz von Wärme- und Kältenetzen erhöht werden (vgl. S. 38).³⁸

Das Angebot an Autos, die mit elektrischer Energie angetrieben werden, hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Standen zunächst vor allem Hybridlösungen zur Auswahl, das heisst Kombinationen von Elektro- und Benzinmotoren, sind inzwischen vermehrt vollelektrische Fahrzeuge unterwegs. In Ländern wie Norwegen ist dank För-

derprogrammen bereits jedes dritte neu zugelassene Fahrzeug ein reines Elektroauto. In der Schweiz ist dies lediglich bei unter 2 Prozent der Fall (EnergieSchweiz & BFE 2018). Ein wichtiger Vorteil von Elektroautos gegenüber anderen alternativen Antriebssystemen (z. B. Wasserstoff, Biogas) besteht darin, dass das Stromversorgungsnetz bereits vorhanden ist. Bei grossen Lastwagen, die auf Mittel- und Langstrecken im Einsatz sind, steht der Einsatz von Wasserstoffantrieben im Vordergrund, der Elektroantrieb mittels Batterien hingegen bei Lieferwagen und innerstädtischen Bussen. Letztere könnten mit Ladestationen an den Haltestellen versorgt werden.³⁹

Power-to-X – Speicherung von umgewandeltem Strom

Die Kopplung mehrerer Energieträger erlaubt es, die Speicherefähigkeiten eines Mediums zu nutzen, um die Variabilität in der Bereitstellung eines anderen auszugleichen, beispielsweise die Speicherung von stark fluktuierender Sonnen- oder Windenergie. «Power-to-X» umfasst verschiedene Kopplungsvarianten: Power-to-Heat, Power-to-Gas, Power-to-Chemicals und Power-to-Liquid. Die Energie kann in der neuen Energieform gespeichert und später bei Bedarf in dieser Energieform verbraucht oder allenfalls wieder in elektrische Energie umgewandelt werden. Wärmepumpen gehören zu den Power-to-Heat-Technologien. Mithilfe eines Wärmespeichers wie Erdsonden- oder Heisswasser-Wärmespeicher lässt sich Wärme auch über längere Zeit speichern.

Als Langzeitspeicher mit grosser Kapazität kommen in der Schweiz Tiefenspeicher infrage, die es erlauben, Gas oder Wärme zu speichern. Auch CO₂ liesse sich allenfalls in Tiefenspeichern deponieren. Die grösste Gesteinsformation in der Schweiz, die bisher für Speichieranwendungen als geeignet erachtet wurde, eine salzgetränkte Sandsteinschicht (saliner Aquifer) zwischen Olten und Schaffhausen, eignet sich gemäss dem Projekt «Tiefliegende Wärmereservoirs» allerdings nur bedingt für diesen Zweck.⁴⁰

³⁹ www.sccer-mobility.ch

⁴⁰ [Tiefliegende Wärmereservoirs]

³⁸ [Wärmenutzung durch Sorptionstechnologie]

Bei der Power-to-Gas-Technologie wird Wasser mittels Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Der Wasserstoff kann zusätzlich in Methan umgewandelt und ins Erdgasnetz eingespeist oder in Kavernen gespeichert werden (BFE 2017). Auf diese Weise ist eine spätere Umwandlung in elektrische Energie möglich. Diese saisonale Speicherung mittels Power-to-Gas-Systemen stellt eine mögliche Lösung dar, um in Regionen mit hohem Potenzial an erneuerbaren Ressourcen CO₂-Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig ausgeprägtem saisonalem Wechsel zwischen Energiebedarf und Produktion erneuerbarer Energien zu begegnen.⁴¹ So sind insbesondere in Deutschland

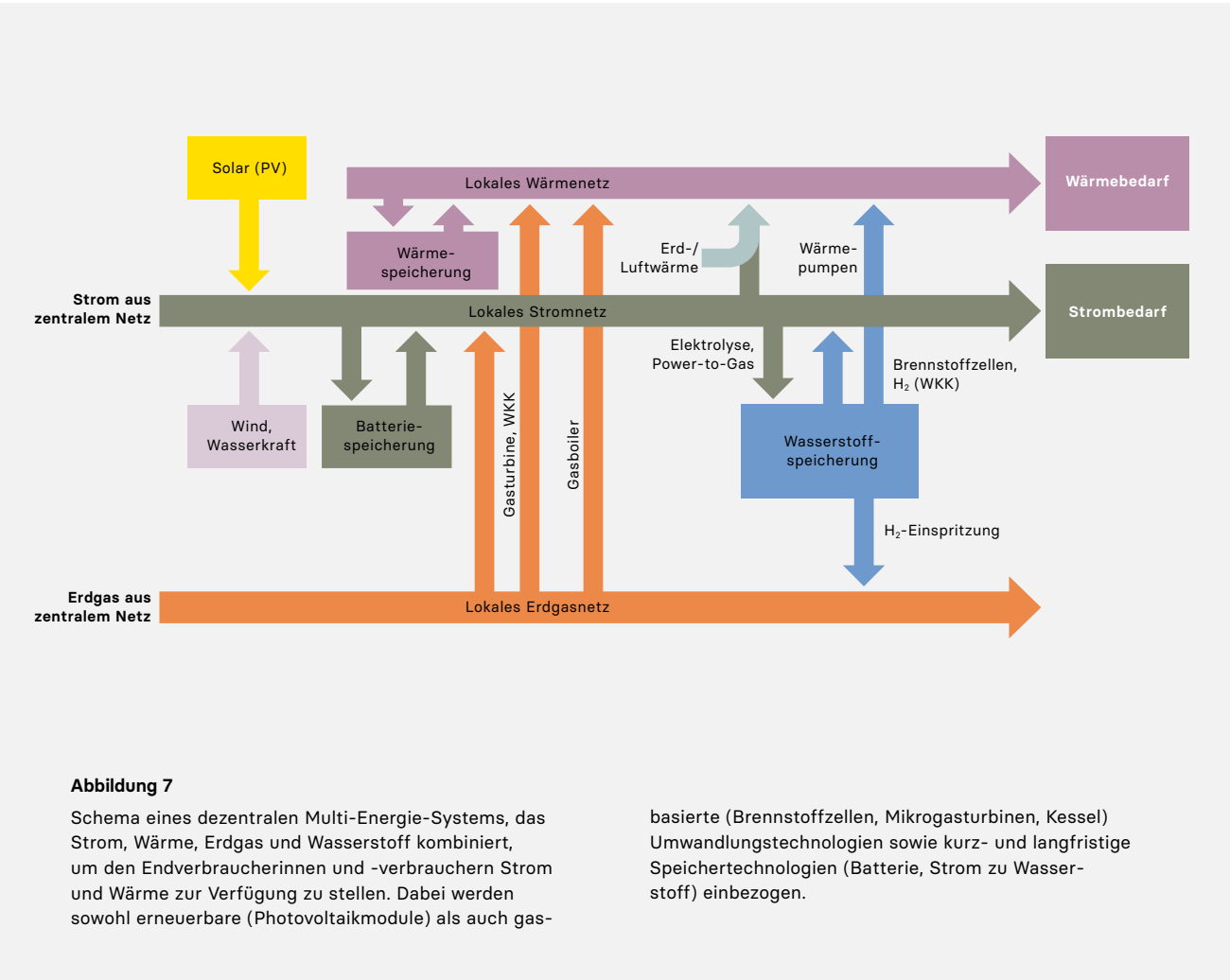
verschiedene Power-to-Gas-Anlagen im Einsatz. In der Schweiz fehlt noch die Notwendigkeit dazu. Allerdings ist die saisonale Speicherung auch sehr kostenintensiv, was ihre Realisierung behindert.

Bei den Power-to-Chemicals- und Power-to-Liquid-Technologien wird der Wasserstoff weiterverwendet und zu chemischen Grundstoffen synthetisiert beziehungsweise verflüssigt. Alle diese Technologien weisen bisher einen schlechten Wirkungsgrad auf. Das NFP «Energie» hat in verschiedenen Projekten Beiträge zu ihrer Verbesserung geleistet (vgl. S. 18).^{42/43}

⁴² [Erneuerbare Energieträger zur Stromerzeugung]

⁴³ [Methan für Transport und Mobilität]

⁴¹ [Technologie dezentraler Energiesysteme]



Dezentrale Multi-Energie-Systeme – Energieträgerkopp-
lung im grossen Stil

Wird die Energieträgerkopplung für ganze Stadt-quartiere oder Dörfer betrachtet, kommt dem Systemaspekt eine noch grössere Bedeutung zu. Die Zusammenführung lokaler Komponenten und deren gemeinsame Steuerung bringt erheb-liche Vorteile mit sich, insbesondere wenn sie sich ergänzen und Redundanzen vermieden werden. Eine Gesamtoptimierung solcher Systeme ist aufgrund der Komplexität, aber auch wegen des Datenschutzes sehr anspruchsvoll. Wie das Projekt «Steuerung dezentraler Energiesysteme» zeigt, ermöglichen es dezentrale Multi-Energie-Systeme (DMES), kostspielige Netzausbauten zu vermei-den.⁴⁴ Sie nutzen die Kopplung verschiedener Energieträger und kombinieren erneuerbare und konventionelle Energiequellen, Umwandlungtech-nologien sowie Speichertechnologien. Ziel ist es, die negativen ökologischen Auswirkungen der Energieversorgung zu minimieren und die Kosten möglichst gering zu halten (vgl. Abb. 7).

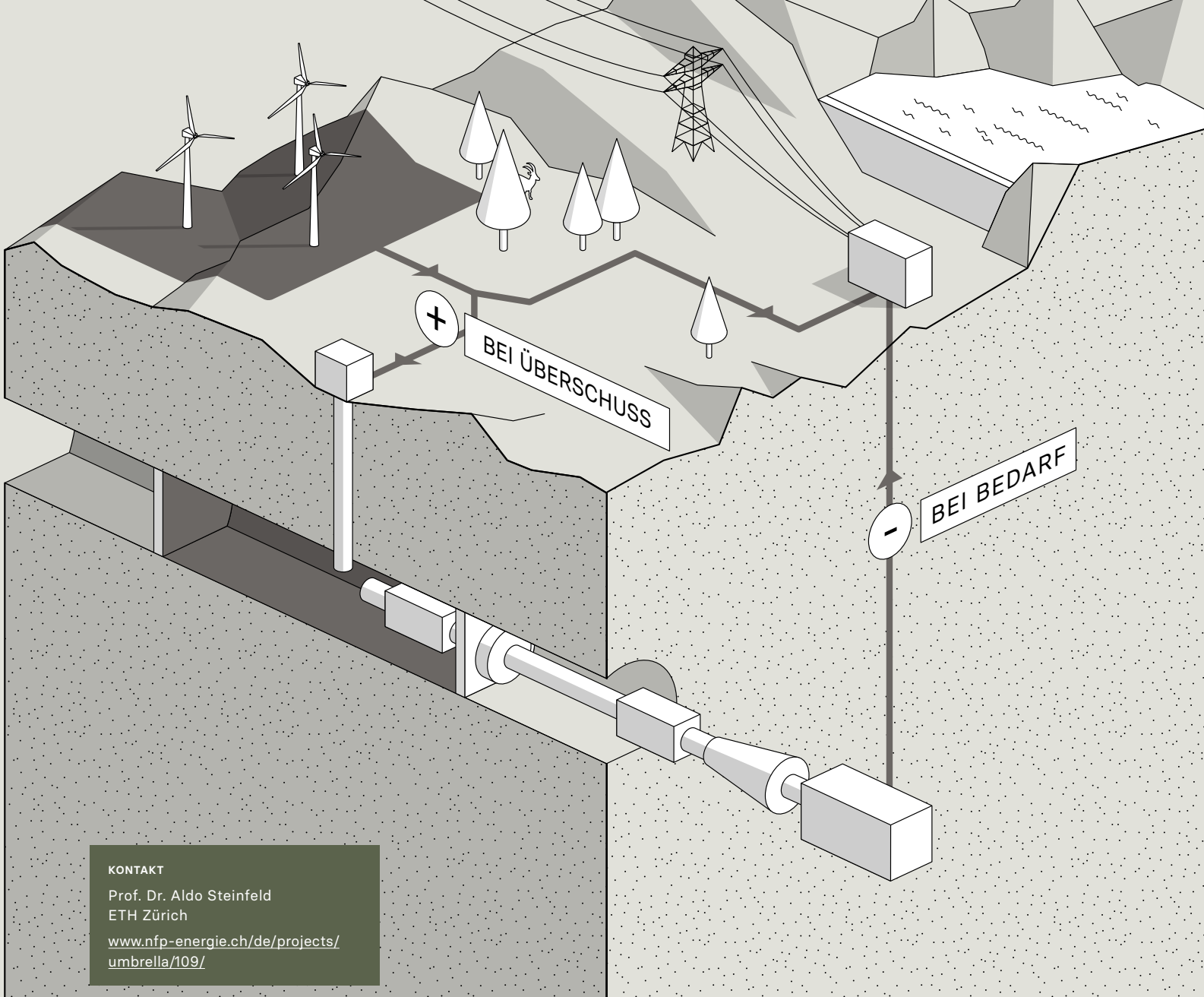
Die Untersuchung der wirtschaftlichen Leistungs-fähigkeit eines solar betriebenen DMES zeigt: Netzgekoppelte Systeme mit Photovoltaik und einer Umwandlungstechnologie schneiden sowohl hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit als auch der Umweltleistung bereits heute deutlich besser ab als eine Ölheizung.⁴⁵ Bei autarken DMES ohne Netzan-bindung, jedoch mit integrierten Speichern, liegen die Kosten derzeit noch um Faktoren höher als bei Systemen, die ins Netz integriert sind (Gross-pietsch et al. 2018). Mit steigenden Energiepreisen und sinkenden Kosten bei den (Speicher-)Techno-logien könnten künftig allenfalls auch autarke Systeme profitabel werden. Um DMES sowohl tech-nisch als auch wirtschaftlich sinnvoll betreiben zu können, bedarf es politischer Massnahmen, beispielsweise im Bereich der Marktgestaltung oder auf kommunaler Ebene im planerischen Bereich.

⁴⁴ [Steuerung dezentraler Energiesysteme]
⁴⁵ [Nachhaltige dezentrale Stromerzeugung]

3.4 Neue Finanzie-
rungs- und
Geschäftsmodelle

Die Transformation des Energiesystems ist nicht nur eine technische Aufgabe, sie hat auch vielfälti-ge betriebswirtschaftliche Komponenten. Der Trend zu Dezentralisierung und Dekarbonisierung der Energiebereitstellung schafft Investitions-bedarf und ermöglicht neue Geschäftsmodelle. Der Investitionsbedarf erwächst in vier Bereichen: Steigerung der Energieeffizienz, Ausbau der ein-heimischen erneuerbaren Energien, Elektromo-bilität sowie Infrastruktur (etwa für den Aus- und Umbau der Stromnetze, insbesondere zur Stärkung der Verteilnetze, für die Stromspeicherung und für andere Energienetze wie Gas- und Fernwärme-netze). Den Investitionsbedarf im Schweizer Kraftwerkpark bezifferte der Bundesrat bis 2050 auf 193 Milliarden Franken. Ein Grossteil dieser Investitionen ist bedingt durch Renovationen, die die Funktionsfähigkeit der Anlagen sicherstellen. Nur 16 Milliarden Franken sind auf den verstärkten Zubau neuer erneuerbarer Energien zurückzu-führen (Bundesrat 2013).

Die angestammten Geschäftsmodelle bisheriger Anbieter geraten mit der Transformation des Energiesystems unter Druck. Zugleich eröffnen sich neue Chancen sowohl für die bisherigen als auch für neue Anbieter. Dazu gehören nebst Prosumern auch elektronische Plattformen, die sich – bisher branchenfremd – vor allem im Energie-handel betätigen.



KONTAKT
Prof. Dr. Aldo Steinfeld
ETH Zürich
www.nfp-energie.ch/de/projects/umbrella/109/

PROJEKT #Energiespeicher #Flexibilität #Versorgungssicherheit

«Stromspeicherung über adiabatische Luftkompression»

Mit dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energie-quellen steigt der Bedarf für grosse Speicher-kapazitäten, die die Netzstabilität gewährleisten und Angebot und Nachfrage in Einklang bringen. **Mit einer weltweit ersten Pilotanlage hat das Forschungsteam die technische Machbarkeit von adiabatischen Druckluftspeicherkraftwerken nachgewiesen.** Dazu wurde Druckluft in einer Fels-kaverne in Pollegio in der Nähe von Biasca ge-speichert. Bei der Kompression entsteht Wärme, die Temperaturen von bis zu 566 °C erreicht. Diese geht nicht an die Umgebung verloren, sondern wird von einem integrierten Wärmespeicher auf-

genommen, dessen Speichermedium spezielle physikalische Materialeigenschaften aufweist. Die Stromerzeugung erfolgt durch Expansion der Druckluft in eine Turbine. Dank der gespeicherten Wärme kann bei dieser Dekompression auf zusätzliche Wärmezufuhr verzichtet werden, was den Gesamtwirkungsgrad auf bis zu 74 Prozent erhöhen könnte und keine zusätzlichen CO₂-Emissionen verursacht. Bis zum praktischen Ein-satz sind weitere Fortschritte notwendig – in Bezug auf die Dichtheit der Kavernen und das langfristige Verhalten des Wärmespeichers.

Perspektiven für Wasserkraft-werkbetreiber

Der Bau und Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken ist eines der klassischen Beispiele für Geschäftsmodelle, die an Attraktivität eingebüsst haben. Bis vor wenigen Jahren konnten Schweizer Energieversorger nachts billigen Überschussstrom einkaufen, in alpinen Wasserkraftwerken zwischenspeichern, das Wasser am Mittag turbinieren und den Strom zu höheren Preisen wieder an in- und ausländische Abnehmer verkaufen. Das Wachstum der Solarenergie machte dieser Handelsstrategie einen Strich durch die Rechnung. Das grosse Angebot von Solarstrom senkte den Preis vor allem in den sonnenreichen Mittagsstunden, sodass die für den Stromhandel interessante Preisdifferenz zwischen Bandlast- und Spitzenlaststrom erodierte. Die Ertragswerte von Pumpspeicherwerken haben sich europaweit bei rund 2 Euro pro kWh Speicherkapazität pro Jahr eingependelt. Es besteht dadurch kein Anreiz mehr, in langfristige Energiespeicherung zu investieren.⁴⁶ Im Projekt «Investitionen in Wasserkraft» wurden neue Instrumente entwickelt, die robuste Investitionsentscheide trotz Unsicherheiten ermöglichen. Solche neuen Finanzierungsinstrumente reduzieren die Schwierigkeit, dass Investitionen in die Wasserkraft für Jahrzehnte nutzbar sind, die Märkte aber nur eine kurzfristige Bewertung erlauben. Damit Investitionen wieder rentabel werden, wird die sogenannte Real-Option-Methode vorgeschlagen. Sie basiert auf einem zeitlich gestaffelten und flexiblen Vorgehen beim Investieren. Neben kurzfristigen Investitionen werden künftige Optionen, die heute noch nicht rentabel sind, in Aussicht genommen und in der Planung berücksichtigt. Die optionalen Investitionen werden aufgeschoben.

Eine Möglichkeit, die wirtschaftliche Situation der Wasserstromerzeuger zu beeinflussen, wird im Zusammenhang mit der Flexibilisierung des Wasserzinses diskutiert. Eine wesentliche Rolle spielt die Form des Wasserzinses allerdings nur für wenige Elektrizitätsunternehmen. Sein Einfluss – ob flexibel oder starr – ist deutlich kleiner als der Effekt des Marktpreises. Je höher der Marktpreis,

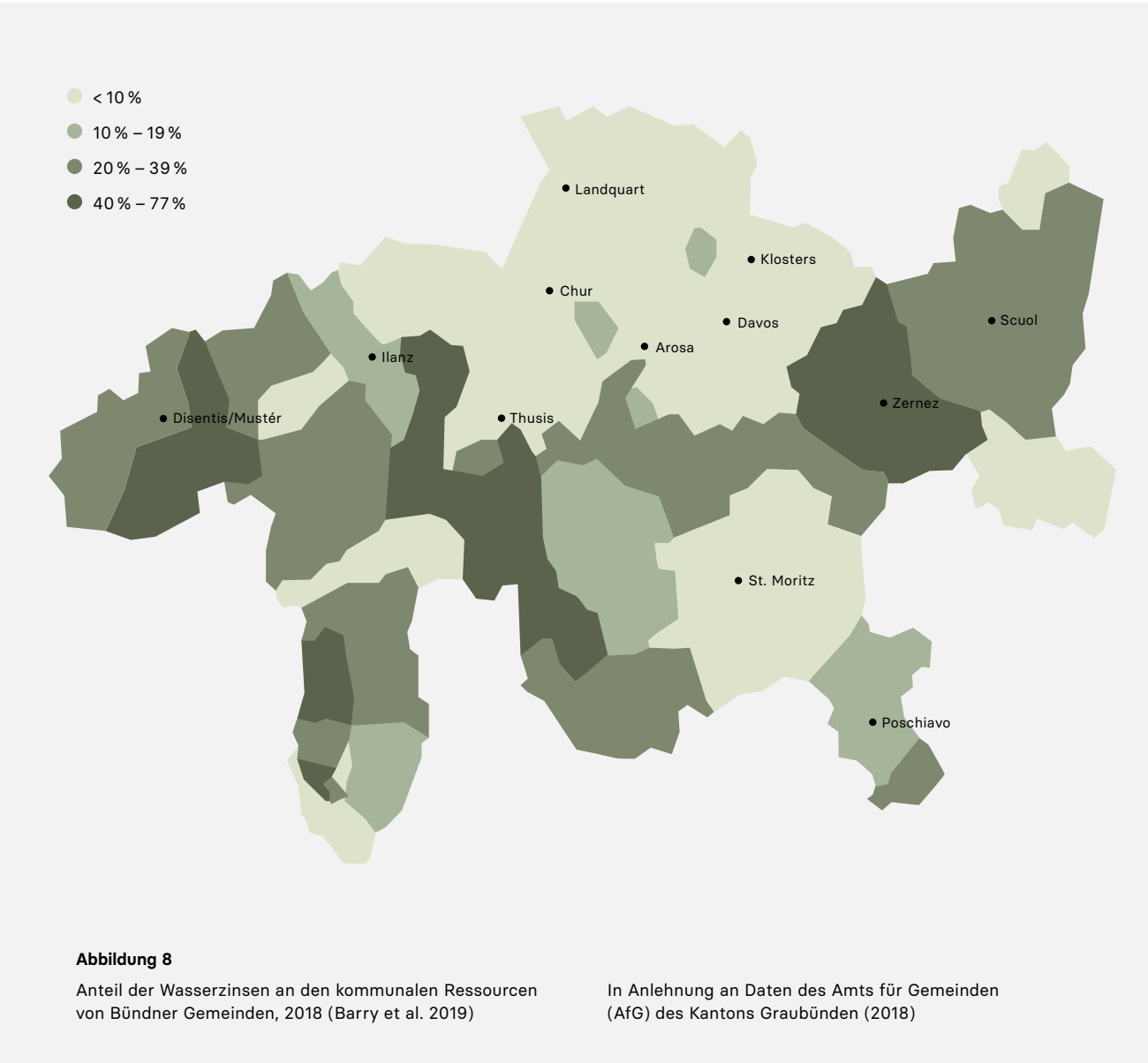
desto weniger fällt der Wasserzins bei der Rentabilität ins Gewicht – und umgekehrt. Der Extremfall, ein vollständiges Wegfallen des Wasserzinses, würde nur wenige Betreiber bei schlechten Marktbedingungen in die Gewinnzone bringen. Im Gegensatz dazu wirken sich Veränderungen beim Wasserzins auf die Eigentümer der Wasserrechte – die Kantone und Gemeinden – weit stärker aus, machen die Wasserzinseneinnahmen doch in zahlreichen Gemeinden den Grossteil der finanziellen Ressourcen aus (vgl. Abb. 8).⁴⁷

Reges Interesse an privater Mitfinanzierung erneuerbarer Energien

Aufgrund der Tiefpreisphase im Strommarkt hatten Energieversorger in den letzten Jahren finanzielle Verluste im Kerngeschäft zu verkraften. In gewissem Ausmass kam es in der Folge zu einer Verschiebung der Investitionskräfte von den grossen Überlandwerken zu regionalen und städtischen Energieversorgern, die weniger stark von den Veränderungen im Strommarkt betroffen waren. Die Lücke, die durch die wirtschaftlichen Schwierigkeiten der grossen Energieversorger entstanden ist, füllen zum Teil neue Akteure. In der Regel sind es einzelne Hausbesitzer oder Immobiliengesellschaften, die dezentrale Solaranlagen finanzieren. Damit wird der Bereich losgelöst von den Schwierigkeiten der klassischen Energieversorgungsbranche. Auch Mieterinnen und Mieter und andere Haushalte und Betriebe, die über keine Möglichkeiten für die Realisierung eigener Anlagen für erneuerbare Energien verfügen, zeigen reges Interesse, sich als Kleinanleger an Solar- und Windkraftanlagen zu beteiligen. Energieversorger, Unternehmen der Solar- und Windenergiebranche oder Energiegenossenschaften vermögen solches «geduldiges Kapital» für die Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 zu mobilisieren (Ebers et al. 2019).

