

# ESC

Energy Science Center



## Energiestrategie für die ETH Zürich

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

## Impressum

### Wissenschaftliche Redaktion

K. Boulouchos (Vorsitz), ETH Zürich

C. Casciaro, ETH Zürich

K. Fröhlich, ETH Zürich

S. Hellweg, ETH Zürich

H.J. Leibundgut, ETH Zürich

D. Spreng, ETH Zürich

### Lektorat

Oerlikon Journalisten

### Layout

null-oder-eins.ch

### Design

Corporate Communications, ETH Zürich

### Bilder

Seite 12, Solar Millennium AG

Seite 28, Axpo

### Erhältlich bei:

Energy Science Center

ETH Zürich

Sonneggstrasse 3

8092 Zürich

[www.esc.ethz.ch](http://www.esc.ethz.ch)

[Info@esc.ethz.ch](mailto:Info@esc.ethz.ch)

---

## Inhalt

<b>Editorial</b>	<b>2</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>Ziele der Strategie und Arbeitsmethodik</b>	<b>8</b>
<b>Herausforderungen und Rahmenbedingungen</b>	<b>9</b>
<b>Energieforschung an der ETH Zürich</b>	<b>13</b>
Energiebereitstellung	14
Energieanwendung	19
Wechselwirkungen mit Gesellschaft und Umwelt	24
<b>Energiebezogene Ausbildung an der ETH Zürich</b>	<b>29</b>
<b>Vision eines Transformationspfads</b>	<b>30</b>
<b>Konsequenzen für die ETH Zürich</b>	<b>35</b>
<b>Anhang Mitwirkende</b>	<b>39</b>

Im Herbst 2006 stellte sich das Energy Science Center der ETH Zürich (ESC) die Aufgabe, die zukünftige Ausrichtung der energierelevanten Lehre und Forschung auf die grossen Herausforderungen im nationalen und globalen Umfeld abzustimmen. Der Leitungsausschuss des ESC beauftragte damals eine interne Arbeitsgruppe mit der Erarbeitung einer Forschungsstrategie. Zur gleichen Zeit erteilte das Vizepräsidium für Forschung der ETH Zürich dem ESC den Auftrag, der Schulleitung Orientierungshilfen für den Energiebereich zur Verfügung zu stellen. Darin sollten einerseits strategische Überlegungen für ein nachhaltiges Energiesystem der Zukunft angestellt und andererseits Chancen und Stärken derjenigen Forschungsfelder aufgezeigt werden, die eine hohe Relevanz für die Zukunft besitzen.

Ein dreiviertel Jahr und eine Reihe von Sitzungen später legte die dafür bestimmte Arbeitsgruppe ihren ersten Strategieentwurf vor. Dieser beschrieb den aktuellen Stand der Energieforschung an der ETH Zürich sowie die wichtigsten Diskussionsbeiträge der beteiligten Forscherinnen und Forscher. Nach Abschluss der internen Vernehmlassung beschlossen die Mitglieder des ESC, daraus einen Schlussbericht zu verfassen und diesen breiten Kreisen für die Kommunikation nach innen und aussen zugänglich zu machen.

Eine wichtige Botschaft in der nun vorliegenden Strategie ist: Damit die hohen gesellschaftlichen Erwartungen erfüllt und die immensen Aufgaben bewältigt werden können, ist die Forschung für ein nachhaltiges Energiesystem auf zusätzliches grundlegendes Wissen und neue Technologien angewiesen. Innovative Forschungsprojekte und Konzepte sind aber nicht nur von den Naturwissenschaften geschuldet. Ebenso erforderlich sind bedeutende Beiträge aus den Sozialwissenschaften.

Das seit drei Jahren aktive Energy Science Center trägt wesentlich zur Vernetzung von Fachleuten und Disziplinen bei und ist für die Koordination der energierelevanten Aktivitäten in Lehre und Forschung an der ETH Zürich unverzichtbar geworden.

Die ESC-Mitglieder werden sich weiterhin aktiv darum bemühen, damit das eben erst begonnene disziplinübergreifende strategische und operationelle Engagement in Forschung und Lehre auf dem Gebiet der Energie Früchte tragen kann. Der vorliegende Strategiebericht stellt einen ersten wichtigen Schritt zum intensiven Dialog dar – sowohl innerhalb der ETH Zürich als auch mit interessierten Partnern aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.

Konstantinos Boulouchos

Energy Science Center der ETH Zürich

## Strategie für die Energieforschung an der ETH Zürich: Vorgeschichte und Ziele

Das Energy Science Center (ESC) der ETH Zürich, das Anfang 2005 seine Arbeit aufgenommen hat, vereint heute rund 40 Professuren und Institute, die sich dem Thema Energie widmen. Gemeinsam wurde im vergangenen Jahr eine Strategie für die Energieforschung und die Ausbildung an der ETH Zürich entwickelt. Die Strategie bezweckt Folgendes:

- den Austausch von Informationen über aktuelle Aktivitäten und über das existierende Wissen innerhalb der ETH-Gemeinschaft von Forschenden, Lehrenden und Studierenden. Das bestehende interne Netzwerk soll damit unter Einbezug interessierter externer Fachleute erweitert werden. Zugleich ist der interdisziplinäre Dialog zu intensivieren.
- das Entwickeln einer plausiblen Vision zu einem Transformationspfad, der die Treibhausgasemissionen im schweizerischen und im globalen Energiesystem des 21. Jahrhunderts reduzieren soll – unter Beachtung der Rolle von Wissenschaft und Technik.
- das Formulieren von Empfehlungen an die ETH-Schulleitung, um die energierelevante Forschung in Zukunft zu stärken. Gleichzeitig sind Massnahmen vorzuschlagen, mit denen die Energieforschung und Ausbildung an der ETH Zürich im internationalen Umfeld prominent positioniert werden soll.
- den eindeutigen Positionsbezug für ein nachhaltiges Energiesystem. Mit einem Bericht zur Energiestrategie wollen sich ESC und ETH Zürich als «honest-broker» vermittelnd an der nationalen und globalen Diskussion über die Energiezukunft beteiligen.

## Arbeitsmethode

Für die Erarbeitung der Forschungsstrategie hat der Leitungsausschuss des ESC eine Arbeitsgruppe bestimmt. Ihr gehörten Konstantinos Boulouchos (Vorsitz), Claudia Casciaro, Klaus Fröhlich, Stefanie Hellweg, Hansjürg Leibundgut und Daniel Spreng an. Um den Einbezug der Basis sicherzustellen, hat sich die Arbeitsgruppe für folgende Vorgehensweise entschieden:

- die Informationen aller ESC-Mitglieder zu den aktuellen Aktivitäten und den künftigen Interessen in der Energieforschung zusammen zu tragen.
- die Leistung, die Relevanz und das Potenzial der energierelevanten Lehre und Forschung an der ETH Zürich aufzuzeigen.
- ausgehend von den zentralen Herausforderungen für das globale Energiesystem im 21. Jahrhundert die Schlüsselbereiche für zukünftige Energietechnologien und für die Energieforschung zu erarbeiten.

## Energiebezogene Aktivitäten an der ETH Zürich: aktueller Überblick

An 12 von 16 Departementen der ETH Zürich werden energiebezogene Themen bearbeitet. Dabei sind ergänzend zu den Arbeiten innerhalb der einzelnen Fachdisziplinen auch übergreifende Projekte berücksichtigt, in denen technologische, ökonomische und sozialwissenschaftliche Aspekte gemeinsam untersucht werden. Folgende Themenfelder charakterisieren die aktuellen Arbeiten:

- Zu den wichtigen Forschungsschwerpunkten gehören erneuerbare Energieträger, die Speicherung von elektrischer Energie und die Entwicklung neuer Werkstoffe für Energiesysteme.
- Ebenso bedeutsam ist die Entwicklung von sauberen und effizienten Technologien zur Energieumwandlung und Energieverteilung. Die Forschung konzentriert sich unter anderem auf Brennstoffzellen, auf Verbren-

nungsprozesse, auf die Nukleartechnologie, auf Simulations- und Regelungsmethoden sowie auf Versorgungsnetzwerke.

- Die Erforschung umweltfreundlicher Technologien für den Transport von Menschen und Gütern umfasst die Entwicklung von effizienz- und emissionsoptimierten, kohlenstoffarmen Treibstoffen sowie die Simulation von innovativen Verkehrs- und Stadtplanungskonzepten.
- Das Erarbeiten von Methoden für Lebenszyklus-, Stoff- und Energieflussanalysen führt zur Identifikation von Optimierungspotenzialen, was zur Steigerung der Energieeffizienz beitragen kann.
- Ein nachhaltiges Energiesystem ist nicht nur auf die Technik, sondern auch auf das Zusammenspiel von Akteuren, Institutionen und Regeln angewiesen. Deshalb werden die Sozialwissenschaften an institutsübergreifenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten aktiv beteiligt.
- Neben einer langen Reihe von energierelevanten Unterrichtsaktivitäten wird seit Herbst 2007 der interdisziplinäre Studiengang zum «Master of Science in Energy Science and Technology» durchgeführt. Im Herbst 2008 startet an der ETH Zürich der Studiengang zum «Master in Nuclear Engineering» (letzterer gemeinsam mit EPF Lausanne und mit Unterstützung vom Paul Scherrer Institut (PSI) und Swissnuclear).

## Die zentralen Herausforderungen

Eine Nachhaltigkeitsvision hat auf die zentralen Herausforderungen für das globale Energiesystem im 21. Jahrhundert einzugehen. Das ESC will die Prioritäten ihrer Strategie für die Energieforschung darauf ausrichten.

### • Herausforderung 1: Klimawandel

Die durch den Energieverbrauch verursachten Treibhausgasemissionen sind schnell und umfassend zu senken. Der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Atmosphäre ist bei rund 500 ppm zu stabilisieren, damit der durchschnittliche Temperaturanstieg auf der Erde – gegenüber dem vorindustriellen Stand – auf etwa 2°C beschränkt werden kann. Dies entspricht den Schätzungen des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC)<sup>1</sup>.

### • Herausforderung 2: Zugang zu Energiedienstleistungen

Grundsätzlich limitierte, nichterneuerbare Energiequellen sind durch einen sicheren und verlässlichen Zugang zu weitgehend erneuerbaren Energieträgern abzulösen. Massnahmen zur Steuerung des Verbrauchs sind so zu wählen, dass die erforderlichen Energiedienstleistungen erbracht werden können, ohne die soziale und ökonomische Entwicklung eines Landes zu behindern oder internationale Konflikte zu verursachen.

### • Herausforderung 3: Lokale Schadstoffe

Zu vermindern sind zum einen die Emissionen der lokal und regional relevanten Schadstoffe wie Feinpartikel, Kohlenwasserstoffe, Stick- und Schwefeloxide sowie schädliche Immissionen (Ozon, Feinstaub usw.). Zum andern sind die Mengen der langfristig relevanten Abfälle (nukleare und weitere) zu verringern.

### • Herausforderung 4: Risiken und gesellschaftlicher Nutzen

Technische, ökonomische und unternehmerische Risiken für die Bereitstellung von Energiedienstleistungen innerhalb und im Umfeld des Energiesystems sind in Bezug zum gesellschaftlichen Nutzen zu setzen.

