



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Eidgenössische Energieforschungskommission CORE

Konzept der Energieforschung des Bundes 2021–2024

Ausgearbeitet durch die
Eidgenössische Energieforschungskommission CORE

Impressum

StandSeptember 2020
HerausgeberinEidgenössische Energieforschungskommission CORE
LeitungKatja Maus

Autoren und Autorinnen

Allgemeiner TeilKatja Maus, BFE
Energie, Gesellschaft und PolitikmassnahmenAnne-Kathrin Faust, BFE
Wohnen und ArbeitenAndreas Eckmanns, BFE
MobilitätMen Wirz, BFE
EnergiesystemeStefan Nowak, NET Nowak Energie und Technologie AG
Industrielle ProzesseCarina Alles, BFE

Unter Beizug und Mitarbeit der SCCER und weiterer Expertinnen und Experten

CORE-Sekretariat
c/o Bundesamt für Energie
CH-3003 Bern
Tel. + 41 58 462 39 78

www.energieforschung.ch

Inhalt

VISION	4
SCHWEIZER ENERGIEFORSCHUNG	5
EMPFEHLUNGEN	11
WIRTSCHAFT, GESELLSCHAFT UND POLITIKMASSNAHMEN	14
WOHNEN UND ARBEITEN	17
MOBILITÄT	23
ENERGIESYSTEME	27
INDUSTRIELLE PROZESSE	32
ANHANG: FORSCHUNGSTHEMEN	37

Vision

Energie wird effizient und emissionsneutral umgewandelt, bereitgestellt, gespeichert und verwendet. Die Schweizer Energieforschung leistet dazu einen entscheidenden Beitrag; sie strebt eine sichere, ökonomisch und ökologisch tragbare Energieversorgung an und unterstützt damit eine effiziente Energiepolitik.

Forschung für eine erfolgreiche Energiezukunft

Der Bundesrat und das Parlament haben für die Schweiz den mittelfristigen Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen; seit 1. Januar 2018 ist das neue Energiegesetz in Kraft. Das Bundesamt für Energie hat dazu die *Energiestrategie 2050* erarbeitet. Mit der *Energiestrategie 2050* hat sich die Schweiz ehrgeizige Effizienzziele sowohl bei der Nutzung fossiler Energie als auch beim Stromkonsum gesetzt. Die Produktion von Strom aus erneuerbaren Quellen – Photovoltaik, Windenergie, Biomasse und Geothermie – soll stark erhöht werden und den wegfallenden Nuklearstrom ersetzen. Gegenüber heute bedeutet die Energiestrategie 2050 pro Kopf der Schweizer Bevölkerung etwa eine Verdopplung der Energieeffizienz und eine Reduktion des Stromkonsums von ca. 10–20 %.

Ein effizienter, umweltfreundlicher und emissionsarmer Umgang mit Energie ist laut Weltklimarat IPCC¹ für den ganzen Globus äusserst dringlich. Nach dem Übereinkommen von Paris 2015, das die Staaten der Welt verpflichtet, Massnahmen zum Klimaschutz durchzuführen, um die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C bzw. 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau zu

begrenzen, erstellte der Weltklimarat einen Sonderbericht zum 1,5 °C-Ziel. Die jetzigen Reduktionspläne der Treibhausgasmissionen sind nicht ausreichend; um die Erderwärmung auf maximal 1,5 °C zu begrenzen, ist eine radikale Reduktion weltweit insbesondere bis 2030 erforderlich.

Die IPCC-Szenarien beinhalten sowohl beschleunigte Verbesserungen bei der Energieeffizienz als auch einen drei- bis vierfach höheren Anteil kohlenstofffreier oder kohlenstoffarmer Energiebereitstellung durch erneuerbare Energie, Kernenergie und fossile Energie gekoppelt mit Kohlenstoffabtrennung und -speicherung (CCS). Die Schweiz hat das Abkommen von Paris ratifiziert. Bis 2030 verlangt die schweizerische Klimapolitik eine Reduktion von 50 % gegenüber 1990. Das gesetzliche Klimaziel² von 20 % Reduktion bis 2020 wurde verpasst und es sind grössere Anstrengungen zur Reduktion der klimaschädlichen Gase nötig. Um die Pariser Klimaziele von 2015 zu erreichen hat der Bundesrat im Sommer 2019 «Netto-Null Emissionen» für 2050 beschlossen³.

Energieforschungskonzept des Bundes

Das Energieforschungskonzept des Bundes ist eine gemeinsame Vision der Schweizer Forschergemeinde mit Empfehlungen für die mit Mitteln der öffentlichen Hand finanzierte Energieforschung in der Schweiz. Es beschreibt Forschungsziele, die zur Erreichung der Energiestrategie 2050 und der Agenda 2030 wichtig sind.

Das Konzept ist ein Planungsinstrument für alle Förderinstanzen des Bundes. Es ist auch eine Orientierungshilfe für die kantonalen und kommunalen Stellen, die über eigene Förderinstrumente in der Energieforschung verfügen.

Das vorliegende Konzept gilt für die Forschungsperiode 2021–2024. Es wurde von der CORE unter Einbezug wichtiger Akteure der Energieforschung erarbeitet. Es stützt sich auf aktuelle, international anerkannte wissenschaftliche Erkenntnisse und berücksichtigt die energiepolitischen Ziele der Schweiz.

¹ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change — ² <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/klimapolitik-der-schweiz.html> — ³ <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-76206.html>

Die Schweiz hat sich ebenfalls der UNO «*Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung*» («*Sustainable Development*») verpflichtet. Sie ist seit 2016 der global geltende Rahmen für die nationalen und internationalen Bemühungen zur gemeinsamen Lösung der grossen Herausforderungen der Welt, wie extreme Armut, Klimawandel, Umweltzerstörung oder Gesundheitskrisen. Die Energieforschung soll vor allem zur Erreichung der Ziele 7: «Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern», 12: «Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen» und 13: «Umgehend Massnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen» beitragen.

Die CORE sieht als wichtigstes Ziel die interdisziplinäre Entwicklung neuer, umsetzbarer und akzeptierter Energietechnologien. Die zunehmende Bedeutung von Querschnittstechnologien verlangt eine deutlich verstärkte Zusammenarbeit sowohl unter den technischen Forschungsgebieten als auch zwischen den technischen und den Sozial- und Geisteswissenschaften (SGW).

Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE)

Die CORE wurde 1986 als beratendes Organ für die Schweizer Energieforschung durch den Bundesrat eingesetzt. Unter anderem erarbeitet sie alle vier Jahre das Energieforschungskonzept des Bundes, prüft die schweizerische Energieforschung und äussert sich zur energiebezogenen Ressortforschung des Bundes. Der CORE gehören 15 Mitglieder an, welche Forschung und Wissenschaft, KMU und Grossindustrie im Energiebereich vertreten. Ihre aktuelle Zusammensetzung kann unter www.energiforschung.ch eingesehen werden.

Energieforschung und Innovation

Die Schweiz gehört weltweit zu den innovativsten Ländern und nimmt in verschiedenen Vergleichen seit Jahren eine Spitzenstellung ein. Im *Global Innovation Index 2019* und im *Innovation Union Scoreboard 2019* der EU liegt sie in Europa auf Platz 1. Für die Innovationsleistung eines Staates werden zahlreiche Parameter gemessen und verglichen, darunter Tätigkeiten und Erträge der Unternehmen, «Human Resources», offene, hervorragende und attraktive Forschungssysteme sowie Finanzierung und Förderung der Forschung. Um den Forschungsstandort Schweiz – und damit die Energieforschung – auf dem aktuellen hohen Niveau zu halten, bedarf es weiterer Anstrengungen.

Wissens- und Technologietransfer

Die Schweiz braucht für die Erhaltung ihrer Innovationskraft offene «symbiotische Systeme» für Forschung und Entwicklung. Die Zusammenarbeit zwischen ETH-Bereich, Fachhochschulen und Universitäten, als auch mit weiteren Akteuren ist zu fördern und Netzwerke sind zu erhalten und weiter-

Energieforschung

Unter Energieforschung wird in diesem Konzept die Entwicklung von wissenschaftlichem und technischem Wissen verstanden, das für die wirtschaftliche, umweltgerechte und effiziente Deckung des Energiebedarfs notwendig ist. Die Energieforschung umfasst die Grundlagenforschung, soweit ihre Ziele sich auf Energiebereiche beziehen, die anwendungsorientierte Forschung, die bestehende Wissenslücken zur Lösung spezifischer praktischer Probleme schliessen soll, und die Entwicklung, die das vorhandene Wissen zur Schaffung marktfähiger neuer Produkte und Verfahren bewertet.

zuentwickeln. Sie unterstützen den Wissenstransfer zwischen der Forschung und der Umsetzung.

Dem Wissens- und Technologietransfer von den Hochschulen in die Praxis und zurück kommt eine zentrale Bedeutung zu, damit die in der Forschung erzielten Resultate eine Wertschöpfung am Markt erzielen. Ein Mittel dazu sind Pilot- und Demonstrationsanlagen; sie sollen in Zusammenarbeit mit der Wirtschaft und weiteren möglichen Akteuren frühzeitig geplant werden. Mit ihnen lassen sich die technische Machbarkeit bzw. die Realisierbarkeit in grossmasstäblichen Anlagen aufzeigen mit dem Ziel, das Risiko für private Investoren zu reduzieren.

Wissen muss weitergegeben und angewendet werden. Deshalb spielt die Ausbildung der wissenschaftlichen und technischen Fachkräfte eine wichtige Rolle.

Internationale Einbindung

Die internationale Forschungszusammenarbeit fördert die Qualität der Forschung und die Effizienz der eingesetzten Forschungsmittel. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Zusammenarbeit sind die aktive Teilnahme an internationalen Programmen – insbesondere die Beteiligung an den EU-Rahmenprogrammen – sowie anerkannte, qualitativ hochwertige Beiträge der Schweiz.

Höchste Priorität hat die Einbindung der Schweizer Forschenden in Forschungsaktivitäten der IEA und der EU. Die internationale Zusammenarbeit und der Austausch von Forschenden sollen aber über die EU und den Kreis der Industriestaaten hinausgehen und sich entwickelnde Staaten einbeziehen.

Über die jeweils federführenden Bundesstellen – Staatssekretariats für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI) bzw. Bundesamt für Energie (BFE) – soll diese Zusammenarbeit sichergestellt und gestärkt werden. Die «Wissensökonomie Schweiz» ist auf «Bildungsausländer» angewiesen. Der Nachwuchs in akademischen Berufen, von Führungskräften und von Beschäftigten im Bereich der wissensbasierten Dienstleistungen kann ohne sie nicht sichergestellt werden.

Die Forschungsschwerpunkte im Kontext

Die Energieforschung soll von einer ganzheitlichen Denkweise getragen werden und sich am Prinzip der nachhaltigen Entwicklung orientieren. Das Energieforschungskonzept des Bundes deckt grundsätzlich die gesamte Wertschöpfungskette Forschung – Innovation – Markt ab und strebt mit der durch die öffentliche Hand geförderten Energieforschung – neben Resultaten von hoher Qualität – einen volkswirtschaftlichen Nutzen an.

Technik

Bei allen technischen Lösungen, die der Energiebereitstellung, -umwandlung, -speicherung und -nutzung dienen, wird die grösstmögliche, wirtschaftlich vertretbare Annäherung an das jeweilige technische Potenzial angestrebt. Die Möglichkeiten durch die Digitalisierung sollen als Querschnittsthema in allen thematischen Schwerpunkten ausgeschöpft werden.

Ressourcen

Als zentrale Elemente der Energieforschung sieht die CORE neue und verbesserte Technologien und Erkenntnisse zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz und den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energie. Produktionskreisläufe sind soweit wie möglich zu schliessen, schädliche Emissionen zu vermeiden und die Kreislaufwirtschaft anzustreben.

Ökonomie und Volkswirtschaft

Das Energieforschungskonzept zielt darauf ab, die Versorgungssicherheit der Schweiz zu verbessern und langfristig zu sichern, Wertschöpfung in Form von Arbeitsplätzen, Know-how oder neuen marktfähigen Produkten für das Land zu generieren und die Konkurrenzfähigkeit der Schweiz international zu steigern sowie ihre Wertigkeit für die Zusammenarbeit zu erhalten.

Gesellschaft

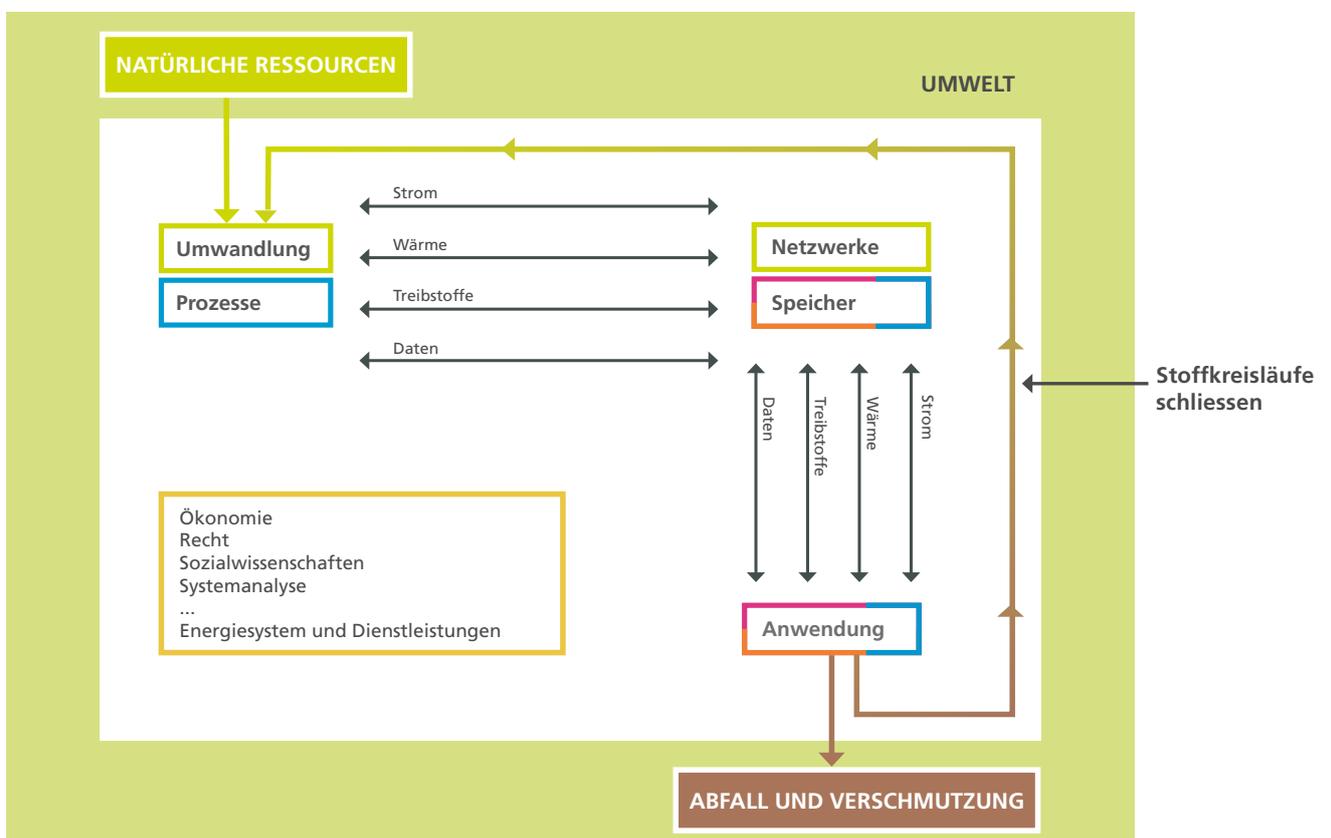
Es sind Fragen zu gesellschaftlichen Bedürfnissen und zu Politikmassnahmen zu beantworten, die eine Umwandlung des Energiesektors ermöglichen. Dabei werden beispielsweise soziologische, psychologische

sowie politologische Fragestellungen der Energiebereitstellung, -umwandlung, -speicherung und -nutzung untersucht. Und nicht zuletzt soll die Energieforschung zum Verständnis beitragen, dass sich weder eine nationale Energiepolitik noch eine globale Klimapolitik mit technischen Massnahmen allein umsetzen lässt. Im Interesse einer nachhaltigen Energienutzung sind Verhaltensänderungen erforderlich.

Forschungsfragen in den Themenbereichen «Ökonomie und Volkswirtschaft» sowie «Gesellschaft» werden in diesem Konzept den Sozial-, Wirtschafts- und Humanwissenschaften zugeordnet. Entsprechend sind sie im Kapitel «Energie – Gesellschaft – Politikmassnahmen» aufgeführt. Haben sie einen starken technischen Bezug, werden sie in den entsprechenden Schwerpunktkapiteln beschrieben.

Das Gesamt-Energiesystem

Unter «Energiesystem» wird in diesem Konzept die Umwandlung, Speicherung, Bereitstellung und Verwendung von Energie aus natürlichen Ressourcen und innerhalb des Stoffkreislaufs sowie dem gesellschaftlichen Rahmen verstanden. Die Abbildung zeigt das Energiesystem stark vereinfacht und schematisch auf. Aus der Umwelt werden durch «Umwandlung und Prozesse» der natürlichen Ressourcen (Wasser, Sonne, Wind, Bodenschätze etc.) Energieträger (Strom, Wärme, Treib- und Brennstoffe) und Produkte bereit- und hergestellt. Sie werden verteilt, gespeichert und durch Anwendungen umgewandelt respektive verbraucht. Zwischen allen Akteuren, Bedingungen und Prozessen bestehen mannigfaltige Abhängigkeiten und Wechselwirkungen. Ziel der Energieforschung ist es, diese Komplexität zu verstehen und aus dieser Kenntnis heraus bestmögliche Weiterentwicklungsoptionen des Gesamtsystems und seiner Teile z.B. der Sektorkopplung zu finden.



Die CORE hat das Energiesystem in fünf Schwerpunkte unterteilt (Seite 10), denen sich im Wesentlichen alle Bereiche der Energieforschung zuordnen lassen. Sie widerspiegeln das tägliche Leben und die damit verbundenen Aspekte von Energiegewinnung und -nutzung; sie werden in der Abbildung mit den Farben der im vorliegenden definierten Schwerpunkte verdeutlicht.

Der mit gelb markierte Bereich der Grafik (Abbildung 1, Schwerpunkt **«ENERGIE, GESELLSCHAFT UND POLITIKMASSNAHMEN»**) umfasst die gesellschaftlichen Komponenten des Energiesystems und setzt den ökonomischen und rechtlichen Rahmen. In Magenta sind die Bereiche des Schwerpunkts **«WOHNEN UND ARBEITEN»** markiert. Gebäude und Areale sind mehrheitlich dem verbrauchenden Sektor zuzuordnen, sie sind aber auch «Träger» von Speichern und «Umwandlern» wie z.B. Photovoltaik oder Wärme/Kältespeicher. In ökonomischen Betrachtungen gibt es dafür die Bezeichnung «Prosumer». Ähnliches gilt für den Schwerpunkt **«MOBILITÄT»**, ein klassischer «Verbraucher», welcher in Form der Elektromobilität regelbar sein und als Speicher das elektrische Netz stabilisieren soll.

Der Schwerpunkt **«ENERGIESYSTEME»** beinhaltet die Umwandlung und Verteilung von Energie in all ihren Formen. Der letzte Schwerpunkt **«INDUSTRIELLE PROZESSE»** umfasst die Herstellung von Gütern aber auch von Brenn- und Treibstoffen und findet sich daher bei den Anwendungen wie bei den Prozessen im Schema in blau. Gerade dieser Schwerpunkt soll stark zum Ziel der Schliessung der Stoffkreisläufe beitragen, damit die Abgabe von Abfall und Verschmutzung an die Umwelt möglichst vermieden und der Verbrauch natürlicher Ressourcen reduziert werden kann.

Das Energiesystem als solches beinhaltet somit die verschiedenen Sektoren und derer Kopplung über Strom, Wärme, Treibstoffe sowie Daten, geht aber deutlich darüber hinaus. Die Forschenden sollen auch bei der Erarbeitung von spezifischen Fragestellungen eine ganzheitliche Betrachtung anstreben und ihren Lösungsansatz am Beitrag zum Energiesystem messen.

Mit den Forschungszielen dieser Schwerpunkte sollen die Schlüsselthemen für die Forschung «top-down» hergeleitet werden können und das Systemdenken sowie die Disziplinen übergreifende Forschung gefördert werden.

Die Schwerpunkte

ENERGIE, GESELLSCHAFT UND POLITIK- MASSNAHMEN

Der Übergang zu einem erneuerbaren, sicheren und effizienten Energiesystem wird durch Märkte, Politikmassnahmen und Institutionen ermöglicht werden, die so ausgestaltet sind, dass sie Energieeffizienz und den Übergang zu erneuerbaren Energien effizient fördern, breite Akzeptanz geniessen und dem individuellen Wohlbefinden dienen. Die Forschungsarbeit im Schwerpunkt Wirtschaft, Gesellschaft und Politikmassnahmen bietet fundiertes Wissen, das für das Verständnis und die Gestaltung solcher Märkte, Politikmassnahmen und Institutionen erforderlich ist.

WOHNEN UND ARBEITEN

Der Gebäudepark wird in Zukunft klimaneutral und energieeffizient betrieben und trägt dezentral dazu bei, Bereitstellung und Nachfrage in Energienetzen – Strom, Wärme, Kälte – im Gleichgewicht zu halten. Die Forschung zeigt sozialverträgliche technologische Wege dazu auf.

MOBILITÄT

«Eine emissionsfreie Mobilität, die den Anforderungen und Bedürfnissen von Gesellschaft und Wirtschaft entspricht.»