⁴⁶ [Investitionen in Wasserkraft]

⁴⁷ [Die Zukunft der Schweizer Wasserkraft]



Einige Energieversorger entwickeln ihre bisherigen Ökostromprodukte zu Beteiligungsmodellen weiter, die es Kundinnen und Kunden erlauben, Anteile an grösseren Solaranlagen zu erwerben. In der Schweiz haben sich bisher rund 300 Energiegenossenschaften gebildet, die zu einer kollektiven Finanzierung von Solar- oder Windenergieprojekten beitragen. Wie in Deutschland, wo dieses Organisationsmodell weiter verbreitet ist, besteht eine enge Verknüpfung mit der Förderpolitik für erneuerbare Energien. So sind viele der Genossenschaften kurz nach der Einführung der kosten-

deckenden Einspeisevergütung (KEV) im Jahr 2009 entstanden. In jüngster Zeit haben die wenigsten der Genossenschaften ihre Kapazitäten ausgebaut, ausser sie erhielten Unterstützung auf Gemeindeebene.⁴⁸ Bislang kommen die Energiegenossenschaften deshalb erst für 1 bis 1,5 Prozent der Solarstromproduktion auf. Vor allem aus Gründen der gegebenen Marktbedingungen sind sie nicht in der Lage, ihr Potenzial voll auszuschöpfen.

⁴⁸ [Kollektive Finanzierung erneuerbarer Energien]

Beteiligungsformen wie die Energiegenossenschaften sind aber in der Lage, die Identifikation der Bevölkerung mit den Energieanlagen zu erhöhen. Sie stärken das Gemeinschaftsgefühl in den betreffenden Regionen und entfachen dadurch auch eine positive Dynamik für die Realisierung weiterer Energieprojekte.

Bedarf an neuen Finanzierungsmodellen für die Verteilnetze

Die zunehmende Zahl an Prosumern wirkt sich auf die Finanzierung der Verteilnetze aus: Wird aufgrund privater Anlagen mit hohem Eigenverbrauch weniger Strom über das Verteilnetz bezogen, schwindet mit dem heute geltenden verbrauchsabhängigen Netznutzungstarif die Finanzierungsbasis. Stromkonsumenten ohne Eigenverbrauch sind gezwungen, den Anteil der Netznutzungskosten zu übernehmen, der durch den Eigenverbrauch verloren geht. Es kommt zu einer Quersubventionierung des Eigenverbrauchs und damit zu einer Umverteilung (Ulli-Baer et al. 2016). Die heutigen Rahmenbedingungen geben Endkunden und Prosumern kaum Anreize für den Ausbau erneuerbarer Energien, für netzdienliches Verhalten und für Investitionen in Speicherslösungen oder DMES-Technologien. Neu gestaltete Netznutzungstarife sollten solche Anreize schaffen und die Kosten verursachergerecht anlasten. Es liegt an den regionalen Verteilnetzbetreibern, entsprechende Geschäftsmodelle zu entwickeln.⁴⁹

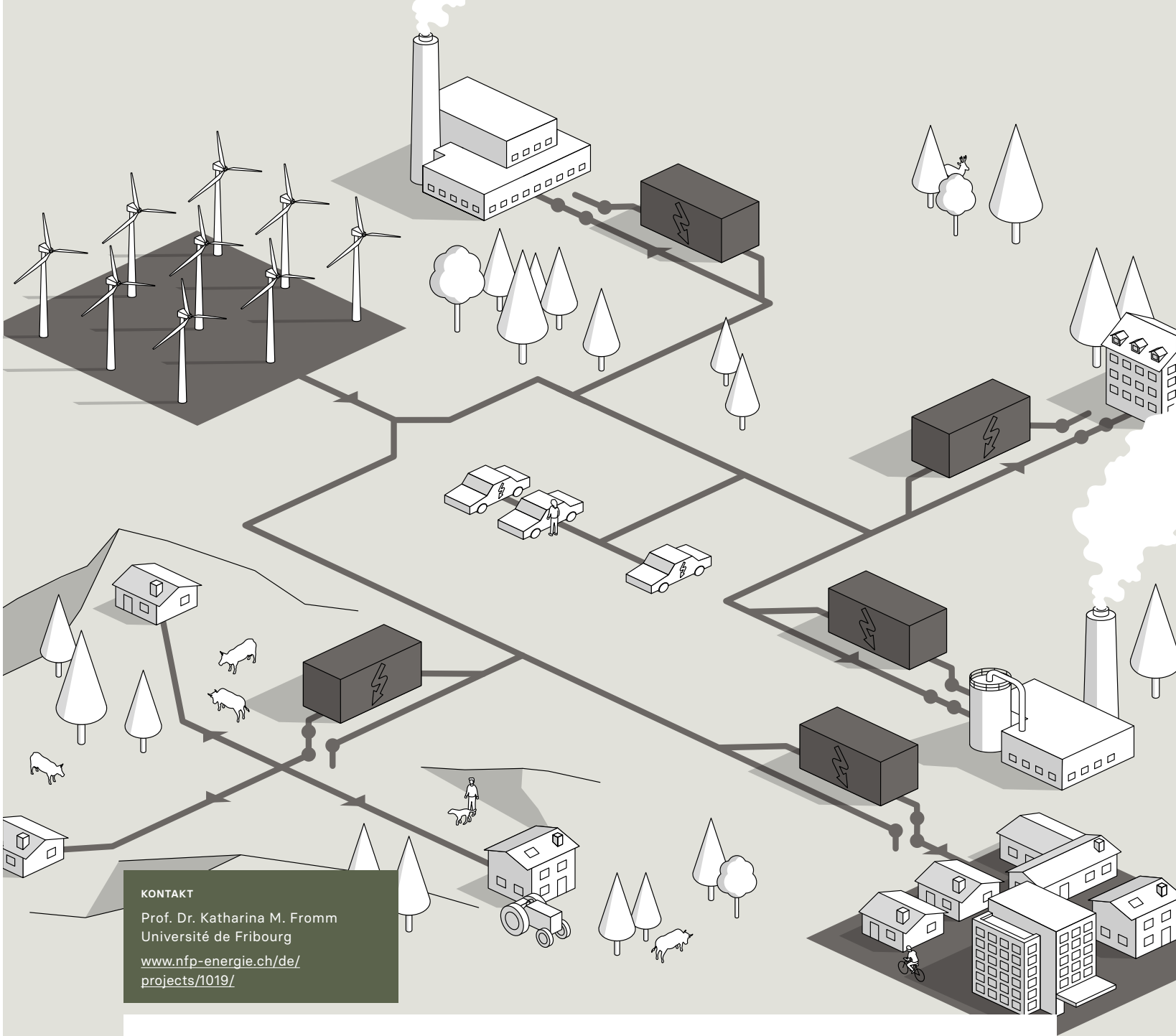
49 Synthese zum Themenschwerpunkt «Marktbedingungen und Regulierung» des NFP «Energie», SNF

Investitionsalternativen und -hindernisse

Die einzelnen Investorentypen agieren nach sehr unterschiedlichen Entscheidungskriterien und -prozessen (Salm et al. 2016). Die Kapitalkosten der verschiedenen Investoren unterscheiden sich in Abhängigkeit davon, mit welchen alternativen Anlagemöglichkeiten sie Energieinvestitionen vergleichen. Pensionskassen beispielsweise können im aktuellen Niedrigzinsumfeld Investitionen zum Teil zu tieferen Kosten finanzieren als Energieversorger (Salm & Wüstenhagen 2018). Private Investoren wiederum, so zeigt auch das Projekt «Energiesparpotenziale in Haushalten von älteren Menschen», entscheiden oft weniger analytisch und beziehen auch intuitive Aspekte in die Entscheidungsfindung ein.⁵⁰

Das aktuelle Niedrigzinsumfeld ist für die Finanzierung von Investitionen in Energieeffizienz tendenziell vorteilhaft. Die Energieeffizienz konkurriert jedoch mit anderen Investitionsmöglichkeiten (mehr Wohnfläche, höhere Ausstattung usw.) um die Aufmerksamkeit der Investoren. Gezielte Angebote wie Minergie-Hypotheken oder Finanzierungsangebote für Solaranlagen können die Realisierungswahrscheinlichkeit solcher Investitionen erhöhen. Zudem stellt die Frage, wie im Mietwohnungsbau die Kosten und der Nutzen von Energieinvestitionen zwischen Vermieter und Mieter verteilt werden, ein wesentliches Hindernis dar für Energieeffizienzinvestitionen im Gebäudebereich.

50 [Energiesparpotenziale in Haushalten von älteren Menschen]



KONTAKT
Prof. Dr. Katharina M. Fromm
Universität de Fribourg
www.nfp-energie.ch/de/projects/1019/

PROJEKT #Energiespeicher #Flexibilität #Mobilität

«Neue Materialien für die Batterien der Zukunft»

Die Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Quellen erfolgt nicht unbedingt zeitgleich mit dem Bedarf. Überschüssig produzierte Energie muss daher gespeichert werden. Als Batteriespeicher bieten sich Metall-Luft-Batterien an. Sie sind in der Lage, viel Energie auf wenig Raum zu speichern. Ihre Energiedichte liegt 10- bis 30-mal so hoch wie bei herkömmlichen Akkumulatoren, also fast so hoch wie jene von Benzin. Das Forschungsteam entwickelte neue Komponenten für

Lithium-Metall-Hochenergie-Akkumulatoren – Molybdän-(IV-)Sulfid-(MoS₂-)Membranen und kronenetherbasierte ionische Flüssigkeiten –, die den bisher im Markt erhältlichen Komponenten überlegen sind. Sie verbessern den Lade-/Entladezyklus und erhöhen gleichzeitig die Sicherheit. Diesen neuen Materialien stehen weite Einsatzgebiete offen. **Weiterentwickelt könnten die neuen Materialien auch bei Akkus für Elektromobile zum Einsatz kommen.**

3.5 Ein nachhaltiges Energiesystem

Die Ziele der nachhaltigen Entwicklung verlangen, dass auch das Energiesystem die hohen, weltweit akzeptierten Nachhaltigkeitsforderungen in Bezug auf die drei Dimensionen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft bestmöglich erfüllt. Konkret bedeutet dies «Minderung des Klimawandels», «effiziente Nutzung energetischer und anderer Ressourcen», «minimale Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen und auf das Ökosystem», «tragbare Kosten», «Versorgungssicherheit» und «gesellschaftliche Akzeptanz».

In den letzten zwei Jahrzehnten hat die Wissenschaft mit dem «Sustainability Assessment for Energy Technologies» eine Methodik auf der Basis der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) entwickelt, die sich für die vergleichende, quantitative Beurteilung von neuen Technologien und ihren Auswirkungen auf die nachhaltige Entwicklung eignet (Hirschberg & Burgherr 2015). Dieser Ansatz steht im Einklang mit den Nachhaltigkeitszielen der UNO (Sustainable Development Goals, SDG). Er verwendet nur diejenigen der 17 Ziele und 169 Indikatoren der SDG mit hoher Relevanz für das Energiesystem. Nicht berücksichtigt sind beispielsweise Ziele wie Armut, Hunger oder Gender-Aspekte.

State of the Art der Nachhaltigkeitsbeurteilung

Die Rangfolge verschiedener Technologien oder Lösungsalternativen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die nachhaltige Entwicklung wird in der Regel in sechs Schritten ermittelt:

1. Wahl und Beschreibung der zu vergleichenden Objekte (Technologien/Lösungsalternativen)
2. Bestimmung der Zielkriterien und der zugehörigen Indikatoren
3. Quantifizierung der Indikatoren
4. Gewichtung der Indikatoren
5. Gesamtbeurteilung der zu vergleichenden Objekte
6. Sensitivitätsanalyse für variierte Gewichtungen der Indikatoren

Im EU-Projekt NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability) wurde mit einem bis heute einmalig umfassenden Effort eine Liste von Beurteilungskriterien erarbeitet (vgl. Abb. 9), die die vergleichende Beurteilung der Nachhaltigkeit von Stromerzeugungstechnologien und der entsprechenden Wertschöpfungskette erlauben (Ricci et al. 2009). In neuesten Forschungen wurde – neben den drei klassischen Nachhaltigkeitsdimensionen – die Versorgungssicherheit als vierte Dimension angefügt.

Für die Quantifizierung der Indikatoren (Schritt 3) werden in der Regel verschiedene Ansätze verwendet. Im Geiste der Nachhaltigkeit stützt sich die Quantifizierung der umweltbezogenen Indikatoren auf Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, LCA). Für soziale Indikatoren, im Besonderen für die Indikatoren «Gesundheitsschäden» und «Luftverschmutzung», hat sich zusätzlich der sogenannte «Impact Pathway Approach» bewährt (Friedrich & Bickel 2001). Die Quantifizierung der Gefahren infolge hypothetischer, schwerwiegender Unfälle basiert auf realen Erfahrungswerten oder fallweise auf «Probabilistic Safety Assessment» (PSA). Die wirtschaftlichen Indikatoren werden anhand von Lebenszykluskostenanalysen

Kriterium	
Ökologische Dimension	Ressourcen Energieressourcen Bodenschätze (Erze)
	Klimawandel
	Auswirkungen auf Ökosysteme Auswirkungen bei Normalbetrieb Auswirkungen bei schweren Unfällen
	Abfälle Chemische Sonderabfälle in unterirdischen Deponien Mittel und hoch radioaktive Abfälle, die in geologischen Tiefenlagern deponiert werden
Wirtschaftliche Dimension	Auswirkungen auf Kunden Strompreis
	Auswirkungen auf Gesamtwirtschaft Beschäftigung Autonomie der Stromerzeugung
	Auswirkungen auf Versorger Finanzielle Risiken Betrieb
Soziale Dimension	Sicherheit/Zuverlässigkeit der Energieversorgung Politische Gefahren für die Kontinuität der Energiedienste Flexibilität und Anpassung
	Politische Stabilität und Legitimität Konfliktpotenzial von Energiesystemen Notwendigkeit von partizipativen Entscheidungsprozessen
	Soziale und individuelle Risiken Auf Expertenmeinungen gründende Risikoeinschätzungen für den Normalbetrieb Auf Expertenmeinungen gründende Risikoeinschätzungen für Unfälle Wahrgenommene Risiken Terroristische Bedrohung
	Qualität der Wohnumgebung Auswirkungen auf Landschaftsqualität Lärmbelastung

Abbildung 9
Beurteilungskriterien und Indikatoren nach NEEDS
(Hirschberg et al. 2008)

geschätzt und die weiteren Indikatoren auf der Basis von Daten aus der Energiewirtschaft oder von Expertenmeinungen.

Anstelle der multikriteriellen Entscheidungsanalyse wird auch die Kosten-Nutzen-Analyse verwendet (Cost-Benefit Analysis), bei der sämtliche Indikatoren monetär quantifiziert werden. Dieser Ansatz wird in Fachkreisen jedoch sehr kontrovers diskutiert, da sich einige Indikatoren, insbesondere jene der sozialen Dimension, nur sehr schwer in Geldwerten ausdrücken lassen.

Mithilfe der multikriteriellen Entscheidungsanalyse wurden in den letzten 10 Jahren in der Schweiz, aber auch in Europa und in China zahlreiche, sehr anspruchsvolle Nachhaltigkeitsbeurteilungen im Energiebereich durchgeführt (Roth et al. 2009; Schenler et al. 2009; Volkart et al. 2017). Dank der Vielfältigkeit und der Breite dieser Studien ist der Schluss zulässig, dass die multikriterielle Entscheidungsanalyse und die in Abbildung 9 dargestellten Indikatoren eine zweckmässige methodische Basis für vergleichende Beurteilungen möglicher Antworten auf unterschiedlichste Fragestellungen im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit des Energiesystems bilden.

Methodische Ansätze im NFP «Energie»

Die Ausschreibung des NFP 70 hatte die Auflage formuliert, dass bei Verbundprojekten im Sinne einer Querschnittsaufgabe die ökologischen, ökonomischen und sozialen Vor- und Nachteile der einzelnen Wertschöpfungsketten quantitativ auszuweisen sind, wobei bewährte Analyse- und Bewertungsmethoden zum Zuge kommen sollen. Gut die Hälfte der insgesamt 15 Verbundprojekte sind dieser Auflage mit einem eigenständigen Subprojekt zum Thema Nachhaltigkeit nachgekommen. Die anderen haben die entsprechenden Darlegungen in den wissenschaftlichen Schlussbericht integriert. Alle Forschenden zielten auf eine vergleichende Analyse der in ihrem Verbundprojekt entwickelten Technologien mit herkömmlichen Konzepten. Dazu verwendeten sie verschiedene methodische Ansätze:

● Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbeurteilung mittels einer Nutzwertanalyse unter Einbezug der drei Dimensionen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft erfolgte in den Verbundprojekten «Die Zukunft der Schweizer Wasserkraft»⁵¹, «Erneuerbare Energieträger zur Stromerzeugung»⁵² und «Wärmenutzung durch Sorptionstechnologie»⁵³.

● Zwei Verbundprojekte verwendeten Lebenszyklusanalysen (LCA): im Verbundprojekt ««SwiSS» Halbleiterbasierter SiC-Trafo»⁵⁴ für den ganzen Transformator anhand einer Liste von 19 umweltrelevanten Indikatoren, im Verbundprojekt «Photovoltaik der nächsten Generation»⁵⁵ für die soziale Dimension der Prozessschritte «Rohstoffbeschaffung» und «Zusammenbau» der neuen Perowskit-Tandem-Solarzelle sowie für die ökologische Dimension der neuen Solarzelle und deren Integration ins Netz. Im letztgenannten Verbundprojekt wurden die LCA durch Wirtschaftlichkeitsanalysen ergänzt.

● Bei den Verbundprojekten «Abfallmanagement als Beitrag zur Energiewende»⁵⁶ und «Energiearmer Beton»⁵⁷ ist die Nachhaltigkeit Programm und entsprechend omnipräsent in allen Subprojekten. In methodischer Hinsicht stehen für die Nachhaltigkeitsbeurteilung der entwickelten Produkte und Strategien Lebenszyklusanalysen (LCA) im Vordergrund. Im Verbundprojekt zum Abfallmanagement wurden sie durch Analysen der Lebenszykluskosten und der Transformationspfade ergänzt.

● In den übrigen Verbundprojekten wurde die Nachhaltigkeit der entwickelten Technologien nur sehr punktuell, wenig systematisch und mehrheitlich qualitativ abgehandelt.