<sup>1</sup> Quelle: Intergovernmental Panel on Climate Change, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, Emissionsszenarios, (IPCC 2000; ISBN: 92-9169-113-5)

## Vision zum Transformationspfad für ein nachhaltiges Energiesystem

Die Vision des ESC für ein nachhaltiges Energiesystem soll einen plausiblen Weg aufzeigen, wie die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf einem klimakompatiblen Niveau zu stabilisieren sind. Der Transformationspfad setzt dazu auf eine Kombination von Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Substitution der fossilen Energieträger. Die Vision nimmt Bezug auf bestehende nationale und globale Energiekonzepte und Szenarien. Folgende Aussagen der entwickelten Vision sind hervorzuheben: Beim Primärenergiefluss und beim energetisch bedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoss wird sich die Schweiz dem globalen pro-Kopf-Mittelwert angleichen. Das heisst: Der Primärenergiebedarf wird im Energiesystem gegen Ende des 21. Jahrhunderts zwischen 4000 und 6000 Watt/Kopf betragen. Das genaue Mass hängt nebst der erzielten Steigerung der Energieeffizienz auch vom Mix der CO<sub>2</sub>-freien Primärenergieträger ab, mit welchen Elektrizität erzeugt wird. Zwingend einzuhalten ist jedoch die Limite für die Treibhausgasemission von 1 Tonne CO<sub>2</sub>/Kopf.

Im Weiteren sind für den Transformationspfad folgende Eckdaten Ausschlag gebend:

- Der Energiebedarf für die Mobilität über lange Distanzen (für Personen und Güter) wird zu Land, zu Wasser und in der Luft weitgehend mit Kohlenwasserstoffen, möglicherweise zum Teil biogenen Ursprungs, gedeckt. Der entsprechende Primärenergiebedarf beträgt rund 400 Watt/Kopf. Damit verbunden ist ein maximal zulässiger Treibhausgasausstoss von knapp 1 Tonne CO<sub>2</sub>/Kopf.
- Der Primärenergiebedarf für den Wärmesektor (Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur) lässt sich mit etwa 1100 Watt pro Kopf decken: solarthermisch, mit Umweltwärme und mit Biomasse (ohne Berücksichtigung des Stroms für Wärmepumpen). Dieser Energiebereich ist entkarbonisiert, das heisst CO<sub>2</sub>-frei.
- Rund 1100 bis 1200 Watt/Kopf an Endenergie sind so-

mit in Form von Elektrizität erforderlich, um – zusätzlich zu den aktuellen noch effizienter zu erbringenden Energiedienstleistungen – Wärmepumpen anzutreiben sowie den Energiebedarf für die Mobilität auf Kurz- und Mittelstrecken (Personen und Güter) abzudecken. Wichtige Voraussetzungen dafür sind: ein Ausbau der Infrastruktur sowie eine effiziente Speicherung von witterungsabhängig anfallender Energie aus erneuerbaren Quellen.

Vorerst, das heisst für die kommenden Jahrzehnte, wird die Steigerung der Energieeffizienz eine äusserst wichtige Rolle spielen. In dieser Übergangsphase kommen verschiedene Primärenergieträger gleichermaßen zum Zuge (fossile mit CO<sub>2</sub>-Abspaltung und -Sequestrierung, Wasser, Kernkraft, Wind, Sonne). Ab der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wird die Photovoltaik weltweit eine besondere Rolle übernehmen. Langfristig besitzt einzig die solar erzeugte Elektrizität das Mengenpotenzial, um den grössten Anteil des Energiebedarfs zu liefern. Dazu sind allerdings enorme technologische Fortschritte und massive Kostenreduktionen erforderlich. Auf jeden Fall kann nur der Wechsel zu kohlenstoffarmen, beziehungsweise -freien Primärenergieträgern den CO<sub>2</sub>-Ausstoss wirksam senken.

Ein wesentliches Element des Transformationspfads ist daher die Erhöhung des Elektrizitätsanteils auf etwa 70% beim Primär- und auf etwa 50% beim Endenergiebedarf im jeweiligen Mix. Dadurch kann der Wärmesektor vollständig entkarbonisiert werden und auch der Verkehr wird so weitgehend kohlenstoffarm betrieben. Die sehr langen Reinvestitionszyklen für den Aufbau der entsprechenden Infrastruktur sind jedoch zu berücksichtigen.

Die oben dargestellte Vision skizziert einen aus heutiger Sicht optimalen, zeitlich abgestimmten Übergang von erforderlichen Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz hin zur Substitution kohlenstoffhaltiger Energieträger. Insofern steht die Strategie des ESC vorbehaltlos hinter der Forderung nach deutlich höherer Energieeffizienz, wie dies auch das Konzept der 2000-Watt-Gesellschaft

verlangt. Doch während letzteres einer qualitativen Metapher entspricht, wie der Primärenergiebedarf bei gleichzeitig ausreichenden Energiedienstleistungen gesenkt werden soll, ist der Transformationspfad des ESC letztendlich auf das übergeordnete Ziel fokussiert, die Treibhausgasemissionen auf 1 Tonne CO<sub>2</sub>/Kopf zu senken. Eine konkrete Zahl für den zulässigen Primärenergiebedarf pro Kopf als strategisches Ziel auszugeben, hält das ESC langfristig nicht für sinnvoll, obwohl ein möglichst geringes Niveau angestrebt werden soll. Vielmehr ist auf die nachhaltige Qualität der Primärenergieträger zu achten, wobei nebst der Entkarbonisierung die Zugangsgerechtigkeit, Aspekte der Sicherheit, die volkswirtschaftlichen Kosten und die Kompatibilität zur Umwelt zu berücksichtigen sind. Es ist schliesslich zu betonen, dass dieser ehrgeizige, technologisch ausgerichtete Transformationspfad nur realisiert werden kann, wenn nebst den erforderlichen technologischen Innovationen auch die ökonomisch und sozialwissenschaftlich angemessenen Rahmenbedingungen gestaltet werden können. Dies gehört zu den Anforderungen eines konsistenten und zielgerichteten «Policy Design».

## Konsequenzen und Empfehlungen für die ETH Zürich

Aus der Vision lassen sich zwar Konsequenzen für Lehre und Forschung ableiten; einen detaillierten Forschungsplan daraus zu erstellen, ist aber nicht sinnvoll. Denn dem Transformationspfad sind Hürden und Weggabelungen eigen, die systembedingten Unsicherheiten von Prognosen und Annahmen entsprechen.

### Forschung

Die Arbeitsgruppe des ESC hat zu Beginn eine Situationsanalyse für die ETH Zürich erstellt. Es wurden 30 Felder definiert, die als Schlüsselthemen für die künftige Energieforschung gelten sollen. Diese erfüllen wichtige Anforderungskriterien, wozu die Bedeutung für ein nachhaltiges Energiesystem, die Konkurrenzfähigkeit im Forschungsumfeld, das technische Wachstumspotenzial sowie die Relevanz für die schweizerische Industrie zu zählen sind. Bei mehr als der Hälfte der erhobenen Forschungsfeldern hält die ETH Zürich eine starke Position inne und will diese in Zukunft stärken. Dazu gehören etwa die Erforschung von Solarbrennstoffen, von Elektrizitätsnetzwerken, von Verkehrs- und Verbrennungstechnologien, der Kernspaltung, der Leistungselektronik, der Energieökonomie, die Entwicklung von Niedrigenergiegebäuden usw. Ein Ausbau der Forschungsaktivitäten ist darüber hinaus beispielhaft für die Speicherung von elektrischer Energie, für die Photovoltaik, für die Bioenergie und für Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abspaltung dringend erforderlich.

Das ESC schlägt der ETH-Schulleitung deshalb die Schaffung von rund 10 neuen Professuren vor, die teilweise von der Industrie mitfinanziert werden sollen. Die ESC-Mitglieder wollen ihrerseits eine aktive Rolle spielen, um geeignete Gemeinschaftsprojekte zu entwickeln, und um die Industrie für eine Beteiligung an der Energieforschung der ETH Zürich zu gewinnen.

---

## **Ausbildung**

Der im September 2007 erstmals angebotene Lehrgang «Master of Science in Energy Science and Technology» bedarf in den kommenden Jahren einer konsequenten Unterstützung. Insbesondere soll in Zusammenarbeit mit der Industrie ein Stipendiensystem erarbeitet werden, das erlaubt, talentierten Nachwuchs aus aller Welt zu rekrutieren. Berufsbegleitende Ausbildungsgänge für in der Praxis aktive Fachleute werden ebenfalls ein Thema sein.

## **Wissenstransfer**

Der Kontakt mit Wirtschaft und Gesellschaft ist für Forschung und Ausbildung im Energiebereich wichtig. Integrierte, kooperative «Leuchtturmprojekte» sind auf einen potenziellen Transfer in die industrielle Realisierung auszurichten, von dem die Wirtschaft profitieren kann.

Zusätzlich fördern qualitativ hochstehende Weiterbildungsangebote nicht nur den Wissenstransfer, sondern sie wirken auch als Nahtstelle zur Gruppe zukünftiger Entscheidungsträger. Von den Forschenden werden zudem relevante Beiträge für die öffentliche und politische Debatte zur Energiezukunft erwartet.

## **Zusammenarbeit**

Das Energy Science Center (ESC) will dazu beitragen, die internen Synergiepotenziale bei der Forschung an der ETH Zürich auszuschöpfen. Ebenso sollen die Beziehungen mit Universitäten und Fachhochschulen, wo immer sinnvoll, verstärkt werden. Dies insbesondere in Rahmen der relevanten Kompetenzzentren des ETH-Bereichs. Die Zusammenarbeit mit den weltweit besten Fachpersonen und Institutionen ist ein Schlüsselfaktor für den nachhaltigen Erfolg der eigenen Forschung. Mit den Akteuren der Energiepolitik soll auf nationaler und internationaler Ebene systematisch Kontakt gepflegt werden.

## Ziele der Strategie

Im Herbst 2006 lancierte der Leitungsausschuss des Energy Science Center (ESC) eine interne Diskussion, um eine kohärente Strategie für die Energieforschung und für die energierelevante Ausbildung an der ETH Zürich zu entwerfen. Zur selben Zeit erhielt das ESC eine Anfrage des ETH-Vizepräsidiums für Forschung, der ETH-Schulleitung eigenständige Leitlinien für die Energieforschung darzulegen. Das ESC entwickelte daraufhin eine Strategie mit den folgenden Zielen:

- der internen Forschungsgemeinschaft eine einheitliche Informationsbasis über die energiebezogenen Arbeiten an der ETH Zürich zu liefern. Dies soll zu einer stärkeren Vernetzung der Departemente führen und die Entwicklung gemeinsamer Forschungsprojekte beziehungsweise Bildungsangebote, insbesondere auf Master- und Doktoratsstufe, fördern;
- den Entscheidungsträgern – aber auch der interessierten Öffentlichkeit – Grundlagen zur Verfügung zu stellen, um strategische Fragen für die zukünftige Energiepolitik anhand wissenschaftlicher Expertisen zu klären;
- Gebiete von besonderem Interesse für die zukünftige Forschung und Ausbildung im Energiebereich zu identifizieren, welche an der ETH Zürich mit zusätzlichen Mitteln – Professuren und Ressourcen – ausgestattet werden sollen. Entsprechende Empfehlungen sind der Schulleitung weiterzuleiten;
- Forschungsprogramme zu initiieren, die den Wissenstransfer und den Dialog mit wichtigen Industrie- und Wirtschaftspartnern stärken. Die schweizerische Exportindustrie soll sich damit durch energiebezogenes Know-how im internationalen Wettbewerb besser positionieren können.