Die Mobilitätsforschung ermöglicht angesichts einer wachsenden Nachfrage die Umsetzung der erforderlichen Technologien, Lösungen und Kenntnisse, um eine hocheffiziente, wirtschaftliche und zweckmässige Mobilität anzubieten.

ENERGIESYSTEME

«Saubere, zuverlässige, kostengünstige Energie in geeignetem Mass und zeitgerecht.»

Dezentrale erneuerbare Energiesysteme werden Schlüsselemente des künftigen Energiesystems. Sie erfordern neue Formen der Netzintegration und werden durch Digitalisierung und neue Geschäftsmodelle beflügelt. Weiterführende Forschungsarbeiten an allen Komponenten des Energiesystems, an der Netzintegration und an der Resilienz für externe Faktoren bilden die Grundlage für eine bezahlbare und sichere Energiewende.

INDUSTRIELLE PROZESSE

Die industriellen Prozesse werden zum Eckstein der Kreislaufwirtschaft, in der Produkte und Dienstleistungen während des gesamten Lebenszyklus nur einen minimalen Energie-, Material- und Emissionsabdruck hinterlassen.

Die Forschung ermöglicht das Entwickeln innovativer Prozesstechnologien und intelligenter Managementpraktiken, die die industrielle Ressourceneffizienz so weit vorantreiben, dass der Materialverbrauch minimiert und der Energiebedarf aus erneuerbaren Quellen abgedeckt wird.

ZEITHORIZONTE FÜR DIE EMPFOHLENEN FORSCHUNGSZIELE

In den folgenden Kapiteln werden Prioritäten und Ziele für die fünf thematischen Schwerpunkte definiert; sie sind auf zwei Zeithorizonte ausgerichtet:

- mittel- bis langfristige Forschungsprioritäten für den Zeithorizont 2030–2050
- kurzfristige Ziele für den Geltungsbereich des vorliegenden Energieforschungskonzepts von 2021–2024.

Empfehlungen

Die CORE empfiehlt den Förderinstanzen der öffentlichen Hand, sich am vorliegenden Energieforschungskonzept zu orientieren um sicherzustellen, dass die öffentlichen Gelder zielgerichtet und koordiniert eingesetzt werden.

Forschungspolitischer Hintergrund

Im Rahmen der *Energiestrategie 2050* wurden in den BFI-Perioden⁴ 2013–2016 und 2017–2020 im Rahmen des «Aktionsplan koordinierte Energieforschung» in acht Kompetenzzentren («Swiss Competence Centers for Energy Research», SCCER) neue Forschungsgruppen aufgebaut. Der mit dem Aktionsplan bezweckte Kapazitätsaufbau wurde erfolgreich abgeschlossen. Mit Beginn der Forschungsperiode 2021–2024 erhalten die SCCER wie vorgesehen keine weitere Unterstützung mehr. Die Forschungskapazität ist durch die Hochschulen zu erhalten und alle Forschungsmittel sind einzuwerben. Ebenfalls erfolgreich abgeschlossen wurden die beiden Nationalen Forschungsprogramme (NFP) des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) zu den Themen «Energiewende» (NFP 70) und «Steuerung des Energieverbrauchs» (NFP 71). In der aktuellen Periode gilt es, den für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiestrategie 2050 und der CO₂-Ziele weiterhin bestehenden Forschungsbedarf anzugehen und das entstandene Wissen und die aufgebauten Forschungsgruppen optimal zu nutzen, weiterzuentwickeln und Innovationen zu schaffen.

Grundsätze der Förderung

Primär soll im Bereich Energie die anwendungsorientierte Forschung gefördert werden. Den Vorrang sollen Forschungsgebiete haben, die eine hohe Wertschöpfung für die Schweiz und einen nachhaltigen Beitrag zur nationalen Versorgungssicherheit erwarten lassen. Die Energieforschung soll so einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung der nationalen Energiestrategie 2050, der Nachhaltigkeitsstrategie und der Einhaltung der Klimaziele liefern. Das vorliegende Konzept enthält auch Empfehlungen für Energieforschung, die nicht in direktem Zusammenhang mit diesen Zielen stehen. Voraussetzung dafür

ist die hohe Qualität der Forschung, die international eingebunden und konkurrenzfähig sein muss.

Das starke Engagement der öffentlichen Hand bei der Vernetzung von Forschungsinstitutionen, der Identifizierung wichtiger zukünftiger Technologiegebiete, der Förderung der internationalen wissenschaftlichen Zusammenarbeit und der Zusammenarbeit von Hochschulen und Wirtschaft ist für die Umsetzung der Forschungsergebnisse zentral und soll weitergeführt werden. Eine effiziente und zielgerichtete Umsetzung wird gefördert durch eine wirtschaftsfreundliche Regelung des mit öffentlichen Fördermitteln erarbeiteten geistigen Eigentums wie beispielsweise Patente oder Lizenzen.

Stärkung der Energieforschung

In den von der Kommission für Technologie und Innovation (KTI, heute Innosuisse) 2013 bis 2020 aufgebauten und geförderten acht SCCER ist die hochschul- und disziplinenübergreifende Zusammenarbeit stark etabliert worden. Die geschaffenen Netzwerke und Forschungskapazitäten sollen auch in Zukunft erhalten bleiben, wobei sich für den Erhalt der Forschungsstellen die Hochschulen verpflichtet haben. Mit dem Auslaufen der SCCER-Förderung und der über den SNF finanzierten nationalen Forschungsprogramme NFP 70 und NFP 71 fallen beachtliche Fördermittel in der Energieforschung weg.

Diese Lücke kann zum Teil mit dem neuen, beim BFE angesiedelten Förderinstrument SWEET (Swiss Energy research for the Energy Transition) geschlossen werden. Über thematische Ausschreibungen fördert SWEET Konsortien über Hochschultypen und Disziplinen hinweg und verlangt explizit den Einbezug von Umsetzungspartnern (z.B. Industriepartner, Gemeinden). Forschungsergebnisse müssen mittels Demonstratoren für die Umsetzung bereitgestellt werden. So werden einerseits die besten Forschenden und Forschergruppen weiter gefördert und andererseits erfolgt eine gezielte Unterstützung der Energiestrategie 2050.

Ressortforschung des Bundes

Eine wichtige Funktion bei der Förderung der Schwei-

⁴ BFI: Bildung, Forschung, Innovation.

zer Energieforschung hat die Ressortforschung des BFE. Mit ihren finanziellen Mitteln gelingt es ihr, zukunftssträchtige Technologien und Projekte zu unterstützen, die sich in Bezug auf ihre technologische Reife zwischen Grundlagenforschung und Marktnähe befinden; sie ist somit eine sinnvolle Ergänzung zur Förderung durch den SNF und die Innosuisse. Dazu gehört auch die Herleitung praxistauglicher, validierter Modelle.

Ferner ist das BFE vom Bundesrat beauftragt, die Beteiligung der Schweiz Forschenden an den Forschungsprogrammen (Technology Collaboration Programmes, TCP) der Internationalen Energieagentur (IEA) sicherzustellen. Neben den Länderbeiträgen finanziert das BFE dabei zum Teil auch die Aufwendungen von Schweizer Forschenden im Rahmen der einzelnen Forschungsprogramme.

Die Schweiz beteiligt sich im Rahmen der europäischen Forschungsrahmenprogramme stark an den sogenannten European Research Area Networks (ERA-Net). Hier kommt der Ressortforschung des BFE ebenfalls eine besondere Rolle zu, da die Finanzierung der energiebezogenen Ausschreibungen durch das BFE finanziert oder mindestens koordiniert wird.

Die CORE empfiehlt, den Umfang der Ressortforschung im Energiebereich mindestens auf dem Niveau der Vorjahre beizubehalten und damit unter anderem die internationale Einbindung – vor allem bei den Forschungsprogrammen der IEA und der EU – sicherzustellen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Mit den Mitteln für Pilot- und Demonstrationsprojekte im Energiebereich wird die Energiepolitik durch die beschleunigte Einführung innovativer Technologien in den Markt unterstützt. Gerade durch Demonstratoren im 1:1-Massstab wird sichtbar, wie die Umsetzung der Energiestrategie 2050 funktionieren kann. Vertrauen der Bevölkerung wird geschaffen; neue Technologien und Lösungen werden einem Praxistest unterzogen und erlebbar gemacht. Gleichzeitig wird die Ausstrahlung schweizerischer Innovationen über die Landesgrenze hinaus verstärkt. Die CORE empfiehlt, diese

Finanzmittel auf dem derzeitigen Niveau von etwa 30 Millionen Franken zu belassen, die Projektanträge weiterhin streng zu evaluieren und insbesondere die Anliegen der Energiestrategie 2050 zu berücksichtigen.

Für die Erprobung neuer Technologien, Verfahren und Vorgehensweisen sind für Feldversuche und Experimente rechtliche Möglichkeiten zu schaffen, sofern sie ethisch vertretbar sind.

Know-how-Erhalt in der Kernenergie

Ein Gebiet, das besondere Aufmerksamkeit braucht, ist jenes der Fachkräfte im Bereich der Kernenergie. Nicht nur für die Restlaufzeit der Schweizer Kernkraftwerke, sondern auch für den Nachbetrieb, die Phase des Rückbaus und der geplanten Einlagerung – noch bis weit ins nächste Jahrhundert – braucht die Schweiz Nachwuchskräfte. Zudem muss die Expertise für die Begutachtung der Entwicklungen auf dem Gebiet der Kerntechnik erhalten bleiben. Um diese Fachkräfte auszubilden und ihre Expertise langfristig sicherzustellen, ist die entsprechende Forschung im nuklearen Bereich weiterhin nötig und zu fördern.

Uneingeschränkter Zugang zu Publikationen und Daten

Die bisherigen Bestrebungen alle Veröffentlichungen, die ganz oder teilweise mit öffentlichen Fördermitteln finanziert wurden, frei zugänglich zu machen, sollen weiter verstärkt werden. Die vorbildliche Open Access Strategie des SNF kann weiteren Förderinstanzen als Richtschnur dienen, da auch der Zugang zu Veröffentlichungen in Journals gesichert wird.

Weit schwieriger als der Zugang zu Veröffentlichungen ist der freie Zugang der Forschenden zu Daten zu bewerkstelligen. Hier regt die CORE eine Diskussion zwischen den Datenerhebenden und den Forschenden an. Es soll ein bestmöglicher Kompromiss zwischen dem nötigen Datenschutz und der wünschenswerten freien Datenverfügbarkeit gefunden werden.

Generell empfiehlt die CORE die Unterstützung der Erhebung guter und bisher nicht systematisch erhobener Daten; besonders wertvoll sind langfristige Datenreihen von mehr als 30 Jahren.

Neue Trends der Forschungsperiode 2021 bis 2024

Die CORE legt den Fokus für die Energieforschung 2021 bis 2024 auf die ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems unter besonderer Berücksichtigung der Sozial- und Geisteswissenschaften. Dies solle eine effiziente Sektorkopplung und eine Umwandlung des Energiesystems auf erneuerbare Energien ermöglichen. Verbesserte Datenanalysemöglichkeiten sollen auch in der Energieforschung genutzt werden, um z.B. selbständiges Lernen und optimierte, menschenorientierte Planung im Energiebereich zu ermöglichen.

Energie, Gesellschaft und Politikmassnahmen: Neben der langfristigen Reduktion der Nachfrage steht deren Flexibilisierung im Vordergrund. Weiter sind die optimale Integration der Erneuerbaren ins Energiesystem sowie Marktdesigns und Koordination der Akteure in einem dezentralisierten Energiesystem neue Ansätze. Verstärkt wird auf systemweite Analysen gesetzt, die auch die Analyse der Einflussfaktoren der gesellschaftlichen Transition ermöglichen.

Wohnen und Arbeiten: Der Fokus wurde im Betrachtungs- bzw. Optimierungsbereich vom Zusammenspiel des Gebäudesektors mit dem elektrischen Netz auf die Wechselwirkung mit allen Energienetzen erweitert. Diese Berücksichtigung der Durchlässigkeit der Netze (Sektorkopplung) führt im Schwerpunkt Wohnen und Arbeiten zu einer Verschiebung der Themen von der Gebäudeebene auf die Areal- und Quartierebene und resultiert in neuen Prämissen für die Optimierung des Gebäudeparks als technisches System. Stärker im Forschungsfokus stehen aber auch die Menschen als Nutzer, Besitzer und Betreiber von Gebäuden. Dies äussert sich in neuen Konzeptansätzen und neuen Methoden, um diese zu validieren (Living-Labs).

Mobilität: In diesem Schwerpunkt liegt der Fokus verstärkt auf den Untersuchungen und dem Verständnis des Mobilitätssystems als Ganzes und der Rolle des menschlichen Verhaltens darin. Auf der technischen Ebene wird verstärkt die Herausforderung der Dekarbonisierung des Fracht- und Flugverkehrs angegangen.

Energiesysteme: Die systemische Forschung zur Vernetzung aller Energieträger und -netze mit einem höchstmöglichen Anteil erneuerbarer Energie steht verstärkt im Vordergrund. Energiespeicherung, vor allem Langzeitspeicherung, bleibt nach wie vor ein relevantes Thema, ebenso die nukleare Sicherheitsforschung.

Industrielle Prozesse: Die Stoff- und Energiekreisläufe zu schliessen ist das klare Langzeitziel dieses Schwerpunkts. Damit ergibt sich ein stärkerer Fokus auf erneuerbare Materialien und erneuerbare Energiebereitstellung in den industriellen Prozessen.

Die CORE empfiehlt, Energieforschung vor allem in diesen Bereichen zu fördern.

Wirtschaft, Gesellschaft und Politikmassnahmen

Der Übergang zu einem erneuerbaren, sicheren und effizienten Energiesystem wird durch Märkte, Politikmassnahmen und Institutionen ermöglicht werden, die so ausgestaltet sind, dass sie Energieeffizienz und den Übergang zu erneuerbaren Energien effizient fördern, breite Akzeptanz geniessen und dem individuellen Wohlbefinden dienen. Die Forschungsarbeit im Schwerpunkt Wirtschaft, Gesellschaft und Politikmassnahmen bietet fundiertes Wissen, das für das Verständnis und die Gestaltung solcher Märkte, Politikmassnahmen und Institutionen erforderlich ist.

Die Energiestrategie 2050 verlangt den schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie bei gleichzeitigem Erreichen der Klimaziele und Aufrechterhalten der grossen Versorgungssicherheit der Schweiz. Dies erfordert gesteigerte Energieeffizienz und eine grössere Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen. Zur Erreichung dieser Ziele ist die Entwicklung neuer Technologien von grosser Bedeutung. Aber der technische Fortschritt alleine wird nicht ausreichen. Grosse private Investitionen und grundlegende Änderungen beim Energieverbrauch werden nötig sein. Für beides sind Verhaltensänderungen, neue Anreize und – im Rahmen der Möglichkeiten – Anpassungen bei Governance und Politikmassnahmen erforderlich. Dieser Umbau des Energiesystems muss so erfolgen, dass er in der Bevölkerung breite Akzeptanz genießt und mit individuellem Wohlbefinden und Lebensqualität auf hohem Niveau einhergeht.

Hauptziel der sozial- und geisteswissenschaftlichen (SGW-)Energieforschung ist es, ein besseres Verständnis für das Verhalten der verschiedenen Akteure, ihre Reaktion auf Politikmassnahmen und die Funktionsweise der Märkte zu gewinnen. Auf dieser Grundlage können die relativen Potenziale und Kosten der unterschiedlichen Massnahmen beurteilt und ihre Ausgestaltung optimiert werden. Überdies bietet die SGW-Forschung eine umfassende Sicht auf den Umbau des Energiesystems und ein besseres Verständnis für die Wechselbeziehungen und Wechselwirkungen zwischen Massnahmen und Prozessen. Systemweite Beurteilungen stützen den Umbau des schweizerischen Energiesystems mit detaillierten Informationen zur Entwicklung der Energiegewinnung und

nutzung, zu ihrem Bezug zu gesellschaftlichen und ökonomischen Entwicklungen sowie ihre Umweltwirkung. Denn viele politische Instrumente und Massnahmen wirken sich längst nicht nur auf einzelne Sektoren, Bereiche oder Regionen aus und müssen deshalb in ihrem weiteren Umfeld untersucht werden.

Neben den bereichseigenen Fragestellungen trägt die SGW-Forschung zur Entwicklung und Implementierung neuer Technologien bei. Technischer und gesellschaftlicher Fortschritt hängen eng voneinander ab und lassen sich nicht trennen. Technische Lösungen können besser zu nachhaltigem Energieverbrauch beitragen, wenn das gesellschaftliche, ökonomische und politische Umfeld bei ihrer Entwicklung angemessen berücksichtigt wird. Aus diesem Grund werden in diesem Forschungskonzept die sozioökonomischen Themen direkt in die technischen Schwerpunkte integriert, wenn sie der Technologie eigen oder für sie von besonderer Bedeutung sind.

Die SGW-Forschung ist besonders stark von der Datenqualität abhängig. Die Erhebung und der Zugriff auf die Daten ist kein Forschungsschwerpunkt an und für sich, aber in vielen Gebieten Voraussetzung für erstklassige Forschungsarbeit. Dazu gehört auch die Möglichkeit von Feldversuchen und Experimenten. Dies wird im Kapitel «Empfehlungen» adressiert.

Der Umbau des Energiesystems erfordert ein verändertes Investitions- und Energienutzungsverhalten der Akteure sowie Politikmassnahmen, Marktgestaltung und Institutionen, die diesen Wandel ermöglichen. Es müssen politische und regulatorische Instrumente ent-

wickelt sowie Rahmenbedingungen geschaffen werden, die den Umbau des Energiesystems unterstützen. Der Hauptbeitrag der SGW-Forschung zur Transformation des Energiesystems besteht darin, dafür die nötigen Kenntnisse bereitzustellen. Dabei sind insbesondere Forschungsarbeiten in den Bereichen «Unternehmen und Haushalte», «Märkte, Regulierung und Politikmassnahmen» sowie «Modellierung, systemweite Beurteilungen und Transformationsprozess» erforderlich.

Mittel- bis langfristige Prioritäten

Unternehmen und Haushalte

Um die Transformation des Energiesystems erfolgreich umzusetzen müssen die Haushalte und Unternehmen ihr energierelevantes Verbrauchs- und Investitionsverhalten ändern. Die erste mittel- und langfristige Priorität legt den Fokus auf die Verhaltensanalyse mittels psychologischer, sozialer und mikroökonomischer Methoden sowie das Abgeben von Handlungsempfehlungen. Forschungsziel ist es, ein besseres Verständnis für die Motivationen der jeweiligen Akteure und die Wirkung spezifischer energiepolitischer Instrumente zu erlangen. Das Reduktionsziel beim Energieverbrauch und der Umbau zu einem System mit erneuerbaren Energien gehen Hand in Hand mit einer reduzierten und flexibilisierten Energienachfrage. In diesem Sinne ist ein wichtiger Forschungsfokus die Analyse der psychologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Determinanten der Energienachfrage und der individuellen Entscheidungsfindung, der dynamischen Gruppenprozesse und der Unternehmensstrategien. Dies erleichtert die Entwicklung von Massnahmen, die zu einem reduzierten Energieverbrauch beitragen, und helfen, die Flexibilität der Nachfrage zu erhöhen und zu nutzen. Bei den Haushalten braucht es etwa weitere Forschungsarbeiten zur Wechselwirkung zwischen sozioökonomischen Determinanten sowie emotionalen, normativen und kognitiven Faktoren, die für den Energieverbrauch erheblich sind, um Politikmassnahmen so auszugestalten, dass die Energienachfrage nachhaltig sinkt. Die Unternehmen ihrerseits sind wichtige Akteure der Transformation des Energiesystems.

Ihre Strategien wirken sich auf das Verbraucherverhalten aus und werden von diesem beeinflusst. Daneben beeinflussen ihre Investitionsentscheide die Entwicklung neuer Infrastrukturbauten entscheidend. Hier sind die Erforschung unternehmenseigener, adaptiver Massnahmen und die Entwicklung von Rahmenbedingungen nötig, die Innovation und technologischen Wandel für mehr Energieeffizienz und erneuerbare Energien fördern. Schliesslich erfordert die Energiestrategie ganz grundsätzlich Investitionen in neue Energieinfrastrukturen. Ein zentraler Erfolgsfaktor ist dabei, dass Hindernisse identifiziert und Empfehlungen für geeignete Rahmenbedingungen zur Förderung solcher Investitionen formuliert werden.

Märkte, Regulierung und Politikmassnahmen

Hauptgegenstände dieses Schwerpunkts sind die Funktionsweise und die Regulierung der Energiemärkte sowie die Ausgestaltung von Politikmassnahmen für ein erneuerbares, sicheres und effizientes Energiesystem. Die Energiemärkte koordinieren die Investitions- und Verbrauchsentscheide der Akteure innerhalb eines Energiesystems. Damit spielen sie eine zentrale Rolle für eine erfolgreiche Energiestrategie. Wegen der Entwicklung neuer Technologien, die eine enge Integration verschiedener Energieträger ermöglichen, der Dezentralisierung des Energiesystems und der Integration erneuerbarer Energien im grossen Rahmen stehen die Energiemärkte und ihre Regulierung in Zukunft vor grossen Herausforderungen. Daher braucht es für eine erfolgreiche Transformation des Energiesystems Forschungsarbeiten zur Marktgestaltung und -regulierung. So ist die Entwicklung und Analyse effizienter Marktgestaltungen, die Investitionen in erneuerbare Energien und deren Integration in das Energiesystem ermöglichen, von grosser Bedeutung. Die Forschung muss angemessene Lösungen für die Integration der erneuerbaren Energien und den möglichen Übergang zu einem dezentralisierten Energiesystem entwickeln. Dazu gehören auch neue Ansätze, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten und die Entscheidungen der Akteure im System zu koordinieren (z.B. Produktionsstätten, Prosumer, Eigenverbrauchsgemeinschaften, Netzbetreiber). Dabei sind auch neue Möglichkeiten, die sich mit der Digitalisie-

rung ergeben, von Interesse. Überdies erfordert eine kosteneffektive, gesellschaftlich akzeptierte Energiestrategie einen ausgewogenen Mix von Politikmassnahmen und eine detaillierte Beurteilung ihrer Auswirkungen. Dabei müssen juristische, auch internationale Aspekte berücksichtigt werden. Hier müssen die Wechselwirkungen mit anderen (nicht energiepolitischen) Massnahmen berücksichtigt werden, etwa im Bereich der Raumplanungs-, Klima- und Verkehrspolitik national und international. Die internationale Klima- und Energiepolitik wirkt sich entscheidend auf die Energiemärkte im Inland aus. Deshalb ist die Erforschung ihres Einflusses und Zusammenspiels mit inländischen Politikmassnahmen von Bedeutung. Dies gilt auch im Zusammenhang mit der Positionierung der Schweiz auf den internationalen Energiemärkten.