⁵¹ [Nachhaltigkeit der Wasserkraft]

⁵² [Nachhaltigkeit der Methanisierung]

⁵³ [Nachhaltigkeit von Adsorptionswärmepumpen]

⁵⁴ [SiC-Festkörpertransformatoren im Stromnetz]

⁵⁵ [Nachhaltigkeit der PV-Systeme]

⁵⁶ [Abfallmanagement als Beitrag zur Energiewende]

⁵⁷ [Energiearmer Beton]

Nachhaltigkeitsbeurteilungen im NFP «Energie»

In Bezug auf die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbeurteilungen stechen die folgenden sechs Aussagen hervor:

● Adsorptionswärmepumpen schneiden bezüglich der integralen Nachhaltigkeit sowohl für den Einsatz bei einem einzelnen Gebäude als auch für ein dezentrales Multi-Energie-System (DMES) deutlich besser ab als herkömmliche Wärmepumpen mit Kompressoren.⁵⁸

● Wasserkraft gilt generell als nachhaltig. Selbst eine negative Wirtschaftlichkeit und die unbestritten nachteiligen Umweltauswirkungen werden von der Summe der übrigen Indikatoren deutlich kompensiert.⁵⁹

● Bei der Methanisierung von CO₂ aus der Zementproduktion erweist sich von den drei untersuchten Anwendungen «Methan in Gasnetz», «Gebäudeheizung» und «Wasserstoff für Fahrzeuge» lediglich letztere nachhaltiger als die heutigen Lösungen, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass für die Elektrolyse zu 100 Prozent Überschussstrom aus erneuerbaren Energien verwendet werden können. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit schneiden alle drei Pfade im Vergleich zu fossilem Methan kombiniert mit CO₂-Zertifikaten deutlich schlechter ab.⁶⁰

● Die Anwendung der neuen Perowskit-Tandem-Solarzelle mit Heteroübergängen für gebäudeintegrierte Solarmodule verfügt über grosses Potenzial in Bezug auf die integrale Nachhaltigkeit. Um dieses zu realisieren, sind weitere Anstrengungen in Bezug auf die Arbeitsbedingungen, insbesondere in China, und die Dauerhaftigkeit beziehungsweise den Leistungsabfall über die Zeit nötig.⁶¹

⁵⁸ [Nachhaltigkeit von Adsorptionswärmepumpen]

⁵⁹ [Nachhaltigkeit der Wasserkraft]

⁶⁰ [Nachhaltigkeit der Methanisierung]

⁶¹ [Nachhaltigkeit der PV-Systeme]

● Die Nachhaltigkeit des halbleiterbasierten SiC-Festkörpertransformators ist bedeutend schlechter als jene herkömmlicher Transformatoren. Zudem ist er nicht geeignet für den Einsatz im Stromverteilnetz auf der tiefsten Verteilebene (Netzebene 6), wie dies ursprünglich vorgesehen war. Sein grosser Vorteil liegt darin, dass er ohne Netzverstärkung eine deutlich höhere Einspeisung von intermittierendem Solar- und Windstrom erlaubt.⁶²

● Die Herstellung von Flugbenzin aus Biomasse könnte in der Schweiz nachhaltig gestaltet werden. In wirtschaftlicher Hinsicht liegt sie jedoch weitab von fossilem Kerosin.⁶³

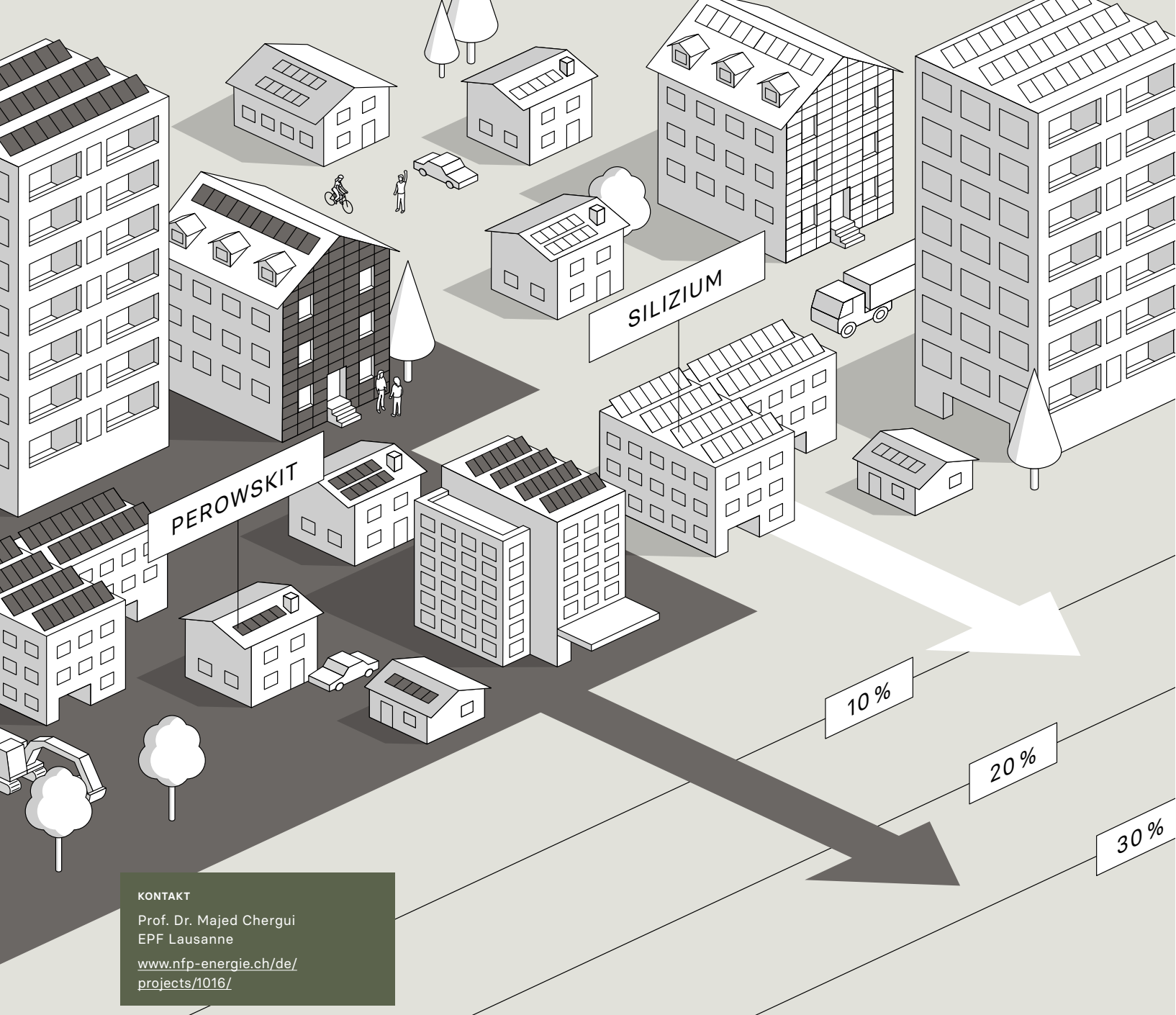
Im Rahmen des NFP «Energie» wurden keine vollständigen und detaillierten multikriteriellen Entscheidungsanalysen durchgeführt, da die meisten Forschungen noch einen relativ niedrigen technologischen Reifegrad aufweisen. Zahlreiche wichtige Indikatoren sind deshalb noch nicht bekannt oder können erst sehr vage geschätzt werden. Es ist zudem offensichtlich, dass keine Technologie alle Nachhaltigkeitskriterien umfassend erfüllt, da jede Technologie spezifische Vor- und Nachteile aufweist. Sehr wahrscheinlich wird dies auch nie der Fall sein. Bei jedem Entscheid für eine bestimmte Technologie ist ein gewisser Ausgleich («Trade-off») deshalb unvermeidbar.

Notwendige Interessenabwägung

In der Regel sind bei allen Energieinfrastrukturvorhaben – ob gross oder klein, in der Stadt oder auf dem Land, erneuerbar oder nicht – vielfältige Ansprüche und Interessenlagen zu berücksichtigen. Oftmals ergeben sich dabei Zielkonflikte mit anderen Politikbereichen wie der Umwelt, der Landwirtschaft, der Zivilluftfahrt oder der Landesverteidigung. Zahlreiche dieser Konflikte lassen sich auf der Basis eines klaren Planungsprozesses identifizieren und einer Lösung zuführen. Manche sind jedoch grundsätzlicher Natur, weil es sich

⁶² [SiC-Festkörpertransformatoren im Stromnetz]

⁶³ [Nachhaltigkeit von Biotreibstoffen]



KONTAKT

Prof. Dr. Majed Chergui
EPF Lausanne
www.nfp-energie.ch/de/projects/1016/

PROJEKT #Photovoltaik #Energieeffizienz #Gebäude

«Perowskite für die Solarenergie»

Seit einigen Jahren gelten Perowskitmineralien als Zukunftshoffnung für Solarzellen. Aufgrund ihrer Zusammensetzung und Gitterstruktur verfügen sie über bemerkenswerte Eigenschaften wie eine gute Lichtaufnahme, eine gute Ladungsträgermobilität, die für die Gewinnung von Strom zentral sind. Zudem sind sie einfach zu verarbeiten und eignen sich zur chemischen Synthese. Dem Forschungsteam gelang es, dank einer verbesserten Synthese den Wirkungsgrad von

Photovoltaikzellen auf der Basis von Perowskiten auf einen – inzwischen wieder überbotenen – Rekordwert von 21 Prozent zu erhöhen. Auch die Stabilität und damit das Langzeitverhalten der Zellen konnte das Team verbessern. Schliesslich deckte es neue Verhaltensweisen von Ladungen auf, die den Weg für neuartige Anwendungen von Perowskiten für lichtemittierende Bausteine ebnen könnten.

um bundes- oder verfassungsrechtlich gleichwertige Anliegen handelt. Das von der Stimmbevölkerung gutgeheissene Energiegesetz spricht gewissen Energieanlagen zur Nutzung erneuerbarer Energie nationales Interesse zu, das anderen gesetzlich geschützten nationalen Interessen (z. B. Landschaften von nationaler Bedeutung) gleichgesetzt ist. Konkret ist aber im Einzelfall zu entscheiden, welches Interesse überwiegt (Bundesrat 2012). Tangiert ein solches Energieprojekt ein anderes nationales Interesse, so sind beide vorerst gleichberechtigt und die konkurrierenden Interessen sind gemäss Raumplanungsgesetz (RPG) zu ermitteln, zu bewerten und sorgfältig gegeneinander abzuwägen.⁶⁴

Grundlage dieser Interessensabwägung ist eine integrale Nachhaltigkeitsbewertung, die die drei Dimensionen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft ausgewogen berücksichtigt, wobei die neue Lösung – oder besser verschiedene Alternativen – mit dem heutigen Zustand zu vergleichen ist. Wie viele und welche Indikatoren zu berücksichtigen und wie diese zu gewichten sind, hängt stark vom konkreten Fall ab. Entscheidend ist, dass die Wahl und die Quantifizierung der Indikatoren von Expertinnen und Experten vorgenommen werden. Die Schlussfolgerungen sind jedoch in einem Stakeholder-Dialog zu erarbeiten. Dies bedingt, dass alle relevanten Stakeholder bereits in den frühen Phasen dieses Prozesses einbezogen werden.

3.6 Der Faktor Mensch

Um die Transformation des Energiesystems voranzubringen, bedarf es nicht nur Technologien, die die Nachhaltigkeitskriterien erfüllen. Notwendig sind auch Entscheidungen der einzelnen Menschen in ihren verschiedenen Rollen. Das NFP «Energie» hat sich intensiv mit den gesellschaftlichen Aspekten auseinandergesetzt, die das Handeln in Richtung eines nachhaltigen Energiesystems lenken.

Vom Wissen über das Wollen zum Handeln

Soll eine Person in einer bestimmten Weise handeln, muss sie dafür motiviert sein sowie über die Gelegenheit und die Fähigkeiten dazu verfügen. Sind diese Voraussetzungen gegeben, stehen die Chancen gut, dass gute Absicht auch in die Tat umgesetzt wird. Motivation, Gelegenheiten und Fähigkeiten können vereinfacht mit den Stichworten «Wissen», «Wollen» und «Handeln» angesprochen werden.

Damit die Menschen ihren Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz oder zur Suffizienz (vgl. S. 66) leisten können, müssen sie über Wissen von den mit dem Energieverbrauch zusammenhängenden Problemen verfügen. In der Bevölkerung bestehen jedoch zum Teil erhebliche Wissensdefizite.⁶⁵ Weniger als die Hälfte der Schweizer Bevölkerung weiss beispielsweise, wie hoch ihre Stromrechnung ist (Filippini et al. 2018). Ein überraschend hoher Anteil von 20 Prozent der Bevölkerung glaubt auch nicht, dass die wissenschaftlich belegte, globale Klimaerwärmung tatsächlich stattfindet (vgl. S. 68).⁶⁶ Sollen in einem solchen Umfeld Fortschritte in Richtung eines nachhaltigen Energiesystems erreicht werden, müssen Informations- und Sensibilisierungskampagnen gezielt darauf Rücksicht nehmen, wo sich die Zielgruppen im Kontinuum zwischen «Wissen», «Wollen» und «Handeln» befinden (vgl. S. 27).⁶⁷ Auch muss überzeugend kommuniziert werden, dass ein wesentlicher Teil des Energieeffizienzpotenzials ohne Verzicht und ohne Komforteinbussen realisiert werden kann: Mehr Energieeffizienz bedeutet nicht weniger Komfort!⁶⁸

Soziale Praktiken und Normen bestimmen individuelles Wollen und Handeln massgeblich. Dies unterstreichen mehrere Projekte des NFP «Energie». Als erfolgversprechend erweist es sich beispielsweise, Verhaltensveränderung in Praktiken bestehender Gemeinschaften wie Sportklubs und

⁶⁵ [Akzeptanz erneuerbarer Energie]

⁶⁶ [Sanfte Anreize und Energieverbrauch]

⁶⁷ [Nachhaltige Lebensstile und Energieverbrauch]

⁶⁸ [Effizienter Energieverbrauch in Privathaushalten]

⁶⁴ Art 3. Raumplanungsverordnung (RPV)

Quartiervereine einzubeziehen.⁶⁹ So lässt sich etwa feststellen, dass Menschen Mitfahrgelegenheiten nicht nur nutzen, weil sie damit einen Beitrag zu einer nachhaltigeren Form der Mobilität leisten können. Mindestens ebenso wichtig ist es, dass Car-Pooling vom Umfeld der Menschen als attraktives Verkehrsmittel akzeptiert wird.⁷⁰ Für das «Wollen» nehmen daher Vorbilder in allen gesellschaftlichen Gruppen eine wichtige Rolle ein.⁷¹ Ein Einzelphänomen zu einem breiten gesellschaftlichen Trend zu entwickeln, lässt sich demnach durch geeignete Vorbilder unterstützen. Als Multiplikatorinnen und Multiplikatoren erhöhen sie die Glaubwürdigkeit, helfen, Vorbehalte abzubauen und soziale Normen zu transportieren.

Vielen Menschen fehlt auch Handlungswissen für energieeffizientes Verhalten. Dabei hängt individuelle Bereitschaft, das Verhalten zu ändern, massgeblich davon ab, wie gross die erforderliche Umstellung ist und welche Lebensbereiche diese betrifft. Die Akzeptanz energieeffizienter Ansätze und Produkte wächst, wenn die Menschen damit eigene Erfahrungen machen können. Beispielsweise akzeptieren Menschen aus Kantonen, die über viele Kleinwasserkraftwerke verfügen, diese Technologie auch besonders oft (Balthasar & Strotz 2017).⁷²

Energie- und Umweltthemen haben bei vielen Schweizerinnen und Schweizern keine hohe Priorität. Diese kommt vielmehr Themen zu, die mit der persönlichen Lebensqualität im Zusammenhang stehen, wie Gesundheit, Wohlbefinden, Komfort, Konnektivität, Bequemlichkeit oder Sicherheit.⁷² Der Effekt einer Energie-Kampagne ist daher umso grösser, je stärker ein energiebewusstes Verhalten mit einem Zusatznutzen für die persönliche Lebensqualität verbunden werden kann. Auf diese Weise rückt ein positiv besetzter Aspekt ins Zentrum.

Suffizienz – die freiwillige Einschränkung

Suffizienz ist eine wichtige Strategie hin zu einem nachhaltigeren Energiesystem. Die darunter verstandene Reduktion der Energienutzung kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen, etwa durch (Kaufmann-Hayoz et al. 2001, 2006):

- erzwungenen Verzicht durch Gesetze, z. B. das Verbot der Glühbirnen;
- nahegelegten Verzicht durch Preisgestaltung, z. B. Benzinbesteuerung;
- nahegelegten Verzicht durch infrastrukturelle Begebenheiten («Nudging»), z. B. dadurch, dass mit dem Aufzug das Ziel langsamer erreicht wird als durch Treppennutzung (Thaler & Sunstein 2009);
- selbstaufgelegten Verzicht durch Selbstverpflichtung für sich selbst oder in Gemeinschaft, z. B. schlägt ein Verein vor, dass die Mitglieder mit dem Fahrrad anreisen;
- Einschränkung des Gebrauchs aus moralischen Gründen, z. B. weil die Einsicht vorhanden ist, dass die Ressourcen nicht für alle reichen könnten;
- Einschränkung des Gebrauchs aus «gesundheitlichen Gründen» für sich selbst und für andere, z. B. Fahrrad fahren, weil es fit macht, Spass bringt und die Schadstoffbelastung für alle reduziert (Schweizer-Ries 2009).

Bis auf den Verzicht wegen Gesetz sind alle Massnahmen freiwilliger Natur. Im Kern geht es beim Suffizienzansatz um «das rechte Mass», das gelingende Leben und Glück nicht auf Kosten von anderen (Küstenmacher & Seiwert 2004). Das Grundprinzip ist, die aktive Entscheidung von Menschen, Organisationen oder Staaten zu prüfen, was sie in Bezug auf Flächenbedarf, Raumtemperatur, Warmwasser, Beleuchtungsintensität usw. wirklich brauchen, und die Nutzung entsprechend umzusetzen.

Suffizienz verlangt nicht den Verzicht auf das Notwendige, aber den freiwilligen Verzicht auf das Nichtnotwendige (Stengel 2011). Dies hat keine wirklichen Einschränkungen in Bezug auf Dienstleistungen zur Folge, jedoch in Bezug auf die Ressourcennutzung. Ressourcen, die ohnehin anfallen, können ruhig genutzt werden, beispielsweise Überschüsse aus der Bereitstellung erneuerbarer Energie. Gefordert ist ein intelligentes Nutzungsverhalten, Energie etwa dann zu nutzen, wenn sie anfällt oder überfällig vorhanden ist (Load-Shifting) (Lange 2019). Der Suffizienzansatz wirkt auch im Bereich der Effizienz, indem verhindert wird, dass technologische Effizienzverbesserungen durch Mehrnutzung ausgeglichen oder sogar konterkariert werden (Rebound-Effekt).

Die Suffizienzpolitik verfolgt vier Ansätze: befähigen (enable, strukturell), ermutigen (encourage, informativ und appellativ), engagieren (engage, mittels Partizipation und Governance) sowie beispielgebend (exemplify, positive Beispiele und Wettbewerbe schaffen) (Linz 2017; Schneidewind & Zahrnt 2013; Sachs 1993). Diese Ansätze werden nicht als «entweder oder» betrachtet, sondern als «sowohl als auch». Es braucht also alle, um eine umfassende Wirksamkeit zu erreichen. Konkret können Anregungen in der Planung – etwa im Mobilitätsbereich – dazu beitragen, die Suffizienz zu fördern, beispielsweise indem Aktivitäten wie Arbeiten, Einkaufen oder Erholen in der näheren Umgebung begünstigt werden. Andere Möglichkeiten bieten sich beim Aufzeigen von Vorteilen eines reduzierten Konsums.

Durchbrechen von Automatismen

Der grösste Teil des Alltagverhaltens folgt eingespielten Routinen. Derartige Automatismen zu ändern, gilt als schwierig. Mehrere Forschungsprojekte betonen deshalb, dass die Kompatibilität eines erwünschten, umweltgerechten Verhaltens mit den Alltagsgewohnheiten der Menschen zu den wichtigsten Erfolgsfaktoren von Kampagnen

und Aktivitäten gehört.^{73/74/75} Als mögliche Ansatzpunkte für das Durchbrechen unerwünschter Automatismen können einschneidende Lebensereignisse wie Heirat, das erste Kind oder der Umzug in eine neue Wohnung dienen. Es gilt, die Menschen aber auch entsprechend der Phase anzusprechen, in der sie sich bezüglich ihrer Entscheidungen («Wissen», «Können», «Handeln») befinden (vgl. S. 27).⁷⁶

Nicht auf den Energiebereich spezialisierte Organisationen leisten Pionierarbeit, indem sie originelle Methoden ausprobieren, um die Energiewende zu unterstützen. Der Hauseigentümerverband Schweiz (HEV) hat interaktive Workshops durchgeführt, um ältere Hausbesitzende dazu anzuregen, ihre künftige Lebens- und Wohnsituation besser zu planen. Durch eine bauliche Verdichtung, einen Umzug in eine kleinere Wohnung oder eine energetische Sanierung liesse sich in Haushalten älterer Menschen potenziell viel Energie sparen. Mit diesen Strategien liessen sich bis zu 4 Prozent der jährlichen Einsparziele der Energiestrategie 2050 im Bereich «Raumwärme» erreichen.⁷⁷ Auf ganz anderer Ebene wurde der Verein Terragir aktiv: Er lancierte einen Wettbewerb, bei dem es darum ging, neue Jeans möglichst lange zu tragen, ohne sie zu waschen. Diese Aktion ermöglichte es den Teilnehmenden, ihre Waschgewohnheiten und damit auch ihren Stromverbrauch zu hinterfragen. Sie zeigte auch, dass soziales Lernen in Form von Wettbewerben oder Vorführungen helfen kann, eingespielte Praktiken zu verändern (Sahakian & Bertho B. 2018).

⁶⁹ [Förderung von energiesparendem Verhalten in Städten]
⁷⁰ [Kollaborativer Konsum: Hype oder Versprechen?]
⁷¹ [Nachhaltige Lebensstile und Energieverbrauch]
⁷² [Akzeptanz erneuerbarer Energie]

⁷³ [Kollaborativer Konsum: Hype oder Versprechen?]
⁷⁴ [Wege zu einem gesellschaftlichen Konsens]
⁷⁵ [Effizienter Energieverbrauch in Privathaushalten]
⁷⁶ [Nachhaltige Lebensstile und Energieverbrauch]
⁷⁷ [Energiesparpotenziale in Haushalten von älteren Menschen]

Hoher Akzeptanzbedarf im schweizerischen Politiksystem⁷⁸

Aufgrund des Föderalismus und der direkten Demokratie ist es in der Schweiz besonders wichtig, dass energierelevante Ziele und Massnahmen breit akzeptiert werden. Die Möglichkeit der Schweizer Bevölkerung, das Referendum zu einem Parlamentsentscheid zu ergreifen, erlaubt es ihr beispielsweise, Abstimmungen zu erzwingen und je nach Ergebnis ein Veto gegen den Parlamentsentscheid einzulegen. Dies gilt nicht nur in Bezug auf die energiepolitische Grundausrichtung, sondern auch hinsichtlich des Vollzugs der Energiepolitik auf nationaler, kantonaler oder kommunaler Ebene. Für den Abstimmungserfolg bedarf es der Zustimmung wichtiger Parteien und Interessenverbände. Nur wenn diese die Anliegen der Behörden unterstützen, finden sich Mehrheiten bei den Stimmbürgerinnen und Stimmbürgern.

Akzeptanz lässt sich nicht erzwingen, sondern muss erarbeitet werden. Glaubwürdige und transparente Information bildet das Fundament dazu. Darauf aufbauend müssen Bevölkerung und Wirtschaft sowohl den Gesamtnutzen eines Vorhabens als auch individuelle Vorteile erkennen können. So lässt sich zeigen, dass der Ausbau erneuerbarer Energien dort vorankommt, wo die lokale Bevölkerung wirtschaftlich davon profitiert und diesen Vorteil auch als solchen wahrnimmt (Zoellner et al. 2012). Am meisten Erfolg versprechen Vorgehensweisen, die im lokalen und persönlichen Umfeld der Menschen ansetzen. Nicht zuletzt ist Akzeptanz eine Sache des Vertrauens, das es aufzubauen gilt. Es stellt sich aber auch die Frage, welche Ausprägung von Akzeptanz es zu erreichen gilt. Reicht passive Zustimmung oder ist aktive Unterstützung gefragt? Passive Akzeptanz führt zu Zustimmung, aktive Akzeptanz bedeutet Unterstützung. Manchmal reicht es, wenn die relevanten Akteure gegen ein Vorhaben nicht opponieren. Manchmal ist es nötig, dass sich die Beteiligten aktiv in die Gestaltung einbringen oder sich explizit für ein Projekt oder eine Massnahme aussprechen.

Die direkte Demokratie ist wesentlich dafür verantwortlich, dass es im Schweizer politischen System nur mit «übergrossen Mehrheiten» (Linder et al. 2017) vorwärtsgeht. Ein politisches Steuerungsinstrument wie eine Energieabgabe kann nur eingeführt, eine neue Energieanlage nur realisiert werden, wenn eine breite politische Mehrheit diese Anliegen unterstützt und sich keine starke Opposition formiert. Zwar variieren die Akzeptanzanforderungen je nach Vorhaben und je nach Situation, sie sind aber generell hoch.⁷⁹ Zur Planung und Gestaltung eines energiepolitischen Vorhabens gehört es deshalb, die relevanten Akteure und ihre Rolle im konkreten Prozess zu identifizieren und einzubeziehen. Gelingt dies, kann möglicherweise breite Akzeptanz über den Prozess geschaffen und die Wahrscheinlichkeit von Opposition reduziert werden.

Das politische System der Schweiz unterstützt zwar im Allgemeinen keine grossen und umfassenden Reformen. Einmal geschlossene Kompromisse geniessen jedoch einen hohen Rückhalt und schliessen die Chance ein, dass auch der nächste Schritt in Angriff genommen werden kann. Ein breit abgestützter Kompromiss hat bessere Erfolgschancen, weil er typischerweise viele der erwähnten Faktoren integriert, die die Akzeptanz eines Vorhabens erhöhen. Ein Kompromiss dürfte aber auch zentral sein, um eine Mehrheit der Bürgerinnen und Bürger trotz starker Aversion gegen anfallende Kosten für ein Vorhaben zu gewinnen.⁸⁰ Die Langfristigkeit der von der Stimmbürgerin beschlossenen Energiestrategie 2050 ist somit ein Erfolgsfaktor, dem bei der Konkretisierung der Umsetzung Rechnung getragen werden muss. So sind langfristig stabile Rahmenbedingungen ausschlaggebend für die Innovationsbereitschaft der Wirtschaft. Die Bevölkerung zeigt sich zudem in der Regel eher bereit, Veränderungen zuzustimmen, die dazu beitragen, ein langfristiges Ziel zu erreichen, das politisch akzeptiert ist. Dies belegen Beispiele aus der Verkehrs-, der Migrations-, der Europa- und auch der Energiepolitik.