## Arbeitsmethodik

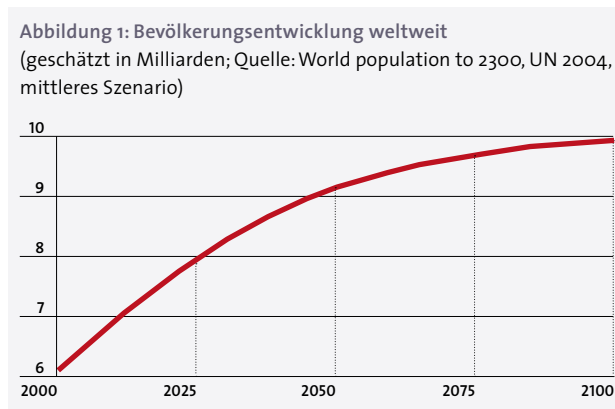
Bei der Strategieentwicklung hat die vom Leitungsausschuss des Energy Science Center (ESC) beauftragte Arbeitsgruppe folgendes Vorgehen gewählt:

- Der Einbezug der am ESC beteiligten Gruppen war ein wichtiges Anliegen. Sichergestellt wurde dies zum einen mit einer breitgefassten Umfrage. Zum anderen konnten sämtliche ESC-Mitglieder und -gremien anlässlich einer Vernehmlassungsrunde nochmals Stellung zum Strategieentwurf nehmen.
- Die in der Umfrage gesammelten Informationen sind zu einer Synthese zusammengeführt worden, die im Kapitel Energieforschung an der ETH Zürich dargestellt ist. Die Zusammenstellung bildet die Basis für die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen.
- Eine begrenzte Zahl von Szenarien bildet ergänzend zu den Rahmenbedingungen und den globalen Herausforderungen den Ausgangspunkt für ein klimaschonendes Energiesystem im 21. Jahrhundert. Ihre Definition stützt sich vor allem auf den aktuellen Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaveränderung<sup>2</sup> (IPCC).
- Zur Erreichung der strategischen Ziele werden Pfade skizziert, die sich am Wünschbaren, am technischen Optimum und auch an der Energiepolitik orientieren. Thermodynamische und, wo möglich, ökonomische Zusammenhänge werden prioritär berücksichtigt.
- Die Strategie ist auf unterschiedliche Zeithorizonte ausgerichtet: bis 2025; bis 2050 und auf die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts. Der Schwerpunkt liegt auf der Schweiz, unter Einbezug der globalen Faktoren Klima, Ressourcen, Demografie und Wirtschaft. Die erwartete globale Entwicklung stellt den übergeordneten Rahmen dar.

<sup>2</sup> Quelle: Klimaänderung 2007 – Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, IPCC, ISBN 978-3-907630-28-0.

## Stand des Wissens

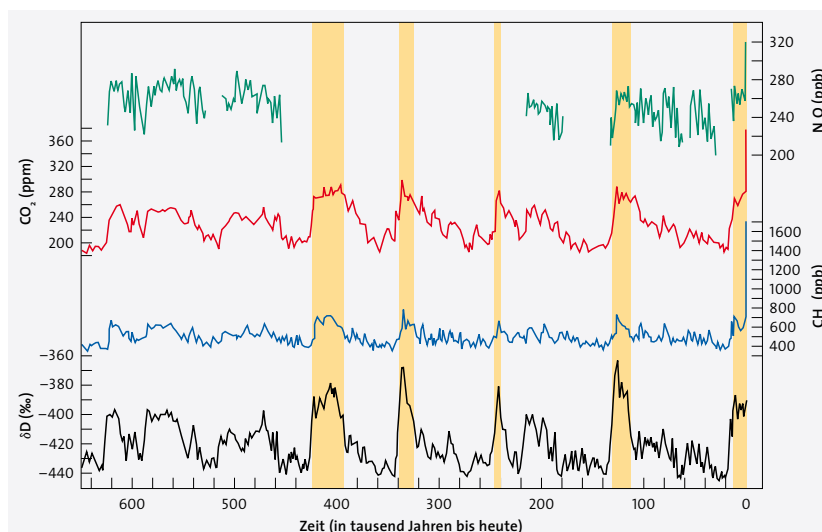
Zu den grössten Herausforderungen im 21. Jahrhundert gehört die Verfügbarkeit von sauberem Wasser und von Nahrungsmitteln sowie die Gesundheit von gegen 9 Milliarden Menschen (Abbildung 1). Die nachhaltige



Abdeckung dieser fundamentalen Bedürfnisse benötigt Ressourcen und Energie. Die Nachfrage nach Primärenergie wird bis 2030 um 53 % steigen, gemäss Referenzszenario im World Energy Out-

look 2006 (Quelle: IEA, ISBN 92-64-10989-7). Rund die Hälfte dieser Zunahme ist auf den steigenden Bedarf für Elektrizität zurückzuführen. Betrug die globale Stromerzeugung 2004 noch 17408 Terawattstunden (TWh), wird bis 2030 eine Verdoppelung erwartet, bestätigt die Internationale Energieagentur IEA in einem eigenen Referenzszenario. Diese Zunahme hat Folgen für das Klima: Aktuell wird elektrische Energie mit einem fossilen Anteil von rund 64% produziert. Erwartet wird jedoch eine Zunahme der Kohlenutzung, was sich beim CO<sub>2</sub>-Ausstoss bemerkbar machen wird.

Im Gleichschritt mit dem steigenden Elektrizitätsbedarf nimmt der Transport von Personen und Gütern weltweit zu. Entwicklungsländer folgen dem Verbrauchstrend der Industrieländer, weshalb eine Verdoppelung des weltweiten Individualverkehrsaufkommens in den kommenden drei Jahrzehnten durchaus vorstellbar ist. Der Flugverkehr nimmt noch rasanter zu. Ebenso wächst das Gütertransportvolumen zu Land, zu Wasser und in der Luft stetig, aufgrund der raschen Expansion des Welthandels. Wie der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaveränderung (IPCC) im Bericht 2007 veröffentlicht, verursachen



**Abbildung 2: Daten zu den eiszeitlichen und zwischeneiszeitlichen Eisschichten**

Der unterschiedliche Gehalt von Deuterium im antarktischen Eis (schwarze Linie), als Kennwert für die lokale Temperatur, und die Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>, rot), Methan (CH<sub>4</sub>, blau) und Lachgas (N<sub>2</sub>O, grün) in der Atmosphäre wurden in den Eisschichten gemessen, bei neueren Messungen zusätzlich in der Atmosphäre. Die Daten decken die vergangenen 650 000 Jahre ab. Die vertikalen Streifen (orange) entsprechen den zwischeneiszeitlichen Wärmeperioden.

(Quelle: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA)

die vom Menschen produzierten Treibhausgase einen Klimawandel (Abbildung 2). Kohlendioxid entsteht hauptsächlich aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern. Ein geringerer Anteil der Emissionen stammt aus der Landwirtschaft. Aktuell beträgt die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre 28 % mehr als beim Höchststand für die vergangenen 650 000 Jahre.

Selbst bei einer unmittelbaren und drastischen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sorgen die Langlebigkeit von Kohlendioxid und die Trägheit des Klimasystems dafür, dass die mittlere Temperatur der Erde in den nächsten 100 Jahren um 2 °C bis 4 °C steigen wird. Dies führt unter anderem zu spürbaren Veränderungen im Wasserhaushalt der Erde und wirkt sich auf die zeitliche und geografische Verteilung des Wassers sehr stark aus.

Erneuerbare und kohlenstoffarme Energieressourcen wie Wind, Wasser, Sonne und Erdwärme sind in ausreichenden Mengen vorhanden. Zwar sind die wesentlichen Prinzipien zur Gewinnung bekannt. Noch fehlen aber geeignete Technologien für die kosteneffiziente, konkurrenzfähige und umweltschonende Produktion. Um mit erneuerbaren Energiequellen bis Mitte dieses Jahrhunderts einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung zu leisten, müssen daher mehr Mittel für die Forschung und für Investi-

onen bereitgestellt werden. Zu fördern sind Forschungsaktivitäten, die sich auf die Energiebereitstellung, zum Beispiel mittels Tiefengeothermie, Thermoelektrik und der Erzeugung kohlenstoffarmer Treibstoffe durch die Sonnenenergie konzentrieren, beziehungsweise sich mit der Erhöhung der Effizienz etablierter Energiequellen (Wind, Photovoltaik, Biomasse, Wasserkraft) befassen.

Wind und Sonne sind witterungsabhängig und insbesondere nicht überall und jederzeit unbeschränkt verfügbar. Daher ist ein leistungsfähiger Energieversorgungsverbund auf grosse Speicher und den Transport über weite Strecken angewiesen, beispielsweise um Windenergie aus «Offshore»-Anlagen in der Nordsee zu den Pumpspeicherseen in den Alpen zu leiten.

Wasserkraft besitzt auf globalem Niveau ein gewisses Ausbaupotenzial. In Europa ist es demgegenüber weitgehend ausgeschöpft. Alpine Speicherseen verfügen zur Zeit allerdings über die einzig möglichen Kapazitäten für eine Energiespeicherung in den gewünschten Dimensionen. Bei einem allfälligen Ausbau der Wasserkraft ist das ökologische Umfeld zu beachten.

Die Biomasse gilt bei geeigneter Erzeugung und optimaler Verbrennung als CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequelle, die trotz limitierter Mengen einen wertvollen Beitrag für die

Abbildung 3: Anteil von Primärenergieträgern an der Produktion elektrischer Energie  
(Quelle: World Energy Outlook 2006, IEA, ISBN 92-64-10989-7)

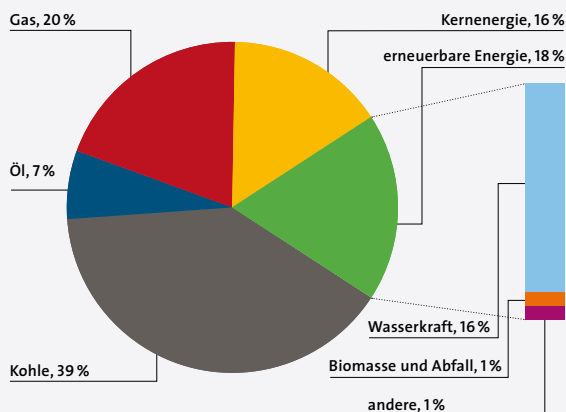
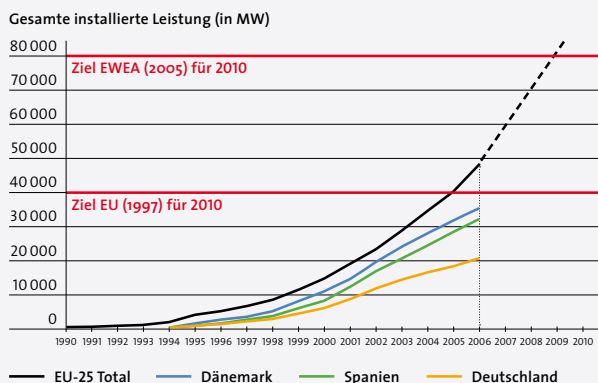


Abbildung 4: Entwicklung der installierten Windenergieleistung in der europäischen Union  
(Quelle: European Wind Energy Association EWEA)



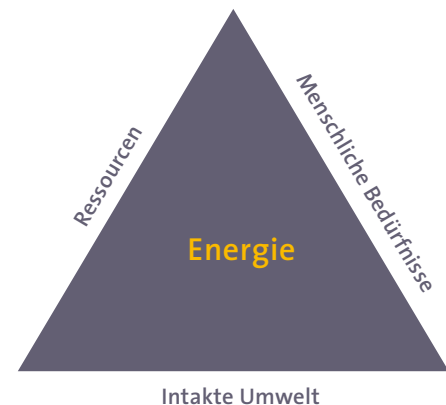
Produktion von Bandenergie liefern kann. Zur Bewertung des Potenzials der Bioenergie ist eine ökologische Analyse der Herstellungsprozesse erforderlich und die Frage der prioritären Nutzung (stationär vs. Verkehr) zu klären. Mit Bezug auf die tiefe Geothermie sind die technologischen Herausforderungen zu bewältigen. Hier ist ein breites Spektrum an Forschungsfragen zu klären, etwa um Bohrstellen festzulegen, um die geologischen Klüftungsvorgänge in der Tiefe besser kennen zu lernen sowie um die Kosten der Bohrtechnik zu reduzieren. Die Stromerzeugung auf globalem Niveau wird in der nahen Zukunft wahrscheinlich nicht auf die Kernkraft verzichten können. Effizienz und Sicherheit des Kernbrennstoffkreislaufs sowie die Reduktion von Nuklearabfällen bleiben somit eine Herausforderung für die Forschung.