Modellierung, systemweite Beurteilungen und Transformationsprozess

Um zweckmässige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Energiestrategie schaffen zu können, müssen der Transformationsprozess und die Folgen energiepolitischer und regulatorischer Massnahmen auf das Energiesystem und die Schweizer Wirtschaft besser verstanden werden. Dies ist das Forschungsziel dieses Schwerpunkts. Es erfordert die Entwicklung und Verbesserung der Modelle und Szenarien, die mögliche Entwicklungen beschreiben und treibende Schlüsselfaktoren der Transformation des Energiesystems herausstellen. Auch technische Szenarien sind interessant, doch werden diese im Kapitel «Energiesysteme» behandelt.

Ein wichtiges Forschungsziel ist die bessere Berücksichtigung der Ungewissheit und die Repräsentation von Verhaltens- und Gesellschaftsaspekten in Modellen und Szenarien. Dann müssen auch die politischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen der Szenarien und die Wechselwirkung zwischen den Politikmassnahmen besser verstanden werden. Dies gilt insbesondere, weil die Energiestrategie nicht nur eine Frage der Technik, sondern auch gesellschaftlicher Art ist. Die Triebkräfte dieses gesellschaftlichen Wandels und die Wechselwirkungen zwischen technischer, gesellschaftlicher, politischer und individueller Veränderung müssen untersucht werden, um die Erfolgsfaktoren der Energiestrategie besser zu verstehen. So beeinflussen etwa gesellschaftliche und technische Dynamiken wie die Digitalisierung die Transformation des Energiesystems auf mehreren Ebenen mit unterschiedlicher Wirkung. Dieses komplexe, dynamische Zusammenspiel verschiedener Triebkräfte muss verstanden werden. Eine weitere Priorität verbleibt die Analyse energiepolitischer Massnahmen und Instrumente, beispielsweise anhand makroökonomischer Instrumente sowie die Untersuchung der zukünftigen Energienachfrage und -angebot sowie Rahmenbedingungen mittels Szenarien, Energiemodellen und anderer Methoden.



Die Forschung schlägt Lösungen für eine verstärkte Integration der erneuerbaren Energien ins Energiesystem vor. Insbesondere werden neue Ansätze entwickelt, um mit zahlreichen, heterogenen Akteuren in einem dezentralisierten System umzugehen. © Shutterstock

Wohnen und Arbeiten

Der Gebäudepark wird in Zukunft klimaneutral und energieeffizient betrieben und trägt dezentral dazu bei, Bereitstellung und Nachfrage in Energienetzen – Strom, Wärme, Kälte – im Gleichgewicht zu halten. Die Forschung zeigt sozialverträgliche technologische Wege dazu auf.

Dieser Vision entsprechend, werden im Schwerpunkt **Wohnen und Arbeiten** Technologien und Konzepte erforscht, die den Energiebedarf reduzieren, die Effizienz der Energieumwandlung und -verwendung steigern und deren Wertigkeit (Exergie) Rechnung tragen. Insgesamt sollen die menschlichen Bedürfnisse im Bereich Wohnen und Arbeiten künftig auf ressourcenschonende und sozialverträgliche Weise befriedigt werden.

Um der Funktion des Gebäudeparks als «Prosumer» Rechnung zu tragen, werden die dezentrale Energiespeicherung, die lokale Gewinnung erneuerbarer Energie an Gebäuden, in Arealen, Quartieren und Städten sowie das Zusammenspiel von Energieverbrauch, dezentraler Energiegewinnung, -speicherung und Energieinfrastrukturen erforscht. Dezentrale Energiesysteme müssen sich zweckmässig in das zukünftige Energiesystem der Schweiz integrieren, damit eine umweltverträgliche, sichere, effiziente und wirtschaftliche Energieversorgung gewährleistet ist.

Strategien zur Effizienzsteigerung und zum konsequenten Umstieg auf erneuerbare Energiequellen sind zentral, um im Gebäudebereich Klimaneutralität im Betrieb zu erreichen. Das optimale Ausmass von Effizienzsteigerungen ist mit einer Lebenszyklusbetrachtung bezüglich Kosten-Nutzen-Verhältnis zu finden. Zusätzlichen Effizienzmassnahmen sollen im Vergleich mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energie beurteilt werden. Im Weiteren hängt der effiziente Betrieb der Gebäude neben politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen vom Verhalten der Besitzenden, Betreibenden und Nutzenden ab. Diese haben einen signifikanten Einfluss darauf, ob die Spar- und Effizienzmöglichkeiten ausgeschöpft und die avisierten Ziele erreicht werden können. Entsprechende Konzepte sind

zu entwickeln, zu validieren (inkl. «Living Labs») und in der Praxis zu demonstrieren.

Neue Gebäude sollen im Betrieb keine umweltbelastenden Emissionen generieren und hohen Komfort bei Raumklima, Lärm/Akustik, Licht und Hygiene erreichen. Gebäude und verwendete Materialien sind ressourcenschonend, emissionsarm und energieeffizient herzustellen. Langfristig ist eine Kreislaufwirtschaft anzustreben.

Um dies zu erreichen, müssen Technologien und Konzepte entwickelt werden, die eine intelligente Gewinnung, Umwandlung, Nutzung und Speicherung von Energie im Gebäudebereich unter Einbezug von Verbund- und Austauschmöglichkeiten mit Versorgungsnetzen (Strom, Wärme, Gas) ermöglichen. Dies umfasst sowohl die technologische als auch die sozial- und geisteswissenschaftliche Forschung, um auch das Nutzerverhalten und die Nutzerbedürfnisse zu berücksichtigen. Das erarbeitete Wissen muss in geeigneter Form für Produkte und Planungs-, Beratungs- und Ausführungswerkzeuge sowie bei Bedarf für energiepolitische Programme und Instrumente verfügbar gemacht werden, um wirkungsvoll in den Markt zu diffundieren.

Die Schnittstellen zu den anderen Schwerpunktthemen dieses Konzepts sind zu beachten, wie beispielsweise die Aspekte der Sektorenkopplung, der Mobilität und der Energieinfrastruktur oder der Einfluss von IKT- und Monitoring-Technologien auf den Einsatz dezentral gewonnener erneuerbarer Energie.

Ziele

Gebäude sind für rund 42 % des Endenergieverbrauchs⁵ und für 26 % der gesamten CO₂-Emissionen der Schweiz⁶ verantwortlich. Sie stehen deshalb im

⁵ BFE Gesamtenergiestatistik 2018 — ⁶ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klimalinkuerze.html>

Zentrum der Energiestrategie 2050. Einerseits muss die energetische Sanierungsrate⁷ von heute nur 1 % dringend und substantiell erhöht werden; gemäss IEA ist in OECD-Ländern eine Verdoppelung nötig⁸. Gleichzeitig stellt die Erhöhung der Sanierungseffizienz – mit technischen und nicht-technischen Massnahmen – ein weiterer wichtiger Hebel für die Zielerreichung dar.

Die Aufgabe der Forschung ist es, sozialverträgliche technologische Wege aufzuzeigen, die in Richtung der eingangs formulierten Vision führen. In einer ersten Etappe sind die Ziele der Energiestrategie 2050 zu erreichen, wobei die Forschung auch die langfristigen, deutlich ambitionierteren Ziele der 2000 Watt-Gesellschaft stets im Fokus behalten muss. Ein messbares Etappenziel 2050 für Gebäude ist im «SIA-Effizienzpfad Energie»⁹ beschrieben. Analoge Anforderungen

an Areale sind im «Bilanzierungskonzept 2000-Watt-Gesellschaft»¹⁰ formuliert. Die beiden Zielformulierungen dienen als Orientierungsgrössen, welche in Pilot- und Demonstrationsprojekten deutlich übertroffen werden sollen.

Nebst dem effizienten Einsatz der Energie tragen eine dekarbonisierte Energiebereitstellung, eine ressourcenschonende, emissionsarme und energieeffiziente Herstellung von Baustoffen – mit dem Ziel einer Kreislaufwirtschaft – sowie eine gesellschaftliche Entwicklung, die qualitativen Mehrwert gegenüber quantitativem materiellem Wachstum bevorzugt, massgebend zur Zielerreichung bei. Ohne diese Entwicklungen vorwegzunehmen, sollen im Gebäudebereich die bestmöglichen Voraussetzungen geschaffen werden, um die vorerwähnten Ziele zu erreichen.

Gebäudekühlung

Aufgrund steigender Temperaturen im Sommer und wachsender Komfortanforderungen ist zukünftig mit einem erhöhten Kühlbedarf in Gebäuden zu rechnen. Im Bereich der Entwicklung von Konzepten und Technologien für eine kostenoptimierte, energieeffiziente und ressourcenschonende passive oder aktive Raumkühlung sollen in der aktuellen Vierjahresperiode markante Fortschritte erreicht werden.



Prüfstandmessungen zur Kühlleistungsbestimmung von drei Solarabsorber im Rahmen des Projektes «Heizen und Kühlen über thermisch aktivierte Aussenflächen» an der FHNW. Die ungedeckten Solarabsorber funktionieren als Aussen-Wärmeübertrager und können im Heizbetrieb Wärme von der Umgebung und durch Absorption von Solarstrahlung aufnehmen und im Kühlbetrieb während der Nacht Wärme an die Umgebung abgeben. © FHNW IEBau

⁷Martin Jakob et al., 2014, Energetische Erneuerungsraten im Gebäudebereich Synthesebericht zu Gebäudehülle und Heizanlagen — ⁸IEA, 2013, Technology Roadmap Energy efficient building envelopes — ⁹Merkblatt SIA 2040, Ausgabe 2017. Demnach sind bis 2050 eine durchschnittliche Leistung von 2000 Watt nicht erneuerbare Primärenergie und 2 t CO₂-Äquivalent pro Person und Jahr anzustreben. Der Gebäudebereich soll davon rund die Hälfte beanspruchen dürfen. Um die für den Gebäudebetrieb benötigte Energie in einen gesamtheitlicheren Kontext zu stellen, berücksichtigt der «SIA-Effizienzpfad Energie» zusätzlich die in den Baustoffen und Gebäudetechnikelementen enthaltene graue Energie sowie der durch den Gebäudestandort verursachte Energieverbrauch für Mobilität. — ¹⁰www.2000watt.swiss, Bilanzierungskonzept 2000-Watt-Gesellschaft, Stand September 2014.

Mittel- bis langfristige Prioritäten

Areale und Quartiere

Um den elektrischen und thermischen Energiebedarf der Schweiz zukünftig weitestgehend mit lokal vorhandenen, erneuerbaren Energiequellen zu decken, sind ganzheitliche Lösungsansätze notwendig. Quartiere bzw. Areale können zu dezentralen, vernetzten Energiesystemen ausgebaut werden und dabei Energiedienstleistungen innerhalb des jeweiligen Quartiers/Areals (inkl. Elektromobilität) oder für die dazugehörige Region in den Bereichen Bereitstellung, Umwandlung, Management, Speicherung und Verteilung übernehmen. Sie sind nicht autarke Systeme, sondern sollen sich als aktive Elemente in das Energiesystem der Schweiz bzw. von Europa einfügen, als Subsysteme im zukünftigen Energiesystem.

Forschungsfragen stellen sich zu Last- und Bereitstellungsflexibilität eines Areals bzw. dessen einzelner Gebäude für das elektrische oder thermische Netz, sowie zur Allokation dieser Flexibilitäten (örtlich und zeitlich), und inwieweit dafür innovative Informations- und Kommunikationstechnologie- (IKT)-Ansätze zur Anwendung kommen können.

Weitere Forschung ist nötig, um ein zuverlässiges und optimiertes Zusammenwirken von elektrischen, thermischen und Gasnetzen, Gebäuden, lokaler Energiegewinnung und Einspeisung, Speicherung und Verteilung sicherzustellen. Zu entwickeln sind aber auch innovative Instrumente zur integralen Planung, Lösungsevaluation und -optimierung. Dazu gehören u.a. digitale Plattformen für integratives, multidisziplinäres und kollaboratives Planen unter Berücksichtigung energetischer Aspekte, ggf. unter Nutzung der Möglichkeiten georeferenzierter Daten.

Bestehende Nachhaltigkeitsstrategien wie «2000 Watt-Areale» oder «Smart Cities and Communities» sollen in Richtung Klimaneutralität auf Quartiersebene weiterentwickelt werden. Von besonderer Bedeutung ist die Definition der «Netzdienlichkeit» auf der Ebene von Arealen und Quartieren und die Ableitung von daraus resultierenden Optimierungsprämissen für die

Praxis. Damit kann ein wichtiger Beitrag zur Konkretisierung der Debatte über «Positive Energy Districts»¹¹ geleistet werden. In diesem Rahmen sollen Konzepte, Prozesse, Massnahmen und Rahmenbedingungen analysiert, entwickelt und getestet werden.

Zusätzlich bedarf es Konzepten zur Anpassung an den Klimawandel, um Gebäude, Areale und Quartiere in Bezug auf die globale Klimaentwicklung und lokale Mikroklimata im urbanen Raum (z.B. «Heat island»-Effekt) resilient zu gestalten.

Gebäude

Eine weitgehende Reduktion von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen bestehender Gebäude ist eine grosse wirtschaftliche Herausforderung, welche den Einbezug aller möglichen Optimierungsmassnahmen am Gebäude erfordert. Bei der energietechnischen Erneuerung der Gebäudehülle steigen die Kosten mit einem gewissen Grad der Verbesserung für jede zusätzlich eingesparte Energieeinheit progressiv an (solange Modelle zum Einbezug externer Kosten nicht verbindlich vorgegeben sind). Können diese Effizienzsteigerung und die damit verbundene CO₂-Reduktion mit anderen Massnahmen umweltfreundlich erreicht werden, so ist es aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoller, in Massnahmen mit geringeren Grenzkosten zu investieren.

Um diese Potenziale zu erschliessen, müssen energie- und kosteneffiziente Systeme für die Gebäudesanierung, einfache, wirkungsvolle Beratungs- und Planungswerkzeuge und effiziente Bauprozesse entwickelt werden. Auch sind günstige und performancerobuste Konzepte für die Wohnungslüftung und weitere Gebäudetechnik notwendig. Zudem sollen die Potenziale der digitalisierten, datenbasierten Gebäudemodellierung über die gesamte Wertschöpfungskette untersucht und demonstriert werden.

Bei Neubauten liegt der Fokus der Forschung auf dem Energiebedarf sowie den Schadstoff- und Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes, inklusive dem grauen Energiebedarf und den damit verbundenen grauen Treibhausgasemissio-

¹¹ SET-Plan Action 3.2

nen. Mit Hilfe des Building Information Modeling (BIM) soll eine effiziente und präzise Berechnung dieser Kennwerte ermöglicht werden, die als Basis für eine ökonomisch-technische Optimierung dienen.

Zur Reduktion des Energieverbrauchs während des Betriebs sind Technologien und Systeme gefragt, welche nicht nur die Energieverluste substantiell reduzieren, sondern auch die Energiegewinnung über die Gebäudehülle ermöglichen. Dabei soll die architektonische Vielfalt gewährleistet bleiben. Allerdings sind auch Konzepte für einen optimalen Betrieb unabdingbar, um einen Energie-«Performance Gap» zu vermeiden, bzw. die Betriebsoptimierung zu erleichtern.

Ein zentraler Aspekt ist hierbei die Benutzerfreundlichkeit der Gebäudesysteme. Dies setzt neue Ansätze zur Berücksichtigung des Nutzerverhaltens und der Nutzerbedürfnisse im Gebäudebetrieb voraus. Während Möglichkeiten von BIM für das Facility Management demonstriert werden sollen, sind die Anwendung von künstlicher Intelligenz (KI) und Machine Learning (ML) auch zum Zweck der Betriebsoptimierung wissenschaftlich zu beleuchten. Es soll untersucht werden, ob sich aus diesen Erkenntnissen neue Ansätze für die Gebäudesanierung ableiten lassen.

Ganz allgemein sind Gebäude den künftigen Komfort- und Raumbedürfnissen anzupassen, also nutzungsflexibel und damit ressourceneffizient zu gestalten, wozu neue Technologien und Prozesse beitragen können. Zur Minimierung der Materialflüsse sind geeignete Kennzahlen, Strategien und Instrumente zu entwickeln und es werden geschlossene Materialkreisläufe angestrebt.

Für sämtliche Gebäudetypen sind innovative Verglasungen, Fenstersysteme und Fassadenelemente mit verbesserten und veränderbaren Eigenschaften wie Lichttransmission, Wärmeeintrag und -speicherung, sowie Energiegewinnung zu erforschen, die sowohl im Winter als auch im Sommer ein optimales Innenraum-

klima bei minimalem Energiebedarf ermöglichen. Auch soll die Forschung neue energieeffiziente, umweltverträgliche, kostengünstige und raumsparende Wärmedämm Lösungen bereitstellen, die architektonisch-ästhetischen Ansprüchen gerecht werden.

Gebäudetechnik

Gebäude sind heute nicht nur Energiekonsumenten, sondern auch -produzenten und stellen erneuerbare Energie bereit. Ihnen fällt dadurch eine neue Rolle innerhalb des Energiesystems zu. Um ein netzdienliches Verhalten des Gebäudes zu erreichen, wird die Integration von lokalen Wärme- und Elektrizitätsspeichern ins Energiesystem zunehmend wichtiger. Während Elektrizitätsspeicher im Gebäudebereich primär der Kurzzeitspeicherung von lokal produzierter erneuerbarer Energie dient, eignen sich Wärmespeicher zur Energiespeicherung auf verschiedenen Zeitskalen. Saisonale Wärmespeicher können durch die Kopplung verschiedener Sektoren dazu beitragen, das Stromnetz vor allem im Winter zu entlasten.

Welche Energieform und Speichertechnologie in Gebäuden zum Einsatz kommt, soll künftig sektorenübergreifend eruiert werden, ist aber zugleich in starkem Maße vom Anwendungsfall und der Wertigkeit der Energie abhängig. In jedem Fall sind zukunftsweisende Technologien ebenso gefragt wie effiziente, zuverlässige und kostengünstige Einbindungs- und Betriebskonzepte in einer Lebenszyklusbetrachtung.

Die Technologien zur Gewinnung von erneuerbarer (thermischer und elektrischer) Energie am Gebäude und zur Nutzung von Abwärme sollen weiterentwickelt und wirtschaftlicher gemacht werden. Die architektonische Integration ins Gebäude wie auch die Entwicklung aktiver, multifunktionaler Gebäudehüllenelemente und die Kostenreduktion haben dabei einen hohen Stellenwert. Darüber hinaus gilt es, die Standardisierung, die entsprechenden Bauprozesse und die Zuverlässigkeit dieser Technologien zu erhöhen.

Lokale Energiebereitstellungsanlagen sollen «smarter» werden: Lösungen vom lokalen Monitoring bis zur Integration in übergeordnete Energiemanagementsysteme auf Stufe Gebäude, Quartier, Areal, Stadt und Region, Funktionsüberwachung und automatisierte, standardisierte Diagnosen bzw. Fehlermeldung an Betreiber fehlen heute für die breite Anwendung. Im Speziellen ist der Eigenverbrauch (mit/ohne Einbindung der Elektromobilität) im Kontext der Netzbedürfnisse¹² zu optimieren.

Hocheffiziente Wärmepumpentechnologien für Raumheizung und Brauchwassererwärmung unterstützen die ökologische Transformation der Energiebereitstellung in Gebäuden. Sie sind oft eine der Voraussetzungen, dass der Energieverbrauch von energieeffizienten Gebäuden mit erneuerbaren Energien gedeckt werden kann. Die Herausforderungen liegen hier v.a. im Einsatz in bestehenden Gebäuden in Verbindung mit einer energetischen Sanierung. Die Chancen und Risiken der Erschliessung und Nutzung des Untergrunds (u.a. von Grundwasserschutzgebieten) mit verschiedenen Energiegewinnungstechnologien wie Erdwärmesonden-Systemen, Grundwasserbrunnen, Thermalwasser etc. zur Heizung und Kühlung auf verschiedenen Stufen (Gebäude, Quartier, Stadt) bedürfen ebenfalls vertiefter Untersuchungen.

Wärme-Kraft-Kopplung- Systeme (WKK)-Systeme, beispielsweise Brennstoffzellen, können auf dem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudepark vermehrt zur Anwendung gelangen. Aufzuzeigen sind Lösungen, die kostengünstig und emissionsneutral zu dieser Zielsetzung beitragen.