⁷⁸ Synthese zum Themenschwerpunkt «Akzeptanz» des NFP «Energie», SNF

⁷⁹ [Akzeptanz erneuerbarer Energie]

⁸⁰ [Modernisierung der Abfallwirtschaft]

KONTAKT

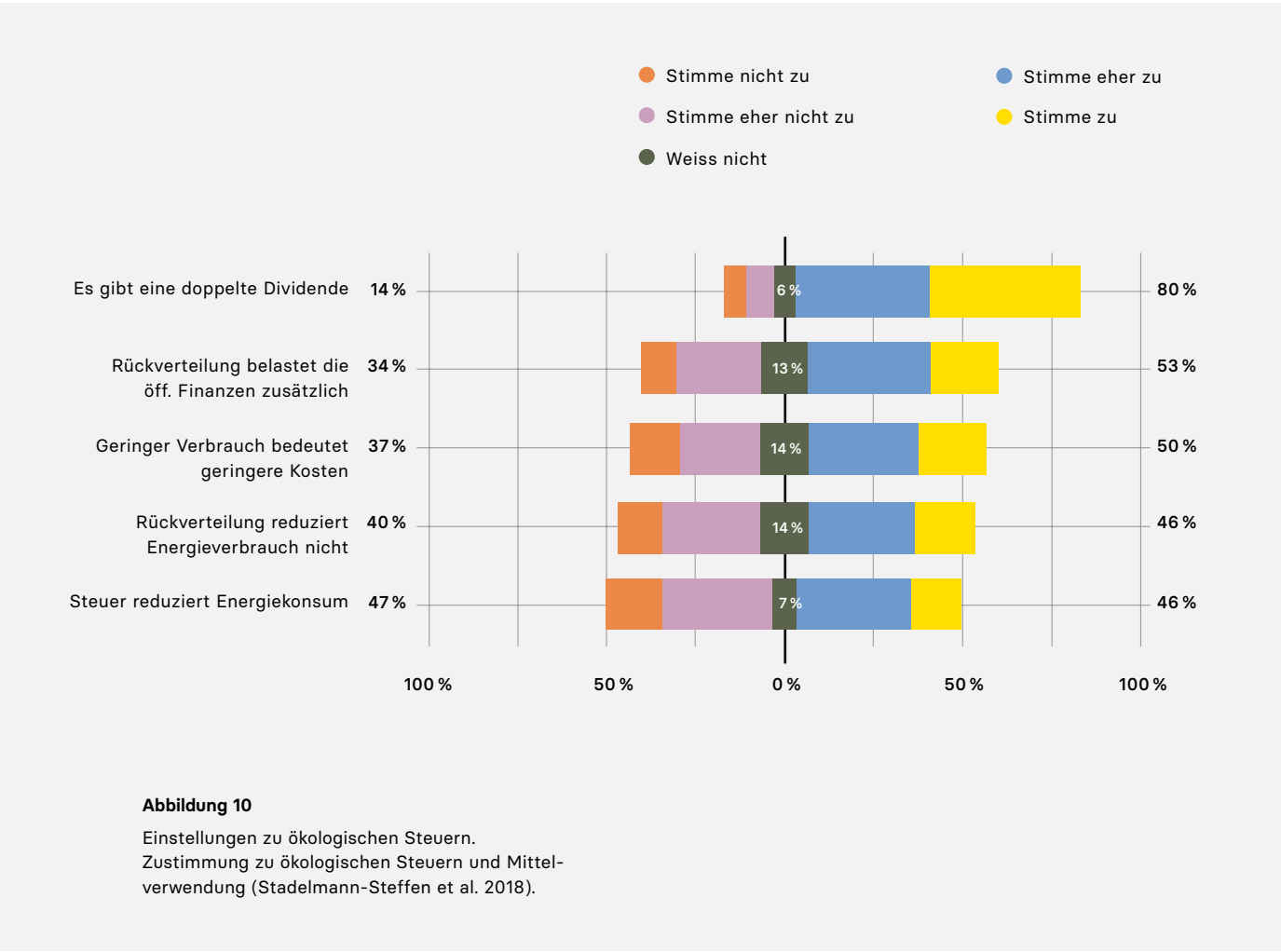
Prof. Dr. Ulf Liebe
Universität Bern
University of Warwick
www.nfp-energie.ch/de/projects/943/

PROJEKT #Anreize #Akzeptanz #Verhalten

«Sanfte Anreize und Energieverbrauch»

Nicht nur Geld, sondern auch nicht materielle Anregungen wie soziale Normen, symbolische Belohnungen oder Veränderungen von Standardverhalten – sogenannte sanfte Anreize – vermögen das Energiesparverhalten zu beeinflussen. Das Forschungsteam kombinierte Feldversuche mit Längsschnittbefragungen und Interventionsstudien, um herauszufinden, welchen Einfluss die sanften Anreize im realen Leben haben. Insbesondere wurden die Energiebezugsdaten von über 200 000 Haushalten, über 7000 Klein- und Mittelbetrieben (KMU) und 400 energieintensiven Unternehmen ausgewertet. Diesen wurde von ihrem Stromanbieter mitgeteilt, dass der gelieferte Strom künftig standardmässig aus erneuerbaren Quellen stammt. Wer dieses

Standardpaket nicht wollte, hatte die Möglichkeit, zu konventionellem Strom zu wechseln. Die Einführung dieses Standards zeigte einen massiven Effekt: Bezogen zuvor weit über 90 Prozent aller Haushalte und Unternehmen konventionellen Strom, akzeptierten nun rund 80 Prozent den neuen Standard und bezogen Ökostrom. Die Akzeptanz des neuen Standards war nur geringfügig vom Stromverbrauch abhängig und sehr stabil über die Zeit. Weniger als 5 Prozent der Kundinnen und Kunden wechselten innerhalb von vier Jahren wieder zu konventionellem Strom. Für die Forschenden ist klar: **Umweltschonendes Verhalten als Standard festzulegen, erweist sich im Alltag als erfolgreicher Ansatz.**



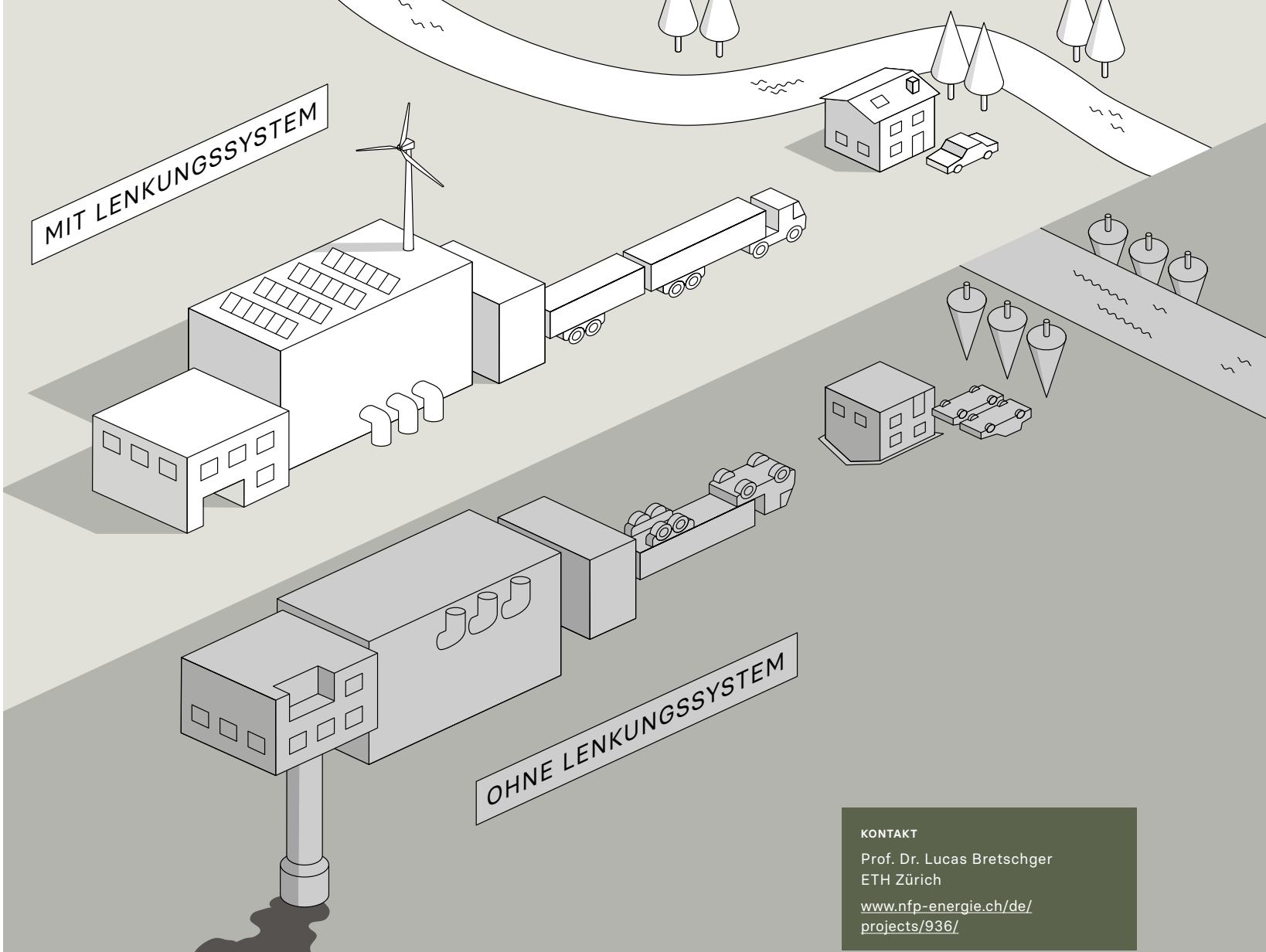
Konsumentinnen und Konsumenten an der Urne

Menschen in der Schweiz verwenden in den Rollen als Konsumierende und als Abstimmende unterschiedliche Denkmuster. Individuen evaluieren energiepolitische Massnahmen anhand unterschiedlicher Kriterien, je nachdem, ob sie deren Effekt auf ihr persönliches Leben einschätzen oder ob sie sich in ihrer Rolle als Stimmbürgerin und Stimmbürger darüber Gedanken machen.⁸¹ Die beiden Rollen sind natürlich nicht strikt voneinander getrennt. Entscheiden die Individuen über

⁸¹ [Wege zum gesellschaftlichen Konsens]

eine energiepolitische Abstimmung, dürfte es durchaus von Bedeutung sein, inwiefern die Vorlage sie als Konsumentin oder Konsument anspricht. Die Formel ist einfach: Je höher die Kosten, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie als Stimmbürgerin oder Stimmbürger die Abstimmungsvorlage gutheissen. Interessanterweise zeigt sich dieses Muster sowohl bei Personen, die politisch eher rechts stehen und der Energietransformation keinen grossen Stellenwert zumessen, als auch bei linksgrünen Wählerinnen und Wählern.⁸²

⁸² [Akzeptanz erneuerbarer Energie]



PROJEKT #Finanzierung #Lenkung/Förderung #Wirtschaft

«Ökologische Steuerreform und endogenes Wachstum»

Um die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen und den Ausstoss von Treibhausgasen massiv zu reduzieren, kann die bisherige Förderpolitik durch ein Lenkungssystem ergänzt oder abgelöst werden. Im Projekt «Ökologische Steuerreform und endogenes Wachstum» untersuchten die Forschenden den Einfluss eines Lenkungssystems auf die Wirtschaftskraft der Schweiz. Dazu berechneten sie die Effekte mithilfe eines auf Schweizer Verhältnisse geeichten Computermodells. Das Forschungsteam kommt zum Schluss, dass die Schweiz auch wirtschaftlich von einer ökologischen Steuerreform profitieren würde. **Um die Belastung durch die Abgaben auf Strom und Treibstoffe zu vermindern, würden Firmen mehr**

Mittel in Innovationen und effizientere Abläufe investieren. Diese würden das Wachstum der Wirtschaft anregen und so die höheren Produktionskosten durch die Steuerabgaben wettmachen. Politisch ist erwünscht, dass die Steuern in einer geeigneten und gerechten Form an die verschiedenen sozialen Gruppen zurückfliessen; dazu hat das Forschungsteam mit dem Modell verschiedene Szenarien berechnet: Während der Umstellung auf ein Lenkungssystem wäre das Konsumwachstum geringfügig tiefer als bei einer Entwicklung ohne Lenkung. Die gesteigerte Lebensqualität dank einer saubereren Umwelt bleibt in dieser kostenseitigen Betrachtung allerdings ausgeklammert.

Sehr wesentlich für die Beurteilung künftiger Energiepolitik sind der erwartete Nutzen einer Massnahme, ihre Machbarkeit und Angemessenheit für verschiedene Akteure. Die Bürgerinnen und Bürger sehen gerade diese wichtigen Kriterien bei vielen zur Debatte stehenden Massnahmen nicht erfüllt. Dies hängt oft damit zusammen, dass ihnen das Wissen über ihren eigenen Energieverbrauch fehlt. Darüber hinaus kennen sie aber auch die Wirkungsweisen vieler Massnahmen, über die sie entscheiden, nur ungenügend. So sind sie beispielsweise mehrheitlich und fälschlicherweise der Ansicht, dass eine ökologische Steuer den Energieverbrauch nicht senkt, wenn die Steuereinnahmen an die Bevölkerung rückverteilt werden (vgl. Abb. 10). Vor diesem Hintergrund ist es nicht erstaunlich, dass energiepolitische Vorlagen an der Urne oft scheitern: Warum soll man eine Massnahme an der Urne annehmen, wenn sie Kosten verursacht und man nicht an ihre Wirkung glaubt?

Ausgestaltung der Energieanlagen und des Entscheidungsprozesses – wichtige Basis der Akzeptanz

Eine Mehrheit der Schweizer Bevölkerung zieht erneuerbare Energien gegenüber fossiler oder nuklearer Energie vor, wie verschiedene Projekte des NFP «Energie», aber auch die deutliche Zustimmung des Souveräns zum neuen Energiegesetz zeigen. Dennoch regt sich oft Widerstand bei konkreten Projekten für erneuerbare Energien wie Windenergie- oder Kleinwasserkraftanlagen. Diese lokale Opposition wurde lange mit dem sogenannten «Not in my backyard»-(NIMBY-) Phänomen erklärt: Bürgerinnen und Bürger mögen zwar beispielsweise Windenergie und Windräder im Allgemeinen, doch sie wollen aus eigennützigen Gründen kein Windrad in der Nähe. Die Gründe für lokale Opposition sind jedoch weit vielfältiger. So ist ein Teil der Bevölkerung skeptisch gegenüber den mit erneuerbaren Energien verbundenen

technischen Infrastrukturen wie Windrädern, Geothermieranlagen oder Hochspannungsleitungen – ganz unabhängig davon, wo sie stehen.⁸³

Das Projekt «Energiewälder» zeigt aber auch, dass die Akzeptanz von Infrastrukturen für eine erneuerbare Energieversorgung stark mit dem Landschaftstyp, der Kombination von Energieanlagen und mit der bereits bestehenden Nutzung eines Raumes zusammenhängt. Je unberührter eine Landschaft wahrgenommen wird, umso grösser ist die Ablehnung von Energieinfrastrukturen. Am besten beurteilt wird eine reine, aber mässige Solarenergienutzung auf Dächern und Fassaden, besser sogar als eine Landschaft ohne Energieinfrastruktur (vgl. S. 44).⁸⁴ Dieses Ergebnis stimmt mit Erkenntnissen zur Akzeptanz von Überlandstromleitungen überein. Werden bestehende Freileitungen mit dem Ziel der Kapazitätssteigerung umgebaut, werden diese besser akzeptiert als Neubauten.⁸⁵

Es sind meist die «harten» technischen Komponenten wie Grösse, Standort, Eingriff in die Natur, die den Hauptgrund für eine Ablehnung des Baus neuer Anlagen darstellen. Entsprechend ist die konkrete Ausgestaltung eines Projekts entscheidend, ob Bürgerinnen und Bürger lokale Infrastrukturprojekte unterstützen. Die höchste Unterstützung geniessen jene Projekte, die an bereits belasteten, vom Menschen veränderten Standorten geplant sind, beispielsweise auf einem Militärgelände oder entlang einer vielbefahrenen Strasse (vgl. S. 44). Wohnzonen, Wald und Waldrand sowie Landwirtschaftszonen, die als Siedlungs-, Erholungs- und Naturräume dienen, sollen dagegen nicht weiter belastet werden. Anlagen – wenn sie schon gebaut werden – sollten zudem einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung leisten und die Einschnitte in die Natur sollten minimiert werden.

Neben dem Infrastrukturprojekt an sich ist auch der Mitbestimmungsprozess relevant: Im direktdemokratischen Kontext der Schweiz genügt die reine Information aus Sicht der Bevölkerung nicht. Einzig die echte Mitbestimmung, verbunden mit einer

⁸³ [Akzeptanz erneuerbarer Energie]

⁸⁴ [Energiewälder]

⁸⁵ [Hybride Freileitungen in der Schweiz]

Abstimmung, schafft Akzeptanz über den Prozess. Der Übergang vom informellen Mitbestimmungsprozess zum formellen Verfahren erweist sich allerdings als Herausforderung. Zudem muss sichergestellt sein, dass das in einer Abstimmung gemeinsam Bestimmte auch realisiert werden kann und nicht durch Beschwerderechte wieder infrage gestellt wird. Schliesslich bestätigt sich auch auf der lokalen Ebene die Wichtigkeit des Kostenfaktors.⁸⁶

3.7 Politische Steuerung – von den Zielvorgaben zur Umsetzung

Jedes Energieregime bedarf spezifischer Regulierungen (vgl. Kap. 2.4). Heute ist das schweizerische Energiesystem durch energieträgerspezifische Gesetzgebungen geregelt. Hinzu kommen nicht nur andere Bundesgesetzgebungen etwa aus der Raumentwicklungs- oder Umweltpolitik, die die Rahmenbedingungen für die Umsetzung der Energiepolitik massgeblich mitgestalten, sondern auch kantonale Regulierungen, insbesondere im Gebäudebereich. Schliesslich sind nebst dem Bund vor allem auch die Kantone und Gemeinden für die Umsetzung von Gesetzen und Verordnungen verantwortlich.

Um die Energietransformation zu realisieren, ist es notwendig, Massnahmen umzusetzen, Projekte durch- oder Technologien einzuführen. Politische Steuerung kann diese Entwicklungen anstossen, erleichtern und ermöglichen. Steuerungsinstrumente sind Massnahmen, die staatliche Akteure nutzen, um politische Ziele zu erreichen (Howlett 2005). Die Transformation verändert die Stellung der verschiedenen Akteure sowie die Zielrichtungen und Kräfte des Energiesystems. Entsprechend bedarf es auch regulatorischer Anpassungen.

⁸⁶ [Akzeptanz erneuerbarer Energie]

Anspruchsvolle Vorgaben für die Politik

Politisch sind die Ziele für die Transformation des Energiesystems in der Schweiz mit der Energiestrategie 2050 festgelegt. Mit der Zustimmung zum Energiegesetz und den damit verbundenen Gesetzesänderungen durch die Stimmbewölkerung wurden diese gesetzlich verankert. So strebt das Energiegesetz die Sicherstellung einer wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energiebereitstellung und -verteilung an, eine sparsame und effiziente Energienutzung sowie den Übergang hin zu einer Energieversorgung, die stärker auf der Nutzung erneuerbarer Energien abstützt. Den Ausgangspunkt der Transformation bildet der Ausstieg aus der Kernenergie, hinzugekommen sind die internationalen Verpflichtungen zum Klimaschutz. Die gemäss dem Übereinkommen von Paris notwendigen Emissionsreduktionen werden mit der derzeit laufenden Totalrevision des CO₂-Gesetzes voraussichtlich gesetzlich festgelegt. Sie skizzieren den Weg zum Ausstieg aus den fossilen Energieträgern. Ein nachhaltiges Energiesystem muss aber auch weitere Anforderungen (z.B. die Bezahlbarkeit) erfüllen, die nur zum Teil in der Energiestrategie 2050 beziehungsweise den darauf basierenden gesetzlichen Grundlagen verankert sind.

Vielfalt an Umsetzungsinstrumenten – von Verboten bis zu Anreizen

Die Auswahl an politischen Instrumenten ist sehr breit. Die stärkste Form sind Richtlinien und Verbote (regulative Instrumente), die das Akteurverhalten möglicherweise sehr spezifisch vorgeben oder einschränken. Auf der anderen Seite der Skala stehen Informationskampagnen, die darauf abzielen, politische Ziele über die Information und die Sensibilisierung von Akteuren und damit freiwillig zu erreichen. Eine dritte Gruppe von Steuerungsinstrumenten setzt auf Anreize. Angestrebte Verhaltensänderungen sollen über die

Belohnung von erwünschtem oder über die Bestrafung von unerwünschtem Verhalten erreicht werden. Typisches Beispiel für belohnende Anreize sind Subventionen, eine ökologische Steuer steht für einen bestrafenden Anreiz.

Wirksame politische Steuerung erfolgt in der Regel mit einer Kombination von Instrumenten. Das Projekt «Akzeptanz erneuerbarer Energie» hat auf den verschiedenen Ebenen des föderalen Systems Bedingungen identifiziert, die sich für die Förderung erneuerbarer Energien als vorteilhaft erweisen. Die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) des Bundes beispielsweise beeinflusst die Rentabilität von Projekten für erneuerbare Energien.⁸⁷ Gleichzeitig vergrössert sie den Spielraum sowohl für die qualitative Optimierung eines Projekts als auch für Kompromisslösungen. Daneben stellt sich auch die Frage, wie der Bund die Zielerreichung im Bereich der Energieeffizienz unterstützen kann, ohne den Freiraum der Kantone über Gebühr zu beanspruchen. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Energieforschung, für die hauptsächlich der Bund zuständig ist. Von Bedeutung ist aber auch die Kommunikation, die der Bund beispielsweise über das Programm «EnergieSchweiz» fördert.

Bund – Lenkung effizienter als Förderung

Die Bundesebene ist verantwortlich für die politischen Rahmenbedingungen, die die Umsetzung der Energiestrategie 2050 voranbringen. Es betrifft dies vornehmlich die Marktordnung, die Energiepreise, die Subventionierung förderwürdiger Energieträger oder die Unterstützung von Energieeffizienzmassnahmen (Beitrag Gebäudeprogramm, wettbewerbliche Ausschreibungen usw.). Die Rahmenbedingungen sollten so ausgestaltet sein, dass sich die Menschen automatisch auf die erwünschte Art und Weise verhalten.