## Rolle des ESC

Das Energy Science Center (ESC) will einen konzeptionellen Beitrag für das nachhaltige Energiesystem aufzeigen. Ein solches System hat mit den gegebenen und limitierten Ressourcen auszukommen, reduziert die Belastung der natürlichen Umwelt und steht nicht in Konkurrenz zu den übrigen Grundbedürfnissen der Weltbevölkerung (Abbildung 5). Das ESC fokussiert dabei auf eine Minimierung des Kohlendioxidausstosses – ohne die übrigen Rahmenbedingungen zu vernachlässigen. So ist die Emission konventioneller Schadstoffe für die Lebensqualität und die Gesundheit der Menschen ebenfalls relevant. Allerdings schaffen aktuelle Forschungsanstrengungen gute Voraussetzungen, um in den kommenden zwei bis drei Jahrzehnten auch fossile Systeme mit einem Schadstoffemissionsniveau von annähernd null zu realisieren. Eine Strategie zur Eindämmung des Klimawandels, die auf Effizienzsteigerungen und auf die Substitution von Energieträgern setzt, trägt automatisch zur Entschärfung des Ressourcenproblems bei den fossilen Energieträgern Erdöl, Erdgas und Kohle bei.

Das ESC ist der Überzeugung, dass es an grundlegendem Wissen und Technologien für ein nachhaltiges Energiesystem fehlt. Dabei ist zu beachten: Ein radikaler Wandel des Energiesystems und ein Aufbau der neuen Infrastruktur benötigen lange Vorlaufzeiten. Eine Restrukturierung in technischer und ökonomischer Hinsicht ist dringend erforderlich. An der Erforschung haben sich neben den Natur- und Technikwissenschaften daher auch die Forschungsdisziplinen zu beteiligen, welche sich mit sozio-ökonomischen Fragen und Verhaltensmustern der individuellen und institutionellen Verbraucher beschäftigen.

Abbildung 5: Dimensionen der Energieproblematik





Aufsehen erregende Neuentwicklungen, wie der Fahrzeugprototyp PAC Car II mit einem minimalen Brennstoffverbrauch oder die fast vollständig energieautarke Monte-Rosa-Hütte veranschaulichen beispielhaft, wie innovativ an der ETH Zürich im Bereich Energie geforscht wird. Das aktuelle Engagement der Forschergruppen und Institute, die sich eingehend mit Energiefragen beschäftigen, ist in der untenstehenden Zusammenstellung der Forschungsaktivitäten dargestellt (Tabelle 1). Bei den Aktivitäten kann zwischen der Grundlagenforschung und dem Entwickeln neuer marktfähiger Technologien unterschieden werden. Die Energieforschung ist häufig eine Querschnittsaufgabe, wofür disziplinenübergreifende Forschungsfelder und eine grosse Themenvielfalt charakteristisch sind. Die beteiligten Forschungsgruppen arbeiten

oft interdisziplinär und untersuchen die Forschungsfragen gemeinsam. In den rund 40 Forschungsgruppen, die derzeit dem Energy Science Center (ESC) angeschlossen sind, befassen sich gegen 200 Doktorandinnen und Doktoranden mit einzelnen Fragen aus der Energieforschung. Gesamthaft beträgt das Budget der zusammengefassten Forschungsaktivitäten im Energiebereich über 50 Millionen Franken. Im Anhang sind die Namen der am ESC beteiligten Professoren und Institute aufgeführt. Der Überblick über die Energieforschung an der ETH Zürich, wie er auf den folgenden Seiten beschrieben ist, erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Darstellung einzelner Forschungsfelder orientiert sich an anschaulichen Vertiefungen und beispielhaften Projekten.

Tabelle 1: Übersicht der Energieforschungsaktivitäten an der ETH Zürich, bezogen auf Institute und Professuren. Die grünen Felder bezeichnen eine Hauptforschungsaktivität respektive -zweck; gelb stellt eine starke Beteiligung dar.

	CEPE	CER	EEH	ECON	GEO	GEP	HBT	ICB	ICOS	IED	IFM	IFU	IGMR	IMRT	IPE	IVT	LAC	LAV	LKE	LSA	LSM	MATL	PES	PRE	SUS	VAW	
<b>Energiebereitstellung</b>																											
Energiegewinnung (insb. aus erneuerbaren Quellen)	■		■		■			■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Energiewandlung und -speicherung			■		■			■	■	■	■		■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Energietransport und -verteilung			■	■				■	■	■			■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
<b>Energieanwendung</b>																											
Verkehr inkl. Raumplanung	■		■						■				■	■		■		■									
Gebäude	■						■			■																	
Geräte, Bauteile, Prozesse	■		■				■	■															■				
<b>Wechselwirkungen mit Gesellschaft und Umwelt</b>																											
Ökologische Systemanalyse	■	■				■		■	■	■	■	■	■	■		■				■							
Wirtschaft, Gesellschaft und Politik	■	■	■	■						■						■				■					■		

<b>Legende Institute</b>		IGMR	Institut für Isotopengeologie und Mineral Rohstoffe
CEPE	Centre for Energy Policy & Economics	IMRT	Institut für Mess- und Regeltechnik
CER	Center of Economic Research	IPE	Institut für Verfahrenstechnik
EEH	Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik	IVT	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
ECON	Professur für Nationalökonomie	LAC	Laboratorium für Anorganische Chemie
GEO	Geologisches Institut	LAV	Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
GEP	Institut für Geophysik	LKE	Labor für Kernenergiesysteme
HBT	Institut für Hochbautechnik	LSA	Laboratorium für Sicherheitsanalytik
ICB	Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften	LSM	Labor für Strömungsmaschinen
ICOS	Institut für Computational Science	MATL	Professur für Nichtmetallische Werkstoffe
IED	Institut für Umweltentscheidungen	PES	Professur für Leistungselektronik und Messtechnik
IFM	Institut für Mechanische Systeme	PRE	Professur für Erneuerbare Energieträger
IFU	Institut für Umweltingenieurwissenschaften	SUS	Professur für Nachhaltigkeit und Technologie
		VAW	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie

## Energiebereitstellung

### Energiegewinnung

#### Erneuerbare Energie

Grosse Forschungsanstrengungen sind erforderlich, um die Effizienz und Kapazität der Wasserkraft zu erhöhen sowie um Umweltbeeinträchtigungen zu minimieren. Zu den detaillierten Forschungsfragen gehören weiter:

- die Abschätzung von bestehenden Wasserressourcen, die für die Wasserkraftnutzung zur Verfügung stehen, sowie die Untersuchung der Beeinflussung von Ökosystemen durch das Hydromanagement;
- die Analyse von Luft-Wasser-Mischungen, von Abflusskanälen und des Wasseraustritts bei grossen Staudämmen; die Untersuchung von generellen Drucksystemen, zum Beispiel von Druckveränderungen und Schwingungen sowie der Entlüftung in Drucktunnels.

Ebenso sind zusätzliche Aktivitäten zur Erforschung der Tiefengeothermie geplant. Um den Prozess der Durchlässigkeitserhöhung im Untergrund besser zu verstehen, braucht es weitergehende Analysen von Bohrloch- und Mikroseismizitätsdaten bei tiefen «Enhanced Geothermal Systems». Weitere wichtige Forschungsfragen beziehen sich: auf Abschätzungen des Seismikrisikos, das bei Bohrlochinjektionen auftreten kann; auf das Modellieren von Interaktionen zwischen der Flüssigkeit und dem Gestein im Dauerbetrieb eines Tiefengeothermie-Systems sowie auf numerische Modellrechnungen für die komplexen und gekoppelten Prozesse. Unter anderem werden elektrisch angetriebene Bohrköpfe entwickelt, um die Kosten zu reduzieren. Dabei kommt hochtemperaturfeste Leistungselektronik zum Einsatz. Erforscht werden muss zudem ein kombinierter Transport von elektrischer Energie und von Bohrflüssigkeit in die Tiefe. Parallel dazu wird eine Variante für Tiefenbohrungen entwickelt, bei der die Kluft mittels elektromagnetischer Fragmentierung im über 500°C heissen (überkritischen) Tiefenwasser erreicht wird.

Windkraft und Sonnenenergie sind ebenfalls Teil der bestehenden Energieforschung. So wird in einzelnen Projekten an einer Effizienzsteigerung von Windgeneratoren mithilfe strömungsdynamischer Modelle gearbeitet. Damit soll insbesondere auch der Geräuschpegel beim Drehen der Rotorblätter verringert werden.

Materialien, die Wärme ab 100° C bis 800° C mit hoher Effizienz direkt in elektrische Energie umwandeln, können ebenfalls zur Energiegewinnung beitragen. Deshalb werden die Anwendungsmöglichkeiten solcher Werkstoffe studiert, um daraus einen mit Wärme betriebenen Generator zu realisieren. Allerdings liegt das Ziel, mit dieser Form der Energiegewinnung konventionellen Umwandlungsmethoden ebenbürtig zu sein, noch in weiter Ferne.

#### Bio-Energie

Die Produktion von Biotreibstoffen (der ersten und teilweise zweiten Generation) steht unter anderem in Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau und zur Erhaltung der Biodiversität (beispielsweise durch das Roden von Urwald etc.). Als geeignete Forschungsfelder werden daher das Design von nachhaltigen Produktionssystemen sowie der Anbau von Energiepflanzen auf unfruchtbaren Böden (in Wüstengebiete etc.) erkannt. So kann eine genetische Verbesserung von Kultur- und Energiepflanzen zu höheren Ernteerträgen führen.

Für die Entwicklung von Bioraffinerien stehen unterschiedliche Varianten zur Verfügung, die von der Art der Biomasse, vom Raffinationsverfahren und von den erwünschten Raffinationsprodukten abhängig sind. Zu entwickeln sind insbesondere Umwandlungsprozesse, bei welchen Biokraftstoffe und Feinchemikalien hergestellt werden, zum Beispiel Bioplastik und Biopolymere. Das pflanzliche Ausgangsmaterial Stärke kann entweder chemisch oder «organisch» getrennt werden. Konkrete Forschungsprojekte befassen sich mit der heterogenen Katalyse sowie mit organischen Trennverfahren, die mithilfe von Mikroben, Bakterien und Pilzen in einem Bioreaktor vorgenommen werden. Die ETH Zürich kann bereits Er-

fahrungen bei der Hochdruckumwandlung von Lignin und beim biokatalytischen Prozessdesign vorweisen. Die Bio-Energie-Initiative befindet sich in der Startphase. Geplant ist, die aktuelle Forschung massiv auszubauen. Dabei sollen neue Methoden in der Systembiologie, für das «molecular engineering» und für die Simulation natür-

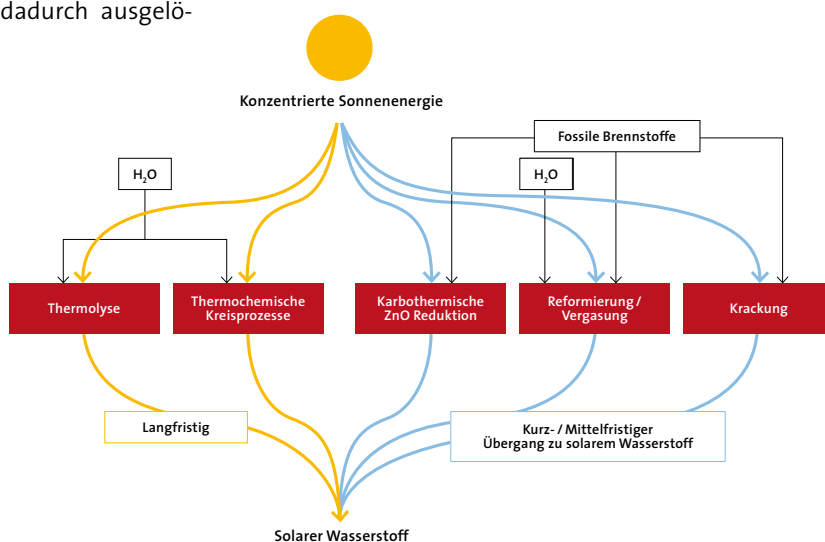
licher Vorgänge im Computer (in silico) angewendet werden. Damit sollen gesamthaft optimierte Prozessketten von der Umwandlung von Bio-Abfall und geeigneten Energiepflanzen zu nutzbaren Endenergieträgern entwickelt werden können.