Brauchwarmwassersysteme stehen heute gesteigerten Anforderungen an Legionellensicherheit gegenüber. Innovative und energieeffiziente Systeme müssen diesen Anforderungen Rechnung tragen. Gesucht sind innovative Brauchwarmwassersysteme, die beide Anliegen gleichermassen erfüllen.

Aufgrund einer tendenziell steigenden Zahl von Hitzeperioden ist davon auszugehen, dass in Zukunft der Kühlbedarf im Gebäudebereich steigen wird. Dadurch wird von Kühlanlagen eine grössere Regulierbarkeit benötigt, was auch erhöhte Anforderungen an einen effizienten Betrieb im Teillastbereich erfordert. Andererseits sind Wohnbauten im urbanen Raum aufgrund des lokalen Klimas und punktuellen Hitzeinseln («Heat island»-Effekte) einem vermehrten Bedürfnis nach Kühlung ausgesetzt. Um dem unkontrollierten Einsatz von ineffizienten, den Aussenraum belastenden Geräten wie z.B. Splitklimagesäten vorzubeugen, müssen Potenziale, Konzepte und Technologien für eine energieeffiziente, ressourcenschonende und kostenoptimierte passive und aktive Kühlung inkl. Einbindung thermischer Speicher (kalt/warm) und unter Einbezug von Sonnenschutzsystemen untersucht werden.

Zur Überwachung und Regelung des gebäudeeigenen Energieverbrauchs, also zur Abstimmung von internem Verbrauch am und im Gebäude produzierter Energie und hauseigener technischer und struktureller Speicherung sowie zur gebäudeübergreifenden Vernetzung sind innovative Lösungen mit Bereich IKT-, Automations-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnologien zu erforschen. Kostengünstige Sensoren und Steuerungen bilden hierbei einen starken Treiber für die Innovation.

Mensch, Markt, Politik

Im Schwerpunkt Wohnen und Arbeiten sollen die Möglichkeiten zur beschleunigten Transformation des Gebäudebestandes und zur Erhöhung der Sanierungsrate erforscht werden. Zu erörtern sind die Akzeptanz neuer Technologien, Konzepte, Prozesse und Modelle bei Investoren und Nutzenden sowie Möglichkeiten zur Überwindung allfälliger Hemmnisse.

Andererseits sind die Treiber und Anreize zu analysieren, die seitens der Hauseigentümer und weiterer Akteure¹³ für eine spartenübergreifende, energetische

¹² Siehe auch «Netzdienlichkeit» im Abschnitt «Areale und Quartiere» — ¹³ Eine vertiefte Untersuchung des Verhaltens der Akteure im Bereich Wohnen und Arbeiten sowie dessen Einflussfaktoren werden im Schwerpunkt «Energie, Wirtschaft, Gesellschaft» thematisiert

Vernetzung (Elektrizität, Wärme, Gas) sprechen. Des Weiteren ist zu untersuchen, wie die Nutzen und Gewinne der Vernetzung verteilt werden, bzw. nach welchen Kriterien sie verteilt werden sollen.

Auf Ebene der öffentlichen Hand soll die Entwicklung von regionalen Ansätzen zur Energieversorgung von Gebäuden unter Einbindung der öffentlichen Güter z.B. bei untiefer Geothermie (Grundwasser, Erdwärmesonden <500m) und Abwärme (Kehrichtverbrennungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen, Industriezonen etc.) untersucht werden.

Das Zusammenspiel von Benutzerverhalten und eingesetzten Technologien soll optimiert werden, wobei die Technik ein sinnvolles Benutzerverhalten unterstützen soll. Im Fokus stehen hierbei Gebäudeautomationslösungen mit hoher Akzeptanz durch neue Ansätze unter Berücksichtigung von Privatsphäre und Sicherheit, neue nutzungsflexible Konzepte und geeignete Gebäude-Nutzer-Schnittstellen.

Die Realisierung von erneuerbaren, dezentralen Energieverbundlösungen für Areale oder Quartiere mit mehreren Eigentümern und Akteuren ist eine komplexe Herausforderung. Modelle für erfolgverspre-

chende Trägerschaften und für (partizipative) Akzeptanzfindungs-, Vorgehens- und Entscheidungsprozesse beim Aufbau und im Betrieb sollen untersucht und evaluiert werden. Die Ergebnisse stellen wichtige Randbedingungen für Planungs- und Beratungsprozesse dar.

Ausserdem sollen sozioökonomische Betrachtungen darüber angestellt werden, durch wen kritische Energieinfrastruktur sinnvollerweise genutzt und betrieben werden (Netzbetreiber, Hausbesitzer, Energieproduzent). Insbesondere sind allgemeine Ansätze und Konzepte in einer digitalisierten Welt¹⁴ zu erforschen. Daraus sind Handlungs- und Politikempfehlungen abzuleiten und Geschäftsmodelle zu entwickeln.

Mobilität

«Eine emissionsfreie Mobilität, die den Anforderungen und Bedürfnissen von Gesellschaft und Wirtschaft entspricht.»

Die Mobilitätsforschung ermöglicht angesichts einer wachsenden Nachfrage die Umsetzung der erforderlichen Technologien, Lösungen und Kenntnisse, um eine hoch-effiziente, wirtschaftliche und zweckmässige Mobilität anzubieten.

Mobilität ist die physische Bewegung von Personen und Gütern mittels eines zusammenhängenden Verkehrssystems zu Land, Wasser und in der Luft. Wann, wohin und wie wir uns in diesem System bewegen, wird stark von der Gesellschaft geprägt. Die Herausforderung besteht also darin, ein Verkehrssystem bereitzustellen, das sowohl den Bedürfnissen der Gesellschaft als auch ihren Zielen der Klima- und Energiepolitik entspricht. Dabei sind wir mit einer wachsenden Nachfrage konfrontiert, denn die Gesellschaft verlangt für alle Teile der Bevölkerung und der Wirtschaft Zugang zu einem flächendeckenden, kostengünstigen Verkehrssystem. Dies führt unweigerlich zu Interessenkonflikten. Wird also eine energieeffiziente, emissionsfreie Mobilität angestrebt, muss der Flugverkehr zu den Bemühungen beitragen, umweltschädliche Emissionen zu reduzieren, ohne aber den Zugang für die breite Bevölkerung einzuschränken.

Bereits auf nationaler Ebene ist die Mobilität ein hochkomplexes System von Angebot und Nachfrage. Um die Vision einer emissionsfreien Mobilität zu erreichen, die den Bedürfnissen und Anforderungen der Gesellschaft genügt, ist ein umfassendes Verständnis für die vorliegenden Wechselbeziehungen erforderlich. Daher ist in der Mobilitätsforschung nebst Bemühungen um technische Verbesserungen von Komponenten und Subsystemen vermehrt ein systemischer Ansatz erforderlich, der die unterschiedlichen Interessen der beteiligten Anspruchsgruppen berücksichtigt. Eine ausgewogene Strategie ist für die Gestaltung des künftigen Mobilitätssystems zentral. Dies erfordert auch eine interdisziplinäre Sicht, weil Mobilität nicht nur mit Energie, sondern auch mit Fragen des Klimas, der Siedlungs- und Raumentwicklung und anderen Forschungsbereichen zusammenhängt. Auch eine ver-

stärkte Berücksichtigung nichttechnischer Aspekte ist erforderlich (Sozial- und Geisteswissenschaften), insbesondere wenn es um ein vertieftes Verständnis für das Verhalten der Mobilitätsbenutzer geht.

CO₂- und andere mobilitätsbezogene Umweltemissionen können reduziert werden, indem ihre Energieintensität auf technischer und SGW-Ebene gesenkt und optimiert wird. Generell wird im technischen Bereich die Angebotsseite der Mobilität behandelt, etwa indem der fossile Energieverbrauch im Güterschwerverkehr und in der Luftfahrt gesenkt wird, während die SGW-Massnahmen auf die Nachfrageseite wirken, etwa wenn den Mobilitätsbenutzern eine sinnvolle modale Wahl ermöglicht wird. In jedem Fall müssen diese Optionen angebots- und nachfrageseitig in die Praxis umgesetzt werden (systemischer Aspekt). Für die künftige Mobilitätsforschung wurden die drei folgenden Schwerpunkte identifiziert: ein systemischer Ansatz, eine stärkere Berücksichtigung der SGW-Aspekte, laufende Weiterentwicklung der technischen Lösungen.

Eine systemische Sicht der Mobilität

Die Mobilität muss interdisziplinär, aus Sicht unterschiedlicher mobilitätsbezogener Forschungsbereiche betrachtet werden. So wird sie etwa im Umfeld der modernen Zivilisation untersucht, womit andere Prioritäten mit einbezogen werden, wie etwa die Klimapolitik, die Raumplanung und die Digitalisierung von Gesellschaft und Wirtschaft. Eine ganzheitliche Sicht kann zur Entwicklung komplett neuer Lösungsansätze beitragen, die für die Erreichung der ehrgeizigen Energie- und Klimaziele im Mobilitätssektor nötig sind, –etwa ein kombinierter Ansatz für den Personen- und Güterverkehr, anstatt diese Bereiche getrennt zu opti-

mieren. Mit der systemischen Sicht lassen sich Risiken und unerwünschte Nebenwirkungen herausstellen – etwa Rebound-Effekte und graue Emissionen –, die sich aus der Wechselwirkung von technischen und SGW-Aspekten ergeben. Um den Nutzen der Mobilitätsforschung zu maximieren, muss bei der Entwicklung, Erprobung und Implementierung neuer Lösungen die Absprache auf internationaler Ebene sowie der Dialog mit der Wirtschaft und der öffentlichen Hand intensiviert werden. Konkret sollte die systemische Mobilitätsforschung in erster Linie der einheimischen Wirtschaft dienen, damit sich Lösungen ergeben, die auf die Schweiz zugeschnitten sind und dem Mobilitätssystem als Ganzes dienen. Im intensiveren Dialog mit Wirtschaft und lokalen Behörden können diesen die Folgen und den Nutzen potenziell disruptiver Technologien und Lösungen – etwa Elektromobilität, autonomes Fahren und «Mobility as a Service, MaaS» – nahegebracht werden.

Bedeutung der SGW-Aspekte

Im Mobilitätssektor besteht nachfrageseitig – z.B. soziales Verhalten und Einstellung zur Mobilität – ein wesentliches, nicht ausgeschöpftes Potenzial für eine gesteigerte Ressourceneffizienz. Deshalb sollten die mobilitätsbezogenen SGW-Aspekte bei der Bestimmung der Forschungsthemen verstärkt berücksichtigt werden. So kann beispielsweise eine grössere Datenverfügbarkeit zum Verständnis für mikroökonomische Faktoren beitragen; beispielsweise das Benutzerverhalten und wie sich Mobilitätsentscheide ohne Rebound-Effekt beeinflussen lassen. Anhand dieser Daten können Strategien und Geschäftsmodelle für alternative Mobilitätsangebote (z.B. MaaS) samt den geeigneten technischen und SGW-Anforderungen für ihre Umsetzung abgeleitet werden. Die SGW-Forscherinnen und -Forscher werden überdies auf die Prioritäten im Kapitel «Wirtschaft, Gesellschaft und Politikmassnahmen» verwiesen, die vielfach für die Mobilität relevant sind.

Fortwährender technischer Fortschritt

Um neuartige Mobilitätskonzepte implementieren zu können, die sich aus dem systemischen Ansatz und den SGW-Betrachtungen ergeben, sind geeignete

technische Lösungen erforderlich. Diese müssen vermehrt interdisziplinär entwickelt werden. So wird es nötig sein, Konzepte für die Sektorkopplung sowie hocheffiziente Speichersysteme zu entwickeln, um die wachsenden Mobilitätsnachfrage mit der Transition des Schweizer Energiesystems zu vereinbaren, die unter anderem über die Dekarbonisierung der Energieerzeugungs- und Fertigungsindustrie erfolgt. Zur Umsetzung alternativer Mobilitätsangebote und Geschäftsmodelle sind IKT-Technologien erforderlich, welche die Vorzüge der zunehmenden Digitalisierung nutzen. Sowohl infrastruktur- als auch fahrzeugeitig müssen Lösungen für den breitflächigen Einsatz erneuerbarer Treibstoffe gefunden werden; dies gilt für Brennstoffzellen und herkömmliche Verbrennungsmotoren im Güterschwerverkehr sowie in der Schiff- und Luftfahrt. Ein wesentlicher Hebel zur Reduktion umweltschädlicher Emissionen ist und bleibt wegen dem grossen Multiplikationspotenzial die Effizienzsteigerung der Fahrzeugantriebe. Dasselbe gilt auch für die Fahrzeuge selber. Hier können Fortschritte bei (leichterer) Bauweise, den Werkstoffen, der Aerodynamik und dem Laufwiderstand zu einem deutlich geringeren Energieverbrauch beitragen. Auch technische Fragen, die von neuen Fahrzeugkonzepten, wie z.B. Drohnen, aufgeworfen werden, sind zu adressieren.

Mittel- bis langfristige Prioritäten

Unter Berücksichtigung der drei Schwerpunkte – systemischere Ansätze, Berücksichtigung von SGW-Aspekten und laufende technische Weiterentwicklung – können die Bereiche bestimmt werden, deren Rolle für die Mobilitätsforschung wichtig sein wird.

Mobilität als gesamtheitliches System

Es braucht einen breiteren Fokus, der Mobilität als ganzheitliches System mit Wechselbeziehungen zu diversen weiteren Bereichen unserer Wirtschaft und Gesellschaft sieht. Mobilität umfasst alle Personen- und Güterverkehrsträger auf Strasse, Schiene und Wasser sowie in der Luft. Dabei gilt es, die Verkehrsträger nicht isoliert zu betrachten, sondern als Teil eines ineinandergreifenden Gesamtsystems. Die rele-

vanten Schnittstellen müssen berücksichtigt werden, etwa mit dem Stromsystem und dem Gebäudebereich oder mit der Raumplanung. Diesbezüglich muss das Energiepotenzial der Sektorkopplung genutzt und geeignete technische Lösungsansätze und Geschäftsmodelle (z.B. MaaS) entwickelt werden. Der ganzheitliche Ansatz kann zu neuen, verbesserten Mobilitätskonzepten führen, indem etwa Personen- und Güterverkehrslösungen kombiniert werden. Das Verständnis dafür, wie neue Technologien, etwa autonome Fahrzeuge, mit bestehenden interagieren, wird zunehmend an Relevanz gewinnen. Dasselbe gilt für ein vertieftes Verständnis dafür, welche Infrastruktur in welcher Form es braucht, um beispielsweise ein landesweites intelligentes Schnelladesystem für elektrische Fahrzeuge zu errichten. Der Umbau des Mobilitätssystems erfordert einen geeigneten Regulationsrahmen. Daher muss die Forschung auch die erforderlichen theoretischen und praktischen Grundlagen bereitstellen, um zweckmässige politische Instrumente (z.B. Lenkungs- und steuerliche Massnahmen) auszugestalten. Solche Informationen umfassen beispielsweise die Beurteilung des ökologischen und ökonomi-

schen Nutzens einer Innovation auf System- oder Komponentenebene.

IKT ermöglicht neue intelligente Mobilitätskonzepte

Moderne IKT und im Speziellen die Digitalisierung können entscheidende Triebkräfte für innovative, intelligente Mobilitätskonzepte sein, insbesondere, wenn sie von technischen Fortschritten abhängig sind. Autonome Strassenfahrzeuge könnten beispielsweise den Mobilitätssektor revolutionieren. Daher sollte die Forschung auf die Entwicklung der erforderlichen technischen Lösungsansätze fokussieren und das Wirkungspotenzial von autonomen Fahrzeugen auf tragfähige Geschäftsmodelle, mögliche Rebound-Effekte oder den notwendigen Regulationsrahmen untersuchen. Die Digitalisierung kann auch neuartige Mobilitätssysteme ermöglichen, bei denen das Benutzerverhalten und das Verkehrsmanagement im Zentrum stehen. Die IKT ist erforderlich, um grosse Datenmengen zu verarbeiten, und um Modelle und Prognosen sowie detaillierte Angaben zum Ressourcenverbrauch zu generieren. Daneben lassen sich durch vertiefte Analysen die



Sektorkopplung ist eine zentrale Stossrichtung, um das Potenzial der erneuerbaren Stromerzeugung und der Energieeffizienz in verschiedenen Bereichen wie beispielsweise dem Mobilitätssektor zu nutzen. In diesem Zusammenhang werden von der Mobilitätsforschung die nötigen technischen Lösungen und geeignete Geschäftsmodelle erwartet, um elektrische Fahrzeuge mit Gebäuden und dem Stromnetz zu verknüpfen und so in allen drei Sektoren einen Mehrwert zu schaffen. © novatlantis

Probleme identifizieren, die sich aus der Eigenart grossflächiger Mobilitätssysteme ergeben, und Prioritäten für ihre künftige Ausgestaltung ableiten. In diesem Zusammenhang wird auch die rechtliche Seite der Datenerhebung und -eignerschaft in den kommenden Jahren an Relevanz gewinnen.

Nutzerverhalten, gesellschaftlicher Wandel, Raumplanung, Wirtschaft und Regulierung

Neben neuer technischer Möglichkeiten ist auch ein vertieftes Verständnis für das Nutzerverhalten zentral, sollen die neuen gesamtheitlichen Mobilitätssysteme erfolgreich umgesetzt werden. Die Realisierung technischer Innovationen sollte daher Hand in Hand mit einem vertieften Monitoring der Mobilitätsmuster eines repräsentativen Teils der Bevölkerung einhergehen. Aufgrund dieser Daten lassen sich die Bedürfnisse und Verhaltensweisen der Nutzer prognostizieren und ihnen die geeignetsten Verkehrsträger für Personen und Güter anbieten sowie Informationen zur getroffenen Wahl generieren. Im Bereich des öffentlichen Verkehrs müssen Möglichkeiten für die ausgeglichene Verteilung des Passagieraufkommens und die Verlagerung von den Haupt- zu den Nebenverkehrszeiten sowie neue «Tür zu Tür»-Konzepte geprüft werden. Diese Untersuchungen müssen auch raumplanerische Aspekte berücksichtigen, weil sie für die Mobilitätsbranche eine entscheidende Randbedingung darstellen, die mit anderen relevanten Bereichen wie dem baulichen Umfeld (inkl. Gebäude und Infrastruktur) verbunden ist.

Energiespeicherung und Substitution fossiler Brennstoffe

Für eine erhebliche Dekarbonisierung der Mobilität ist ihre Integration in die sich wandelnde Energielandschaft Schweiz mit zunehmender Sektorkopplung essenziell. Daher braucht es technisch und wirtschaftlich praktikable Lösungen für die Kurz- und Langzeitspeicherung von Energie, insbesondere um die Fluktuationen der erneuerbaren Stromerzeugung abzufangen, sowie die Substitution fossiler Treibstoffe durch erneuerbare Energieträger. Für die Elektromobilität sind kostengünstige, hocheffiziente Stromspeicher-

lösungen im Fahrzeug und möglichst auch bei der Infrastruktur erforderlich. Es ist wichtig, die Energie- und Leistungsdichte sowie die Lebensdauer der Batterien zu steigern und zugleich die Kosten zu senken. Hinzu kommen Massnahmen, um die Umweltauswirkung von Batterien zu bewerten und zu reduzieren. Dabei sind beispielsweise Lebenszyklusanalysen und Second-Life-Konzepte zu prüfen. Die Forschung kann dazu beitragen, diese Ziele gemeinsam mit der Industrie zu erreichen. Daneben müssen geeignete Konzepte für alternative chemische Energieträger hergeleitet werden. Beim Gütertransport (Land, Wasser und Luft) und in der allgemeinen Luftfahrt sind in absehbarer Zukunft erneuerbare Gas- und Flüssigtreibstoffe erforderlich. Es müssen Lösungen für die energetisch und ökologisch sinnvolle Erzeugung, Verteilung und Nutzung dieser Treibstoffe entwickelt und realisiert werden.

Fahrzeugeffizienz

Die Bemühungen um effizientere Fahrzeuge (neben Autos auch Schiffe, Flugzeuge, selbstfahrende Fahrzeuge usw.) – sowohl was das Gesamtfahrzeug als auch den Antrieb und die Zusatzausrüstung angeht – bleiben prioritär. Durch den Multiplikationseffekt bei der Einführung neuer Fahrzeuggenerationen mit verbesserter Technik und implementierten Innovationen lässt sich der Treibstoffverbrauch grossflächig reduzieren. Kurz- und längerfristig stehen bei diesen Bemühungen komplett elektrische Lösungen für alle möglichen Fahrzeugtypen im Vordergrund. Dort wo eine komplette Elektrifizierung nur schwer erreichbar scheint, wie in der Luft- und Schifffahrt, sollten hybride Ansätze verfolgt sowie die Effizienz gesteigert und die umweltrelevanten Emissionen weiter gesenkt werden. Für alle Antriebstechniken sollten auch Lösungen mit leichteren Fahrzeugen (Leichtbau) und mit dem Einsatz neuartiger, umweltfreundlicher Werkstoffe geprüft werden. Technische Verbesserungen werden in der Regel in Neufahrzeuge eingebaut, doch auch für die grosse bestehende Fahrzeugflotte, die noch Jahre in Betrieb bleiben wird, sollten geeignete Lösungen für eine Reduktion des Energieverbrauchs und der umweltschädlichen Emissionen gesucht werden.

Energiesysteme

«Saubere, zuverlässige und bezahlbare Energie in relevantem Ausmass und Geschwindigkeit.»¹⁵

Dezentrale erneuerbare Energiesysteme werden rasch Schlüsselemente des künftigen Energiesystems. Sie erfordern neue Formen der Systemintegration und werden durch Digitalisierung und neue Geschäftsmodelle begünstigt. Weiterführende Forschungsarbeiten an allen Komponenten des Energiesystems, an der Systemintegration und an der Resilienz für externe Faktoren bilden die Grundlage für eine bezahlbare und sichere Energiewende.