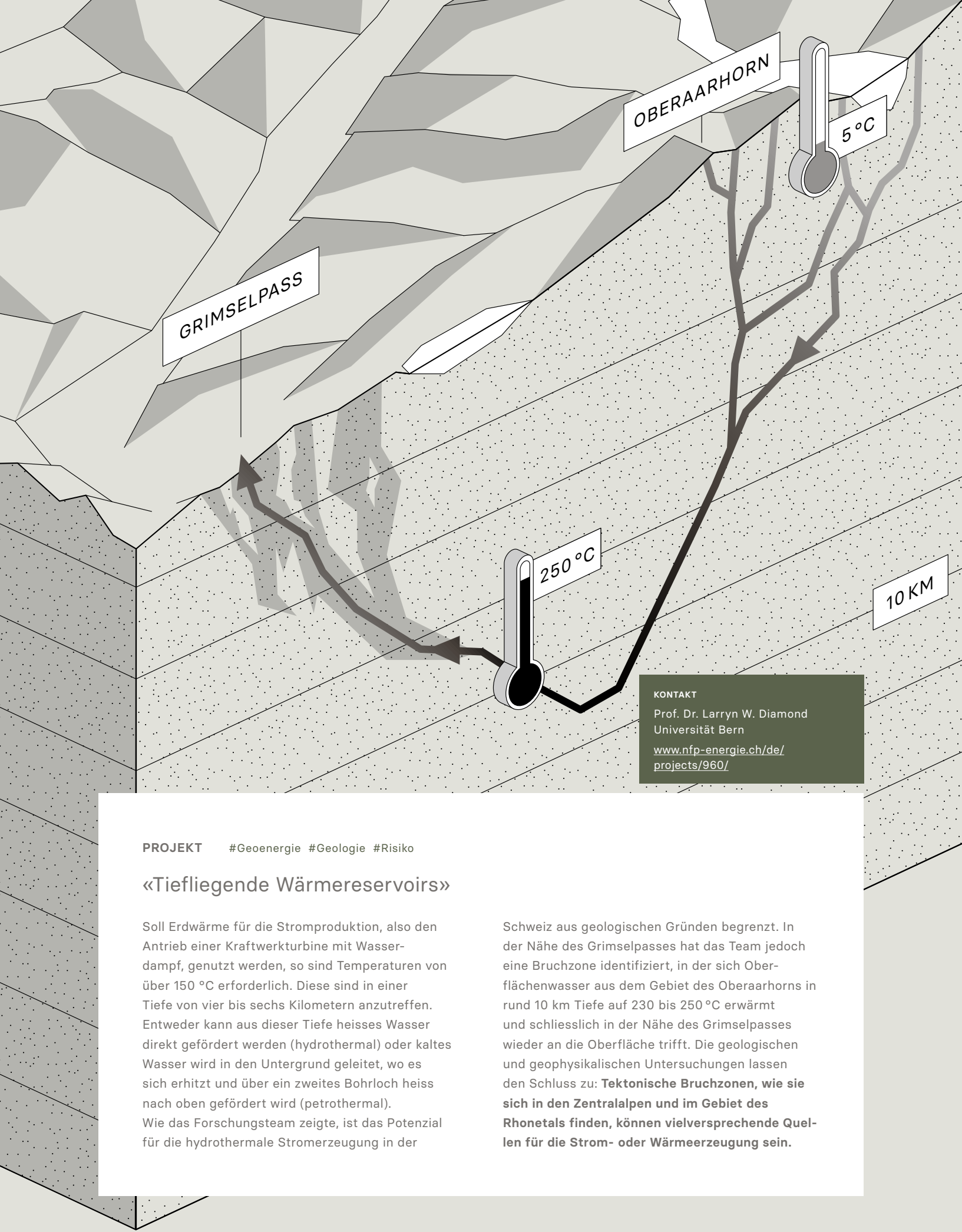
Mit der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) verfügt der Bund über ein Steuerungsinstrument, das einen substanziellen Beitrag an die Förderung erneuerbarer Energien in der Schweiz leistet. Die finanziellen Mittel dafür sind allerdings beschränkt und das Instrument läuft Ende 2022 aus. Die Wissenschaft hat wiederholt festgehalten, dass im Bereich der Klima- und Energiepolitik die ökologischen Ziele mit Anreizsystemen am effizientesten zu erreichen sind. Anreizsysteme sind – etwa die Lenkungsabgabe auf fossilen Brennstoffen – idealerweise für die Staatskasse kostenneutral. Lenkungsabgaben erweisen sich zudem als deutlich kostengünstiger als Fördermassnahmen wie Subventionen, aber auch als effizienter. Ihre Lenkung wirkt überall und auf jede einzelne energierelevante Entscheidung von Haushalten und Unternehmen. Auf diese Weise werden die Effekte breiter gestreut. So wird mit einer Lenkung ein Drittel aller Haushalte bessergestellt, während mit einer Förderstrategie unter dem Strich fast alle Haushalte verlieren. Bei einer Förderung berappen sie zwar die Finanzierung, können davon aber nicht profitieren.^{88/89}

Politisch haben sich anreizbasierte Steuerungsinstrumente allerdings als besonders unpopulär erwiesen. Politische Akteure und die breite Bevölkerung ziehen oft Gebote oder Verbote vor, unter anderem weil die Kosten einer anreizbasierten Massnahme, beispielsweise einer Steuer, direkter sichtbar sind als beim Erlass eines Verbots oder Gebots. In der Praxis noch häufiger verwendet werden Informationskampagnen. Als weichste Form der Steuerung stellen sie unter politischen Akteuren mit unterschiedlichen Präferenzen und Vorstellungen oft den kleinsten gemeinsamen Nenner dar. Sie ist zwar eine notwendige Voraussetzung, allerdings mit dem Nachteil beschränkter Wirksamkeit behaftet.

⁸⁸ [Förder- oder lenkungsbasierte Energiepolitik]

⁸⁹ Synthese zum Themenschwerpunkt «Marktbedingungen und Regulierung» des NFP «Energie», SNF

⁸⁷ [Akzeptanz erneuerbarer Energie]



Vielfältige Rolle der Kantone

Eine wichtige Rolle bei der Umsetzung energiepolitischer Ziele kommt den Kantonen zu. Sie entwickeln jeweils spezifische Instrumente, mit denen sie die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) bei der Förderung erneuerbarer Energien ergänzen. Die Kantone nutzen ihren Spielraum, um die kantonale Energiepolitik ihren Prioritäten und Gesichtspunkten entsprechend zu gestalten – mit der Folge, dass die 26 Schweizer Kantone den Ausbau der erneuerbaren Energien unterschiedlich regulieren und fördern (Sager 2014).

Gefordert sind die Kantone insbesondere bei den Energiemassnahmen im Gebäudebereich, bei der Verbreitung von Anlagen zur Bereitstellung erneuerbarer Energie sowie bei der Information und Beratung. Im Gebäudebereich stehen sie vor der Herausforderung, die aktuellen Mustervorschriften (MuKE) zu implementieren.⁹⁰

Die Bewilligungsverfahren sowie die kantonal sehr unterschiedlichen Subventionsmöglichkeiten für die Realisierung von Anlagen zur Bereitstellung erneuerbarer Energie sind entscheidend dafür, wie erfolgreich die Energiestrategie 2050 auf kantonaler Ebene umgesetzt werden kann. Die Kantone teilen zwar die grundsätzliche Ausrichtung der Energiestrategie 2050, sie setzen jedoch unterschiedliche Schwerpunkte bezüglich Energiequellen und Steuerungsinstrumenten. Sie orientieren sich an ihren Erfahrungen, den geografischen Gegebenheiten und politischen Präferenzen. Vor diesem Hintergrund ist es zweckmässig, wenn die vom Bund festgelegten Ziele den Kantonen Spielraum lassen, um individuelle und damit lokal akzeptierte Lösungen zu entwickeln.

Die Information und Beratung gehen die Kantone ebenfalls sehr unterschiedlich an. Das Informationsbedürfnis der Bevölkerung, aber auch spezifischer Zielgruppen wie Mieterinnen und Mieter, Wohnungs- und Gebäudebesitzende sowie Verantwortliche von Betrieben ist gross. Die Projekte des NFP «Energie» zeigen: Es ist wichtig, dass die Bevölkerung die Herausforderungen der Energiepolitik kennt, versteht und entsprechend handelt. Kampa-

gnen, die das soziale Umfeld der Angesprochenen miteinbeziehen, auf einer direkten Beteiligung der Menschen oder auf persönlichen Erfahrungen aufbauen, erzielen dabei wesentlich bessere Resultate als eine reine Informationsvermittlung.^{91/92/93}

Gemeinden – zwischen Planung, Bewilligung und Förderung

Nebst informationsbezogenen und teilweise auch finanziellen politischen Einflussmöglichkeiten stehen den Gemeinden auch regulative Instrumente zur Verfügung. Insbesondere können Gemeinden unter Einhaltung der kantonalen Richtpläne Vorgaben zur Energieversorgung in der kommunalen Bau- und Zonenplanung verankern. Oft scheiden sie Sonderzonen aus, in denen beispielsweise Windanlagen zugelassen sind, oder sie definieren Gebiete, in denen solche Infrastrukturen verboten sind. Regulierungen dieser Art dienen dazu, Interaktionen und Zielkonflikte zwischen Politikfeldern vorgängig zu regeln – beispielsweise Konflikte zwischen der Förderung von Infrastrukturen erneuerbarer Energie und dem Landschafts- oder Tierschutz. Für Projektträger, die in den Bau entsprechender Infrastruktur investieren wollen, stellen diese lokalen Planungsinstrumente wichtige Rahmenbedingungen dar. Entsprechend der föderalistischen Struktur können sich diese je nach Standort jedoch wesentlich unterscheiden. Um die Planungsunsicherheiten im Bereich der Windenergie zu mildern, hat der Bund 2017 das «Konzept Windenergie» verabschiedet (ARE 2017). Es soll eine kohärentere Anwendung bestehender Regulierungen bewirken, ohne die abschliessenden Entscheidungen auf kommunaler Ebene vorwegzunehmen.

Die Mühen, die die föderalistische Struktur der Schweiz mit sich bringt, sind nur eine Seite der Medaille. Der Föderalismus bietet auch Chancen in Sinne eines «föderalistischen Labors», die es zu nutzen gilt (Balthasar et al. 2020). Dabei spielen die

⁹¹ [Kollaborativer Konsum: Hype oder Versprechen?]

⁹² [Effizienter Energieverbrauch in Privathaushalten]

⁹³ [Förderung von energiesparendem Verhalten in Städten]

Gemeinden eine besonders wichtige Rolle – als Gebäudebesitzer, als Eigentümer von Werken, als politische Akteure oder als Unterstützende von Initiativen lokaler Verbände und Organisationen. Sie verfügen über ein hohes Potenzial, die Realisierung der Energiestrategie 2050 voranzubringen.

Gemeinden sind oft massgeblich an Energieversorgungsunternehmen und damit am Ausbau der Produktionskapazitäten für erneuerbare Energieträger beteiligt. In diesem Zusammenhang ist die Erkenntnis von Bedeutung, dass Schweizerinnen und Schweizer erneuerbare Energien besser akzeptieren, wenn sie im Inland oder im Ausland durch ein schweizerisches Unternehmen produziert werden. Die wiederholte Ablehnung einer Privatisierung der Stromproduktion in kommunalen und kantonalen Abstimmungen legt nahe, dass sich Staatseigentum an der Energiebereitstellung grundsätzlich positiv auf die Akzeptanz auswirkt.

Die starke Anbindung der Energiebereitstellung an die Gemeinden bringt auch Probleme mit sich. Viele Gemeinden verfügen angesichts der zunehmenden Komplexität energietechnischer Lösungen nicht über die notwendigen personellen und fachlichen Ressourcen, die anstehenden Herausforderungen zu bewältigen. Auch fühlen sich gewisse Gemeinden von den immer anspruchsvolleren Bewilligungsverfahren bereits heute überfordert.

Notwendigkeit horizontaler und vertikaler Koordination

Angesichts der Vielzahl involvierter Bereiche erfordert die Transformation des Energiesystems von den Behörden aller Ebenen eine verstärkte horizontale Koordination zwischen den einzelnen Politikbereichen, insbesondere für die Lancierung innovativer Projekte. Typisches Beispiel dafür ist die urbane Logistik.⁹⁴ Eine intelligente Regulierung der städtischen Frachtlogistik hat Auswirkungen auf die Politik in den Bereichen «Energie» (Treibstoffverbrauch), «Klima» (CO₂-Emissionen), «Verkehr» (Schiene und Strasse), «Raumplanung» (Entwicklungsgebiete für Arbeiten mit Schwer-

⁹⁴ [Intelligente urbane Logistik]

punkt Logistik) oder auch «Finanzen» (Mobility Pricing mit zeit- und auslastungsabhängigen Benützungsgebühren).

Ebenso wichtig ist im föderalistischen System die vertikale Koordination zwischen Bund, Kantonen und Gemeinden sowie auf internationaler Ebene. Hinsichtlich der Förderung erneuerbarer Energien scheint eine koordinierte Planung der prioritären Entwicklungsgebiete notwendig zu sein. So kann etwa eine kantonale Politik, die die Bewilligung kleiner Wasserkraftwerke restriktiv handhabt, die Ausschöpfung des natürlichen und technischen Potenzials stark einschränken.⁹⁵ Ebenso genügt eine finanzielle Unterstützung durch den Bund – beispielsweise eine kostendeckende Einspeisevergütung – alleine nicht, die lokalen Widerstände gegen die Exploration der Tiefengeothermie zu überwinden.⁹⁶ Zurzeit fehlt eine umfassende Koordination für die Transformation des Energiesystems, wie dies in Teilbereichen mit dem Konzept «Windenergie» oder dem Sachplan «Übertragungsleitungen» (UVEK 2001) des Bundes der Fall ist. Angesicht der vielfältigen zu koordinierenden Anforderungen und Ansprüche ist es angezeigt, tripartit – also in Zusammenarbeit mit Kantonen und Gemeinden – auch die Transformation des Energiesystems in einem umfassenden Konzept des Bundes zu behandeln.

Die Herausforderungen zur Koordination erstrecken sich schliesslich auch auf die europäische Ebene, wenn es darum geht, die Liberalisierung des Strommarktes, deren Auswirkungen auf den Preis und die öffentliche Förderung der Wasserkraft in den Alpenkantonen zu regulieren.^{97/98}

⁹⁵ [Akzeptanz erneuerbarer Energie]

⁹⁶ [Tiefengeothermie]

⁹⁷ [Zukunft der Schweizer Wasserkraft]

⁹⁸ [Europäisierung des Schweizer Energiesystems]

Bleibende Abhängigkeit vom europäischen Energiemarkt

Angesichts der Wichtigkeit der Energieversorgung für die Gesamtwirtschaft kommt auch dem Ziel der Versorgungssicherheit eine hohe Bedeutung zu. Aufgrund der internationalen und globalen Vernetzung der Energiesysteme, aber auch aufgrund der Vielschichtigkeit des Betriebs der Übertragungsnetze gestaltet sich die Frage der Sicherheit der Energieversorgung eines Landes als äusserst komplex. Die Eidgenössische Elektrizitätskommission (ElCom) kommt zum Schluss, dass die Versorgungssicherheit der Schweiz bis 2025 gegeben ist, sofern sich die Last und das Bereitstellungsportfolio gemäss der Energieperspektiven 2050 (BFE 2013) des Bundes entwickeln (ElCom 2018). Sie bleibt jedoch wesentlich von der Entwicklung im Ausland und der Einbindung in den europäischen Energiemarkt abhängig (vgl. Kap. 3.8).⁹⁹

Kritisch wird die Situation für die Schweiz, sobald beispielsweise Deutschland nicht nur aus der Kernenergie, sondern auch aus der Kohlestromproduktion aussteigt – was bis 2038 geplant ist. Eine stärkere Abkopplung der Schweiz vom EU-Strommarkt könnte zudem Instabilitäten in den Versorgungsnetzen bewirken. Um die Versorgungssicherheit zu erhöhen, bieten sich ein allfälliger Ausbau der Speicherseen, vertraglich gesicherte strategische Reserven, zertifikatsbasierte Leistungsverpflichtungen oder ein diversifizierter Kraftwerkpark an. Um insbesondere Langfristinvestitionen in den schweizerischen Kraftwerkpark attraktiv zu machen, bedarf es aber entsprechender regulatorischer Rahmenbedingungen und neuer Investitionsstrategien, wie das Projekt «Investitionen in Wasserkraft» aufzeigt (vgl. S. 56).¹⁰⁰ Damit die Stabilität des Netzes gewährleistet werden kann, gilt es zudem, das Leitungsnetz wie geplant auszubauen.

⁹⁹ [Europäisierung des Schweizer Energiesystems]

¹⁰⁰ [Investitionen in Wasserkraft]

3.8 Der europäische Kontext

Szenarien in der Beziehung Schweiz–EU

Die historisch starke Rolle der Schweiz im europäischen Strombereich hat sich aufgrund der fortschreitenden Integration der europäischen Energiemärkte und der angespannten Beziehungen zur EU wesentlich verschlechtert. Inwieweit die Schweiz aufgrund physikalischer Abhängigkeiten der Elektrizitätsnetze, ihrer Position als Transitland nach Italien und ihrer technischen Expertise künftig auch ohne Stromabkommen informell Einfluss nehmen kann, ist nur schwer abschätzbar. Aufgrund des aktuellen Stands der Verhandlungen ergeben sich drei Szenarien:¹⁰¹

● **Szenario 1 – Das institutionelle Rahmenabkommen wird in seiner jetzigen oder in einer neu ausgehandelten Form unterzeichnet.**

Die Verhandlungen über das Stromabkommen können sodann fortgesetzt werden. Umstritten sind vor allem die Regeln und die Aufsicht über staatliche Beihilfen («Governance der Versorgungsunternehmen»), die vollständige Marktöffnung, die Subventionen für die Stromproduktion aus Wasserkraft und die weitere Entflechtung der Verteilnetze. Gelingt eine Verständigung, könnte die Schweiz innerhalb weniger Jahre an den europäischen Prozessen und Märkten teilnehmen. Für die Zwischenzeit würden Übergangslösungen vereinbart.

● **Szenario 2 – Das institutionelle Rahmenabkommen wird nicht unterzeichnet.**

Der Abschluss eines Stromabkommens wird auf absehbare Zeit verunmöglicht, mit negativen Auswirkungen auf die Handlungsspielräume der Schweizer Elektrizitätswirtschaft, die effiziente Gewährleistung der Versorgungssicherheit und die Grosshandelspreise im Strommarkt. Möglicherweise bleibt auch in diesem Szenario Raum für

¹⁰¹ [Integration des Schweizer Energiesystems in die europäische Energiepolitik]

punktuellen Verständigungen, wie die von der Eidgenössischen Elektrizitätskommission (ElCom) getroffene Vereinbarung betreffend ungeplante Netzflüsse. Der gleichberechtigte Marktzugang für Schweizer Elektrizitätsunternehmen bliebe jedoch länger in der Schwebe, ungeachtet davon ob die Schweizer Gesetzgebung weiterhin europarechtsfreundlich ausgestaltet würde.

● **Szenario 3 – Das institutionelle Rahmenabkommen wird ebenfalls nicht unterzeichnet. Es kann zudem keine vorläufige Einigung über einen gleichberechtigten Zugang zum Elektrizitätsbinnenmarkt erzielt werden.**

Auch wenn der physische grenzüberschreitende Austausch von Elektrizität bestehen bleibt: Der dauerhafte Ausschluss von den europäischen Handelsplattformen wird zu deutlich höheren Systemkosten und damit zu Wohlfahrtsverlusten

führen. Da die Fähigkeit der Schweiz, Strom zu importieren, abnehmen dürfte, werden hohe Investitionen in heimische Ausgleichsreserven und in die Speicherung von saisonalem Wasser- und Solarstrom nötig. Ohne Stromabkommen werden die Schweizer Konsumenten gemäss Simulationen des Projekts «Europäische Einbindung des Schweizer Energiesystems» Nachteile in Kauf nehmen müssen: Der Grosshandelspreis für Strom in der Schweiz wird demnach deutlich höher sein als in anderen europäischen Ländern und somit die Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industrien beeinträchtigen. Das jährliche Handelsdefizit der Schweiz im Stromhandel mit den Nachbarländern und das Risiko von Versorgungsengpässen dürften zunehmen.

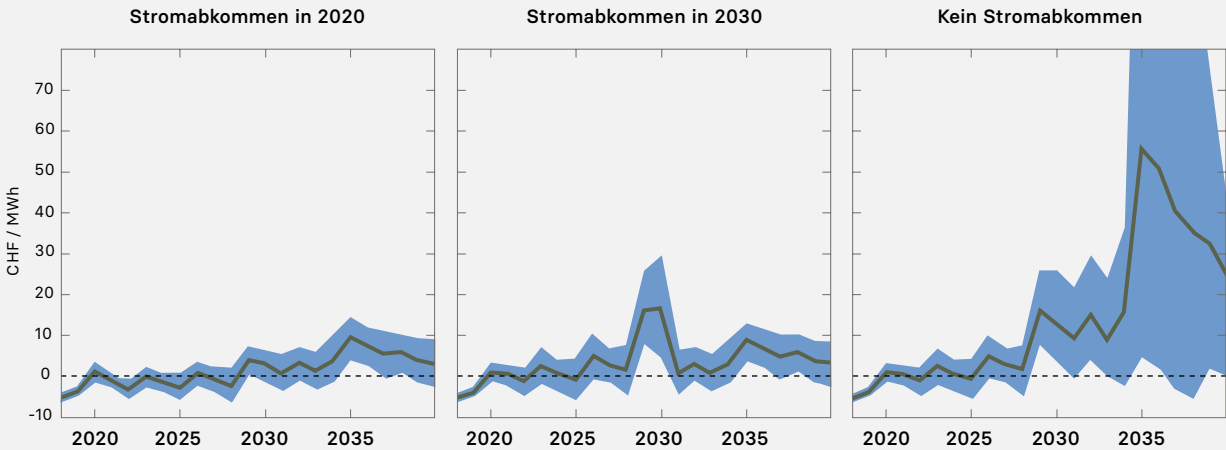


Abbildung 11
Differenz der Schweizer Grosshandelspreise zum EU-Durchschnitt. Die Linie stellt den Jahresmittelwert dar, der schattierte Bereich das 90 %-Konfidenzintervall.¹⁰⁰

Zunehmende Verschlechterung des grenzüberschreitenden Handels

Dadurch, dass die Schweiz die Liberalisierung der Märkte und die Harmonisierung der Marktregulierung durch die EU nur teilweise nachvollzogen hat, haben sich die Handelsbedingungen vor allem für die grösseren Schweizer Elektrizitätsunternehmen verschlechtert. Dabei wird gemäss dem Projekt «Europäische Einbindung des Schweizer Energiesystems» die Liberalisierung von fast allen Akteuren des Schweizer Energiesektors als wichtig erachtet. Auch der effizienten Anbindung an die europäischen Elektrizitätshandelsmärkte wird bei Befragungen eine hohe Bedeutung zugemessen.¹⁰²

Beim grenzüberschreitenden Austausch von Elektrizität zwischen der Schweiz und der EU muss die Leitungskapazität an der Grenze heute explizit erworben werden – dies im Gegensatz zu den Transferkapazitäten an den Grenzen der meisten europäischen Länder. Die fehlende kommerzielle Marktkopplung führt zu Unsicherheiten und Risiken für die Handelsunternehmen, sodass weniger Strom grenzüberschreitend gehandelt wird. Dies kann zu Wohlfahrtsverlusten und überhöhten Grosshandelspreisen auf beiden Seiten der Grenze führen.

Eine 2014 neu eingeführte Methode zur Berechnung der grenzüberschreitenden Übertragungskapazität («flow-based») hat die Stromimportfähigkeit der Schweiz reduziert. Ohne ein Stromabkommen mit gleichwertigen Handelsbedingungen für Schweizer Marktakteure dürfte der grenzüberschreitende Handel weiter abnehmen. Alle EU-Mitgliedstaaten werden in den nächsten Jahren zu einem einzigen gekoppelten Elektrizitätsmarkt zusammenwachsen, von dem die Schweiz teilweise ausgeschlossen sein wird. Da der Wasserkraft, die davon am stärksten betroffen ist, im angestrebten Energiesystem (Energiestrategie 2050) eine wichtige Rolle zukommt, müssen die entsprechenden rechtlichen Rahmenbedingungen im Inland überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Ohne ein Stromabkommen soll-

ten die technischen Elemente des europäischen Rechts trotzdem übernommen werden, während für den Marktzugang die vorläufige Beibehaltung differenzierter Regelungen möglich und vermutlich auch sinnvoll ist.