### Projekt: Brennstoffe aus Solarenergie

Ziel des Forschungsprojekts ist, aus Sonnenlicht und Wasser solare Brennstoffe herzustellen. Die solarthermische Produktion von Wasserstoff ( $H_2$ ) aus Wasser ( $H_2O$ ) ist ein solcher, potenziell attraktiver Prozess.  $H_2$  kann unter anderem zum Antrieb von Brennstoffzellen verwendet werden. Der Forschungsschwerpunkt liegt dazu in der Entwicklung von solarchemischen Reaktoren, in denen Brennstoffe bei Temperaturen zwischen  $800^\circ C$  bis  $2000^\circ C$  hergestellt werden (zum Beispiel  $H_2$ , Zink und Synthesegas) und in welchen Materialien mit hohem Energiebedarf aufzubereiten sind (zum Beispiel Kalk und Metalle). Die Herstellungsprozesse für solaren  $H_2$  erfolgen thermochemisch und sind auf konzentrierte Solarstrahlung angewiesen, die als Energiequelle für die Hochtemperatur-Prozesswärme dient (Abbildung 6). Bei der Strahlungsübertragung und der dadurch ausgelö-

sten chemischen Reaktionskinetik handelt es sich um komplexe Phänomene, die unter anderem mithilfe von Computermodellen («Computational Fluid Dynamics», «Monte-Carlo-Ray-Tracing») untersucht werden. Weiterzuentwickeln ist zudem die Modellierung des Wärme- und Stofftransports in chemischen Reaktorsystemen. Ein viel versprechender Solarreaktor, mit dem Wasser aufgespaltet werden kann, baut auf dem ZnO/Zn-Kreisprozess auf. Darin wird Zinkoxid zu Zink umgewandelt. Das Metall, das der Speicherung von Sonnenenergie dient, lässt sich für die katalytische Herstellung von  $H_2$  und ebenfalls in Zink-Luft-Batterien nutzen. Trotz intensiver Forschung, gemeinsam mit dem PSI, kann diese Brennstofftechnologie erst in einiger Zeit kommerziell eingesetzt werden. Weitere Informationen sind erhältlich unter: [www.pre.ethz.ch](http://www.pre.ethz.ch).

Abbildung 6: Fünf thermochemische Wege zur Herstellung von solarem Wasserstoff ( $H_2$ ).



## Energiewandlung

### Energieumwandlungs- und Transporttechnologien

Klimafreundliche Technologien zur Stromerzeugung und für den Verkehr sind auf Umwandlungsmaschinen mit hohem Wirkungsgrad und niedrigen Schadstoffemissionen angewiesen. Geforscht wird an einer Reihe von Grundlagen und unterstützenden Technologien:

- zur Entwicklung von präzisen und leistungsfähigen Berechnungsmethoden (reaktive Thermofluidik);
- zur Entwicklung von Echtzeit- und miniaturisierter Sensorik für die Kontrolle und Überwachung;
- zur Entwicklung von Regelungsalgorithmen;
- zur präzisen mechanischen Modellierung des Verhaltens einzelner Komponenten, um thermomechanische Ermüdungen, das Deformationsverhalten und die Beschädigung von Hochtemperaturbestandteilen einzuschätzen.

### Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung

Für die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und für Grosskraftwerke sind hoch effiziente Systeme zu optimieren. Dafür betrachtet werden das Management von thermischen Stromerzeugungsanlagen sowie Verbrennungssysteme mit äusserst niedrigen Emissionen. Des Weiteren ist die Nutzung von geothermischer Energie und von Abwärme auf eine thermoelektrische Umwandlung von Niedertemperaturenergie (unter 200°C) in Strom angewiesen.

Der Fokus bei der Kernkraftforschung richtet sich auf thermische und fluiddynamische Modellierungen von Kernenergiesystemen, auf die Reaktordynamik, auf die Mess- und Steuerungstechnik sowie auf die Abfallentsorgung.

Kohlendioxid abzuscheiden und endzulagern wird in Zukunft sehr bedeutsam werden (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS). So könnte es beispielsweise möglich werden, Kohlendioxid als Karbonate im mineralischen Gestein zu speichern. Zusätzlich wird eine Lagerung in Steinkohlelagerstätten erforscht, bei gleichzeitiger Nutzung von Methangas (Enhanced Coal Bed Methane Reco-

very, ECBM). Weitere Forschungsprojekte behandeln das Abtrennen von CO<sub>2</sub> aus der Luft sowie die Abtrennung von CO<sub>2</sub> durch eine Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption, PSA).

Zunehmendes Interesse findet die dezentrale Stromerzeugung, üblicherweise für die Kombination von Heizen und Kühlen. Dank neu entwickelter Verbrennungstechnologien ist es gelungen, ein Demonstrationsmodell für Blockheizkraftwerke zu fertigen, das mit Rekordwerten aufwarten kann. Der mit Erdgas betriebene «Swiss Motor» erbringt die aktuell höchsten Werte für die Gesamt- und elektrische Leistung. Gleichzeitig sind die Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) beispiellos niedrig. Der entwickelte Motor ist für Grossanlagen von über 100 Kilowatt elektrische Energie (kW<sub>el</sub>) konzipiert. Kleinere und grössere Leistungsmodelle sind bereits in Planung. Diese Technologie der ETH Zürich ist von Schweizer Firmen erfolgreich vermarktet worden.

Geforscht wird zudem an einer Mikroturbine, die auf eine extrem kleine Leistung von 100 W<sub>el</sub> ausgelegt ist (Abbildung 7). Daran beteiligt sind fünf Gruppen aus drei verschiedenen ETH-Abteilungen. Im Teamwork wird ein Durchbruch angestrebt: bei der katalytischen Verbrennung; bei den Materialien; bei Ultra-Hochgeschwindigkeitsdrehlagern; bei elektrischen Maschinen; bei möglichst verlustfreien Strömungsmaschinen sowie bei miniaturisierten Sensoren, die für Diagnosen und Kontrollen erforderlich sind.

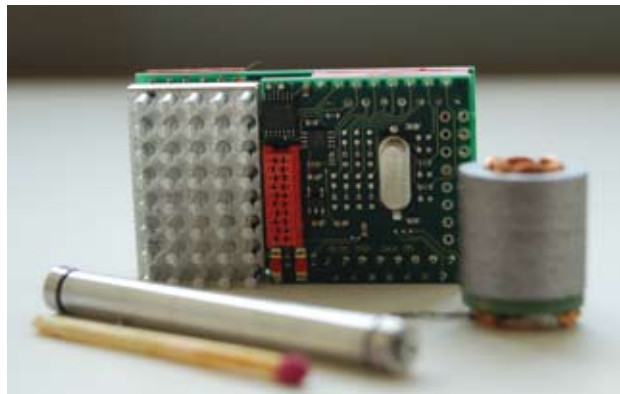


Abbildung 7: Komponenten einer Mikroturbine im Grössenvergleich.

## Transport, Verteilung und Speicherung

Transport und Verteilung von Energie erfolgen bisher – unabhängig von den einzelnen Quellen – mit einer einseitigen Flussrichtung vom Erzeuger respektive Lieferanten zum Verbraucher. Das elektrische Versorgungsnetz sorgt dafür, dass der Quellenverbund stets genau soviel Energie liefert, wie die Verbraucher benötigen. Das Konsumverhalten und der Preis bestimmen somit den Energiefluss in einem solchen, relativ geradlinig konzipierten Transport- und Verteilsystem. Eine Zwischenspeicherung von grossen Energiemengen ist jedoch nur mit Materie behafteten Energieträgern (Gas, Öl, Kohle) oder mit der Wasserkraft in Stauseen möglich.

Zukunftsgerichtete Konzepte für die Versorgungsnetze sind demgegenüber auf einen effizienten Energietransport über lange Distanzen sowie auf das Speichern von elektrischer Energie im grossen Umfang ausgerichtet. Forschungsgruppen der ETH Zürich arbeiten seit längerer Zeit interdisziplinär daran, einen Prototypen für ein Energieverteilnetz zu entwerfen, der die Bedürfnisse für die nächsten 20 bis 50 Jahre abdecken kann. Der Prototyp eignet sich insbesondere für die kombinierte Integration von konventionellen Energiequellen, von witterungsabhängigen elektrischen Quellen (Wind, Sonne) sowie der Energiespeicherung. Ein solcher Mix von Energieträgern wird für die künftige Versorgung von Ballungszentren benötigt.

Das Hauptaugenmerk der Forschung liegt auf den Nutzungsaspekten wie Netzsicherheit, komplexe Steuerung, Kommunikation und Überwachung. Ebenso gilt es zusätzliche Technologien, beispielsweise für den unterirdischen Transport von unterschiedlichen Energieträgern, sowie neue Speichermaterialien (Strom, thermische Energie, Gas oder Flüssigkeit) zu studieren.

Solche Netzkonzepte sind auf die Entwicklung von Konvertern angewiesen, die ein verlustarmes und sicheres Implementieren verschiedenster elektrischer Quellen in ein Versorgungsnetz ermöglichen. Hinsichtlich Effizienz,

Baugrösse, Temperaturfestigkeit und Zuverlässigkeit haben die neuen Konverter weit über den aktuellen Stand der Technik hinauszugehen. Ebenso wird an der Entwicklung von automatisierten, komplexen Netzsteuerungen und Netzüberwachungswerkzeugen gearbeitet.

An elektrochemischen Batterien wird intensiv geforscht, um ihren Energiegehalt zu erhöhen. Zudem gilt es Alternativen für den elektrischen Energietransport mit Speichermöglichkeit zu entwickeln. Das beinhaltet die Suche nach effizienten Methoden für die Umwandlung von Elektrizität in einen mit Materie behafteten Energiespeicher, beispielsweise zu Wasserstoff ( $H_2$ ).

## Projekt: Vision eines zukünftigen Energieversorgungsnetzes

Zentrale Bausteine des zukünftigen Netzwerks für die Energieversorgung sind Hubs unterschiedlicher Grösse, welche die Knoten bilden, sowie als verbindende Elemente dazwischen die Konnektoren («Interconnector») (Abbildung 8). Ein Energiehub ist mit den dezentralen Quellen und mit dem Energiespeicher verbunden. Von diesem Knoten aus kann die Konversion in beliebige Richtungen erfolgen. Im allgemeinen Fall verknüpft ein Hub alle denkbaren Energieträger miteinander.