Gegenwärtig sind die modernen Energiesysteme fundamentalen Änderungen unterworfen, da Energieinfrastrukturen widersprüchlichen Anforderungen genügen müssen: Sie müssen einer wachsenden Kundenzahl zuverlässige und sichere Dienstleistungen bieten und sich zugleich an einer rationellen Energienutzung sowie am Klima- und Umweltschutz orientieren. Diese letzte Anforderung treibt grosse Veränderungen in den Energiesystemen voran, welche massgeblich durch erneuerbare Energiequellen erschlossen werden müssen. Allgemein wird anerkannt, dass die erneuerbaren Energien im Volumen bedeutend und verteilt sein werden, um einen grossen Teil des Energiebedarfs abdecken zu können. Ebenso, dass ihre Integration in die bestehende Versorgungsinfrastruktur von der erfolgreichen Kombination spezifischer Prozesse, neuer Technologien und geeigneter Lösungsansätze abhängig ist. Gegenwärtig leisten verschiedene Forschergemeinschaften einen grossen Aufwand, um neue Methoden für Planung, Betrieb und Steuerung künftiger Energiesysteme zu erarbeiten, diskutieren und validieren.

Weiter ist von grosser Bedeutung, dass relevante Treiber für die Weiterentwicklung moderner Energiesysteme erkannt werden: grössere gesellschaftliche Teilnahme, politische Anreize für geringeren CO₂-Ausstoss, grossmassstäbliche Integration der erneuerbaren Energien in die Energienetze, alternde Energieinfrastrukturen und der technische Fortschritt schlechthin (inkl. Information und Kommunikation).

Obwohl unter dem Begriff «Energiesystem» allgemein das Gesamtsystem verstanden wird, werden im Folgenden auch viele einzelne Systemkomponenten beschrieben (inkl. Gebäude, Mobilität und Industrie). In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Angebotsseite, entsprechenden Technologien und der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Energieträgern, sowie Umwandlungstechniken und Energienetzen.

Per Definition ist der Inhalt dieses Kapitels eng mit allen anderen Kapiteln verbunden, insbesondere mit der Nachfrageseite (Gebäude und Mobilität) sowie mit sozioökonomischen, regulatorischen und politikbezogenen Themen.

Ziele

Die Energiestrategie 2050 formuliert für den Elektrizitätssektor klare Richtwerte. Bis 2035 sieht das aktuelle Ziel für erneuerbare Energieträger (ohne Wasserkraft) eine Jahresproduktion von 11,4 Terawattstunden (TWh), für die Wasserkraft 37,4 TWh vor. Während der kurzfristige Richtwert (2020) mit 4,4 TWh erneuerbare Energien (ohne Wasserkraft) wahrscheinlich übertroffen wird, beträgt der mittelfristige Richtwert (2035) für nur 15 weitere Jahre knapp dreimal mehr. Ein wesentlicher Beitrag zu dieser Zielerreichung wird durch die Photovoltaik erfolgen müssen, unter Verwendung bereits heute weitgehend verfügbarer Technologien.

Die Forschungsarbeiten, die in diesem Kapitel beschrieben werden, sollen die Grundlage für weit grössere

¹⁵ NREL, Energy System Integration Facility (ESIF), <https://www.nrel.gov/esif/>

Anteile an sauberen Energiequellen legen und längerfristig möglichst zu einem 100-prozentig fossilfreien Energiesystem sowie zur Erreichung der Ziele des Pariser Übereinkommens 2015 der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) beitragen.

Schliesslich darf sich die systemische Energieforschung nicht nur auf das nationale Umfeld beschränken. Die weiterführende Forschung an Energiesystemen muss traditionsgemäss internationalen Forschungsstandards genügen und soll damit zur weltweiten Spitzenstellung des Forschungs- und Innovationsstandorts Schweiz beitragen. Dies stärkt die Wirtschaft der Schweiz als Exportland für Güter und Dienstleistungen von hoher Wertschöpfung.

Mittel- bis langfristige Prioritäten

Integration der Energiesysteme

Während langer Zeit konzentrierte sich die Energiesystemforschung auf einzelne Technologien, um die Umwandlungseffizienz zu steigern und die Erzeugungskosten für Strom, Wärme oder Treibstoffe zu senken. Da bei neueren Umwandlungstechnologien im vergangenen Jahrzehnt deutliche Fortschritte zu verzeichnen sind, verdienen nicht mehr nur die Indikatoren Effizienz und Kosten unsere Aufmerksamkeit. Auf technologischer Seite sind heute Verfügbarkeit, Nutzungsflexibilität und Nachhaltigkeit weitere Schlüsselindikatoren geworden.

Noch wichtiger: Der laufende Umbau des Energiesystems als Ganzes ist sehr viel komplexer und herausfordernder als der Wechsel einzelner Erzeugungstechnologien. Insbesondere wird in Zukunft, wenn die dezentralen erneuerbaren Energiequellen deutlich wichtiger und längerfristig zum Rückgrat des gesamten Energiesystems werden, die zeitliche und örtliche Variabilität von Angebot und Nachfrage viel relevanter. Dieser allgemeine Trend stellt die Strom-, Wärme- und Gasnetze vor neue Herausforderungen, ganz besonders was ihr Zusammenspiel, sämtliche Formen der Speicherung und ihre zeitliche und volumenmässige Dimensionierung angeht. Die zunehmend verteilte und

variable Art der Energieerzeugung und -speicherung schafft Chancen und Herausforderungen bei Planung, Betrieb, Flexibilität und zusätzlichen Dienstleistungen. Während sich Tag/Nacht-Unterschiede bei Angebot und Nachfrage mit Kurzzeitspeichern und Nachfrage-Management angehen lassen, sind saisonale Schwankungen komplexer und erfordern eine Kopplung verschiedener Sektoren, insbesondere Strom, Wärme und Gas (inkl. Wasserstoff). Diese Herausforderungen werden sich mit dem fortschreitenden Übergang zur Elektromobilität weiter akzentuieren.

Als Folge davon nimmt der Forschungsbedarf in den Bereichen der Strom- und Fernwärmenetze, der Sektorkopplung und der Speicherung stark zu und verschiebt den Fokus von einzelnen Technologien zu einer systemischen Sicht. Es gibt zahlreiche Lösungsansätze, die es weiterzuentwickeln und mittels einer geeigneten Systemanalyse zu beurteilen gilt.

Digitalisierung

Intelligente Energiesysteme sind an und für sich keine Neuheit. Die Technologien der Digitalisierung und ihr grossflächiger Einsatz bieten aber viele Chancen, vereinzelt auch Herausforderungen bei Entwicklung, Betrieb und dem Management der künftigen Energiesysteme und -netze.

Ein bedeutender Nutzen der Digitalisierung im Energiesektor wird systembezogen für das Effizienzmanagement und die Betriebssicherheit der künftigen, stark dezentralen Energiesysteme erwartet; von der Erzeugung, über die Speicherung und Umwandlung bis hin zum Verbrauch.

Viele heutige Digitalisierungstrends – Big Data, datenbasierte Modelle und Managementformen, digitale Plattformen, künstliche Intelligenz, maschinelles Lernen usw. – bieten neue technische, geschäftliche und marktbezogene Chancen für die Energiesysteme und ihre Akteure.

Die konkreten Lösungsansätze und die Auswirkungen der laufenden Digitalisierung auf Planung, Entwicklung, Betrieb und Management der künftigen Energie-

systeme verbleiben aber ein weites Feld, auf dem viele Themen noch nicht erforscht sind.

Hinzu kommen kritische Themen wie die Cyber-Sicherheit der Energiesysteme und Datenschutzaspekte, die im Fokus der Forschung stehen.

Schliesslich führen die Digitalisierung und das damit verbundene, stark wachsende Datenvolumen auch zu einem zunehmenden Energieverbrauch. Dies muss kontinuierlich beurteilt und es müssen energiesparende Strategien entwickelt werden.

Szenarienmodellierung und Systemanalyse

Die laufenden fundamentalen Veränderungen im gesamten Energiesystem führen zu zahlreichen Veränderungen bei Erzeugung, Umwandlung, Transport und Verbrauch von Energie. Es sind viele technisch gangbare Wege möglich, für die ein profundes systemisches Verständnis erforderlich ist. In diesem komplexen Umfeld spielt die Erforschung der Szenarienmodellierung und Systemanalyse, bei der ressourcenbezogene, technische, gesellschaftliche und ökonomische Aspekte auf den unterschiedlichen Raum- und Zeitebenen berücksichtigt werden, eine immer wichtigere Rolle, um für das künftige Energiesystem optimierte Wege und Optionen zu finden. Damit ihre Resultate möglichst solide ausfallen, müssen verschiedene Modelle und Szenarienansätze verglichen und ihre Sensitivität für unterschiedliche Prämissen geprüft werden. Diese Forschungsarbeiten sollten auch ein kontinuierliches Benchmarking des technisch-wirtschaftlichen Fortschritts der verschiedenen Technologien und dessen Wirkung auf das Gesamtsystem beinhalten. Ebenso die systematische Risikobeurteilung der Technologien und möglicher disruptiver Änderungen im Energiesystem.

Nachhaltigkeit

Der anhaltende Wandel des Energiesystems beinhaltet den massiven Einsatz neuer Erzeugungs- und Speichertechnologien und die zunehmende Kopplung der verschiedenen Sektoren. Die Nachhaltigkeitsaspekte dieser umfassenden Änderungen müssen beurteilt und in jeder Hinsicht optimiert werden, namentlich was Res-

ourcen, Materialien, Prozesse, Erzeugnisse, graue Energie und THG-Emissionen, aber auch soziale und wirtschaftliche Wirkungen oder davon betroffene raumplanerische Themen angeht.

Erneuerbare Energie

Erneuerbare Energien stellen im Strom- und Wärmesektor des Schweizer Energiesystems zwar bereits einen wichtigen Pfeiler dar, doch müssen sie in der künftigen Energieversorgung eine deutlich grössere Rolle spielen. Neben der Wasserkraft wird die Photovoltaik den weitaus grössten Beitrag an die Stromversorgung leisten.

Die verschiedenen Technologien müssen weiterhin Gegenstand grosser spezifischer Forschungsanstrengungen sein, um einen optimierten, wirtschaftlichen Mix der Strom-, Wärme- und (längerfristig) Treibstoffherzeugung zu ermöglichen.

Bei der Wasserkraft, heute eine ausgereifte Technologie, sollte die Forschung auf Erhalt und Steigerung der Stromerzeugung abzielen und zugleich das sich wandelnde Betriebsumfeld berücksichtigen, was das Wasserregime (z.B. Gesetzesrahmen, Gletscherschmelze, Niederschlagsmuster), den Bedarf an kurzfristiger Flexibilität bei grösserem Verschleiss sowie den Wechsel zu vermehrter Winterproduktion anbelangt. Die Beurteilung der Folgen solcher betrieblichen Änderungen auf die Wasserqualität und das Abflussregime stellen relevante weiterführende Arbeiten dar.

Bei der Photovoltaik muss die Forschung zu höchsteffizienten Solarzellen und Modulen auf der technischen Seite fortgesetzt werden. Auf der Produkt- und Systemseite muss das enorme Potenzial der Photovoltaik und ihre Integration in Gebäude, Infrastruktur, Mobilität und in das Energiesystem als Ganzes erschlossen werden. Neben Effizienz und Kosten müssen in Zukunft auch Ästhetik und Multifunktionalität weiterentwickelt werden. Hochentwickelte industrielle Prozesse und Fertigung werden bei der Photovoltaik auch weiterhin wichtige Forschungsziele sein. Die Integration der Photovoltaik in das Stromnetz und – bei hoher Durchdringung – auch das Energiesystem bilden Quer-

schnittsthemen mit anderen Forschungsbereichen. Lebenszyklusanalysen und verbesserte Prognosen für Solarressourcen sind für die Begleitforschung relevante Themen.

Bioenergie umfasst eine grosse Vielfalt an Umwandlungsprozessen, die unterschiedliche Ausgangsstoffe und Abfallressourcen nutzen und in den Bereichen Wärme, Strom, Gas, anderer Treibstoffe und chemischer Stoffe eine breite Auswahl an Endverbrauchsformen ermöglichen. Die Entwicklung und Verbesserung ausgewählter Wertschöpfungsketten inklusive mikrobiologischer und thermochemischer Prozesse oder ihrer Kombination, sollte eine grössere Umwandlungseffizienz und eine bessere Ausgangsstoffnutzung ermöglichen. Die Forschung sollte auch bezüglich der künftigen Rolle von Biomasse bei Energiespeicherung, Klimakontrolle und Sektorkopplung intensiviert werden.

Die Geoenergie kann für die Wärme- und Kälteversorgung, Fernwärmenetze, Stromerzeugung und Speicherung eine wichtige Rolle spielen. Prioritäre Forschungsbereiche sind Beurteilung und Verständnis des geologischen Untergrunds, seines geothermischen Potenzials und mögliche Erschliessungsformen. Die Geoenergieforschung adressiert ausserdem hochentwickelte Stimulations- und Bohrtechniken. Risiko- und -minderung sowie Sicherheitsforschung bilden angesichts der künftigen Nutzung von Geoenergie besonders relevante Forschungsaspekte.

Windenergie ist eine eher ausgereifte Technologie. Dennoch erfordern für die Schweiz spezifische Aspekte (z.B. Vereisung) sowie alternative Turbinenkonzepte weitere Forschungsarbeiten. Daneben werden fortgeschrittene Leistungsprognosen und Kontrollstrategien zu einer optimierten Kraftwerksleistung beitragen.

Die Sonnenenergie bietet über die Photovoltaik hinaus ein breites Anwendungspotenzial im Niedrigtemperaturbereich für die Wärmeerzeugung, im Hochtemperaturbereich für Stromerzeugung, industrielle Prozesse und längerfristig auch für Treibstoffe. In diesem Bereich bilden die solare

Thermochemie, die Photoelektrochemie und die elektrochemische Brennstoffsynthese Gegenstände für die Grundlagenforschung.

Wenn grosse Mengen Sonnen- und Windenergie in das Energiesystem eingespeist werden, werden Energiespeicherungsaspekte relevant. Flexibler Verbrauch mit flexibler Erzeugung ist nur möglich, wenn das heute starre Energiesystem mit Speicherungs-elementen gestärkt und flexibilisiert wird. Zurzeit dienen die Kurzzeit-Speicher vor allem dem Brechen der Verbrauchsspitzen («peak shaving») und der Wärmeversorgung im Sommer. Um den Einbau solcher Speicher attraktiver zu machen, müssen Kosten- und Zuverlässigkeitsfragen adressiert werden. In Zukunft sind (für die Schweiz) grossmasstäbliche Langzeit-Speichersysteme erforderlich, um die Abhängigkeit von Energieimporten im Winter und die Stromkosten zu senken. Diese Art Speichersysteme, wie etwa Power-to-X (z.B. Power-to-Gas oder grosse Wärmespeichersysteme kombiniert mit grossen Wärmepumpen), befinden sich in einer frühen Entwicklungsphase, werden aber für die Erreichung der Klimaziele zentral sein. Ein starkes Speicher-Rückgrat steigert die Unabhängigkeit und die Resilienz des Energiesystems.

Kernenergie und nukleare Abfälle

Unabhängige regulatorische Forschung auf dem neusten Stand von Wissenschaft und Technik muss sichergestellt werden, um für die Schweizer Kernkraftwerke (KKW) auf lange Frist höchste Sicherheitsstandards zu gewährleisten. Mit der voraussichtlichen Verlängerung der Lebensdauer der Schweizer KKW auf über 60 Betriebsjahre wird ihre Sicherheit zunehmend von Alterungsprozessen gefordert, womit evidenzbasierte Belege erforderlich sind, dass die KKW weiterhin für alle konstruktionsbedingten Unfälle mit einer hinreichenden Sicherheitsmarge gewappnet sind. Daneben haben der Unfall von Fukushima und die Einführung der europäischen Stresstests eine breite Forschungstätigkeit zum Störfallmanagement, zum Nachrüsten der Sicherheitssysteme und zu unfalltoleranten Brennstoffen ausgelöst. All diese Massnahmen erfordern kontinuierliche Forschungsbemühungen, um den Nachweis für ihre Sicherheitseffi-

zienz zu erbringen und kritische Nuklearforschungsstandorte in der Schweiz zu erhalten.

Ungeachtet der Rolle, welche die Kernenergie im künftigen Schweizer Energiemix spielen wird, muss die Frage nach der sicheren Lagerung der radioaktiven Abfälle vorangetrieben werden, bis ein geologisches Tiefenlager in vollem Umfang realisiert werden kann. Mit der anbrechenden Etappe 3 des Sachplans Geologische Tiefenlager muss bis Ende des Jahrzehnts ein definitiver Standort gefunden werden. Dies erfordert wissenschaftliche Infrastrukturen, um die geologischen Sondierungen zu begleiten, sowie hochentwickelte Computer-Modellierung, um die komplexen geochemischen und felsmechanischen Prozesse im Wirtgestein zu verstehen. Der gesamte Standortbestimmungsprozess muss transparent geführt werden und eine sorgfältige Beurteilung sozialer und psychologischer Kriterien umfassen. Dies ist für eine breit akzeptierte Lösung fundamental.

Die Schweiz wird bei der Entwicklung von Technologien für sichere, innovative Reaktoren auch in Zukunft eine Rolle spielen, damit sie in der Lage bleibt, zu den hochentwickeltesten nuklearen Technologien anderer Länder ihre eigene Expertenmeinung abzugeben.

Daher müssen neue Reaktortechnologien der Generation IV und ihre Brennstoffzyklen kontinuierlich auf ihre nukleare Sicherheit, Nachhaltigkeit und Strategien zur Abfallreduktion untersucht werden. Mit der kontinuierlichen Erforschung der Generation IV im Rahmen internationaler Organisationen wie EURATOM, der Kernenergie-Agentur der OECD (NEA) und der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) kann die Schweiz ihre eigenen Interessen beim Errichten völkerrechtlicher Regeln und Richtlinien zum nuklearen Sicherheits- und Sicherungsregime wahrnehmen. Das ist die beste Garantie dafür, dass ihre Stimme auf dem internationalen Parkett weiterhin gehört wird.

Fusionsforschung soll in einem Umfang betrieben werden, wie sie im Rahmen multilateraler Tätigkeiten finanzierbar bleibt und nicht mit Forschungsgeldern für andere Energietechnologien interferiert.

Alle diese Massnahmen tragen zum übergeordneten Ziel bei, die grosse nationale Kompetenz für nukleare Fragen zu erhalten und zu sichern, um den schweizerischen Kernkraftwerken einen möglichst sicheren Betrieb bis weit in die 2040er Jahre sowie eine kompetente Bewirtschaftung des nuklearen Erbes für die nachfolgenden Jahrzehnte zu gewährleisten.



Die Energieforschung auf Systemebene war noch nie so relevant wie im kommenden Jahrzehnt: Fortgeschrittenes Energienetz-Management, Systemintegration, Sektorkopplung und Speicherung werden eine entscheidende Rolle spielen, um die Durchdringung der erneuerbaren Energien weiter zu steigern. Umfassende Forschungsarbeiten werden die Penetration weit über 100 Prozent der Kapazität des aktuellen Verteilungsnetzes bringen. © Shutterstock

Industrielle Prozesse

Industrielle Prozesse werden Säulen einer Kreislaufwirtschaft, in der Produkte und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg nur minimale Fussabdrücke von Energie, Materialien und Emissionen hinterlassen.

Die Forschung ermöglicht das Entwickeln innovativer Prozesstechnologien und intelligenter Managementpraktiken, die die industrielle Ressourceneffizienz so weit vorantreiben, dass der Materialverbrauch minimiert und der Energiebedarf aus erneuerbaren Quellen abgedeckt wird.

Auf dem Weg zu dieser Vision bestehen für die industriellen Prozesse Herausforderungen und auch Chancen:

Kreislaufwirtschaft

Das Schliessen von Materialkreisläufen beginnt mit einem intelligenten Produktdesign, das darauf abzielt, den Energie- und Materialverbrauch nicht nur in der Herstellungs- und Nutzungsphase von Produkten, sondern auch am Ende ihrer Lebensdauer zu reduzieren. Wiederverwendung, Recycling und Umwandlung von Materialien in industriellem Massstab bieten neue Möglichkeiten für die Kopplung von Abfallmanagement- und Materialversorgungsketten. Die nachhaltige Produktion von Biomasse oder die Nutzung von Kohlenstoff aus CO₂-emittierenden Prozessen bieten weitere Alternativen zu fossil basiertem Kohlenstoff in Grundstoffen und Energieträgern.

Immer dann, wenn etablierte Ausgangsmaterialien ersetzt werden, müssen die bestehenden Lieferketten neu gestaltet werden. In vielen Fällen bedeutet dies eine Verlagerung von Grossstandorten mit Massenproduktion hin zu kleineren, dezentraleren Einheiten; sei es für die Rückgewinnung von Materialien direkt am Ort ihrer Verwendung oder für die Nutzung lokaler Biomasse. Neben der Verfügbarkeit erneuerbarer Ausgangsstoffe ist auch die Nähe zu Absatzmärkten ein weiterer Treiber für die dezentrale Fertigung, zumal die Digitalisierung der Lieferketten die Herstellung massgeschneiderter Produkte in kleineren Losgrössen bei reduzierten Lagerbeständen und agiler Lieferung ermöglicht.