Handlungsspielräume für die künftige Förderung

Heute stehen namentlich bestimmte Unterstützungsmassnahmen für grosse Schweizer Wasserkraftwerke im Konflikt mit dem europäischen Beihilferecht. Die EU-Kommission will diese Grossanlagen verstärkt den Preissignalen der Märkte aussetzen und allfällige Förderungen wettbewerblicher gestalten. Sofern die Förderinstrumente technologieneutral ausgestaltet werden, würde dies zu einem verstärkten Ausbau derjenigen Bereitstellungsformen führen, die in der Schweiz relativ kostengünstig und/oder raumplanerisch einfach zu verwirklichen sind, beispielsweise Wasserkraft- und Photovoltaikanlagen. Mit der Einbettung in den europäischen Elektrizitätsbinnenmarkt wäre eine solche Spezialisierung weniger problematisch als in der Situation ohne Marktanbindung. Der Gesetzgeber wäre im letzteren Fall eher gehalten, die Rahmenbedingungen auf ein gut diversifiziertes Portfolio verschiedener Bereitstellungsformen auszurichten.¹⁰²

Eine marktnahe Förderung ausschliesslich von Grossanlagen im Inland ist derzeit auch unter europäischem Recht möglich. Bis 2030 muss allerdings ein Anteil von mindestens 10 Prozent der Förderung für ausländische Anlagen geöffnet werden. Ohne Stromabkommen drängt sich ein solcher Öffnungsschritt nicht auf.

Bei der Förderung kleiner dezentraler Erzeuger erneuerbarer Elektrizität sind auch nach neuem europäischen Recht weiterhin Ausnahmen von wettbewerblichen Verfahren möglich. Dabei können auch Instrumente wie Investitionsbeihilfen oder die Befreiung von Netzentgelten im Eigenverbrauch eingesetzt werden. Die meisten der in der Schweiz aktuell bestehenden, allerdings nach 2022 auslaufenden Fördermassnahmen in diesem Bereich sind mit dem europäischen Recht vereinbar. Die Situation der dezentralen Erzeuger könnte im

Einklang mit dem europäischen Recht noch dadurch verbessert werden, dass sie beispielsweise in die Lage versetzt werden, ihre Stromerzeugnisse im Rahmen des Peer-to-Peer-Handels oder von Strombezugsverträgen (Power Purchase Agreements, PPA) an ein breiteres Spektrum von Akteuren zu verkaufen.

¹⁰² [Europäisierung des Schweizer Energiesystems]

Die über 100 Forschungsprojekte des NFP «Energie» haben Hunderte von Einzelergebnissen hervorgebracht. Manche von ihnen haben technologische Innovationen geschaffen, andere das wirtschaftliche oder gesellschaftliche Umfeld analysiert. Die auf dem Webportal www.nfp-energie.ch verfügbaren Synthesen haben thematisch verwandte Projekte zusammengeführt und neue, übergreifende Erkenntnisse ergeben. Nachfolgend sind jene Aspekte hervorgehoben, die aus Sicht des NFP «Energie» für die Transformation des Energiesystems von besonderer Relevanz erscheinen. Es zeigt sich: Die gesellschaftlich-politischen Aspekte sind für die Transformation ebenso wichtig wie die technischen; sie stellen den Schlüssel dar, damit technische Lösungen realisiert werden.

Fazit



Die über 100 Forschungsprojekte des NFP «Energie» haben Hunderte von Innovationen hervorgebracht. Manche von ihnen sind technologische Innovationen, geschäftliche Innovationen, andere das wirtschaftliche oder gesellschaftliche Umfeld analysiert. Die auf dem Webportal www.nfp-energie.ch verfügbaren Synthesen haben thematisch verwandte Projekte zusammengeführt und neue, übergreifende Erkenntnisse ergeben. Nachfolgend sind jene Aspekte hervorgehoben, die aus Sicht des NFP «Energie» die Transformation des Energiesystems von besonderer Relevanz erscheinen. Es zeigt sich, dass die gesellschaftlich-politischen Aspekte der Transformation ebenso wichtig wie die technischen; sie stellen den Schlüssel dar, um technische Lösungen realisiert werden zu können.

Zahlreiche technische Lösungen, die wesentlich zur Transformation des Energiesystems beitragen können, stehen bereit. Jeder und jede Einzelne ist gefordert, die Chancen für die Transformation des Energiesystems zu ergreifen. Dazu gehört auch eine Regulierung, die dazu motiviert und in die gewünschte Richtung lenkt. Dies ist heute noch nicht im notwendigen Mass gegeben.



4.1 Brachliegende Potenziale im Gebäudepark

Auf den Betrieb der Gebäude entfallen rund zwei Fünftel des Endenergiebedarfs. Die Steigerung der Energieeffizienz des Gebäudeparks, also dessen energetische Sanierung, stellt denn auch einen Eckpfeiler der Energiestrategie 2050 dar. Mit ihren Dach- und Fassadenflächen bieten Gebäude zudem vielfältige, bisher zu wenig genutzte Möglichkeiten für die Photovoltaik.

Die energetische Sanierung des Gebäudeparks erfolgt viel zu langsam und muss verstärkt werden.

Bei der aktuellen Sanierungsrate bei Wohn- und Bürobauten von lediglich rund 1,5 Prozent pro Jahr dauert die Erneuerung der Altbauten bis gegen Ende dieses Jahrhunderts – also viel zu lange, um den erwarteten Beitrag zur Transformation des Energiesystems leisten zu können. Es gilt, diesen Prozess zu beschleunigen. Die bisherigen Förderungsmassnahmen erweisen sich als unzureichend.

Gebäudefassaden bieten grosses Potenzial für Photovoltaik.

Die Photovoltaik ist eine der tragenden Technologien für die Bereitstellung erneuerbarer Energien. Ihre Leistung soll ab heute bis 2050 gut verzehnfacht werden. Um dieses Ziel zu erreichen, drängt sich die Nutzung weiterer Flächen auf. Während PV-Parks auf freien Flächen in der Schweiz kaum Akzeptanz geniessen, bieten bestehende (Tourismus-)Infrastrukturanlagen und vor allem Gebäudefassaden ein entsprechendes Potenzial. Allerdings fristet gebäudeintegrierte Photovoltaik bis heute ein Nischendasein. Dies ist

auf mangelndes Wissen bei Gebäudeeigentümern und Architekten, fehlenden gesellschaftlichen beziehungsweise politischen Druck und zurzeit noch etwas ungewisse Kosten zurückzuführen. Hinsichtlich gestalterischer Anforderungen erfüllt das Angebot an PV-Panels für gebäudeintegrierte Anwendungen bereits heute hohe Ansprüche. Die Angebotsvielfalt ist aber – auch dank den Arbeiten des NFP «Energie» – weiter im Wachsen begriffen.

4.2 Wasserkraft zwischen Investitionsbedarf und Nachhaltigkeit

Die Wasserkraft bleibt ein essenzielles Element des künftigen schweizerischen Energiesystems. Sie leistet einen erheblichen Beitrag zur Energieversorgung, trägt zur Versorgungssicherheit bei und gleicht Schwankungen bei der Strombereitstellung aus. Sie erfreut sich einer breiten Akzeptanz. Es bieten sich Möglichkeiten, die Nutzung zu optimieren, ihr Ausbau ist durch ökonomische und ökologische Rahmenbedingungen allerdings eng begrenzt.

Die Wasserkraft verlangt mehr Aufmerksamkeit.

Die bestehenden Wasserkraftinfrastrukturen haben grossen Instandhaltungsbedarf. Aufgrund verschiedener Ungewissheiten werden jedoch die dafür notwendigen Investitionen von den Kraftwerkeignern nicht getätigt. Die kurz- bis mittelfristig prekäre Ertragslage steht im Widerspruch zur Langfristigkeit der notwendigen Investitionen von mehreren Jahrzehnten. Die geltenden Konzessionsbestimmungen mit dem absehbar drohenden Heimfall der Werke von den Kraftwerkbesitzenden an die Konzessionsgeber hemmen die Investitionen ebenfalls.

Wasserkraftanlagen erfordern eine gesamtheitliche Beurteilung.

Die Wasserkraftnutzung steht in einem Grundkonflikt zur Ökologie natürlicher Gewässer. Zahlreiche Wasserkraftanlagen weisen noch immer einen Restwassersanierungsbedarf auf. Gleichzeitig

werden die geltenden Restwasserbestimmungen unzureichend umgesetzt, um die angestrebten Biodiversitätsziele zu erreichen. Der Rückzug der Gletscher eröffnet zwar Potenziale für neue Stauseen. Deren Nutzung bedarf jedoch einer umfassenden Nachhaltigkeitsbeurteilung. Künftig gilt es aber, nicht nur einzelne Anlagen zu beurteilen, sondern im Sinne einer Gesamtbeurteilung schweizweit die Potenziale dort zu nutzen, wo das Verhältnis zwischen energetischer Nutzung und ökologischem Schaden am günstigsten ist. Dies bedingt gleichermassen eine verstärkte Koordination und die Berücksichtigung aller Wasserkraftanlagen.

4.3 Motivierbare Bevölkerung

Die Transformation des Energiesystems ist in hohem Masse eine Aufgabe der Gesellschaft. Jede Einzelne und jeder Einzelne ist in unterschiedlichen Rollen gefordert, dazu beizutragen. In der Bevölkerung besteht eine Bereitschaft, aktiv zu werden, sofern die konkreten Möglichkeiten bekannt und nutzbar sind. In mancher Hinsicht bestehen allerdings beträchtliche Informations- und Wissenslücken.

Gesellschaftliche Normen bestimmen Verhalten.

Menschen entscheiden beim täglichen Einkauf, bei Anschaffungen und Investitionen, aber auch bei politischen Entscheiden erst in zweiter Linie ökonomisch. Voran geht eine (Produkte-)Wahl, die stark von gesellschaftlichen Normen geprägt ist. Entscheidend ist also oft, ob etwas gesellschaftlich akzeptiert wird oder gar im Trend liegt. Erst danach stellt sich die Frage nach den Kosten. Gelten etwa E-Bikes als «cool», wächst die Kaufbereitschaft für diesen Fahrradtyp, auch wenn die Kosten dafür hoch sind. Diese gesellschaftliche Bewertung und Einordnung spielt für die Transformation des Energiesystems eine wichtige Rolle. Sie lässt sich dafür einsetzen, die Transformation voranzubringen. Energetisch sinnvolle Verhaltensweisen zum Trend zu entwickeln, ist daher eine vielversprechende und oft noch zu wenig genutzte Strategie.

Breit finanzierte Energieversorgung geniesst hohe Glaubwürdigkeit.

Bei den Konsumentinnen und Konsumenten besteht erhebliches Interesse an der Mitfinanzierung erneuerbarer Energie zur Eigenversorgung. Geschützt durch die kostendeckende Einspeisever-

gütung (KEV) und unterstützt durch lokale und regionale Energieversorger, bündeln Unternehmen oder Organisationen wie Energiegenossenschaften diese fragmentierte Finanzierung. Eine hohe Identifikation mit den nutzernahen Strukturen erweist sich als eine Schlüsselgrösse. Aus ihr erwächst eine hohe Akzeptanz für lokale und regionale Energiemassnahmen und Investitionen in Infrastrukturen erneuerbarer Energien. Die rund 700 bestehenden lokalen und regionalen Energieversorger stellen aus dieser Perspektive eine wichtige Basis für die weitere Transformation des Energiesystems dar. Sie geniessen einen hohen Rückhalt und hohe Glaubwürdigkeit für innovative Massnahmen und Infrastrukturinvestitionen, selbst wenn diese im Ausland erfolgen.

4.4 Bedarf für Re-Regulierung und verstärkte Umsetzung

Die energierelevante Gesetzgebung, die weit mehr umfasst als die Energiegesetzgebung im engeren Sinne, ist noch ungenügend auf das Energiesystem der Zukunft ausgerichtet. Sie bremst dadurch in manchen Bereichen die Realisierung vielversprechender technischer Lösungen. Mangelnde Koordination der verschiedenen Politik- und Verwaltungsbereiche sowie der staatlichen Ebenen in der Umsetzung der gesetzlichen Aufträge verlangsamt die Transformation ebenfalls. Insbesondere Städte und Gemeinden hätten es zudem in der Hand, die Transformation aktiver voranzubringen. Ihnen stehen dazu vielfältige informationsbezogene, finanzielle und regulatorische Eingriffsmöglichkeiten zur Verfügung.

Die Gesetzgebung unterstützt die Transformation des Energiesystems nicht im notwendigen Ausmass.

Das bisherige Energieregime ist geprägt vom Nebeneinander der verschiedenen Energieträger sowie von einer Energieverteillogik, die sich an einer monodirektionalen Versorgungskette (Bereitstellen – Verteilen – Nutzen) orientiert. Die Transformation des Energiesystems verändert diese Situation grundsätzlich. Um die Schwankungen bei der Bereitstellung erneuerbarer Energien auszugleichen, ist es notwendig, die Trennung der verschiedenen Energieträger mittels Sektor-kopplung zu überwinden – konkret beispielsweise in dezentralen Multi-Energie-Systemen (DMES). Die zunehmende Bedeutung von Prosumern – Akteuren, die Energie nicht nur nutzen, sondern auch dezentral bereitstellen – verändert die bisherige Verteillogik gänzlich. Die stark sektoriell ausgerichtete geltende Energiegesetzgebung wird dieser

neuen Dynamik nicht gerecht. Sie erschwert oder verunmöglicht gar den Einsatz verschiedener verfügbarer Technologien ebenso wie die Kopplung der Technologien und Energieträger. Sie bremst in zahlreichen Bereichen den dort vorhandenen guten Willen, die Transformation des Energiesystems voranzutreiben. Die Vergangenheit lehrt: Jedes Energieregime braucht seine spezifischen regulatorischen Rahmenbedingungen. Die laufenden Revisionsarbeiten an der Energiegesetzgebung vermögen einen Teil der erforderlichen Anpassungen hervorzubringen. Doch erst eine sorgfältige Re-Regulierung über die Energiegesetzgebung hinaus schafft die notwendigen Handlungsspielräume, in denen sich technologische Potenziale entfalten können.

Das Energiesystem der Zukunft benötigt mehr Flexibilität.

Der höhere Anteil an Solar- und Windenergie im Energiesystem der Zukunft führt zu grösseren Schwankungen im Energieangebot. Ein agiles Lastmanagement soll diese Schwankungen ausgleichen, was grosse technische Herausforderungen in der Steuerung mit sich bringt. Zudem muss im Energiesystem mehr Flexibilität geschaffen werden – räumlich, zeitlich und hinsichtlich des Energiemixes. Räumlich lässt sich die notwendige Flexibilität über leistungsfähige Verteilnetzestherstellen. Der geplante Ausbau des schweizerischen Stromverteilungsnetzes ist deshalb notwendig und muss entsprechend realisiert werden. Ein Ausbaubedarf darüber hinaus ist nicht erkennbar. Zeitliche Flexibilität schaffen Speicher unterschiedlicher Art – Speicherseen, Batterien, Druckluftspeicher usw. Die Kopplung der verschiedenen Energieträger ermöglicht die Flexibilität bezüglich des Energiemixes, beispielsweise mit der

Produktion von Wasserstoff oder synthetisiertem Methan mit Strom aus Solar- oder Windkraftwerken. Die höhere Flexibilität des Energiesystems bedarf nicht nur technischer Lösungen, sondern auch regulatorischer. Die Ausgestaltung der Netzegebühren stellt für die Sektorkopplung teilweise unüberwindbare ökonomische Hindernisse dar. Regulatorische Anpassungen können die notwendigen Handlungsspielräume schaffen.

Die Transformation des Energiesystems bedarf verstärkter Koordination der staatlichen Akteure.

Im föderalistischen System der Schweiz befassen sich im Zusammenhang mit der Energiestrategie 2050 alle staatlichen Ebenen mit energiepolitischen Aufgaben. Diese betreffen auf den einzelnen Ebenen jeweils verschiedene Vollzugsbereiche. Jedoch sind die energiepolitischen Aktivitäten weder horizontal noch vertikal ausreichend aufeinander abgestimmt und koordiniert. Die verstärkte Koordination dieser Aktivitäten und Vollzugspraktiken birgt ein erhebliches Potenzial, die Transformation des Energiesystems effektiver zu gestalten und damit zu beschleunigen.

Städte und Gemeinden verfügen über grossen Handlungsspielraum für eine aktive Energiepolitik.

Städte und Gemeinden, aber auch Gemeindeverbände und Regionen verfügen über einen grossen Handlungsspielraum, die Transformation des Energiesystems mitzugestalten und voranzutreiben – planerisch, organisatorisch und kommunikativ. Der Spielraum der Gemeinden geht weit über den Vollzug der Energiegesetzgebung hinaus. Im Rahmen der Nutzungsplanung legen sie die planerischen Rahmenbedingungen fest, die beispielsweise die Realisation gebäudeintegrierter

Photovoltaik, dezentraler Multi-Energie-Systeme (DMES) oder Windenergieanlagen ermöglichen. Als (Mit-)Besitzer von lokalen Energieversorgungsunternehmen können sie die Einführung von «Smart Meters» unterstützen oder mithelfen, die Produktionskapazitäten für erneuerbare Energieträger zu steigern. Dabei können sie sich auf eine hohe Akzeptanz für das Staatseigentum an der Energiebereitstellung stützen. Auch im Verkehrsbereich spielen Städte und Gemeinden eine zentrale Rolle und es stehen ihnen viele Kompetenzen zu. So können sie etwa dazu beitragen, die Güterverteilung umweltfreundlicher zu gestalten oder die öffentlichen Busse auf erneuerbare Energie umzurüsten. Städte und Gemeinden sind dank ihrer Nähe zur Bevölkerung prädestiniert, dieser Innovationen im Energiebereich zugänglich zu machen oder die Bevölkerung mit Informations- und Bildungsaktivitäten für die Mitwirkung an der Transformation zu motivieren. Sie können auch Initiativen lokaler Verbände und Organisationen unterstützen, die mit innovativen Praktiken energiesparendes Verhalten fördern. Die vom Bund unterstützten Programme «Energiestadt» und «Energie-Region» bieten Erfahrungsaustausch und Managementinstrumente zur Planung, Umsetzung und Messung einer erfolgreichen kommunalen beziehungsweise regionalen Energiepolitik.

Die Forschung kann sehr wohl Antworten auf einzelne Fragen geben und spezifische Lösungsansätze entwickeln. Daraus können sich jedoch auch Interessenskonflikte zwischen den einzelnen Lösungsansätzen ergeben. Es ist nicht an den Forschenden, die in der Folge notwendige gesellschaftliche Güterabwägung vorzunehmen. Dies ist vielmehr Sache der Politik und der Stimmbevölkerung.

Die nachfolgend entwickelten Empfehlungen stellen auf dem Weg von der Forschung zur Umsetzung deshalb einen Zwischenschritt dar. Sie basieren im Wesentlichen auf den Ergebnissen der einzelnen Forschungsprojekte und den thematischen Synthesen. Im Rahmen von Workshops wurden sie mit verschiedenen Akteursgruppen diskutiert, bewertet und mit deren Erfahrungswissen abgestimmt.

Empfehlungen

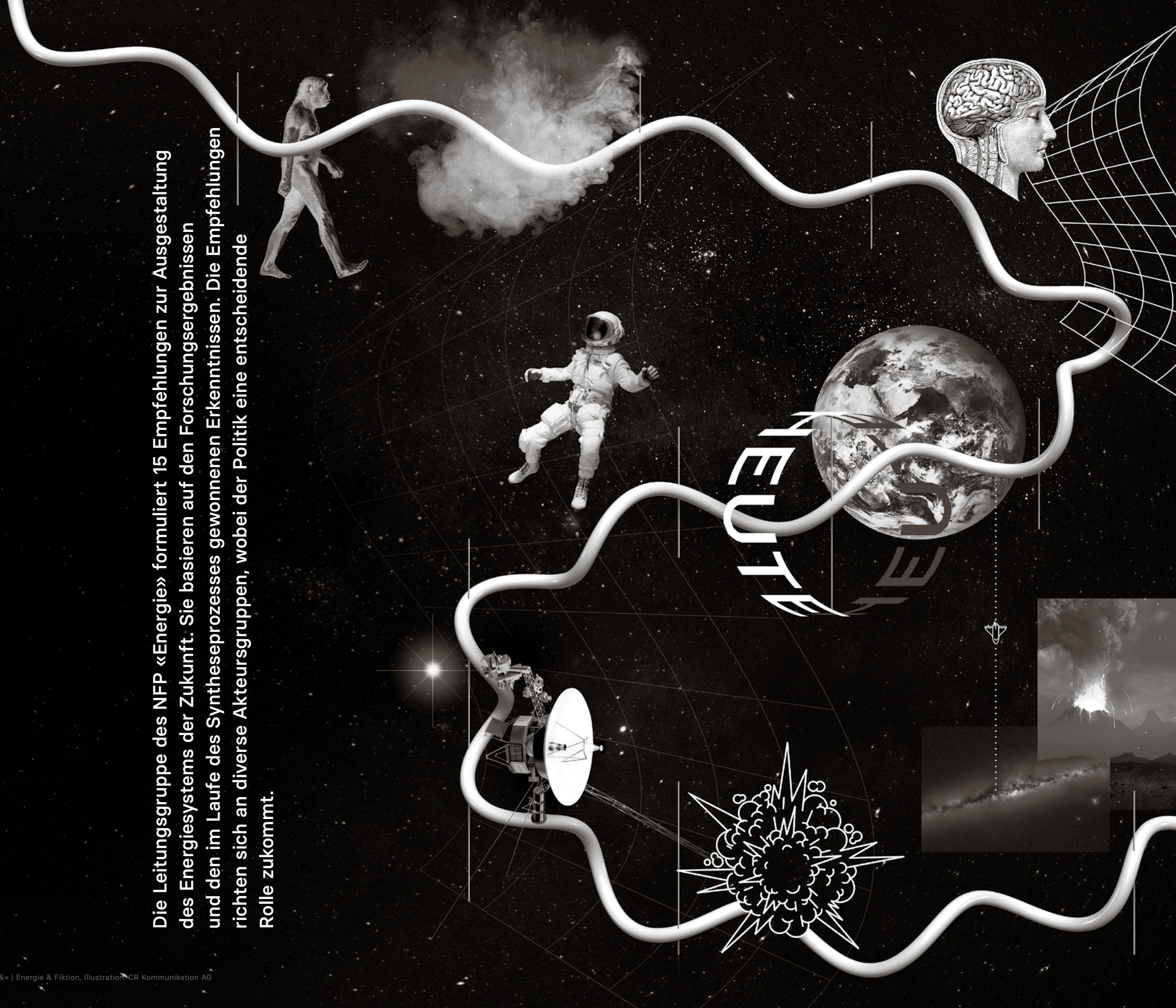
5



Die Forschung kann sehr wohl auf einzelne Fragen geben und spezifische Lösungsansätze entwickeln. Daraus ergeben sich jedoch auch Interessenskonflikte zwischen einzelnen Lösungsansätzen, die von den Forschenden, die in der Folge notwendige gesellschaftliche Güterabwägung vorzunehmen ist. Dies ist vielmehr Sache der Politik und der Stimmbevölkerung.