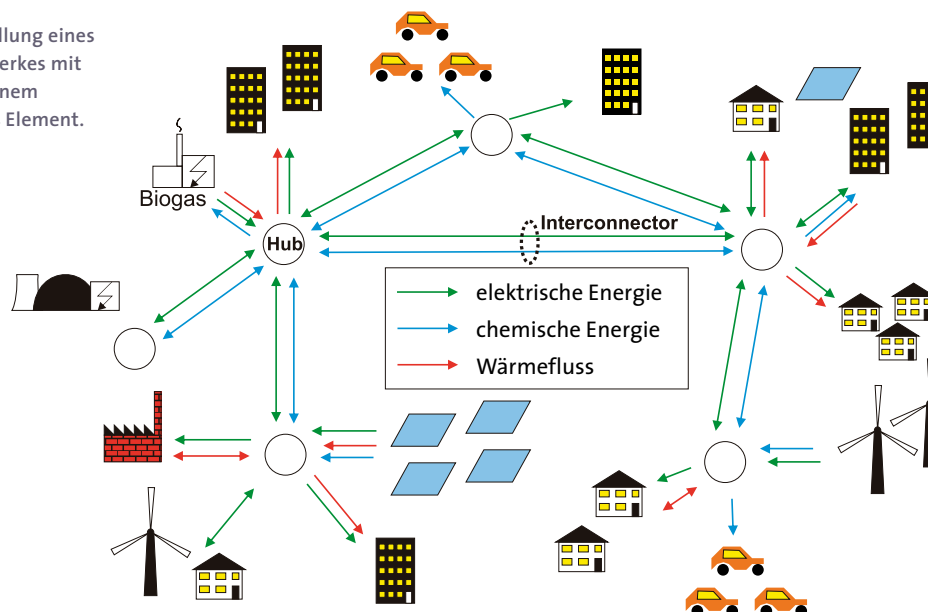
Dieses abstrakte Netzbaukonzept hat sich als tauglich erwiesen, um den aktuellen Mix von Energieträgern für die Nahversorgung hinsichtlich Kosten und Ökologie zu optimieren. Eine Fallstudie für eine mittelgrosse schweizerische Kleinstadt ist bereits in Angriff genommen worden. Im Rahmen dieses Projekts wird ebenso untersucht, wie ein Mix an Energieträgern zu transportieren ist. Die Entwicklung einer solchen Technologie ist auch als Input für einen Transfer des Knowhows zugunsten der Industrie gedacht.

Um vom Verbraucher abhängige Bezugsszenarien zu beurteilen, wurden verschiedene Algorithmen erarbeitet. Dazu müssen zum Beispiel Einsatzort und Grösse von Energiespeichern abgeschätzt werden, um damit die witterungsabhängige Verfügbarkeit von Windkraft und Photovoltaik auszugleichen. Die Energiespeicherung ist vorab für Siedlungseinheiten (Quartiere, Gemeinden, Städte) unerlässlich, die emissionsfrei mit elektrischer Energie versorgt werden sollen.

Das Energieversorgungssystem der Zukunft wird an der ETH Zürich von den Fachgruppen für Hochspannungstechnologie und Energieübertragungssysteme studiert, in Zusammenarbeit mit einem Konsortium der schweizerischen Elektrizitätsversorger, den drei grössten europäischen Kraftwerkherstellern (ABB, AREVA, Siemens) sowie mehreren europäischen Universitäten. Weitere Informationen sind erhältlich unter:

[www.future-energy.ethz.ch](http://www.future-energy.ethz.ch).

Abbildung 8: Schematische Darstellung eines künftigen multiplen Energienetzes mit dem Energiehub als Knoten und einem «Interconnector» als verbindendes Element.



## Energieanwendung

### Verkehr und Raumplanung

#### Güter- und Personentransport

Innovationen der ETH Zürich zugunsten einer umweltfreundlichen Mobilität haben mehrmals ein grosses Echo in Fachkreisen ausgelöst. Dazu gehören der Fahrzeugprototyp PAC Car II\*, der den aktuellen Weltrekord bei der Kraftstoffeffizienz inne hält, sowie das Clean Engine Vehicle (CEV). Das in Zusammenarbeit mit der Empa entwickelte Fahrzeug verursacht geringere Stickoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ) als in der Umgebung vorhanden (Abbildung 9).

Da rund 90% des globalen Gesamtfrachtvolumens auf See transportiert wird, stehen umweltfreundliche Antriebslösungen für Schiffe zunehmend im Fokus der Gesetzgeber. In Zusammenarbeit mit der schweizerischen und der europäischen Industrie ist an der ETH Zürich ein weltweit einzigartiger Versuchsträger für grosse Schiffsantriebe entworfen worden. Daran werden neue Brennverfahren und Kraftstoffe untersucht:

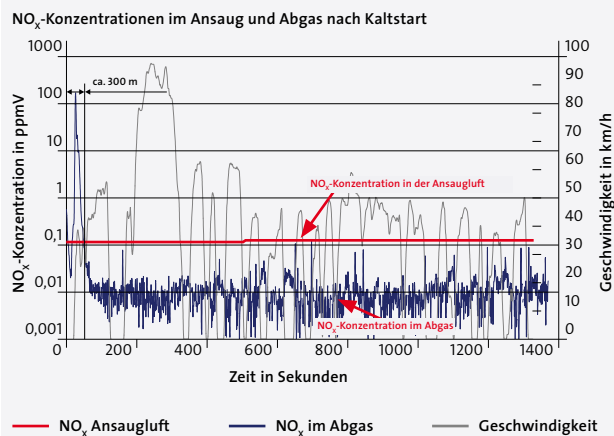
- Im Rahmen von disziplinübergreifenden Projekten im Bereich «Verkehr und Mobilität» wird ebenso an technologischen, ökonomischen und sozialpsychologischen Aspekten geforscht. Dabei geht es um das Aufarbeiten von Grundlagen und um einen Wissenstransfer, der in enger Kooperation mit der internationalen Industrie vorangetrieben werden kann.
- Weitere Forschungsschwerpunkte sind: das Minimieren der Emissionen von lokal und regional wirksamen Schadstoffen (Stickoxide  $\text{NO}_x$ , Russ, Kohlenwasserstoffe), die als Vorläufer für die Smogbelastung und der Feinstaubimmissionen gelten. Dazu werden homogene Brennverfahren, neue Arbeitsprozesse für den Fahrzeugantrieb und der Einsatz von Sauerstoff ( $\text{O}_2$ )- und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ )-haltigen Kraftstoffen systematisch untersucht. Ebenso werden die Grundlagen der Kata-

lyse zur Abgasnachbehandlung sowie leistungsfähige Regelungsalgorithmen erforscht.

- Die Entwicklung von Materialien für die «On-Board»-Speicherung von Elektrizität und chemischer Energie. Der Fokus liegt unter anderem auf neuartigen Elektroden, auf Hochleistungsbatteriesystemen, auf Supercaps (Doppelschichtkondensatoren) sowie auf Verfahren für die effiziente Wasserstoffspeicherung.
- Das Weiterentwickeln der pionierhaften Vorarbeiten für die Hybridfahrzeuge Ende der 90er Jahre. In einem interdepartementalen Projekt werden technologische Mobilitätskonzepte für Agglomerationen entwickelt. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Prognose, wonach die Antriebe von Personenwagen und Lastwagen in Zukunft elektrifiziert werden.
- Die Analyse von Investitions- und Kaufentscheidungen bei Konsumenten. Um die Verkehrsströme erfassen und optimieren zu können, werden offene Fragen aus raumplanerischer, ökonomischer und sozialpsychologischer Perspektive beleuchtet.

\* Die Brennstoffzelle wurde am PSI entwickelt.

Abbildung 9: Die «Clean Engine Vehicles» (CEV) Technologie drückt die  $\text{NO}_x$ -Emissionen unter die Konzentration in der Atmosphäre.



## Gebäude

### Energieumwandlung in Gebäuden

Gemäss der eidgenössischen Enquete-Kommission CORE ist die Energienutzung in Gebäuden darauf auszurichten, dass ab dem Jahr 2050 ein CO<sub>2</sub>-freier Betrieb möglich wird. Diese Bilanzierung bezieht alle Energieumwandlungssysteme innerhalb und ausserhalb eines Gebäudes mit ein- und betrifft insbesondere auch externe Elektrizitätserzeugungsanlagen.

Die Energie- und Stoffflüsse, die für Bau und Betrieb eines Gebäudes benötigt werden, sind Mittel zum Zweck. Von spezifischem Forschungsinteresse sind daher die Dienstleistungen, die ein Gebäude den Benutzern zur Verfügung stellt. Dazu gehören beispielsweise die thermische und hygrische Behaglichkeit, die hohe Luftqualität, ein gutes visuelles Umfeld sowie das hohe Potenzial zur Erbringung eines Mehrwerts.

Die Forschung befasst sich mit jedem einzelnen Glied der Energieumwandlungskette und konzentriert sich

- erstens auf die Primärenergie (Solarstrahlung, Wind, Wasserkraft, Brennstoffe etc.);
- zweitens auf die Endenergie (Energiespeicherung, -transformation, -transport etc.)
- und drittens auf die Nutzenergie (Umwandlung der Energie in Nutzen, Steuerung der Systeme in Funktion eines zeitlichen und leistungsmässigen Bedarfs etc.).

Das Departement Architektur der ETH Zürich übernimmt die Aufgabe, die erforschten Systeme zu einem kompletten Gebäudeinstallationssystem beziehungsweise zu einem Gebäude zusammenzufügen – formal und funktional.

Die Forschungsbemühungen sind dabei auf folgende Kriterien ausgerichtet:

- **Erhöhung der exergetischen<sup>3</sup> Effizienz**  
Erbringen von Energiedienstleistung mit einem minimalen Anteil an (hochwertiger) Exergie.
- **Verringerung der Volllaststundenzahl**  
Bereitstellung der gewünschten Energiedienstleistung mit dem kleinstmöglichen Jahres-Energieaufwand. Bei der Fokussierung auf die Effizienz eines Systems zur Erzeugung einer Energiedienstleistung muss zwischen dem Volllastzustand und dem Teillastzustand unterschieden werden.
- **Entkarbonisierung von Energieumwandlungsprozessen**  
Ersatz von Systemen mit offenem fossilem Kohlenstofffluss durch kohlenstoffarme respektive -freie Prozesse.

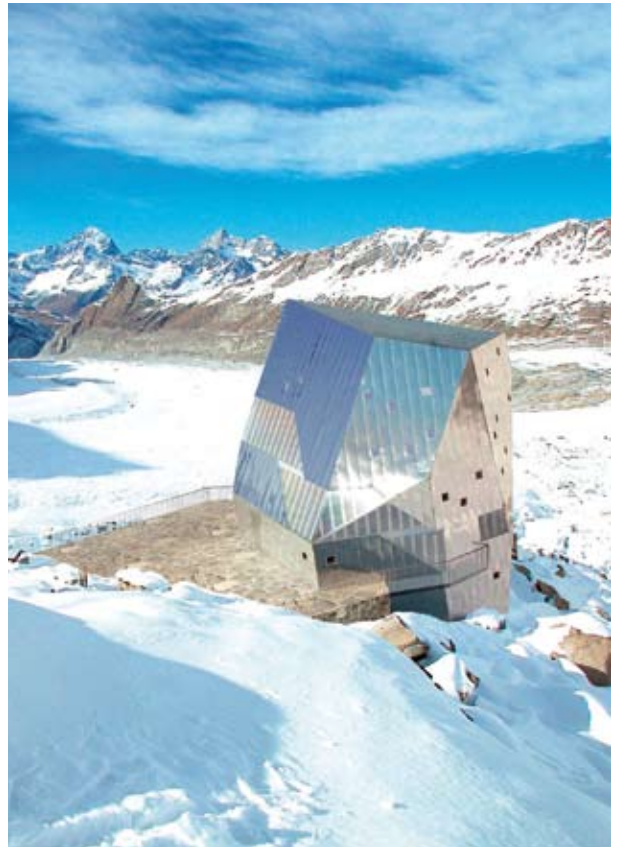
Vertiefte physikalische und chemische Kenntnisse bilden eine Voraussetzung für signifikante Steigerungen der Energieeffizienz. Der Zeithorizont, um einen Prozess um beispielsweise 10 % bis 20 % effizienter zu gestalten, ist relativ kurz, nämlich wenige Jahre. Effizienzverbesserungen um den Faktor 1,5 bis 2 sind durchaus zu erwarten; sie erfordern allerdings eine Entwicklungszeit, je nach Produkt, von typischerweise 10 Jahren.