Damit Rückgewinnungsprozesse am Lebensende des Produkts wirtschaftlich tragfähig und umweltverträglich sind, müssen sie in Qualität, Preis und Effizienz

mit der Produktion von Neumaterial konkurrieren können. Die mit geschlossenen Materialkreisläufen einhergehenden Einschränkungen von Materialqualität und -verfügbarkeit erfordern resiliente industrielle Prozesse, damit die Qualität des Endproduktes auch bei wechselhafter Beschaffungslage gewährleistet ist. In ähnlicher Weise ruft der Trend zu flexiblen Versorgungsketten nach anpassungsfähigen Industrieanlagen, die gut in virtuelle Fertigungsnetze eingebunden sind.

Erneuerbare Energie

Gegenwärtig ist der Anteil der erneuerbaren Energie im Industriesektor gering. Das liegt häufig daran, dass die Anforderungen, die industrielle Prozesse an ihre Energieversorgung stellen, ernsthafte Hürden für die Integration erneuerbarer Energien darstellen. Zuverlässigkeit ist von entscheidender Bedeutung, da Störungen der Energiezufuhr nicht nur die Produktivität der Anlage beeinträchtigen, sondern auch die Anlagensicherheit und die Produktqualität gefährden. Bei der Prozesswärme kommt es nicht nur auf die Verfügbarkeit vor Ort an, sondern der industrielle Prozess gibt auch das erforderliche Temperaturniveau vor.

Solche nachfrageseitigen Vorgaben stehen im Gegensatz zu den unregelmässigen und saisonalen Erzeugungsmustern von Wind- und Sonnenenergie sowie zur standortspezifischen Verfügbarkeit und Qualität von Bioenergie, Geothermie oder Umgebungswärme. Soll die industrielle Nachfrage mit erneuerbarer Energie gedeckt werden, sind daher oft komplexe, massgeschneiderte Lösungen erforderlich; sei es bei der Technologiewahl, dem Betriebsmanagement oder bei der Gestaltung des Geschäftsmodells. In der Regel wird jede Integrationslösung erschwinglicher, wenn

Energieeffizienzmassnahmen schon im Vorfeld berücksichtigt werden.

Systemansätze für Effizienz und Flexibilität

Energie- und Materialeffizienz sind miteinander verbunden, weil der Grossteil der Energie in industriellen Wertschöpfungsketten für die Materialverarbeitung in der Produktion verwendet wird. Als Faustregel gilt, dass die Reduktion des Materialverbrauchs in einem Prozess zugleich die Reduktion der Energiekosten sowie der Emissions- und Abfallmengen bewirkt.

Weitere Effizienz- und Flexibilitätsgewinne sind durch die lokale Integration von Energie und Materialflüssen oder deren vermehrtem Austausch an dezentralen Energie-Hubs zu erwarten, wo Industriestandorte mit umliegenden Geschäfts- und Wohngebäuden verbunden sind. Zum Erreichen optimaler Lösungen auf Standorte- oder regionalen Systemen spielen durchdachte Prozessintegrationsmethoden eine entscheidende Rolle. In Multi-Energie-Netzen werden die Netze für Strom, Fernwärme und -kälte, Treibstoffe, Trink- und Abwasser gemeinsam betrieben. In solchen Kombinetzen wird Energie koordiniert gespeichert, umgewandelt und wieder abgegeben.

Die Integration auf der höchsten Systemebene führt zu einer Sektorkopplung, bei der die Bereitstellung und Nutzung von Energie über eine Vielzahl von Umwandlungs- und Speichertechnologien miteinander verknüpft sind. Weil Produzenten und Konsumenten so nicht nur mit Strom und Wärme, sondern auch mit Plattformchemikalien und Treibstoffen handeln können, kommt den industriellen Prozessen hier eine zentrale Rolle zu. Die wirkungsvollsten Lösungen werden letztlich nicht nur Effizienzgewinne erzielen und neue industrielle Anwendungen für die Nutzung erneuerbarer Energien erschliessen, sondern auch neue betriebliche Freiheitsgrade schaffen, die es der Industrie ermöglichen, Flexibilitätssdienstleistungen anzubieten und eine höhere Anlagenproduktivität zu erreichen.

Digitalisierung als transformative Kraft im industriellen Sektor

Im Internet der Dinge liefern kostengünstige Sensoren mit minimalem Energieverbrauch eine Fülle von Daten zu Prozessparametern, Anlagenleistung und Materialqualität, die auch unter schwierigen Bedingungen in

Echtzeit rund um den Globus geschickt werden können. Eine solche Fernüberwachung ist von unschätzbarem Wert für die dynamische, prädiktive Prozesssteuerung, eine vorausschauende Instandhaltung und agile Lieferkettenplanung. Daraus ergeben sich unmittelbar Vorzüge in Bezug auf Ressourceneffizienz, Prozesssicherheit, Produktqualität, Anlagenproduktivität und Kosten.

Die schnelle, zuverlässige Kalibrierung von Prozessmodellen anhand von Daten, die unter klar definierten, realen Umständen und nicht unter hypothetischen Annahmen erhoben wurden, erleichtert robustere Prozessdesigns und verhindert Ressourcen- und Kosteneinbussen wegen Overengineering oder sicherheitsbedingten Redundanzen. Nachdem ein Prozessdesign umgesetzt wurde, können im täglichen Betrieb regelmässig aktualisierte Modelle als Optimierungsinstrumente sowie zur Szenarienanalyse für die Unterstützung von Geschäftsentscheidungen dienen. In Form digitaler Zwillinge konkreter Anlagen können solche Modelle auch in Schulungen eingesetzt werden, damit ineffiziente Stillstandszeiten bei Instandhaltung und Nachrüstung vermieden werden.

Mit zunehmender Rechenleistung und dem Fortschritt der künstlichen Intelligenz kann das Anwendungsgebiet der Prozessmodelle vom Betrieb der Einzelanlage über ganze Produktionslinien bis hin zu integrierten Industriestandorten erweitert werden. Mit intelligenter Prozessüberwachung auf verschiedenen Systemebenen wird es einfacher, den optimalen Betriebspunkt zu finden und auch bei sich rasch ändernden Umständen nahe daran zu bleiben. Dank Schwarmlogik können «Cloud-Fabriken» (räumlich verstreute Anlagen, die virtuell miteinander verbunden sind) koordiniert und ferngesteuert werden.

Mit Echtzeitdaten zu Energieerzeugung und -verbrauch, die sich für die Optimierung der industriellen Energieeffizienz oder zum Anbieten nachfrageorientierter Netzflexibilitätsdienste nutzen lassen, erreicht das Energiemanagement neue Dimensionen. Zusammen mit zeitabhängigen Informationen über die Kosten und den ökologischen Fussabdruck des Energiemix können sogar komplexe Energiesysteme mit einem grossen Anteil an erneuerbaren Energien robust, wirtschaftlich und umweltschonend betrieben werden.

Mittel- bis langfristige Prioritäten

Prozesstechnologien zur Verbesserung der Material- und Energieeffizienz

Heute verfügbare, kostenwirksame Best Practices bieten immer noch ein beträchtliches Potenzial für weitere Verbesserungen der Ressourceneffizienz, insbesondere bei bestehenden Anlagen und Nachrüstungen. Disruptive Innovationen könnten jedoch noch grössere Effizienzgewinne bewirken.

Produktdesign, das auf minimalen Materialverbrauch und maximale Recyclingfähigkeit abzielt, führt zu kleineren Abfallströmen mit höherem Wert. Intelligente Prozesse, die solche Abfälle wie auch nachhaltige gewonnene Biomasse zu industriellen Grundstoffen und Energie umwandeln, werden für die Kreislaufwirtschaft von zentraler Bedeutung sein. Während die niedrigen Temperaturniveaus von Abfall und Umgebungswärmeströmen ihre direkte Nutzung in vielen herkömmlichen Prozessen ausschliessen, könnten neuartige Bioprozesse und innovative Katalysmethoden diesen Zwängen gewachsen sein, ohne signifikante Einbussen bei Ertrag, Selektivität und Geschwindigkeit der Umwandlung zu provozieren. Innovative Technologien zur effizienten Anhebung des Temperaturniveaus und zur Minimierung von Wärmeübertragungsverlusten erweitern die Einsatzmöglichkeiten der erneuerbaren Wärmequellen noch zusätzlich.

Die Prozessintensivierung ist ein weiteres Forschungsgebiet zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Verschiedene Strategien können den Energieverbrauch und den Materialverlust reduzieren: optimierte Prozesse für beschleunigten Wärme- und Massetransfer, kürzere Reaktionszeiten, höhere Trenneffizienz, grössere Selektivität, mildere Reaktionsbedingungen, Synergien im Anlagenbetrieb sowie Umstellung von Batch- auf kontinuierliche Prozesse.

Neuartige Apparate mit besserem Wärme- und Massetransfer in optimierten Strömungsfeldern (z.B. Mikroreaktoren oder rohrlose Wärmetauscher) sind ein Schlüsselfaktor für die Prozessintensivierung. Durchbrüche in der Materialforschung und bei der additiven Fertigung werden neue Gestaltungsfreiheit für

3D-Strukturen bringen und damit die Anpassung kritischer Anlagenkomponenten an spezifische Prozessanforderungen zu erschwinglichen Kosten ermöglichen. Die künstliche Intelligenz könnte den Designprozess mit schnellem, automatisiertem Varianten-Screening deutlich beschleunigen. Im Endeffekt sollten modulare, kompakte und multifunktionale Systemkomponenten, die sowohl für Nachrüstungen als auch für Neuanlagen verschiedener Grössenordnung geeignet sind, den Entwicklern industrieller Prozessen und den Planern von Lieferketten in der Kreislaufwirtschaft mehr Flexibilität verschaffen.

Prozessintegration auf Standort- und Systemebene

Die Prozessintegration zielt auf den ökonomisch sinnvollen Austausch und die Kaskadennutzung von Stoff- und Energieflüssen auf Anlagen-, Standort- und Regionenebene ab und ist somit eine zentrale Voraussetzung für die Kreislaufwirtschaft. Die Forschung soll dabei die wissenschaftliche Grundlage für die Technologien und Instrumente schaffen, die bei Entwicklung, Bewirtschaftung und Betrieb hochintegrierter industrieller Systeme erforderlich sind.

Auf Ebene der technischen Grundoperationen werden Modelle benötigt, welche die physikalischen Gegebenheiten der Material- und Energieflüsse sowie der Umwandlungsprozesse angemessen beschreiben, um nicht nur Verbrauchsmuster zu erfassen, sondern auch die Eignung der Prozesse, sich in Prozessnetze mit Kaskadennutzung von Wärme und Materialien integrieren zu lassen. Neuartige industrielle Symbiosekonzepte auf Standortebene sollen Synergien aus der Vernetzung von Prozessen, der Kopplung von Material- und Abfallwirtschaft und der Integration erneuerbarer Energieressourcen schaffen. Bioraffinerien für die Koproduktion von Materialien, Brennstoffen, Wärme und Strom sind ein Paradebeispiel für diesen Ansatz. Die Integration von Industrie-Clusters in Multi-Energie-Netze bringt neue Herausforderungen aufgrund täglicher und saisonaler Schwankungen von Angebot und Nachfrage. Obwohl fortschrittliche Prozesssteuerungssysteme diese Schwankungen bis zu einem gewissen Grad mildern könnten, ist weitere Forschung nach effizienten und erschwinglichen Tech-

nologien für die kurz- und langfristige industrielle Energiespeicherung angesagt. Angesichts der langen Lebensdauer industrieller Anlagen stellt das Nachrüsten bestehender Produktions- und Infrastruktureinrichtungen eine besondere Herausforderung dar.

Solange sich Prozessnetzwerke nur schwerlich mit den gängigen Planungs- und Optimierungs-Tools darstellen lassen, ist die ingenieurwissenschaftliche Forschung gefordert, neue Methoden für das schnelle Screening von Integrationsoptionen auf Standort- und Lieferkettenebene vorzuschlagen. Da eine nachhaltige Symbiose allen am Austausch Beteiligten Nutzen bieten soll, muss die Forschung nicht nur die Machbarkeit und die Umweltwirkung technischer Entwicklungen adressieren, sondern auch die Wirtschaftlichkeit neuer Geschäftsmodelle sowie die sozialen Innovationen, die kollaborative Ansätze begünstigen.

Multi-Kriterien-Analysen als Entscheidungshilfe in Industrie und Politik

Aufgrund der fortschreitenden Integration industrieller Prozesse in grössere physische und virtuelle Netzwerke dehnt sich die Reichweite von Technologie-, Geschäfts- und Strategieentscheidungen immer weiter über den unmittelbaren Einflussbereich der Entscheidungsträger hinaus. Um künftigen Herausforderungen ohne unerwünschte Rebound-Effekte oder Lastenverlagerungen zu bewältigen, werden die Entscheidungsträger vermehrt auf Instrumente zurückgreifen, welche die möglichen positiven und negativen Auswirkungen der vorliegenden Optionen zuverlässig darstellen. Die Forschung ist gefordert, der wachsenden Komplexität mit Modellen zu begegnen, die ein Bündel von Optionen wissenschaftlich fundiert untersuchen können, sich aber dennoch in praxistaugliche Instrumente zur Einbindung von Interessengruppen



Innovative Prozesstechnologien und Managementpraktiken steigern die Energieeffizienz, während erneuerbaren Energien in vernetzte Anlagen, Standorte und ganze Wertschöpfungsketten integriert werden. © Shutterstock

und zur Unterstützung von Entscheidungen übersetzen lassen.

Um zu vermeiden, dass ein Subsystem auf Kosten der übergeordneten Ziele optimiert wird, müssen Produktvarianten und alternative Prozesse aus Lebenszyklusperspektive bewertet werden. Die Grenzen der Lebenszyklusanalysen (LCA) müssen sorgfältig definiert werden. Oft reichen sie von der Gewinnung der Rohstoffe und Primärenergien über die Nutzung des Produkts bis hin zum Schliessen des Kreislaufs am Ende seiner Lebensdauer. Insbesondere Effizienzgewinne durch Kaskadennutzung oder Netzwerkaustausch werden leicht übersehen, wenn sich die Analyse auf einen Kernprozess oder einen einzelnen Produktionsstandort beschränkt.

Übergreifende Methoden zur Multi-Kriterien-Analyse sind erforderlich, nicht nur um aus einem breiten Spektrum von Wirkungskategorien potenzielle Probleme zu identifizieren, sondern auch um Mehrfachnutzen (Multiple Benefits) über Energieeinsparungen und Treibhausgasreduktionen hinaus aufzuzeigen, beispielsweise Kosteneinsparungen oder immaterielle Vorteile bei Qualität, Produktivität, Sicherheit, Resilienz oder Reputation. In hochintegrierten Systemen lassen sich die Vor- und Nachteile kaum an einer einzelnen Massnahme festmachen. Daher ergeben sich für die Forschung Fragen rund um Tracking-, Moneta-

risierungs- und Allokationsmethoden, die den Ansprüchen von Geschäftspartnern, Regulierungsbehörden und anderen Interessengruppen gleichermaßen gerecht werden.

Je früher derartige Analysen in die Produkt- und Prozessentwicklung integriert werden, desto besser. Unzureichende Datenqualität und -verfügbarkeit sind jedoch häufig Hindernisse bei der Bewertung neuer Technologien. Um zu vermeiden, dass Zukunftsszenarien für geschäftliche und politische Entscheidungen auf veralteten Informationen beruhen, müssen Forschende Wege finden, disruptive Innovationen so zu beschreiben, dass die Kompatibilität mit Multi-Kriterien-Analysen gewährleistet ist.

Die enge Zusammenarbeit mit der Industrie und weiteren Akteuren bei der Zielbestimmung, bei kritischen Begutachtungen und bei der Verbreitung der Resultate ist unerlässlich, um die Relevanz und Glaubwürdigkeit der Analyse zu sichern. Jedoch steht der komplexe, hochtechnische Inhalt solcher Analysen einer breitangelegten Partizipation oft im Weg. Die Forschung soll dazu beitragen, dass ein fundierter Dialog bis weit über die inneren Expertenkreise hinaus erfolgt und Entscheidungsträger in Industrie, Politik und Gesellschaft dazu befähigt, sich auf die Resultate der Multi-Kriterien-Analyse abzustützen.

Anhang

Forschungsthemen

2021–2024

Die folgende Liste weist die Forschungsthemen aus, auf die in der Periode 2021–2024 fokussiert werden muss. In den meisten Fällen sind die genannten Themen für mehrere Forschungsschwerpunkte erheblich. So ist beispielsweise ein besseres Verständnis für die Faktoren, die das individuelle Energieverbrauchsverhalten in Zukunft beeinflussen, für «Mobilität» wie auch für «Wohnen und Arbeiten» von Bedeutung.

ENERGIE, GESELLSCHAFT UND POLITIK- MASSNAHMEN

Unternehmen und Haushalte

Energieverbrauch und individuelles Verhalten

- Modellierung der individuellen Entscheidungsfindung unter rationalem Einfluss (Rendite/Risiko) und unter «begrenzt rationalem» Einfluss;
- Untersuchung der Wechselwirkung zwischen sozio-ökonomischen Determinanten sowie emotionalen, normativen und kognitiven Faktoren, die für den Energieverbrauch erheblich sind;
- Untersuchung der Wirkung gesellschaftlicher Innovation im Energiesektor sowie des Verhaltens der Haushalte, wenn sie mit Innovationen im Energiesektor konfrontiert sind.

Ansatzpunkte für eine gesenkte Energienachfrage von Haushalten und Unternehmen

- Untersuchung struktureller Aspekte der Energienachfrage von Haushalten: Lifestyle, wo und wie die Menschen leben;
- Untersuchung gesellschaftlicher und ökonomischer Entwicklungen: langfristige Trends mit Wirkung auf die Energienachfrage;
- Untersuchung der Verhaltensänderung während günstiger Zeitfenster (aufgrund technischer, gesellschaftlicher, wirtschaftlicher Veränderung, insbesondere Digitalisierung);
- Entwicklung von Preissignalen mit den dazugehörigen effektiven Energiekosten (inkl. Transport)
- Untersuchung von Wirkung und Ausgestaltung nichtpreislicher Massnahmen für eine Reduktion des Energieverbrauchs;
- Untersuchung von Rebound-Effekten und Entwicklung gezielter Gegenstrategien.

Nachfrageflexibilität von Haushalten und Unternehmen nutzen und multiplizieren

- Entwicklung von Geschäftsmodellen, welche die Flexibilität im Energiesystem steigern, unter Berücksichtigung der Wirkung und Chancen der Digitalisierung;
- Entwicklung und Untersuchung von Tarifmodellen für die Netznutzung und den Energieverbrauch, die auf der Nachfrageflexibilität beruhen;
- Experimentelle Untersuchung neuartiger Instrumente für die Nachfrageflexibilität.

Investorenverhalten, Unternehmensstrategie und Organisation

- Untersuchung der Attraktivität von Investitionen in die Energieinfrastruktur aus Sicht der Investoren und der Portfolio-Optimierung, Entwicklung von Strategien zur Attraktivitätssteigerung;
- Entwicklung von Strategien für intelligente Energiesysteme (inkl. datenschutzrechtliche Grenzen)
- Untersuchung von Investitionshürden bei Energieeffizienz und erneuerbaren Energien;
- Untersuchung des Energiesektors als Innovationssystem: Funktionalität und Determinanten der Innovation, Anreize und Hindernisse für die Innovation: Verbreitung neuer Produkte;
- Untersuchung des Akteurverhaltens in den Organisationen und von Lösungen für den Abbau von Innovationshürden im Energiebereich;
- Beurteilung, wie Unternehmen das energierelevante Verhalten ihrer Belegschaft beeinflussen können und umgekehrt (inkl. arbeitsrechtliche Grenzen);
- Chancen der Zusammenarbeit zwischen Akteuren verschiedener Branchen und Sektoren;
- Integration neuer Technologien (z.B. Speicherung): Untersuchung der Chancen und Vorzüge für Unternehmen und andere Akteure.

Märkte, Regulierung und Politikmassnahmen

Marktgestaltung und -regulierung

- Beurteilung verschiedener Energiemarktgestaltungen in der Schweiz und Entwicklung neuer, effizienter Marktgestaltungen mit Fokus auf ihre Fähigkeit,
 - › erneuerbare Energien im grossen Rahmen zu integrieren;
 - › die Sektorkopplung zu fördern;
 - › effiziente Investitionen und Entwicklungsbemühungen für Speicherung und Nachfragesteuerung (Demand Side Management) zu fördern;
 - › das Potenzial neuer Technologien (z.B. Digitalisierung) und neue gesellschaftliche Entwicklungen (z.B. Kreislaufwirtschaft und Urban Mining) nutzbar zu machen;
- Entwicklung von Entscheidungsfindungs-Tools für die Sektorkopplung;
- Untersuchung der Wirkungen einer Marktliberalisierung, insbesondere bei Strom und Gas;
- Beurteilung der Optionen für die Marktregulierung;
- Untersuchung der gesetzlichen Aspekte von «Energy as a Service»;
- Untersuchung der gesetzlichen Umsetzung von Investitionsanreizen in neuen Marktgestaltungen;
- Untersuchung der Stringenz von gesetzlichen Mitteln aus einer ganzheitlichen Sicht des Energiesystems.

Integration der erneuerbaren Energien und Dezentralisierung

- Untersuchung der gesetzlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen und Chancen beim Übergang zu einer dezentraleren, intermittierenden Energie (z.B. Aspekte der Verteilung, Zuständigkeit für Systemstabilität, neuen Regulationsinstrumenten);
- Entwicklung von Ansätzen (z.B. Marktgestaltung und Geschäftsmodelle) für den Umgang mit der dezentralisierungsbedingten Vielzahl und Heterogenität der Akteure, gerade was die Koordination der Investitions-, Realisierungs- und Nutzungsentscheide anbelangt: diesbezügliche Chancen der Digitalisierung;

- Beurteilung des Beitrags von Eigenverbrauchsgemeinschaften und vom Übergang Verbraucher-Prosumer für die Energiestrategie;
- Entwicklung von Ansätzen für den Umgang mit intermittierender Erzeugung und die Gewährleistung der Versorgungssicherheit in einem äusserst dezentralen System;
- Entwicklung von Entscheidungshilfen für die Beurteilung von Entwicklungen in einem dezentralen Energiesystem.