Die nachfolgend entwickelten Empfehlungen stellen auf dem Weg von der Forschung zur Umsetzung deshalb einen Zwischenschritt dar. Sie basieren im Wesentlichen auf den Ergebnissen der einzelnen Forschungsprojekte und auf wissenschaftlichen Synthesen. Im Rahmen von Workshops wurden sie mit verschiedenen Akteuren diskutiert, bewertet und mit deren Erkenntnissen abgestimmt.

Die Leitungsgruppe des NFP «Energie» formuliert 15 Empfehlungen zur Ausgestaltung des Energiesystems der Zukunft. Sie basieren auf den Forschungsergebnissen und den im Laufe des Syntheseprozesses gewonnenen Erkenntnissen. Die Empfehlungen richten sich an diverse Akteursgruppen, wobei der Politik eine entscheidende Rolle zukommt.



Akteur: Politik

Bundekonzept zur Transformation des Energiesystems erarbeiten!

Schlecht oder nicht koordinierte Planungs- und Bewilligungsverfahren bremsen viele Energieinfrastrukturprojekte aus. Bund, Kantone und Gemeinden sollen deshalb mit einem gemeinsam erarbeiteten Konzept eine verlässliche Grundlage schaffen, um die Interessen der verschiedenen Staatsebenen aufeinander abzustimmen und Blockaden abzubauen.

Die Planung und die Realisierung von Energieinfrastrukturen erfordern in der Regel komplexe Verfahren, an denen Bundes-, Kantons- und Gemeindebehörden beteiligt sind und in die sich verschiedenste Akteure, insbesondere auch beschwerdeberechtigte Organisationen, einbringen können. Die bisher erlassenen Sachpläne und Konzepte betreffen lediglich bestimmte Infrastrukturen wie Hochspannungsleitungen oder Windenergieanlagen. Die Energiegesetzgebung ist zudem in zahlreiche Spezialerlasse aufgegliedert, die auf die einzelnen Energieträger ausgerichtet sind und eine notwendige Gesamtbetrachtung des Energiesystems behindern. Gleichzeitig gilt es, vielfältige Schutzinteressen zu berücksichtigen. Mit einem von Bund, Kantonen und Gemeinden gemeinsam erarbeiteten Konzept kann der Bund aufzeigen, wie raumwirksame und energiepolitische Aufgaben im Zusammenhang mit der Transformation des Energiesystems abgestimmt wahrgenommen werden und wie der Bund die entsprechenden Bestrebungen der Behörden aller Stufen unterstützt. Den Schwerpunkt bildet dabei die inhaltliche und verfahrensmässige Koordination mit dem Ziel, die Umsetzung von Infrastrukturprojekten, die für die Energiestrategie 2050 notwendig sind, zu beschleunigen.

Das Verhältnis der Schweiz zur EU im Interesse der Versorgungssicherheit im Strombereich rasch klären!

Durch Stromimporte gleicht die Schweiz die ausgeprägten saisonalen Schwankungen der Stromproduktion durch die Wasserkraftwerke aus. Die Beziehungen zur EU und damit zu den europäischen Energiemärkten bestimmen, wie und zu welchen Kosten dieser Ausgleich künftig gewährleistet werden kann. Ohne Stromabkommen sind die Kosten dafür deutlich höher.

Die historisch starke Rolle der Schweiz im europäischen Strombereich hat sich aufgrund der fortschreitenden Integration der europäischen Energiemärkte und der angespannten Beziehungen zur EU wesentlich verschlechtert. Studien lassen zwar den Schluss zu, dass, wie auch immer die Beziehungen zur EU geregelt sein werden, die Versorgungssicherheit bis 2025 gewährleistet werden kann. Kritisch wird die Situation für die Schweiz allenfalls, sobald beispielsweise Deutschland nicht nur aus der Kernenergie, sondern auch aus der Kohlestromproduktion aussteigt – was bis 2038 geplant ist. Eine stärkere Abkopplung der Schweiz vom EU-Strommarkt könnte Instabilitäten in den Versorgungsnetzen bewirken. Die Massnahmen, die notwendig sind, um Versorgungssicherheit auch dann zu gewährleisten, sind mit höheren Kosten verbunden und bedürfen eines regulatorischen Rahmens. Um sich entsprechend vorzubereiten, sollten die Beziehungen zur EU rasch geklärt werden.

Mit gezielter Regulierung Energieeffizienz fördern und den Ausbau der erneuerbaren Energien voranbringen!

Viele der Technologien, die für die Transformation des Energiesystems notwendig sind, stehen bereit. Auf freiwilliger Basis allein werden sie aber insbesondere im Gebäudebereich und bei der Mobilität nicht genügend genutzt. Um die gesteck-

ten Ziele zu erreichen, sind darum zusätzlich zu marktwirtschaftlichen Anreizen auch regulatorische Eingriffe nötig. Verschiedene der vor Kurzem getroffenen politischen Vorentscheide gehen in die richtige Richtung.

Allein schon aufgrund der verkehrsinduzierenden Wirkung neuer Mobilitätsangebote und der vielfältigen, damit verbundenen Rebound-Effekte wird sich die Transformation des Energiesystems mit rein technologieorientierten und/oder ausschliesslich marktgetriebenen Strategien im Verkehr nicht erreichen lassen. Ähnliches gilt für den Gebäudebereich: Die Rate der energetischen Erneuerung ist viel zu tief, als dass die Ziele der Energiestrategie 2050 erreicht werden könnten. Nachhaltiges Mobilitätsverhalten braucht «Push and Pull». Als Financier und Betreiber der Infrastruktur sowie als Mitbesteller von Angeboten spielt der Staat auf allen Ebenen eine wichtige Rolle in der Ausgestaltung der Mobilität. Entsprechend wichtig ist es, dass er die neuen Entwicklungen aktiv begleitet und im Hinblick auf die politisch gesetzten Ziele steuert, beispielsweise mit Zutritts erleichterungen für besonders energieeffiziente Anlieferer in den Innenstädten, mit wirksameren Verbrauchsvorschriften für Fahrzeuge oder Förderung von Mobilitätsapps, die die energieeffizientesten Optionen prominent aufzeigen. Organisatorische Massnahmen wie Carsharing und Carpooling können die Mobilität deutlich im gewünschten Sinn beeinflussen.

Bei der Wärmeerzeugung im Gebäudebereich lässt sich der Umstieg auf nicht fossile Energieträger mit Lenkungs massnahmen wie einer CO₂-Abgabe beschleunigen. Hingegen bedürfen die angestrebten Effizienzsteigerungen im Bereich der Gebäudehülle, insbesondere bei Altbauten, zusätzlicher Vorschriften und Anreize, um den Anteil der Energieerzeugung mit erneuerbaren Energien zu erhöhen. Zudem braucht es weiterhin Fördermassnahmen wie das Gebäudeprogramm.

Den Ausbau der erneuerbaren Energien mit einer umfassenden und wirksamen CO₂-Lenkungsabgabe unterstützen!

Lenkungs massnahmen sind wirksamer und kostengünstiger als Förderung. Eine CO₂-Lenkungsabgabe auf allen fossilen Energieträgern ist deshalb besonders geeignet, die Transformation des Energiesystems voranzubringen.

Weder ist der Markt allein in der Lage, die für den Ausbau der erneuerbaren Energien notwendigen Investitionen auszulösen, noch reicht Freiwilligkeit aus, die erforderlichen Verhaltensänderungen für die Transformation des Energiesystems bei der Bevölkerung und den Wirtschaftsakteuren anzuregen. Lenkungsabgaben erweisen sich aber als wirksames Instrument, erwünschtes Verhalten zu fördern. Sie sind bis zu fünfmal kostengünstiger als Fördermassnahmen wie Subventionen und wirken sich auf alle relevanten Entscheidungen aus. Die Effekte werden dadurch breit gestreut. Auf diese Weise profitiert ein grosser Anteil der Haushalte, während mit einer Förderstrategie zwar alle zahlen, aber nur wenige profitieren. Lenkungsabgaben haben sich in verschiedenen Bereichen, etwa der CO₂-Abgabe auf Brennstoffen oder der Abgabe auf flüchtigen organischen Verbindungen (VOC-Abgabe), bewährt und sind dort akzeptiert. Werden die bestehenden Mechanismen für energieintensive Unternehmen beibehalten, haben Lenkungsabgaben auf CO₂-Emissionen keine negativen Auswirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung und sollten deshalb möglichst in allen Energiebereichen eingesetzt werden. Mittels einer transparenten Rückvergütung und mit fundierten Informationen über ihre Wirkungsweise lässt sich die Akzeptanz von Lenkungsabgaben erhöhen. Eine festgelegte progressive Entwicklung unterstützt die Planbarkeit für Unternehmen.

Die Wasserkraft auf ihre stabilisierende Funktion im Energiesystem fokussieren!

Die neuen erneuerbaren Energien sind mit dem Problem verbunden, dass Produktion und Nutzung zeitlich oft nicht zusammenfallen. Die Wasserkraft erfüllt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle: Sie stabilisiert das Versorgungssystem und gewährleistet die technische Versorgungssicherheit des schweizerischen Energiesystems. Diese Funktion kann auch als Grundlage für finanzielle Abgeltungen dienen.

Als grosse Speicher spielen die Stauseen eine zentrale Rolle für die Regulierung des schweizerischen Energiesystems. Sie dienen der Kapazitätsregulierung und übernehmen stabilisierende Funktionen. Es sind die regulatorischen Rahmenbedingungen zu schaffen, um diese Funktion zu stärken und die Investitionen in Wasserkraftanlagen attraktiv machen. Um die stabilisierende Rolle auch im transformierten Energiesystem erfüllen zu können, bedarf es zusätzlicher Speicherkapazitäten.

Wasserzinsen nach Erträgen ausrichten!

2024 muss eine neue Lösung für den Wasserzins beschlossen werden. Sie sollte auf dem Ertrag basieren und damit den Marktpreis sowie die Produktionskosten widerspiegeln. Die neue Lösung muss auch die Interessen der Berggebiete berücksichtigen. Für sie sind die Wasserzinsen wirtschaftlich weit wichtiger als für die Stromproduzenten.

Der Wasserzins ist ein Entgelt der Stromproduzenten an die Gebirgskantone und -gemeinden für die Nutzung ihrer Wasserressourcen. 2015 betrug er etwa 560 Millionen Franken. In zahlreichen Gemeinden machen die Wasserzinsen einen bedeutenden Anteil (20–50 %) der finanziellen Ressourcen aus: Flexible und ertragsabhängige Wasserzinsen werden heute als marktgerechter eingestuft als fixe Maximalwerte, die nur von

der installierten Leistung und nicht vom tatsächlich produzierten Strom abhängen. Flexible Wasserzinsen erhöhen allerdings einseitig das Risiko der Ressourcenbesitzer, also der Berggemeinden und -kantone, während jenes des Kraftwerkbetreibers reduziert wird. Für Letztere ist jedoch die Höhe des Wasserzinses nur in wenigen spezifischen Fällen von entscheidender Bedeutung für den Ertrag. Es sollen deshalb flexible, ertragsabhängige Wasserzinsen eingeführt werden, die gemäss den Prinzipien der Gewinn- und Verlustverteilung («revenue-sharing») zwischen den Ressourceneigentümern – also den Gemeinden und Kantonen – und den Kraftwerkbetreibern gestaltet sind. Im Sinn einer ganzheitlichen Betrachtung sollen die neuen Regelungen auch regionalpolitische und regionalwirtschaftliche Aspekte berücksichtigen.

Optimale Bedingungen schaffen für Finanzierungsmodelle, an denen sich die Bevölkerung beteiligen kann!

Die finanzielle Beteiligung an Investitionen in Infrastrukturen für erneuerbare Energien schafft Identifikation. Lokal verankerte Organisationen wie Vereine, Genossenschaften oder Nachbarschaftsorganisationen schaffen Akzeptanz und helfen, den Ausbau der erneuerbaren Energien voranzubringen.

Die Chancen für die Akzeptanz neuer Energieinfrastrukturen erhöhen sich, wenn die Beteiligung am Nutzen von Projekten für erneuerbare Energie stärker betont und gefördert wird. Am attraktivsten scheinen hier Modelle zu sein, die Gemeinden oder Private zu Mitbesitzenden machen und so für diese wirtschaftliche Vorteile generieren, etwa im Rahmen von lokalen Aktiengesellschaften, Vereinen, Genossenschaften oder Nachbarschaftsorganisationen. Gemeinden können solche öffentlich unterstützen, indem sie – etwa mit Darlehen – zur Finanzierung der Infrastruktur beitragen oder öffentliche Räume zur Verfügung stellen, beispielsweise Dächer für Solarkollektoren. Auch Pensionskassen sollte die Möglichkeit

gegeben werden, zur Finanzierung von Energieinfrastrukturen beizutragen. Die lokalen Elektrizitätswerke können ihr Know-how zur Verfügung stellen, einen Netzzugang für den erzeugten Strom aus erneuerbaren Energiequellen gewährleisten oder diesen Strom zu einem attraktiven Tarif einspeisen.

Städte und Gemeinden dazu motivieren, ihren Handlungsspielraum im Energiebereich verstärkt aktiv wahrzunehmen!

Städte und Gemeinden verfügen als Gebäudebesitzer, Eigentümer und Betreiber öffentlicher Werke und Betriebe, als politische Akteure oder Unterstützende lokaler Initiativen über vielfältige Möglichkeiten, die Transformation des Energiesystems mitzugestalten. Sie können – nicht nur im Energiebereich – planerisch, organisatorisch und kommunikativ aktiv werden.

Trotz der zahlreichen Möglichkeiten tun sich Städte und Gemeinden oft schwer, eine aktive Energiepolitik zu betreiben. Eine solche erfordert neben dem politischen Willen eine gewisse Kreativität und ein fachbereichsübergreifendes Vorgehen. Nicht nur bei der Energieproduktion, der Energieverteilung sowie als Gebäudebesitzerinnen und -nutzerinnen haben Gemeinden einen grossen Spielraum, um die Transformation des Energiesystems zu unterstützen. Die vom Bund unterstützten Programme «Energiestadt» und «Energie-Region» bieten Erfahrungsaustausch und Managementinstrumente zu Planung, Umsetzung und Messung einer erfolgreichen kommunalen beziehungsweise regionalen Energiepolitik.

Akteur: Politik/ Betriebe

CO₂-freie urbane Logistik bis 2050 realisieren!

Erfolgt die Versorgung in den städtischen Agglomerationen CO₂-frei, lassen sich 7 Prozent der entsprechenden Effizienzziele der Energiestrategie 2050 und rund 9 Prozent der angestrebten Reduktion von Treibhausgasemissionen erreichen. Kantone, Städte und Gemeinden sollen deshalb die entsprechenden Rahmenbedingungen schaffen und mit den Logistikakteuren zusammenarbeiten.

Der Logistikmarkt verzeichnet ein unaufhaltsames Wachstum – um knapp einen Viertel innert 10 Jahren. Trends wie E-Commerce, reduzierte Lagerhaltung, abnehmende Grössen der Liefereinheiten und steigende Lieferhäufigkeiten sind die prägenden Treiber. Ein Grossteil der Logistik basiert auf fossilen Energien. Das Ziel einer CO₂-freien urbanen Logistik ist wirtschaftlich machbar und wird von den Logistikunternehmen akzeptiert. Ihre Realisierung erfüllt nicht nur energetische Ziele. Sie schafft auch gesellschaftlich breit akzeptierte Zusatznutzen, indem sie die Luftschadstoff- und Lärmimmissionen in den städtischen Räumen reduziert und damit die Lebensqualität generell erhöht. Das Ziel einer CO₂-freien urbanen Logistik erfordert Massnahmen wie CO₂-freie Fahrzeugantriebe, Mobility Pricing, Strassennutzungsbedingungen, Energieeffizienz-Label, Kooperation, Planung von Logistikzentren usw. Notwendig sind Aktivitäten aller Beteiligten und deren enge Zusammenarbeit. Die öffentliche Verwaltung sollte durch die gesamtheitliche Planung geeignete Rahmenbedingungen im städtischen Raum schaffen, Logistik- und Transportdienstleister ihrerseits sollen unter anderem die Lieferketten darauf ausrichten, geeignete Standorte für Logistikzentren bestimmen und Fahrzeuge mit CO₂-freien Antrieben beschaffen.

Akteur: Politik/ Energieversorger

Dezentrale Multi-Energie-Systeme (DMES) realisieren!

DMES ermöglichen eine höchst effiziente Nutzung dezentral bereitgestellter Energie. Damit sie realisiert werden können, ist die Energiebereitstellung und -versorgung lokal und regional als Ganzes zu betrachten. Selbstorganisation und staatliche Regulierung sollen sich bestmöglich ergänzen. Die Gemeinden, aber auch der Bund und die Kantone müssen planerische und gesetzliche Vorarbeiten erbringen.

Dezentrale Multi-Energie-Systeme (DMES) verknüpfen in intelligenter Form Strom-, Gas- und Wärmenetze, aber auch Speichermöglichkeiten und die Energiebezüger. Dezentral bereitgestellte Energie lässt sich so effizient nutzen – lokal oder regional, im Quartier, im Dorf oder Stadtteil – und kann dank des lokalen Kontextes auch mit hoher Akzeptanz rechnen. Auf diese Weise lassen sich die unterschiedlichen Verfügbarkeiten erneuerbarer Energien puffern. Die Versorgungsmonopole der lokalen und regionalen Energieversorger erschweren die Realisierung von DMES. Zudem erfordert die Realisierung von DMES eine Betrachtung des gesamten Energiesystems im lokalen und regionalen Kontext, also eine Abkehr von der Einzelbetrachtung der Energieträger ebenso wie von der individuellen Energieversorgung einzelner Gebäude und Betriebe. Gefordert sind die Gemeinden und ihre Werke, die die Potenziale für DMES identifizieren und die Realisierung von DMES mittels Energierichtplänen und aktiver Begleitung vorantreiben können. Der Bund und die Kantone ihrerseits sollen für die notwendigen gesetzlichen Rahmenbedingungen (u. a. Anschlusspflicht, Datenschutz, Datenmanagement usw.) sorgen.

Akteur: kantonale Verwaltungen

Restwasserregime den ökologischen Bedürfnissen anpassen!

Das Gewässerschutzgesetz wird heute hinsichtlich der ökologischen Ziele unzureichend umgesetzt. Die angestrebte biologische Vielfalt im Unterlauf der Stauwerke wird nicht erreicht. Die Kantone sollen deshalb den Vollzug so gestalten, dass die Restwasserführung die ökologischen Ziele sicherstellen kann. Entsprechende Massnahmen verlangen mehr Wasser und reduzieren die Stromproduktion.

Der heutige Vollzug der Restwasserbestimmungen sorgt nicht für jene ökologischen Bedingungen, die zum Erhalt der biologischen Vielfalt in den Restwasserstrecken nötig sind. In Rücksicht auf die wirtschaftlichen Interessen werden zu oft Minimalvorschriften umgesetzt und Ausnahmeregelungen erlassen. In Flüssen mit ungenügender Geschiebedynamik verfestigt sich der Gewässergrund und er verliert seine Eignung als Laichsubstrat. Natürliche Hochwasser können den von Feinsedimenten verstopften Porenraum nicht mehr genügend durchspülen, und die Sauerstoffzufuhr nimmt ab. Konstant fliessende Restwassermengen vermögen die Vielfalt von Habitaten und Lebewesen nicht wiederherzustellen. Eine natürliche Situation liesse sich durch sporadische grosse Überschwemmungen und mehr zeitliche und räumliche Variabilität des Abflusses schaffen. Künstliche Hochwasser und Massnahmen zum Management der Geschiebefracht rücken deshalb immer stärker in den Fokus. Die Erneuerung der Konzessionen ist zu nutzen, um die ökologischen Bedingungen zu optimieren. Entsprechende Massnahmen haben Folgen für die Stromproduktion und beeinflussen deshalb auch die Zielerreichung der Energiestrategie 2050.

Akteur: Energieversorger

Die Bevölkerung von Beginn an aktiv an der Planung von Infrastrukturprojekten beteiligen!

Mitgestaltung stärkt die Identifikation und fördert die Akzeptanz. Projektinitiantinnen und -initianten sollen deshalb Planungsprozesse für Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien von Beginn an partizipativ gestalten.

Die Schweiz ist sehr stark von einer Kultur der Beteiligung und Mitsprache gekennzeichnet. Dieser gilt es bei der Ausgestaltung von politischen Massnahmen und Projekten zu erneuerbaren Energien Rechnung zu tragen. In Entscheidungsprozessen sollen die Projektinitiantinnen und -initianten insbesondere die betroffene Bevölkerung ab Planungsbeginn einbeziehen. Partizipation gelingt jedoch nur, wenn sie professionell betrieben wird. Beteiligung bedeutet auch, den Anliegen der Bevölkerung Rechnung zu tragen. Eingebraachte Anliegen müssen von den Projektinitiantinnen und -initianten ernst genommen sowie transparent und fair berücksichtigt werden. So gilt es auch, die Interessen frühzeitig abzuklären und den Prozess der Interessenabwägung gut zu dokumentieren.

Mit flexiblen und dynamischen Stromtarifen, Belohnungszielen und Information Anreize zum Energiesparen schaffen!

Energieverteiler sollen flexible und dynamische Stromtarifmodelle entwickeln und einsetzen, die den Anreiz schaffen, den Stromverbrauch und die Energiekosten zu senken. Die Kombination mit Bonuselementen, die das Erreichen von Sparzielen belohnen, erhöht die Akzeptanz entsprechender Tarifmodelle.

Es besteht breite Akzeptanz dafür, erneuerbare Energien mit entsprechenden Preiszuschlägen als Standardangebot anzubieten, das bewusst abgewählt werden muss, wenn konventionelle Energieträger zu tieferen Preisen gewünscht werden. Solche sogenannten «Green defaults» können von den Energieverteilern in einem ersten Schritt umgehend eingeführt werden. Um die Transformation des Energiesystems weiter voranzutreiben, bedarf es aber weiterer, neuer Formen der Tarifierung. Die stärkste Wirkung erzielen Tarifsysteme, die einen grösseren Verbrauch zusätzlich belasten. Diese geniessen bei der Bevölkerung und der Wirtschaft zwar geringe Akzeptanz. Belohnungen – etwa bei der Erfüllung von Energiesparzielen – können dazu beitragen, diese Hürde zu überwinden. Die Energieversorger sind gefordert, entsprechende Tarifmodelle (Bonus-Malus-Systeme) für die verschiedenen Energieträger zu entwickeln. Das Tarifmodell soll von den Energiebezügern alternativ zu den bestehenden Tarifen gewählt werden können. Zielwert sowie Bonus beziehungsweise Malus werden individuell zwischen dem Energieversorger und den Energiebezügern vereinbart. Die Bereitschaft für entsprechende Tarife ist bei den Konsumentinnen und Konsumenten hoch. Diese Systeme tragen auch dazu bei, den Spitzenbedarf beim Strombezug zu dämpfen und dadurch das Energiesystem kostengünstig zu gestalten. Je stärker das Energiesystem auf erneuerbare Energien und die dezentrale Energiebereitstellung ausgerichtet ist, umso wichtiger wird die Abstimmung zwischen Energieangebot und -nachfrage. Es gilt sicherzustellen, dass die Preissignale die Haushalte auch erreichen. Dies bedeutet auch, dass die Tarifunterschiede hoch sein müssen, damit Konsumentinnen und Konsumenten ihr Verhalten entsprechend ändern und sich Geräte anschaffen, die die Signale automatisch verarbeiten können.

Akteur: Energiever-sorger / öffentliche Verwaltungen

Wissen vermitteln, und zwar zielgruppengerecht und neutral!