Solche Verbesserungen können in der Regel nur interdisziplinär entwickelt werden. Je nach Produkt oder Prozess wird die Industrie zu unterschiedlichen Entwicklungszeitpunkten einbezogen. Das Potenzial, neue Produkte für den Weltmarkt zu entwickeln, ist dabei relativ gross. Die ETH Zürich besitzt in diversen Fachgebieten derzeit (noch) einen Vorsprung auf die internationale Forschungsgemeinde – insbesondere in Forschungsprojekten, die sich auf die Exergieeffizienz spezialisieren.

<sup>3</sup> Exergie bezeichnet den Anteil der Energie, der Arbeit verrichten kann, wenn er in das thermodynamische (thermische, mechanische und chemische) Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird.

## Projekt: Monte-Rosa-Hütte

Das Projekt für die neue Monte-Rosa-Hütte beweist, dass dem nachhaltigen Bauen inmitten einer Gletscherlandschaft keine Grenzen gesetzt sind. Um dieser Herausforderung zu begegnen, hat die ETH Zürich unter Einbezug von Studierenden, Professoren und Spezialisten ein baureifes Projekt für den Schweizer Alpen-Club (SAC) entwickelt, welches ab 2008 realisiert wird. Die Gebäudetechnik für die neue Monte-Rosa-Hütte geht neue Wege, sodass auf umweltschonende Weise ein möglichst hoher Autarkiegrad bei der Energie- und Wasserversorgung erreicht wird. Hierzu tragen eine ausgiebige aktive und passive Nutzung der solaren Energie, eine gute Wärmedämmung und -rückgewinnung aus der Abluft sowie der Einsatz von effizienten Geräten bei. Die neue Monte-Rosa-Hütte wird mit einem energetischen Gebäudeautarkiegrad von über 90% nicht nur schweiz-, sondern weltweit ein Beispiel für die nachhaltige Gebäudeerstellung und -bewirtschaftung darstellen. Weitere Informationen sind erhältlich unter: [www.deplazes.arch.ethz.ch/monterosa](http://www.deplazes.arch.ethz.ch/monterosa).



## Geräte, Bauteile, Prozesse

### Energieeffizienz in der Industrie

Die Industrie verbraucht weltweit am meisten Endenergie und beansprucht 30 % der in die OECD-Länder gelieferten Energieressourcen (Quelle: World Energy Outlook 2006, IEA, ISBN 92-64-10989-7). Da viele Branchen energieintensiv arbeiten, besteht eine hohe Motivation, die Effizienz zu steigern. Die ökonomischen Gründe sind eindeutig: der Anstieg der Energiepreise zwischen 2005 bis 2006 sowie das inskünftig absehbare hohe Niveau. Die Industrie hat sich bereits mit einer grossen Vielfalt an Strategien, Programmen und Produkten zur Förderung der Energieeffizienz engagiert, sodass bedeutende Schritte erreicht wurden. Während sich der industrielle Output der OECD-Länder seit 1970 verdoppelt hat, blieb die Menge an verbrauchter Energie praktisch konstant (Quelle: World Energy Council 2004). Unabhängig davon bleibt das Potenzial zur Effizienzsteigerung in der Industrie beträchtlich. Kurzfristig sind 10 % erreichbar; langfristig werden Verbesserungen von 25 % angestrebt. Folgende Instrumente sind dafür erforderlich:

- Eine systematische Energiebilanzierung wird für Industrieunternehmen unverzichtbar, um das Sparpotenzial abzuschätzen und um angemessene Effizienzmassnahmen zu identifizieren.
- Das Benchmarking macht Prozesse und Systeme untereinander vergleichbar. So lässt sich der Energieverbrauch innerhalb eines Unternehmens oder innerhalb einer Produktionsbranche analysieren.
- Monitoring- und Targeting-Methoden liefern entscheidende Informationen zur Umsetzung und Weiterentwicklung von Energieeffizienzmassnahmen.

### Materialeffizienz in der Industrie

Die Materialeffizienz lässt sich steigern, wenn weniger Ausgangsmaterialien für das Endprodukt benutzt werden, beziehungsweise der Materialbedarf im Produktionsprozess reduziert wird. Die Materialeffizienz muss grundsätzlich in Bezug zu den Ausgangsrohstoffen und zu den Reststoffen gesetzt werden, die für die Produktion wieder verwendet werden. Drei Strategien tragen zu Effizienzsteigerungen bei:

- Die Gewichtsreduktion im Produktionsprozess («lightweighting») verringert den Materialverbrauch eines Produktes, unter Beibehaltung seiner Funktionalität.
- Zur Abfallreduktion im Produktionsprozess trägt hauptsächlich das Wiederverwenden von energieintensiven Abfallstoffen beziehungsweise von Reststoffen bei, die einen hohen Energiegehalt aufweisen. Dazu gehört beispielsweise das Recycling von Lösungsmitteln für die chemische Produktion.
- Das Wiederverwenden von Materialien im Produktionsprozess reduziert den Rohstoffbedarf, senkt den Energieverbrauch bei der Gewinnung und verringert ausserdem die Abfallmenge, die deponiert oder verbrannt werden muss.

**Projekt: Analyse der Energieeffizienz in der chemischen Industrie**

Die Forschungsaktivitäten der Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie an der ETH Zürich ([www.sust-chem.ethz.ch](http://www.sust-chem.ethz.ch)) befassen sich mit Energieeffizienz in der chemischen Industrie. Hauptziel ist das Entwickeln eines dynamischen Gleichgewichts (energy balance) für komplexe chemische Produktionsprozesse. Das aktuelle Projekt bezieht sich auf Prozesse für die Herstellung von rund 40 chemischen Produkten.

Die entwickelten Analyse- und Modellierungsinstrumente erlauben eine Berechnung des Energieverbrauchs (Dampf, Elektrizität und Kühlenergie) jeder einzelnen Prozesstätigkeit mit einer Genauigkeit von 10 %, ohne dass dafür individuelle Verbrauchsmessungen erforderlich sind. Das Steigerungspotenzial für die Energieeffizienz, definiert als Verhältnis zwischen dem thermodynamisch vorgegebenen Bedarf und der tatsächlich erforderlichen Energiemenge, liegt für einzelne Prozesseinheiten zwischen 40 % bis 70 %.

Das Forschungsergebnis wird generalisiert und soll als Softwarelösung für ein Energieeffizienzmonitoring den chemischen Produktionsstätten in der Schweiz und der EU zur Verfügung gestellt werden. Die Umsetzung der möglichen Energiesparmassnahmen und die dafür erforderlichen Investitionen liegen im Verantwortungsbereich der interessierten Unternehmen.

## Wechselwirkungen mit Gesellschaft und Umwelt

### Ökologische Systemanalyse

Die meisten menschlichen Aktivitäten benötigen Energie, etwa in Form von mechanischer Energie, Elektrizität oder Nutzwärme. Um die ökologischen Verbesserungspotenziale zu identifizieren, ist ganzheitliches Systemdenken gefragt. So kann die Allgegenwart von energetischen Prozessen in der Wirtschaft sowie die Existenz von komplexen Wechselbeziehungen am besten erfasst werden. Das Fachgebiet der ökologischen Systemanalyse beinhaltet die Untersuchung und die ökologische Optimierung von technischen und ökonomischen Systemen im Hinblick auf einen effizienten Umgang mit Energie und Ressourcen.

Für die Entwicklung von Bilanzierungsmethoden hat die ETH Zürich pionierhafte Forschungsarbeit geleistet. Ökologische Systemanalysen quantifizieren zum Beispiel sämtliche Energie- und Stoffflüsse eines Systems und schätzen die daraus resultierenden Umwelteinwirkungen und Risiken ab. Für die so genannte Lebenszyklusanalyse werden dagegen die Umwelteinwirkungen eines Produktsystems, von der Ressourcengewinnung und Herstellung, über den Gebrauch, über die Wartungs- und Transportprozesse bis zum Recycling und zur Entsorgung, quantitativ erhoben.

Mehrere Forschungsgruppen befassen sich mit der energetischen und ökologischen Systemanalyse und -gestaltung. Einige Beispiele dafür sind:

- Die Analyse von Risiken bei Energieerzeugungssystemen und Versorgungsnetzen und deren Minimierung.
- Die Untersuchung von Abhängigkeiten zwischen Energiebedarf und Umweltveränderungen, beispielsweise hinsichtlich den Auswirkungen des Treibhauseffekts auf die Verfügbarkeit der Wasserkraft.
- Die Entwicklung von Instrumenten zur Entscheidungsfindung für die Industrie und für Konsumenten, um die

Energieeffizienz zu optimieren und die Nachfrage für Energie aus sauberen Quellen zu erhöhen.

- Die Entwicklung von agentenbasierten Modellen für Verkehrssysteme, die eine Identifizierung von energetisch effizienten Szenarien ermöglichen.
- Die Entwicklung von Ansätzen für das Umwandeln von Materialflüssen zu Kreisläufen und für die Reduktion des Energiebedarfs durch umweltorientiertes Prozess-(Re-)Design.
- Die Entwicklung von robusten «Road-Maps» für zukünftige Energiesysteme, insbesondere bezüglich neuer Technologien.

Als beispielhafter Forschungserfolg der ETH Zürich ist die weltweit grösste Datenbank für ökologische Lebenszyklusdaten, Ecoinvent, zu nennen. Sie enthält Daten von über 1000 Ressourcen und erhebt Emissionsflüsse von über 3500 Produktsystemen und Prozessen aus den Bereichen Energiesysteme, Transport, Produktion, Materialien, Chemikalien und Entsorgung. Ecoinvent wurde ursprünglich von der ETH Zürich und dem Paul Scherrer Institut (PSI) geschaffen. Die Daten werden von Unternehmen, Behörden und Forschungsinstituten für die Durchführung von umfassenden Umweltanalysen genutzt und zur Entscheidungsfindung beigezogen. In vielen Fällen wird Ecoinvent auch dazu benutzt, um ökologische Verbesserungspotenziale aufzudecken, und die Energieeffizienz von Produktionsprozessen zu steigern. Die Datenbank wird gemeinsam von ETH Zürich, PSI, Empa und der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt ART auf dem aktuellen Stand gehalten.

### Projekt: Energie-Navigator

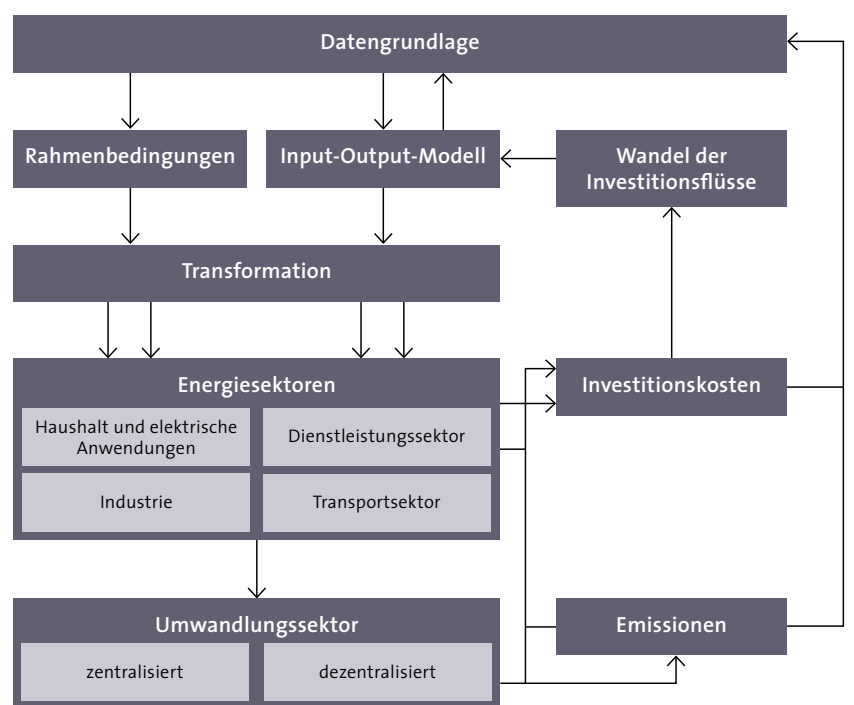
Der Energie-Navigator simuliert mithilfe einer rechnergestützten Modellierung ein Energiesystem für die Schweiz im Zeitraum 2002 bis 2035, mit welchem sich der Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Funktion der technologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Entwicklung beschreiben lassen (Abbildung 10). Mit diesem Modell können Varianten und Szenarien inklusive der Sensitivitäten berechnet werden. Ermittelt sind prinzipiell nicht nur Kosten und Nutzen von energietechnischen Optionen, sondern auch ihre Auswirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung.