Untersuchung politischer und regulatorischer Instrumente

- Entwicklung neuartiger Politikmassnahmen und Ansätze für:
 - › eine reduzierte Energienachfrage und eine gesteigerte Energieeffizienz, die sich aus den Determinanten und Hindernissen gemäss Forschungsbereich 1 («Unternehmen und Haushalte», s.o), neue Ansätze, die sich aus der Digitalisierung ergeben;
 - › wachsende Investitionen in die Energietechnologien und Energieinfrastruktur, die sich aus den Hindernissen gemäss Forschungsbereich 1 («Unternehmen und Haushalte», s.o) ergeben, sowie die finanziellen Risiken;
 - › die Verwendung der Raumplanung als Ausgangspunkt für neue Energieprojekte (Siedlungsgebiet, Baubewilligungsverfahren);
 - › verbesserte Verteilungseffekte von Politikmassnahmen (z.B. soziale Abfederung);
- Beurteilung der Folgen der Wechselwirkungen zwischen Politikmassnahmen (bereichsübergreifend, alte/neue Massnahmen) und Entwicklung von Ansätzen und Prozessen zum Umgang damit;
- Ex-post-Untersuchung der Wirkung von Politikmassnahmen/Instrumenten zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien; gewonnene Erkenntnisse für die Schweiz;

Juristische und internationale Aspekte

- Positionierung der Schweiz auf dem internationalen Energiemarkt; Optionen für eine Integration der Schweiz im europäischen Energie- bzw. Strommarkt, inklusive Pumpspeicher-Kraftwerke;

- Beurteilung des Einflusses und der Wechselwirkungen der Energiepolitik im Ausland und der internationalen Klimapolitik mit den Schweizer Instrumenten und Massnahmen;
- Beurteilung der Konformität von Schweizer Instrumenten und Massnahmen mit dem internationalen Recht und insbesondere dem europäischen Recht;
- Entwicklung von Optionen für das Lösen bzw. Mindern von Zielkonflikten zwischen Raumplanungs-, Umwelt- und Energierecht; Möglichkeiten und Grenzen beschleunigter Planungs- und Genehmigungsverfahren;
- Untersuchung und normative Beurteilung des Gesetzesrahmens für langfristige Investitionen.

Modellierung, systemweite Beurteilungen und Transformationsprozess

Energiemodellierung und -szenarien als Entscheidungshilfen

- Verbesserung und Entwicklung neuer Energiemodelle und -szenarien, die Verteilungsaspekte, disruptive Veränderungen und Ungewissheit berücksichtigen;
- Verbesserung und Entwicklung geeigneter Tools und Methoden (z.B. volkswirtschaftliche Modelle) für die Szenarienentwicklung und -simulation unterschiedlicher energiepolitischer Optionen;
- Anreicherung von Energie- mit neuen Szenarien, die auf die Schlüsselakteure und die Gesamtgesellschaft fokussieren (z.B. Verhalten und Lifestyle, Landnutzung, Beschäftigung, Wohnungsbau, Digitalisierung, Konsum, Freizeit und Mobilität);
- Verbesserung der Energienachfragemodellierung unter Berücksichtigung des individuellen Verhaltens und der sozialen Interaktionen;
- Entwicklung geeigneter Modellierungstools für die ganzheitliche Analyse eines hochdynamischen, digitalisierten Energiesystems, inklusive Modellvergleichsstandards und eine verbesserte Berücksichtigung der Ungewissheit.

Systemweite Beurteilungen

- Bewertung von Politikmassnahmen für die Dekarbonisierung des Schweizer Mobilitäts- und Wärmesystems auf Systemebene;
- Simulation der Auswirkungen unterschiedlicher politischer Optionen und Marktgestaltungen auf die Energieversorgung, die Wettbewerbsfähigkeit der Schweizer Industrie und die Umwelt;
- Beurteilung von Mechanismen, die auf die weitere Abkoppelung der Energie- und Wachstumskurve abzielen;
- Entwicklung und Beurteilung von Strategien für die Anpassung des Energiesektors an den Klimawandel (z.B. Kühlung und Verfügbarkeit von Wasser);

Der Transformationsprozess

- Im Umfeld der Energiestrategie Untersuchung und Analyse der Komplexität und Wechselwirkungen
 - › verschiedener Sektoren, inklusive Wechselwirkungen zwischen technischem, gesellschaftlichem, politischem und individuellem Wandel;
 - › der Wechselwirkung zwischen unterschiedlichen Strategien wie Effizienz, Sharing Economy, Digitalisierung usw.;
- Untersuchung und Analyse der sozialen Interaktionen in verschiedenen institutionellen Kontexten, wie soziales Lernen und soziale Innovationen, Governance, Bewegungen, Graswurzelbewegungen, Gemeinschaften, kollaborative und partizipative Prozesse, Akzeptanz/Resistenz neuen Technologien und Politikmassnahmen gegenüber;
- Untersuchung und Analyse räumlicher Wechselbeziehungen, wie etwa die Wechselwirkungen Nische/Regime/Landschaft, internationale/nationale/kantonale/lokale Entscheidungsfindung und Umsetzungsprozesse in Multi-Level-Kontexten;
- Entwicklung von Strategien zur Vermeidung von Lebensqualitätsverlust während des Umbaus des Energiesystems.

WOHNEN UND ARBEITEN

Areale und Quartiere

- Zuverlässigkeit von Energiesystemen mit lokalen erneuerbaren Energiequellen, sowie energieeffiziente Massnahmen zur Erhöhung der Versorgungssicherheit;
- Gebäude und Areale (inkl. Elektromobilität) als Energiedienstleister: Welche Last- und Bereitstellungsflexibilität kann ein Gebäude bzw. Areal dem elektrischen oder thermischen Netz anbieten und zu welchem Preis? Allokation dieser Flexibilitäten (Gebäude, Areal, Quartier)? Rolle innovativer IKT-Ansätze?
- Vom Gebäudeenergiemanagement zum Areal/ Quartierenergiemanagement: Konzepte, Planung, Betrieb.
- Entwicklung von Planungstools zur besseren Systemeinbindung von erneuerbarer Wärme, Gas und Strom (inkl. biogener, synthetischer WKK Systeme);
- Digitale Plattformen für integratives, multidisziplinäres und kollaboratives Planen unter Berücksichtigung energetischer Aspekte, ggf. unter Nutzung der Möglichkeiten georeferenzierter Daten (GIS);
- Weiterentwicklung bestehender Nachhaltigkeitsstrategien wie «2000-Watt-Areale» oder «Smart Cities and Communities» in Richtung Klimaneutralität auf Quartiersebene, sowie Demonstration dieser neuen Ansätze. Darauf basierend Konzepte, Prozesse, Massnahmen, Rahmenbedingungen analysieren, entwickeln und testen;
- Konzepte zur Klimaanpassung, um Gebäude, Areale und Städte in Bezug auf die globale Klimaentwicklung, urbane und lokale Mikroklimata (inkl. «heat island» Effekt) resilient zu gestalten.

Gebäude

- Lean Retrofit: Kosteneinsparungen durch einfache und robuste ggf. skalierbare Sanierungslösungen mit niedriger Komplexität und guter Performance, inkl. digitalisierte, daten- und modellbasierte energetische Gebäudesanierung;
- Energie- und Kosteneffiziente Systeme für die Gebäudehüllensanierung. Neue Konzepte, Ansätze, Technologien (z.B. Membranen);
- Reduktion des Energy Performance Gaps auf Basis benutzerfreundlicher Gebäude (u.a. durch Benutzer Feedback basierter Steuerung, User Interfaces, Vermeidung von Rebound-Effekten) und automatisierter Betriebsoptimierung;
- Innovative Verglasungen, Fenstersysteme und Fassadenelemente mit verbesserten und veränderbaren Eigenschaften wie Lichttransmission, Wärmeeintrag und -speicherung;
- Wärmedämmung: Neue Materialien und Konstruktionen, welche energieeffizient, umweltverträglich, kostengünstig und raumsparend sind;
- Minimierung der Materialflüsse, LCA und Erhöhung Recyclingfähigkeit in Richtung einer Kreislaufwirtschaft;
- Rolle von BIM bei LCA und Energieoptimierung (z.B. durch BIM-gestütztes Facility Management)
- Rolle von machine learning und künstliche Intelligenz zum Zweck von Beratung, Planung, Bau und Betrieb (z.B. Fehlerdiagnose);
- Baukultur, Planungs-, Bau- Betrieb- und Rückbauprozesse neugestalten, um die Umsetzung neuer Technologien und Konzepte zu ermöglichen und zu beschleunigen (Zusammenhänge zwischen Kreislaufwirtschaft, Bauprozesse, Nutzungsflexibilität und LCA berücksichtigen).

Gebäudetechnik

Dezentrale Technik

- Kurzzeit-Wärmespeicher: Integration von lokalen Wärme- und Stromspeichern ins Energiesystem;
- Neue Wärmespeicherungs-Technologien (thermo-chemische, latente);
- LCA, Materialien und Kostensenkung von dezentralen Speichersystemen;
- Effiziente und legionellensichere Brauchwarmwassersysteme für die Gebäudesanierung;
- Alternative Konzepte für die Wohnungslüftung im Gebäudebestand mit geringer Eingriffstiefe, niedrigem Aufwand an grauer Energie und guter und robuster Performance;

Thermische und elektrische Nutzung lokaler, erneuerbarer Energie

- Neuartige solare Fassadenelemente (PV, Solarthermie, PVT) mit flexiblen Geometrien und gutem optischem Erscheinungsbild zur besseren Gebäudeintegration bzw. zur Eignung als gestalterisches Element;
- Smarte solare/solarthermische Systeme (Integration in Energiemanagementsystem, Funktionsüberwachung, automatisierte Fehlermeldung an Installateure, Eigenverbrauchssteuerung bei Hybridsystemen);
- Reduktion des Strombedarfs im Winter durch Speicher und lokale Energiebereitstellung (Solar, Wärme-Kraft-Kopplung, Vermeidung durch Substitution von Abwärme, Geothermie, etc.);

Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)

- Hocheffiziente Wärmepumpen für die Gebäudesanierungen;
- Kostengünstige und emissionsneutrale WKK-Systeme (z.B. Brennstoffzellen) als Beitrag zu einem klimaneutralen Gebäudepark.

Kältebereitstellung

- Potenziale, Konzepte und Technologien für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Raumkühlung im urbanen Raum, Einbindung thermischer Speicher (kalt/warm) Ressourcen- und kostenoptimierte Lösungen für die aktive und passive Gebäudekühlung (inkl. Sonnenschutzsysteme);
- Effiziente Retrofit Systeme (Alternativen zu Split-Klimageräten).

Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

- innovative Lösungen mit IKT für Gebäudeautomations-, Mess-, Steuerungs- und Regelungs-technologien;
- Kostengünstige Sensoren und Steuerungen für einen vernetzten Einsatz.

Monitoring und Betriebsoptimierung

- Analyse der Übereinstimmung von Planungswerten mit den realen Verbrauchswerten bei Neubauten und Erneuerungen, Identifikation und Analyse der Ursachen für allfällige Diskrepanzen (Diagnosesysteme) und Ableitung von Empfehlungen;
- Entwicklung kostengünstiger Methoden zur Verbrauchserhebung und -vermeidung von Betriebsenergie und von Energie für gebäudeinduzierte Mobilität;
- Analyse technischer Möglichkeiten zur Selbstregulierung der Systeme sowie Analyse ihrer längerfristigen Wirksamkeit.

Mensch, Markt, Politik

- Untersuchung der Möglichkeiten (neue Ansätze bei Anreizen, Normen, Vorschriften) zur beschleunigten Transformation des Gebäudebestandes und zur Erhöhung der Sanierungsrate;
- Analyse durch wen kritische Energieinfrastruktur sinnvollerweise genutzt und betrieben werden soll (Netzbetreiber, Hausbesitzer, Energieproduzent). Ableiten von Handlungs- und Politikempfehlungen und entwickeln von neuen Geschäftsmodellen;
- Benutzerbedürfnisse in Bezug auf und Akzeptanz von Gebäudeautomationslösungen unter Berücksichtigung von Einfluss von Privacy und Security, nutzungsflexiblen Konzepten und Gebäude-Nutzer Schnittstellen;
- Untersuchung der Einflussfaktoren, Treiber und Hemmnisse sowie von möglichen Anreizen, welche Gebäudeeigentümer dazu bringen, sich zu vernetzen und einem Energieverbund anzuschliessen (neue partizipative Prozesse und Geschäftsmodelle für alle Stakeholders, inkl. Mieter);

MOBILITÄT

Mobilität als ganzheitliches System

- Analyse der potenziellen CO₂-Reduktion dank verbesserter multimodaler Verkehrskonzepte;
- Analyse der Integration erneuerbarer Stromerzeugung und der Rolle der Elektromobilität;
- Lösungen für die vollständige oder teilweise Elektrifizierung des Güterschwerverkehrs und der Güterschiffahrt;
- Reduktion der CO₂-Emissionen im kommerziellen Luftverkehr durch den Einsatz erneuerbarer Treibstoffe und der teilweisen Elektrifizierung der Antriebs- und Nebenaggregate;
- Ganzheitliches Monitoring der Umweltwirkung ausgewählter Aspekte des Mobilitätssystems (z.B. Benutzerverhalten) sowie des Treibstoff- und Antriebs-Mix;
- Analyse der Gesamtemissionen von Fahrzeugen und ihrer Antriebstechniken aus Sicht des Lebenszyklus, inklusive mögliche Auswirkungen des Stromnetzes auf diese Emissionen;
- Untersuchung der Auswirkung einer grossen Elektrofahrzeugflotte auf das Stromnetz;
- Beurteilung der Auswirkung verschiedener Diffusionsraten unterschiedlicher Fahrzeugantriebstechnologien auf die Stromnetzinfrastruktur, beispielsweise was den Ausbau- und Verstärkungsbedarf des Netzes anbelangt;
- Untersuchung von Fragen bezüglich Erhebung, Verfügbarkeit, Sicherheit und Eignerschaft von Mobilitätsdaten.

IKT ermöglicht neue intelligente Mobilitätskonzepte

- Untersuchung, wie effiziente, intelligente Personen- und Güterverkehrssysteme (Boden und Luft) in dichtbesiedelten Gebieten realisiert werden können;
- Weiterentwicklung und Realisierung von Konzepten für das reibungslose Betriebsmanagement im öffentlichen Verkehrsnetz;
- Reduktion von Unsicherheiten bei Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen durch verbesserte Kriterien und Datenerhebungsmethoden, inklusive Themen wie Datenverfügbarkeit und Abschätztechniken für künftige Szenarien;
- Untersuchung moderner IKT-Lösungen für geeignete Geschäftsmodelle bei neuen Mobilitätskonzepten, wie etwa Vehicle-to-X-Anwendungen;
- Untersuchung indirekter Einflüsse und von Rebound-Effekten auf den Energieverbrauch neuer Mobilitätskonzepte;
- Untersuchung der Auswirkungen neuer Technologien auf Güterlogistik und -vertrieb, wie etwa die Verkehrsträgerauswahl und eine grössere Resilienz für disruptive Ereignisse in der Güterlogistikkette;
- Analyse neuer Gütertransportlösungen (z.B. Platooning und alternative automatisierte Transportkonzepte) und ihrer Wirkung auf das Wesen von Fahrzeugen (d.h. die Vorstellung davon, was ein Auto ist);
- Analyse der Rolle der Elektrofahrzeuge im Demand-Side-Management, was den Ausgleich des Stromnetzes anbelangt;

Nutzerverhalten, gesellschaftlicher Wandel, Raumplanung, Wirtschaft und Regulierung

- Entwicklung von Massnahmen und Angeboten, die auf die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs und der kombinierten Mobilität abzielen;
- Analyse der Möglichkeiten, die sich aus Raumplanung, kollaborativer Mobilität und anderen Massnahmen für eine reduzierte Verkehrsnachfrage ergeben;
- Untersuchung des Potenzials von besseren Marketingstrategien durch die Mobilitätsanbieter;
- Untersuchung von Ansätzen, um den Fussgänger- und Fahrradverkehr, beispielsweise im Zusammenhang mit gesundheitsfördernden Massnahmen, zu fördern;
- Sozioökonomische und soziotechnische Untersuchung von Technologien, erforderlichen Infrastrukturen, Geschäftsmodellen, Instrumenten, Lenkungs- und Regulationsmassnahmen zum Arbeits- und Freizeitverkehr, dessen Wirkung auf die Mobilitätsnachfrage und den Energieverbrauch sowie mögliche Rebound-Effekte;
- Untersuchung des Potenzials von Verbesserungen bei Verfügbarkeit, Konnektivität, Infrastruktur und Energieeffizienz nachhaltiger Optionen bei der Verkehrsträgerwahl;
- Visuelle Analyse und Simulation des Fahrzeugverkehrs und Nutzerverhaltens mittels künstlicher Intelligenz;
- Untersuchung von Laststeuerungsmassnahmen, beispielsweise durch variable Tarifgestaltung, und ihre Wirkung auf das Mobilitätssystem;
- Untersuchung der öffentlichen Wahrnehmung neuer Antriebs- und Fahrzeugkonzepte.

Energiespeicherung und Substitution fossiler Brennstoffe

- Entwicklung hybrider Energiespeicherlösungen für Fahrzeuge, wie zum Beispiel Wasserstoff, Batterien und Superkondensatoren («Super Caps»);
- Optimierung von Batterien bezüglich Energiedichte, Lebensdauer, Materialien, Sicherheit, Kosten, Schnellladung und Second-Life-Anwendungen;
- Ableitung von Szenarien für die Errichtung von Synthese- und Verteilungsinfrastruktur synthetischer Treibstoffe im Strassen-, See- und Luftverkehr;
- Analyse des Einflusses in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzter alternativer Energieträger (z.B. Wasserstoff, Synthese- und Biotreibstoffe) auf die CO₂- und andere Emissionen.

Fahrzeugeffizienz

- Weiterentwicklung und Optimierung von Fahrzeugkomponenten und -systemen für den effizienten, wirtschaftlichen Einsatz von Strom und alternativen Energieträgern (z.B. Wasserstoff, Synthese- und Biotreibstoffe);
- Verringerung des Fahrzeuggewichts dank neuartiger Materialien, Fertigungsmethoden und Leichtbau-Komponenten, um den Energieverbrauch zu senken;
- Verbesserung des Energiemanagements in den Fahrzeugen, Optimierung des Antriebs, Realisierung von Rekuperationssystemen und Reduktion des nichtantriebsrelevanten Energiebedarfs (Hilfsantriebe);
- Steigerung der Effizienz herkömmlicher Verbrennungsmotoren dort, wo die Elektrifizierung bzw. Substitution schwierig ist, etwa im Güterfernverkehr zu Land oder Wasser sowie im Luftverkehr.

ENERGIESYSTEME

Energienetzwerke, Systemintegration, Sektorkopplung und CO₂-Abscheidung

Systemintegration

- Optimierung der Lenkungsarchitekturen für die unterschiedlichen Netzinfrastrukturen (Wärme, Gas, Strom, Wasser, potenziell CO₂, Wasserstoff);
- Optimierung der lokalen Energieerzeugung und des Eigenverbrauchs

Sektorkopplung

- Entwicklung von innovativen Technologien für die Sektorkopplung (z.B. Power-to-X);
- Untersuchung der Auswirkungen auf Umwelt und Wirtschaft

Wärme und Kälte

- Prognostizierung der Wärme-, Kälte- und Stromnachfrage in verschiedenen Branchen, inklusive Änderung der klimawandelbedingten Wärmelast;
- potenzielle Kühltechnologien und -lösungen für bestehende Siedlungen;
- Beurteilung optimaler Fernwärmekonfigurationen.

CO₂-Abscheidung

- Verbesserung der Kosten- und Energieeffizienz von CO₂-Entnahme-Technologien mit sauberem Energiepotenzial, wie etwa Bioenergie mit CCS (BECCS) und CO₂-Abscheidung aus der Luft mit Speicherung oder Umwandlung;
- Potenziale sowie indirekter Nutzen und Zielkonflikte aus einer Gesamtperspektive.

Digitalisierung

Datenanalyse

- Analyse von Big Data für Planung und Lenkung;
- datenbasierte Interoperabilitätsplattformen und Anlageverwaltung.

Daten-Sharing und Datenschutz

- Entwicklung von Daten-Sharing-Plattformen für Energiemarktakteure und von Anonymisierungsmechanismen

Datenbasierte Modelle

- Analyse und Lenkung grossflächiger Netzwerke;
- Austausch zwischen Betreibern von Übertragungs- und Verteilsystemen.

Datensicherheit

- Datenerhebung und -aggregation, Übertragung von Kontrollsignalen, Cyberangriffe, Schutzmittel

Querschnittsthemen

- KI-Anwendungen; inklusive digitale Marktplätze für eine grössere Partizipation der Kunden;
- Stromverbrauch der Digitalisierung, verbrauchssenkende Strategien.

Stromnetze

Technologien und Datenmanagement

- Quantifizierung der kundenseitigen Flexibilität;
- Planung und Betrieb dezentraler Speichersysteme (inkl. Elektrofahrzeuge);
- Daten-Sharing und Interoperabilität, Anlageverwaltung, Datensicherheit.

Flexibilität

- Hilfsdienste von den Verteil- bis zu den Übertragungsnetzen;
- Integration von hydraulischen Klein- und Grosskraftwerken;
- Prognostizierung für mehrere Zeithorizonte und Systemgrössen, Ressourcenaggregation.