Die Wissens- und Informationsvermittlung muss den unterschiedlichen Wissensstand und die unterschiedliche Motivation verschiedener Bevölkerungsgruppen mit innovativ konzipierten Strategien nutzen. Die öffentlichen Verwaltungen von Bund, Kantonen, Städten und Gemeinden, die Verbände und die Wirtschaft sollen über die Funktionsweise von Technologien und Steuerungs-mechanismen informieren und überzeugend kommunizieren, dass ein wesentlicher Teil des Energieeffizienzpotenzials ohne Verzicht und ohne Komforteinbussen realisiert werden kann: Mehr Energieeffizienz bedeutet nicht weniger Komfort.

Die Bürgerinnen und Bürger der Schweiz agieren sowohl als Akteure, die im Alltag energierelevante Entscheidungen treffen, als auch als Stimmbürge-rinnen und Stimmbürger, die die Energiepolitik mitbestimmen. Damit sie diese Entscheidungen treffen, aber mit Energie auch sorgsam umgehen können, müssen sie über Wissen über die mit dem Energieverbrauch zusammenhängenden Probleme verfügen. Diesbezüglich bestehen in der Bevölkerung zum Teil erhebliche Wissensdefizite. Für die differenzierte Auseinandersetzung mit energierelevanten Vorhaben ist die langfristig angelegte und neutrale Information der Bevölke-rung, aber auch der Fachleute und der Politik von grosser Bedeutung. Informations- und Sensibilisie-rungskampagnen müssen gezielt darauf Rück-sicht nehmen, wo sich die Zielgruppen im Kontinu-um zwischen «Wissen», «Wollen» und «Handeln» befinden. Zielgruppengerechte Information bringt Wissen dorthin, wo situationsbedingt der Bedarf dafür besteht.

Ein möglicher Anknüpfungspunkt sind soziale Prak-tiken und Normen, da sie das individuelle Wollen und Handeln massgeblich bestimmen. Als erfolg-versprechend erweist es sich, energierelevante Verhaltensangebote in Praktiken bestehender

Gemeinschaften wie Sportklubs und Quartier-vereine einzubeziehen und an Aspekte der Lebens-qualität zu koppeln («Co-Benefits»). In allen gesellschaftlichen Gruppen nehmen Vorbilder für die Meinungsbildung eine wichtige Rolle ein. Positive Erfahrungen – möglichst im engeren Lebensumfeld – steigern sowohl die Akzeptanz von Technologien als auch die Bereitschaft, das Verhalten zu ändern. Beispielhafte sind Pilotanla-gen zur Entwicklung von dezentralen Multi-Energie-Systemen (DMES).

Akteur: Verbände

Die Verbände stärker in die Verantwortung nehmen!

Verbände stehen im engen Austausch mit ihren Mitgliedern und verfügen über branchenspe-zifische Kenntnisse, die die Transformation des Energiesystems voranbringen können. Sie sollten ihre wichtige Rolle im politischen Entschei-dungsprozess auch dazu nutzen, ihre Mitglie-der für die Unterstützung gemeinsam entwickelter Lösungen zu gewinnen.

Verbände verfügen über weitreichende Netze in der Wirtschaft und der Gesellschaft und geniessen gleichzeitig grosses Vertrauen bei ihren Mitglie-dern. Sie verfügen in partizipativen Prozessen, in der Vernehmlassung, im Parlament und in der direktdemokratischen Mitbestimmung über zahl-reiche und wichtige Mitwirkungsmöglichkeiten. Auf diese Weise tragen sie zur Entwicklung von Lösungen bei, welche die relevanten Schutz- und Nutzungsrechte berücksichtigen. Die aktive Mitwirkung ist für die Verbände auch mit der Verpflichtung verbunden, bei ihren Mitgliedern für die gemeinsam erarbeiteten Lösungen einzu-stehen. Auch nicht direkt mit Energiefragen befass-te lokale Verbände können eine wichtige Rolle einnehmen. Sie haben das Potenzial, ihre Mitglie-der für die energetischen Auswirkungen ihrer alltäglichen Praktiken zu sensibilisieren und die Ak-zeptanz einer Verhaltensänderung zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

Die zitierten Forschungsprojekte werden in den Fussnoten mit eckigen Klammern referenziert.

Aarts H., Verplanken B., van Knippenberg A. (1998): Predicting behavior from actions in the past: repeated decision making or a matter of habit? In: Journal of Applied Social Psychology 28, 1355–1374.

ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) (2017): Konzept Windenergie. Basis zur Berücksichtigung der Bundesinteressen bei der Planung von Windenergieanlagen. ARE, Bern.

Balthasar A., Schreurs M., Varone F. (Guest Editors) (2020): Journal of Environment and Development. Special Issue on Energy Transition and Federalism, <https://journals.sagepub.com/loi/jeda>

Balthasar A., Strotz C. (2017): Akzeptanz von erneuerbaren Energien: Erfolgsfaktoren für Infrastrukturprojekte. In: Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE, Hrsg.): bulletin.ch, 10/2017, 20–23, Aarau.

Balthasar A., Walker D. (2015): Lenkungsabgaben alleine genügen nicht. In: Die Volkswirtschaft, 88 (6), 44–47.

Barry M., Betz R., Fuchs S., Gaudard L., Geissmann T., Giuliani G., Hediger W., Herter M., Kosch M., Romero F., Schillinger M., Schlange L., Schuler C., Schumann R., Voegeli G., Weigt H. (2019): The Future of Swiss Hydropower: Realities, Options and Open Questions, Final Project Report.

Beck U. (1986): Risikogesellschaft: auf dem Weg in eine andere Moderne. Suhrkamp, Frankfurt a.M.

BFE (Bundesamt für Energie) (2013): Energieperspektiven 2050. Zusammenfassung. Bern.

BFE (Bundesamt für Energie) (2017). Wie Strom zu Gas wird. In: Energiea 2, 5.

BFE (Bundesamt für Energie) (2018): Gesamtenergiestatistik 2017. Bern.

BFE (Bundesamt für Energie) (2018a): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien Ausgabe 2017. Bern.

BFE (Bundesamt für Energie) (2019): www.bfe.admin.ch/stromversorgung (Zugriff: 6.8.2019).

BFS (Bundesamt für Statistik) (2017): Gebäude nach Heizsystem und Energieträger. BFS su-d-09.02.04.02 Neuenburg.

BFS (Bundesamt für Statistik) (2018): Statistik der Bevölkerung und der Haushalte (STATPOP) 2017. Neuenburg.

BFS (Bundesamt für Statistik) (2018a): Gebäude- und Wohnungsstatistik 2017. Neuenburg.

BFS (Bundesamt für Statistik) (2019): www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/energie.html (Zugriff: 11.9.2019)

BFS/ASTRA (Bundesamt für Statistik/Bundesamt für Strassen) (2019): Strassenfahrzeugbestand (MZf) 2018. Bern.

Bice D. (o.J.), in: *EARTH 104 Energy and the Environment* (open education courseware), College of Earth and Mineral Sciences, The Pennsylvania State University.

Bracco S., Delfino F., Pampararo F., Robba M., Rossi M. (2013): The University of Genoa smart polygeneration microgrid test-bed facility: The overall system, the technologies and the research challenges. In: Renewable Sustainable Energy Reviews 2013, 18, 442–59. doi:10.1016/j.rser.2012.10.009.

Bundesrat (2012): Erläuternder Bericht zur Energiestrategie 2050.

Bundesrat (2013): Botschaft zum ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050. Bern.

Carlisle R. P. (1997): Probabilistic Risk Assessment in Nuclear Reactors: Engineering Success, Public Relations Failure. In: Technology and Culture. The International Quarterly of the Society for the History of Technology 38 (4), 920–941.

Cieslik T., Knüsel P. (2018): 20 Jahre Minergie: «Lieber freiwillig als mit Zwang» (Interview mit Andreas Meyer Primavesi und Milton Generelli, Verein Minergie). In: TEC21 31–33, 25.

Cieslik T., Knüsel P. (2018): Lieber freiwillig als mit Zwang, Interview mit Andreas Meyer Primavesi und Milton Generelli. In: TEC21 31–32–33, 25.

Ebers Broughel A., Stauch A., Schmid B., Vuichard P. (2019): Consumer (Co-)Ownership in Renewables in Switzerland. In: Lowitzsch J. (Hrsg.): Energy Transition, 451–476. Palgrave Macmillan, Cham. doi.org/10.1007/978-3-319-93518-8.

EEA (European Environment Agency) (2005): Household consumption and environment. EEA Report 11, European Environment Agency, Copenhagen.

Eicher + Pauli (2018): Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien. Ausgabe 2017. Hg.: Bundesamt für Energie. Bern.

EKZ (Elektrizitätswerke des Kantons Zürich) (2018): Energiezukunft: Grosse Batterie in Betrieb. Medienmitteilung vom 15. Mai 2018.

ElCom (Eidgenössische Elektrizitätskommission) (2018): System Adequacy 2025 – Studie zur Versorgungssicherheit der Schweiz im Jahr 2015.

EnDK (Konferenz kantonaler Energiedirektoren) (2014): Energieverbrauch von Gebäuden. Fact Sheet. Bern. Gugerli D. (1996): Redeströme: Zur Elektrifizierung der Schweiz 1880–1914. Chronos, Zürich.

EnergieSchweiz, BFE (Bundesamt für Energie) (2017): Geothermie in der Schweiz: Eine vielseitig nutzbare Energiequelle. Bern.

EnergieSchweiz, BFE (Bundesamt für Energie) (2018): Energieeffiziente Fahrzeuge – Markttrends 2018. Bern.

EnergieSchweiz, BFE (Bundesamt für Energie) (2018a): Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz. Ausgabe 2017. Bern.

www.eneff-industrie.info: <https://eneff-industrie.info/quickinfos/energieintensive-branchen/einsparerfolge-sichtbar-gemacht>

Filippini M., Blasch J., Boogen N., Kumar N. (2018): Energy efficiency, bounded rationality and energy-related financial literacy in the Swiss household sector, final report, 52–53.

Friedrich R., Bickel P. (2001): The Impact Pathway Methodology; In: Friedrich R., Bickel P. (Hrsg.): Environmental External Costs of Transport. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg.

Gabrielli P., Fürer F., Mavromatidis G., Mazzotti M. (2019): Robust and optimal design of multi-energy systems with seasonal storage through uncertainty analysis. In: Applied Energy 238, 1192–210. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.064.

Grosspietsch D., Thömmes P., Girod B., Hoffmann V.H. (2018): How, When, and Where? Assessing Renewable Energy Self-Sufficiency at the Neighborhood Level. In: Environmental Science and Technology 52, 2339–2348. doi:10.1021/acs.est.7b02686.

Grosspietsch D., Saenger M., Girod B. (2019): Matching decentralized energy production and local consumption: A review of renewable energy systems with conversion and storage technologies. In: Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment 2019:e336. doi:10.1002/wene.336.

Gugerli D. (2004): Kernenergienutzung – ein nachhaltiger Irrtum der Geschichte? In: Nova Acta Leopoldina 91, 331–342.

Gugerli D. et al. (2000): Kernenergie in der Schweiz 1950–1990. In: Bulletin SEV/VSE 21, 24–27.

Hediger, W. (2017): Nachhaltigkeitsbeurteilung (NHB) von Wasserkraftprojekten, Arbeitsdokument, Mai 2017, Zentrum für wirtschaftspolitische Forschung, HTW Chur.

Helms T. (2016): Asset transformation and the challenges to servitize a utility business model. In: Energy Policy 91, 98–112.

Hirschberg S., Burgherr P. (2015): Sustainability assessment for energy technologies; in Handbook for Clean Energy Systems, John Wiley & Sons Ltd, New York.

Hirschberg S., Bauer C., Burgherr P., Dones R., Simons A., Schenler W., Bachmann T., Gallego Carrera D. (2008): Final set of decision criteria and indicators for assessment of electricity supply options; NEEDS deliverable no. D3-2 – Research Stream 2b, NEEDS Project, Brüssel.

Howlett M. (2005): What is a Policy Instrument? Policy Tools, Policy Mixes and Policy-Implementation Styles. In: Eliadis F.P., Hill M.M., Howlett M. (Hrsg.): Designing government. From instruments to governance, 31–50. McGill-Queen's University Press, Montreal.

IEA (International Energy Agency) (2016): Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems. Paris.

IES (International Energy Agency) (2018): World Energy Balances.

Iten R., Oettli B., Wunderlich A., Hammer S., Cooremans C., Schönenberger A., Ouni M., Brunner C.U., Werle R.: (2017): Management as a Key Driver of Energy Performance (Final Report), INFRAS AG, Zürich.

Kaufmann-Hayoz R., Gutscher H. (2001): Transforming towards Sustainability: An Interdisciplinary, Actor-Oriented Perspective. In: Kaufmann-Hayoz R., Gutscher H. (Hrsg.): Changing Things – Moving People: Strategies for Promoting Sustainable Development at the Local Level, 19–25, Birkhäuser, Basel – Boston – Berlin.

Kaufmann-Hayoz R. (2006): Human action in context: A model framework for interdisciplinary studies in view of sustainable development. In: *Umweltpsychologie*, 10(1), 154–177.

Kupper P. (2003): Atomenergie und gespaltene Gesellschaft: Die Geschichte des gescheiterten Projekts Kernkraftwerk Kaiseraugst. Chronos, Zürich.

Kupper P. (2003a): Die 1970er-Diagnose: Grundsätzliche Überlegungen zu einem Wendepunkt der Umweltgeschichte. In: *Archiv für Sozialgeschichte* 43, Umwelt: 325–348.

Kupper P., Pallua I. (2016): Energieregime in der Schweiz seit 1800. Bundesamt für Energie, Bern; <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/45346.pdf>.

Küstenmacher W.T., Seiwert L.J. (2004): Simplify your life. Einfacher und glücklicher leben. Campus, Frankfurt, New York.

Lange Ch. (2019): Load Shifting and Peak Shaving: Simulation, Prototype Development, Validation. Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology. https://www.energy-seeds.org/content/dam/energy-seeds/de/documents/2016-06-27_Flyer_TF5.pdf (Download: März 2019).

Linder W., Mueller S. (2017): Schweizerische Demokratie: Institutionen, Prozesse, Perspektiven. Haupt Verlag. Bern.

Linz M. (2017): Wie Suffizienzpolitiken gelingen: eine Handreichung. Wuppertal Special 52. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (Hrsg.), Wuppertal.

Orehounig K., Mavromatidis G., Evins R., Dorer V., Carmeliet J. (2014): Towards an energy sustainable community: An energy system analysis for a village in Switzerland. In: *Energy and Buildings* 84, 277–286. doi:10.1016/j.enbuild.2014.08.012.

Ott W., Jakob M., Bolliger R., Bade S., Karlegger A., Jaberg A., Berleth H. (2013): Erneuerungstätigkeit und Erneuerungsmotive bei Wohn- und Bürobauten. Hrsg.: Energieforschung Stadt Zürich, Bericht Nr. 12, Forschungsprojekt FP-2.2.1.

Prognos AG (2012): Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, Basel.

Prognos AG, Infrac AG, TEP Energy GmbH: (2013): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2012 nach Verwendungszwecken. Hrsg.: Bundesamt für Energie (BFE). Ittigen.

Ricci A. et al. (2009): Policy use of the NEEDS results; NEEDS project «New Energy Externalities Developments for Sustainability». Brüssel.

Roth S., Hirschberg S., Bauer C., Burgherr P., Dones R., Heck T., Schenler W. (2009): Sustainability of electricity supply technology portfolio. In: *Annals of Nuclear Energy*, 36, 409–416. DOI: 10.1016/j.anucene.2008.11.029.

Rütter H., Staub P. (2018): Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Immobilienwirtschaft. HEV Schweiz, Zürich.

Sachs W. (1993): Die vier E's: Merkposten für einen massvollen Wirtschaftsstil. In: *Politische Ökonomie* 33, 69–72.

Sager F. (2014): Infrastrukturpolitik: Verkehr, Energie und Telekommunikation. In: Knoepfel P., Vatter A., Häusermann S., Papadopoulos Y., Sciarini P. (Hrsg.): Handbuch der Schweizer Politik, 721–748, NZZ Libro, Zürich.

Sahakian M., Bertho B. (2018): L'électricité au quotidien : le rôle des normes sociales pour la transition énergétique suisse. Genf. (www.unige.ch/sciences-societe/socio/energiebrochure)

Salm S., Hille S.L., Wüstenhagen R. (2016): What are retail investors' risk-return preferences towards renewable energy projects? A choice experiment in Germany. In: *Energy Policy* 97, 310–320.

Salm S., Wüstenhagen R. (2018): Dream team or strange bedfellows? Complementarities and differences between incumbent energy companies and institutional investors in Swiss hydropower. In: *Energy Policy* 121, 476–487.

Schenler W., Hirschberg S., Burgherr P., Makowski M., Granat J. (2009): Final report on sustainability assessment of advanced electricity options, NEEDS deliverable no. D10.2-Research stream 2b, NEEDS project. Brüssel.

Schneidewind U., Zahrnt A. (2013): Damit gutes Leben einfacher wird: Perspektiven einer Suffizienzpolitik. Oekom, München.

Schweizer-Ries P. (2009): Ein Verhaltensmodell zum Umdenken und Umlenken. Nachhaltige Konsummuster aus umweltspsychologischer Sicht. In: Müller M. (Hg): Nachhaltigkeit: Burnout eines revolutionären Anspruchs? Umwelt–Wirtschaft–Soziales: Zuspitzung eines Dauerkonflikts, 101–116. Loccum, Rehburg.

Stadelmann-Steffen I., Ingold K., Rieder S., Dermont C., Kammermann L., Strotz C. (2018): Akzeptanz erneuerbarer Energie. Bern.

Stengel O. (2011): Suffizienz: Die Konsumgesellschaft in der ökologischen Krise. Wuppertaler Schriften, Wuppertal.

Thaler R.H., Sunstein C.R. (2009): Nudge. Wie man kluge Entscheidungen anstößt. Econ, Berlin.

Ulli-Beer S., Hettich P., Kratz B., Krause T., Kubli M., Walther S., Kobe C. (2016): Netznutzungstarife im Zielkonflikt: Anreize für den Ausbau erneuerbarer Energien versus Verursachergerechtigkeit, SCCER CREST (Hrsg.) White Paper 2.

UVEK (Departement für Umwelt, Energie, Verkehr und Kommunikation) (2001): Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL). Hrsg.: Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).

Verloop J. (2004): Insight into Innovation. Elsevier B.V.

Volkart K., Weidmann N., Bauer C., Hirschberg S. (2017). Multi-criteria decision analysis of energy system transformation pathways: A case study for Switzerland. In: *Energy Policy*, Vol. 106, 155–168. doi: 10.1007/978-3-658-27041-4_9.

VSE (Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen) (2018): Strom aus Biomasse.

Wallerand A.S., Moret S., Kantor I., Butun H., Kermani M., Santecchia. A, Maréchal F. (2018): Energy saving potentials in the Swiss industry toward the goals of ES2050, EPFL, Lausanne.

Wildi T. (2003): Der Traum vom eigenen Reaktor: Die schweizerische Atomtechnologieentwicklung 1945–1969. Chronos, Zürich.

Wissen Hayek U., Spielhofer R., Luthe T., Salak B., Hunziker M., Kienast F., Thrash T., Schinazi V., Steiger U., Grêt-Regamey A. (2019): Landschaftsstrategie für erneuerbare Energiesysteme. Resultate, Schlussfolgerungen und Entwurf der Empfehlungen. Zürich.

Wüstenhagen R., Wolsink M., Bürer M.J. (2007): Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. In: *Energy Policy* 35(5), 2683–2691.

Zoellner J., Schweizer-Ries P., Rau I. (2012): Akzeptanz erneuerbarer Energien. In: Müller T. (Hrsg.): 20 Jahre Recht der erneuerbaren Energien, 91–106, Nomos Verlag, Baden-Baden.

Anhang

Leitungsgruppe NFP 70

Prof. em. Dr. Hans-Rudolf Schalcher, ETH Zürich (Präsident)

Prof. em. Dr. Göran Andersson, ETH Zürich

Prof. em. Dr. René L. Flükiger, Département de Physique de la Matière Condensée (DPMC), Universität Genf

Prof. em. Dr. Beat Hotz-Hart, Universität Zürich (Mitglied der Leitungsgruppe des NFP 71 mit Einsitz in der Leitungsgruppe des NFP 70)

Dr. Tony Kaiser, E-Consulting, Bülach

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kleiner, Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL), Universität Dortmund

Prof. em. Dr. Martha Lux-Steiner, Helmholtz-Zentrum Berlin / Freie Universität

Prof. Dr. Dimos Poulikakos, Direktor, Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT), ETH Zürich (bis 30. April 2019)

Dr. Jan van der Eijk, Technology and Business Innovation Consultant, Dordrecht

Delegierte der Abteilung Programme des Nationalen Forschungsrats für das NFP 70

Prof. Dr. Peter Chen, Laboratorium für Organische Chemie (LOC), ETH Zürich (bis 31. Januar 2015)

Prof. Dr. Dimos Poulikakos, Direktor, Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT), ETH Zürich (ab 1. Mai 2019)

Prof. Dr. Frank Scheffold, Departement für Physik, Universität Freiburg (1. Februar 2015 bis 30. April 2019)

Bundesvertreter im NFP 70

Dr. Sebastian Friess, Leiter Innovationspolitik, Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI), Bern (bis 30. April 2017)

Dr. Rolf Schmitz, Leiter Sektion Energieforschung, Bundesamt für Energie (BFE), Bern

Leitungsgruppe NFP 71

Prof. Dr. Andreas Balthasar, Politikwissenschaftliches Seminar, Universität Luzern (Präsident)

Dr. Konrad Götz, Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE), Frankfurt/Main

Prof. em. Dr. Beat Hotz-Hart, Universität Zürich

Prof. Dr. Miranda Schreurs, Hochschule für Politik München (HfP), Technische Universität München

Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries, Professorin für Nachhaltigkeitswissenschaft an der Hochschule Bochum und apl. Prof. für Umweltpsychologie an der Universität des Saarlandes

Prof. Dr. Frédéric Varone, Département de science politique et relations internationales, Université de Genève (ab 1. Januar 2017)

Prof. Dr. Hannelore Weck-Hannemann, Professur für Politische Ökonomie, Institut für Finanzwissenschaft, Universität Innsbruck

Delegierte der Abteilung Programme des Nationalen Forschungsrats für das NFP 71

Prof. Dr. Claudia R. Binder, Laboratory for Human-Environmental Relations in Urban Systems (HERUS), EPFL Lausanne (ab 1. Januar 2017)

Prof. Dr. Frédéric Varone, Département de science politique et relations internationales, Université de Genève (bis 31. Dezember 2016)

Bundesvertreter im NFP 71

Dr. Matthias Gysler, stellvertretender Leiter Abteilung Energiewirtschaft, Leiter Sektion Marktregulierung, Bundesamt für Energie (BFE), Bern

Programm-Manager NFP 70 und NFP 71

Dr. Stefan Husi, Schweizerischer Nationalfonds, Bern

Team für Wissens- und Technologietransfer NFP 70 und NFP 71

Dr. Andrea Leu (Teamleitung), Senarclens, Leu + Partner AG, Zürich

Theres Paulsen, Netzwerk für transdisziplinäre Forschung td-net, Akademien der Wissenschaften Schweiz, Bern (bis 31. Dezember 2016)

Daniel Schaller, Planair AG, La Sagne (TCT Antenne Romande / ab 1. Januar 2018)

Dr. Oliver Wimmer, CR Kommunikation AG, Zürich