Übertragungsnetze und -märkte

- resilienter Betrieb und Planung von Netzen;
- Tarifmodelle vs. Netzwerknutzung; Integration von politischen Zielsetzungen und Marktstrukturen im Umfeld der EU.

Lenkungsverfahren und Schutzmittel

- dezentrale Sensoren; resiliente Schutz- und Fehlerlokalisierungssysteme;
- zentrale vs. dezentrale funktionsbasierte Lenkung;
- Übertragungsnetzstabilität bei reduzierter Trägheit.

Netzkomponenten

- Leistungsbeurteilung leistungselektronischer Architekturen
- hochentwickelte Technologien für Mittelfrequenz-Umwandlung
- Materialien für die Hochleistungsisolierung von Hochspannungs-Netzkomponenten;

Speicherung

Speicherkonzepte

- künftige Energie-Angebots- und -Nachfragesituation;
- ökonomische und ökologische Wirkung von Speichertechnologien:
- optimale Speicheroptionen (de-/zentralisiert, Kurz-/Mittel-/Langzeit, Wärme/Strom/chemisch, Ort/Zeit).

Pumpspeicherung

- kostenwirksame Nachrüstungsoptionen, Dynamik reversibler Speicher-/Erzeugungssysteme

Druckluftspeicherung

- Effizienzsteigerung durch neue Anlagen-Designs, Stollenoptionen in der Schweiz;
- Turbomaschinen- und thermale Energiespeicherung für den dynamischen Betrieb.

Langzeit-Speicherung

- Hochentwickelte Konzepte der chemischen und elektrochemischen CO₂-Reduktion;
- Transformation von Biomasse zu lagerfähigen Biotreibstoffen;
- neuartige Konzepte zur Wasserstoffgewinnung.

Batterien

- Materialverfügbarkeit und Fertigungskonzepte für die Batterieherstellung im grossen Rahmen
- kostenwirksame, zuverlässige Technologien für stationäre und mobile Anwendungen;
- Recycling- und Second-Life-Anwendungen, inklusive ökonomische und ökologische Aspekte.

Wärmespeicherung

- thermomechanische Stabilität von Festphasen-Speichern für sensible Wärme und Kälte
- Wärmetransfer und Degradation in Phasenübergangssystemen für die Latentwärmespeicherung
- stabile Schichtspeicher und Wärmetauscher für die thermochemische Wärmespeicherung;
- grossflächige Wärmespeicherung im Untergrund

Szenarienmodellierung und Systemanalyse

Wege Richtung Netto-Null-Treibhausgas-Emissionen

- Energiesystemmodellierung für kostenoptimierte technische Lösungen;
- Raum- und Zeitdimensionen und ihre Implikationen für Infrastruktur und Speicherung;
- Ungewissheit bei der Modellierung;
- Wechselbeziehungen der Energietechnologien in einem Energiesystem mit Sektorkopplung;
- Monitoring und Benchmarking von Entwicklungen neuer Technologien und ihrer Auswirkung auf das Energiesystem.

Risiken

- Berücksichtigung von Risikoaspekten bei der optimierten Energiesystem-Modellierung und Szenarienanalyse;
- Gefährdungs- und Risikoanalyse einzelner Technologien und Infrastrukturen des Energiesystems;
- komparative, integrale Risikoanalyse eines stark gekoppelten Energie-Gesamtsystems.

Das Unerwartete vorbereiten

- Auswirkung disruptiver Ereignisse natürlicher, technischer und politischer Art, um die Systemresilienz und -zuverlässigkeit zu steigern;
- Prüfung der Belastbarkeit der Szenarienvarianten mittels Energiesystemmodellierung, beispielsweise bei Zusammenbruch der Biomasse- und Wasserkraftverfügbarkeit wegen dem fortschreitenden Klimawandel oder dem plötzlichen Ausstieg aus der Kernkraft (z.B. nach Zwischenfall in Europa).

Erneuerbare Energie, natürliche Ressourcen

Wasserkraft

Strom aus Wasserkraft

- innovative Ansätze für die Gesetzes Einhaltung (Gewässerschutzgesetz);
- Wasserkraftpotenzial an sensiblen Standorten.

Kurzfristige Flexibilität

- innovative Flexibilitätslösungen;
- Anlagendigitalisierung und Echtzeit-Monitoring zur Optimierung der Produktion;
- O&M;
- Hybridisierung der Wasserkraftwerke mit stationären Batterien.

Wechsel zur Winterproduktion

- Identifizierung des Potenzials der Gletscherschmelze bei gletschernahen Talsperren;
- Talsperrenerhöhung, Vernetzung von Speicherseen, intrasaisonale Abflussprognosen;
- minimierter Verlandungsverlust in kritischen Speicherseen.

Betriebssicherheit

- Techniken für die Verlängerung der nützlichen Lebensdauer sowie Feststellung sicherheitskritischer Ausfälle;
- Entwicklung und Prüfung von Kriterien für neue hydraulische Werkstoffe zur Erweiterung der Betriebsmöglichkeiten;
- Auswirkungen des Klimawandels auf den sicheren, kontinuierlichen Betrieb des Wasserkraftsystems und ihre Minderung.

Photovoltaik (PV)

PV-Zellen

- Kostensenkung durch verbesserte Umwandlungseffizienz bzw. Fertigungstechnologie;
- neuartige hocheffiziente Geräte für breitere Anwendungsmöglichkeiten (inkl. Light-to-X/ Treibstoff-Umwandlung).

PV-Module

- Prozesse und Materialien für grössere betriebliche Zuverlässigkeit von Modulen, Systemen und Kraftwerken;
- neuartige industrielle Fertigungsmethoden und Testprotokolle;
- verbesserte PV-Lebenszykluseigenschaften.

PV-Systeme, Solarhäuser und unkonventionelle Systeme

- Entwicklung von Industrienormen;
- digitale Tools zur Beschleunigung von Entwicklung und Einbau von PV-Systemen an Gebäuden;
- Potenzial, Leistung und Kosten von PV-Anlagen an unkonventionellen Infrastrukturen.

PV-Integration im Energiesystem

- zuverlässige, zeitlich und örtlich zuverlässige Prognostizierung der PV-Erzeugung;
- Integration der PV in das Niederspannungsnetz, massive Netzpenetration der PV;
- Methoden zur Beurteilung des Systemwerts der PV.

Bioenergie

Biomasse als Ausgangsstoff

- Mobilisierung, Logistik, Aufbereitung und Lagerung von Biomasse;
- Konzepte und Prozesse zur Maximierung der abfallbasierten Biomassenutzung;
- Benutzung neuer Bioenergie-Substrate für Energie-Grosskonsum.

Biomasse für Gas- und Flüssigtreibstoffe und die chemische Industrie

- fermentierbare Biomassebasis mittels neuartiger mikrobiologischer Prozesse;
- Biotreibstoffe mit minimaler Auswirkung auf Raffinerie- und Verteilinfrastruktur;
- Ansätze für eine flexiblere Biogaserzeugung in der gesamten Prozesskette.

Biomasse-Verbrennung

- saubere Verbrennungstechnologien;
- innovative Konzepte und Prozesse zur Erlangung der Prozesswärme mit wenig Emissionen.

Biomasse für die Energiespeicherung und Klimatisierungstechnologien

- neuartige Wege, um biogen gewonnenes CO₂ für Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Modelle zu nutzen;
- Biomasse mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung als Negativemissionstechnologie (NET).

Nutzung von Biomasse im Energiesystem

- optimierte Integration von Bioenergiewerken inklusive Sektorkopplung;
- End- und Nebenprodukte der Biomasse-umwandlung für geschlossene Stoffkreise;
- Bioraffinerie-Konzepte.

Geoenergie

Suchen und Finden erneuerbarer Energiequellen im Untergrund

- Geologie, Aufbau und Dynamik des Untergrunds in der Schweiz;
- integrierte Prospektionsmethoden, um die Erfolgchancen einer ersten Erkundungsbohrung zu steigern;
- Reduktion der Ungewissheit dank fortgeschrittener statischer und dynamischer Ressourcen- und Reservoir-Modellierung.

Erneuerbare geothermische Ressourcen

- Heiz-, Kühl- und Speicherkonzepte für Fernwärmegebiete;
- neuartige Konzepte, um die Kosten für das Bohren und die Bohrlochfertigstellung zu reduzieren und die Reservoirleistung zu steigern;
- Technologien für das Bohren, die Fertigstellung und Stimulation für hydrothermale und geothermische Systeme.

CO₂ im Untergrund für gross angelegte CO₂-Speicherung und -Nutzung

- die CO₂-Injektivität tiefer saliner Wasserleiter als Einschränkung des CO₂-Speicherpotenzials der Schweiz;
- das CO₂ als Wärmetauscher-Medium in geothermischen Applikationen für Direktnutzung und Stromerzeugung.

Sicherheit und Systeme

- neuartige Methoden für die Beobachtung, Kontrolle und Minderung von Risiken durch die induzierte Seismizität;
- Sicherheitsforschung zur standortgleichen Exploration und Gewinnung von Geothermie und Kohlenwasserstoffen;
- Bewertung der Geoenergienutzung für das schweizerische Energiesystem.

Unterirdische Speicherung von Wärme und Gas

- Die H₂-/CH₄-Injektivität tiefer saliner Wasserleiter als Einschränkung des Speicherpotenzials der Schweiz;
- Exploration der unterirdischen Wärmespeicherung für Wärmenetze und die saisonale Wärmespeicherung.

Windkraft

- Schweiz-spezifische Aspekte von Windkraftanlagen, z.B. Kraftwerksausführung, Prognosen, Lärm und Eis

Andere Solartechnologien (exkl. Photovoltaik)

Solarthermie (Niedrigtemperatur)

- Stagnationstemperatur der Kollektoren;
- Drain-Back-Anlagen;
- vereinfachte, standardisierte Systeme;
- hybride PVT-Kollektoren.

Solarthermie (Hochtemperatur)

- Kostenreduktion bei konzentrierenden Solartechnologien;
- hitzebeständige Fluide;
- Integration solarer Hochtemperatur-Wärme in industrielle Prozesse.

Solare Treib- und Werkstoffe thermochemische Ansätze

- effiziente, stabile, häufig vorkommende Redox-Stoffe;
- Optimierung des kombinierten Wärme-/Massetransports in Solarreaktoren;
- effiziente Veredelung von Solartreibstoffen und skalierbare Prozesse für Solarwerkstoffe.

photoelektrochemische (PEC-) Ansätze

- effiziente, stabile und nachhaltige Ausgangsstoffe für die PEC-Wasserspaltung;
- skalierbare PEC-Komponenten dank optimiertem gekoppeltem Wärme-, Masse- und Ladungstransport;
- PEC-Stoffe und Reaktionswege jenseits der Wasserspaltung.

Kernenergie und nukleare Abfälle

Langzeitbetrieb und Alterungsmanagement

- Leistungsfähigkeit deterministischer, probabilistischer Sicherheitsbeurteilungen der schweizerischen Kernkraftwerke;
- Langzeitbetrieb, strukturelle Integrität, Materialalterung;
- materielles und thermisches Hydraulikverhalten neuer, komplexer Brennelemente;
- sicherheitstechnische Aufrüstungen, z.B. Nachrüsten passiver Sicherheitssysteme, unfalltolerante Brennstoffe;
- Untersuchung der Störfallmanagementmassnahmen und Implementierung neuer Richtlinien;
- Risikostudien zu den Auswirkungen externer Gefährdungen und Cyberangriffe auf Kernkraftwerke;
- Sicherheitsbeurteilung des Lastfolgebetriebs für den KKW-Park der Schweiz;
- Erhaltung umfassender, kritischer Nuklearinfrastrukturen in der Schweiz.

Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken

- Sicherheit und Strahlungsschutz während des Stilllegungsprozesses von KKW;
- optimale Verfahren für Rückbau, Dekontamination und Aufbereitung der radioaktiven Rückstände;
- hochentwickelte Techniken für die Freimessung radioaktiver Abfälle;
- Verhalten abgebrannter Brennelemente bei trockener Langzeitzwischenlagerung.

Radioaktive Abfälle und geologische Tiefenlagerung

- Herausforderungen bei der Umsetzung der neuen Strahlenschutzverordnung;
- Forschungsbeitrag zur Geochemie und Nuklidtransportprozess-Modellierung für den Sachplan geologische Tiefenlager;
- Wirkung von Niedrigdosisstrahlung auf Umwelt und öffentliche Gesundheit;
- Wirkung von trockener Langzeitlagerung auf abgebrannte Brennelemente (Alterungsprozess).

Dimensionierung und Materialien für Transport- und Lagerbehälter

- Eigenschaften des Opalinustons (Wirtgestein) und ihre Variabilität, ihre Wirkung auf den Schachtbau und die Prozesse in und um geologische Tiefenlager;
- landschaftliche Langzeitentwicklung als Verständnishilfe für die künftigen (glazialen und fluvialen) Erosionsprozesse.

Hochentwickelte, innovative Reaktorkonzepte

- Teilnahme an internationalen Forschungsarbeiten zu hochentwickelten Reaktortechnologien via Euratom, OECD (NEA), IAEA und Generation-IV International Forum;
- Erforschung verbesserter Sicherheits- und Nachhaltigkeitsaspekte der wichtigsten Generation-IV-Reaktorkonzepte;
- Beurteilung hochentwickelter, neuartiger (geschlossener) Brennstoffkreisläufe bezüglich Kreislauf-Anforderungen;
- Potenzial hochentwickelter Systeme wie beschleunigerbetriebene und schnelle natriumgekühlte Systeme;
- Überwachung verbrannter Brennelemente und Partitioning-Technologien.

INDUSTRIELLE PROZESSE

Hier wird eine Auswahl von Forschungsthemen für die Periode 2021–2024 aufgeführt, die nach einem breiten Vernehmlassungsverfahren zusammengetragen und priorisiert wurde. Jeder Themen-Cluster beschreibt einen Innovationspfad hin zur Vision ressourceneffizienter industrieller Prozesse in einer Kreislaufwirtschaft.

Dabei liegt die Priorität auf technischen Innovationen, die eine signifikante Reduktion des Fussabdrucks industrieller Prozesse in Aussicht stellen oder Effizienz und Resilienz in anderen Sektoren erlauben. Nicht-technologische Forschungsthemen, die auf das Verständnis und die Überwindung von Umsetzungsbarrieren abzielen, sind ebenfalls enthalten.

Produkte und Prozesse für energieeffiziente Wertschöpfungsketten

Materialien, die den Fussabdruck von Produkten verringern

- Substitution fossiler Rohstoffe durch lokale Bio- bzw. Abfallstoffe;
- Nachhaltige Prozesse für Abscheidung, Verwertung und Speicherung von CO₂ (CCUS), um den Kohlenstoffkreislauf zu schliessen;
- Alternativen zu Verbundstoffen;
- Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen für neue Produktfunktionalitäten;
- Materialien für längere Instandhaltungs- und Austauschzyklen bei Gebrauchsgütern;
- Materialien und Produktdesign für bessere Recyclingfähigkeit und integriertes End-of-Life-Management.

Innovative, optimierte Produktionsprozesse

- Katalyse- und Metabolic Engineering für schnellere, effizientere und selektivere Materialtransformationen unter milden Bedingungen;
- Biotechnische Synthese und Produktaufbereitung mit niedrigem Energieverbrauch;
- Gezielter Energieeintrag mit Hilfe von Leistungselektronik, z.B. bei Trocknungsprozessen;
- Fortschrittliche Trennverfahren (z.B. Sorption, Membranen, reaktive Trennung) mit hoher Ausbeute und Selektivität bei minimalem Energieverbrauch;

- Hybridprozesse mit kombinierten Grundoperationen (z.B. Reaktion und Trennung), um Zwischenschritte zu vermeiden und Verluste zu minimieren;
- Werkstoffe und Apparatedesign mit minimalen Wärme- und Produktverlusten im Prozessverlauf sowie vereinfachten Reinigungs- und Produktwechselroutinen;
- Stabile kontinuierliche Prozesse mit minimierten Verlusten, insb. bei der Feststoffverarbeitung (z.B. Agglomerieren, Filtern von pharmazeutischen und Spezialchemie-Produkten);
- Neuartige Werkstoffe, strömungsdynamisch optimierte Designs und fortschrittliche Fertigungstechniken für kompakte Komponenten mit optimierten Wärme- und Stoffübertragungseigenschaften;
- Kompakte und erschwingliche Sensoren mit minimalen Energieverbrauch für die Fernüberwachung von Prozessen;
- Dynamische Modelle zur Regelung und Ablaufplanung hochintegrierter Prozesse;
- Digitalisierungskonzepte für die Überwachung, Steuerung und Optimierung des Energieverbrauchs von Produktionsanlagen;
- Entwicklung von Software und Hardware nach Prinzipien der Energieeffizienz («energy-aware computing»).

Schliessen von Stoffkreisläufen mit minimalem Energieaufwand

- Effiziente Verfahren für Produktaufbereitung, Materialrecycling und Abfallaufbereitung mit minimalem Energieaufwand im geeigneten Massstab;
- Flexible Prozessdesigns, die sich den variablen, heterogenen Strömen der Kreislaufwirtschaft anpassen können;
- Wiederverwendung von Materialien und Abwärmennutzung, um den Energie- und Emissionsabdruck der Abfallwirtschaft zu reduzieren;
- Integrierte Ansätze für optimierte Ressourceneffizienz und Flexibilität in der Abwasseraufbereitung bei verschiedenen Anlagengrößen;
- Systematische Ansätze für die Nachrüstung von Produktionsanlagen, Apparaten und Geräten für eine gesteigerte Energieeffizienz und längere Lebensdauer.

Planung und Entwicklung mit Systemperspektive

- Integration zukunftsorientierter LCA-Methoden bei Produktdesign und Prozessentwicklung für eine gesteigerte Energie- und Ressourceneffizienz über den gesamten Lebenszyklus hinweg;
- Multi-Kriterien-Optimierungsmethoden für eine beschleunigte, in jeder Hinsicht nachhaltigere Prozessentwicklung;
- Wissenschaftliche Design- und Optimierungsmethoden, um die Leistung integrierter Prozessnetzwerke auf Standort- und Versorgungskettenebene zu beurteilen;
- Generische Prozessmodelle und virtuelle Produktionsanlagen für ganzheitliche Szenarienanalysen in frühen Entwicklungs- und Planungsphasen;
- Generische Branchenmodelle zum Vergleich des aktuellen Energieverbrauchs gegenüber Minimalwerten für die Priorisierung und Planung von Effizienz- und Integrationsmassnahmen.

Industrielle Prozesse in einem nachhaltigen, resilienten Energiesystem

Produkte und Prozesse für die künftige Energietechnik

- Effiziente, umweltfreundliche Prozesse zur Vorbehandlung von komplexer Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung;
- Integrierte Herstellungsprozesse für klimafreundliche Bio- oder Synthesetreibstoffe, inkl. Power-to-Gas und Power-to-X;
- Effiziente, umweltfreundliche Prozesse in der Nutzungsphase von Bio- und Synthesetreibstoffen (Verbrennung, Brennstoffzellen usw.);
- Nachhaltige Produktion, Wiederverwendung, Recycling und Entsorgung von Batterien, Brennstoffzellen und Katalysatoren im kommerziellen Massstab.

Integration von Produktionsanlagen und Industriestandorten in zukunftsfähige Energiesysteme

- Fortschrittliche Methoden und Praxistools für die Gestaltung effizienter, zuverlässiger und flexibler Prozessintegrationslösungen von der Anlagenebene bis hin zu grösseren Verbundsystemen, sowohl für Neuanlagen wie auch für die Nachrüstung bestehender Anlagen;

- Effiziente Systeme für Rückgewinnung, Austausch und Speicherung chemischer, thermischer und elektrischer Energie in industriellen Fertigungsprozessen sowie in IKT-Systemen;
- Integration fluktuierender erneuerbarer Energiequellen (Solarthermie, Umgebungswärme, Photovoltaik usw.) in Produktionsprozesse mit optimierter Ablaufplanung und Speicherung;
- Innovative Prozesssteuerungsschemata zur Nutzung der Flexibilitäts- und Resilienzvorteile integrierter Systeme;
- Konzepte für Nutzung, Umwandlung und Übertragung von Fernwärme, insbesondere im Niedrigtemperaturbereich und für dezentrale Energieströme;
- Elektrifizierung von Fertigungsprozessen (z.B. Wärmepumpen zur Bereitstellung von Prozesswärme und -kälte) zur Einbindung dezentraler Stromerzeugung;
- Multi-Energiesysteme zur Bereitstellung von Wärme und Strom in Industrieanlagen in Netzwerken mit fluktuierenden Energiequellen und dynamischen Nutzungsmustern;
- Industrielle Symbiose zur Reduktion und Flexibilisierung des Energiebedarfs sowie zur Schaffung von Geschäftsmöglichkeiten dank lokalem Austausch von Wärme, Strom, Materialien und Geräten;
- Optimierungsmethoden für Design und Betrieb von Multi-Energie Infrastrukturen.

Sektorspezifische sozial- und geisteswissenschaftliche Forschung

- Hindernisse für energieoptimierte Produktionsplanung und Betrieb: Lösungsansätze, inklusive Managementmodelle;
- Geschäftsmodelle, welche die Energieeffizienz und Systemintegration fördern, samt Monitoring- und Management-Tools;
- Erfolgsfaktoren für die Markteinführung neuer energieeffizienter Produkte, inkl. Aus- und Weiterbildung;
- Bestimmung kontextspezifischer Mehrfachnutzen (Multiple Benefits), die über Energieaspekte hinausgehen;
- Zweckmässiger Einbezug der Akteure zur besseren Entscheidungsfindung mit Multi-Kriterien-Analysen.