Dieses Projekt soll zeigen, wie die energiewirtschaftlichen und energietechnischen Entwicklungen eines Industrielandes trotz komplexer Zusammenhänge sachgerecht und verständlich abgebildet und kommuniziert werden können. Das rechnergestützte Modell bietet

eine relativ einfach zu bedienende Benutzeroberfläche und ermöglicht das Arbeiten mit veränderbaren Parametern. Unter Begleitung der Projektentwickler stellt es für Entscheidungsträger in Politik, Verwaltung, Industrie und Gesellschaft ein nützliches Instrument dar, um unterschiedliche energie- und klimapolitische Strategien zu bewerten.

Beim Energie-Navigator handelt es sich um ein interdisziplinär erarbeitetes Forschungs- und Demonstrationsprojekt. An der Entwicklung beteiligt waren technische, naturwissenschaftliche und ökonomische Fachgruppen, ebenso wie Fachleute für angewandte Informatik und Systemmodellentwicklung. Verantwortlich dafür zeichnen das Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme des Instituts für Energietechnik ([www.lav.ethz.ch](http://www.lav.ethz.ch)) sowie das Centre for Energy Policy and Economics ([www.cepe.ethz.ch](http://www.cepe.ethz.ch)).

Abbildung 10: Überblick über das sektorale Energiesystemmodell der Schweiz (Energie-Navigator).



## Wirtschaft, Gesellschaft und Politik

Ein Energiesystem besteht aus Hardware- und Softwarekomponenten. Hard- und Software entwickeln sich Hand in Hand; das Energiesystem funktioniert nur als Ganzes (Abbildung 11). Zur Hardware gehören die Infrastruktur: industrielle Anlagen, Maschinen und Einrichtungen. Demgegenüber bilden Knowhow und Verhalten von Akteuren und Institutionen sowie Regeln und Gesetze die Softwareelemente. Eine Weiterentwicklung des Systems ist daher nur in Zusammenarbeit der Ingenieurwissenschaften mit den Sozial- und Geisteswissenschaften möglich. Das Energy Science Center (ESC) bietet eine ideale Plattform dazu: Es ermöglicht den Informationsaustausch zwischen den Disziplinen und lässt Gemeinschaftsprojekte zu. Ökonomen, Soziologen, Politologen und Psychologen werden systematisch in die Energieforschung einbezogen und stellen einen wichtigen Standortvorteil für die ETH Zürich dar.

Wechselwirkungen zwischen Hardware und Software besitzen eine herausragende gesellschaftliche Relevanz und können nur im Verbund von Forschern «beider Kulturen» beziehungsweise von Forschern, die sich genügend Kompetenz in beiden Bereichen der Wissenschaft angeeignet haben, adäquat erforscht werden. Die grossen Probleme des Energiesystems sind anhand solcher Wechselwirkungen auszumachen:

- Die Versorgungssicherheit ist kein ausschliesslich technisches Problem. Die Versorgung der Verbraucherländer mit fossilen Brennstoffen wird auch geopolitisch beeinflusst. Zum Beispiel: Das Erdöl beschert derzeit einigen Förderländern hohe Einnahmen, was eine Beurteilung des Risikos dieser sich anhäufenden Kapitalstöcke erfordert. Dafür notwendig sind detaillierte Kenntnisse der beteiligten Staaten, Kulturen und Akteure – zusätzlich zum Wissen über die Ressourcen und über den potenziellen Absatz in den Förderländern. Russland, Nigeria, Irak oder Saudi Arabien in einen Topf zu werfen, ergibt daher keinen Sinn. Ebenso wenig sind

leicht lagerfähiges Erdöl und leitungsgebundenes Erdgas als vergleichbare fossile Rohstoffe zu beurteilen. Unabdingbar für eine Bewertung der Versorgungssicherheit ist aber ebenso das Knowhow zur Wirtschaftlichkeit und zu den Anwendungsmöglichkeiten für erneuerbare Energieträger.

- Der Versorgungssicherheit und der Umwelt ist gedient, wenn massiv weniger Energie nachgefragt wird. Energie sparen ist die wirtschaftlichste und am schnellsten umsetzbare Strategie, den Klimaschutz voranzubringen. Energie sparen als ein rein technisches Problem darzustellen oder auf die Erhöhung der Energieeffizienz zu reduzieren, wäre allerdings falsch. Denn eine bessere Effizienz erhöht ihrerseits sehr oft die Energienachfrage: Die effizientere Technologie ist billiger und wird stärker nachgefragt. Zudem wird eingespartes Geld anderswo ausgegeben, und eine zusätzliche Ausgabe führt in der Regel zu zusätzlicher Nachfrage nach Energie. Dieser Kopplungsmechanismus ist in der Ökonomie unter dem Begriff «Rebound Effect» bekannt.
- Für die technische Entwicklung von Produkten ist der Aspekt Energieeinsparung nur einer unter mehreren. Ebenso geht es dabei auch um Verbesserungen der Anwenderfreundlichkeit, des Anwendungsbereichs oder der Kosten. Letzteres aber kann dazu führen, dass die Nachfrage nach neuen Technologien steigt. Damit die

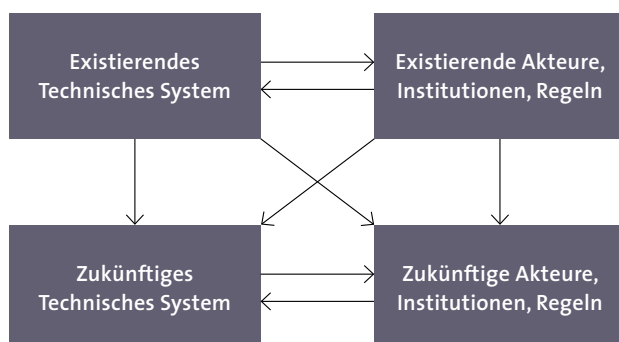
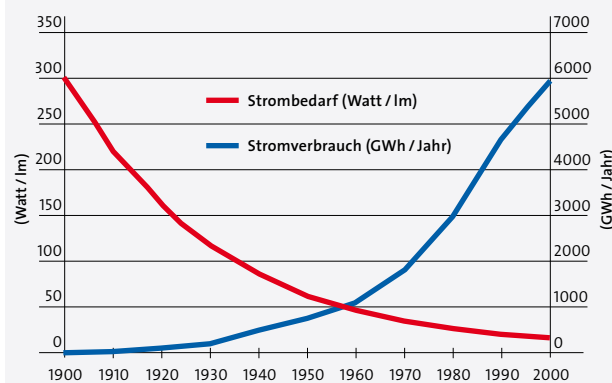


Abbildung 11: Wechselwirkungen zwischen Hardware- und Softwarekomponenten formen das künftige Energiesystem.

Verbesserung der Energieeffizienz auch auf volkswirtschaftlicher Ebene tatsächlich einen geringeren Energieverbrauch bewirkt, ist das Energie sparen mit wirksamer Politik durchzusetzen und attraktiv zu machen. Dies ohne negative Auswirkungen auf die Lebensqualität und den gesellschaftlichen Zusammenhalt zu erreichen, ist eine dringende, zu einem hohen Anteil sozioökonomische Forschungsfrage unserer Zeit (Abbildung 12).

Abbildung 12: Spezifischer Stromverbrauch [Watt/Lumen] und Gesamtverbrauch [GWh/Jahr] in der Schweiz für die Erzeugung von Licht

Trotz dem eindrücklichen technischen Fortschritt, der sich als ein Rückgang des Strombedarfs zur Erzeugung einer bestimmten Lichtmenge von 300 auf 14 Watt/Lumen darstellen lässt, ist der Stromverbrauch für die Erzeugung von Licht im letzten Jahrhundert stark angestiegen.



- In der Klimapolitik kann die sozioökonomische Forschung viel zur Lösung der Probleme beitragen. Zwar stecken die Vorschläge betreffend des Handels mit Emissionszertifikaten bereits in der Umsetzungsphase. Aber noch ist viel Arbeit erforderlich, um damit auf Stufe Unternehmen optimal umzugehen. Auch auf volkswirtschaftlicher Ebene sind ungewollte negative Auswirkungen zu verhindern, wie zum Beispiel das Risiko von Korruption, die die Geldflüsse zwischen Industrieländern und wirtschaftlich aufstrebenden Nati-

onen – im Rahmen des «Clean-Development-Mechanism» (CDM) – mit sich bringen.

- Bei einem Energiesystem handelt es sich um ein grosses, eng verknüpftes und träges Gebilde. Investitionsentscheide müssen auf lange Sicht getätigt und neue energiepolitische Massnahmen ebenso weit im voraus geplant werden. Rechnergestützte Zukunftsmodelle thematisieren die Wechselwirkungen zwischen Wirtschaft und Umwelt und tragen daher zur Entwicklung geeigneter Strategien bei. Für die Politikberatung und für grössere Unternehmen sind solche Modelle unabdingbar.
- Eine positive Energiezukunft ist auf Innovationen angewiesen. Das Studium von technischen (und sozialen) Neuerungen hilft, sowohl deren Bedeutung besser zu erfassen, als auch weitere spezifische Innovationsprozesse potenziell zu unterstützen.
- Forschungsgruppen, die sich intensiv mit Fragen rund um das (energierelevante) Konsumverhalten beschäftigen, wenden Methoden der experimentellen Ökonomie, der Psychologie und der Marktforschung an. Die detaillierten Forschungsfragen lauten: Welches sind Hintergründe und Motive, sich für einen Kauf von Investitionsgütern wie Autos und Wohnhäuser zu entscheiden? Wie bewusst fällen Konsumenten einen Kaufentscheid? Was tun sie mit dem eingesparten Geld, wenn sie sparsame Alternativen wählen? Wie hoch ist die Zahlungsbereitschaft für energieeffiziente Produkte? Auf welche Massnahmen der Unternehmen und der öffentlichen Hand reagieren die Kunden?



Zum einen will die ETH Zürich mit eigenen Forschungsanstrengungen zu einem künftigen, nachhaltigen Energiesystem beitragen. Zum andern werden akademisch ausgebildete Fachpersonen benötigt, die sich um die Planung, die Ausgestaltung und den Betrieb dieses Systems kümmern können. Für die vorliegende Forschungsstrategie ist es daher unerlässlich, die Lehre sowohl auf Bachelor-Stufe als auch danach entsprechend auszurichten und zu gestalten. Dies soll sicherstellen, dass Unternehmen und Organisationen aus der Energiebranche und verwandten Bereichen Fachleute finden, die den steigenden Herausforderungen gewachsen sind.

Die ETH Zürich ist mit umfangreichen, energiebezogenen Ausbildungsangeboten präsent und bietet mehrere Studiengänge an. Das Thema Energie bildet sowohl in der Elektrotechnik- als auch in der Maschinenbauausbildung auf Stufe Bachelor und Master eine eigenständige Vertiefungsrichtung. Andere Departemente bieten Vorlesungen an, worin die Aspekte Energieversorgung, Energieumwandlung und Energienachfrage vertieft werden. Die wirtschaftlichen Elemente eines Energiesystems werden in Vorlesungen des Centre for Energy Policy and Economics (CEPE) behandelt und die Wechselwirkungen mit der Umwelt werden in den Departementen Bau, Umwelt und Geomatik sowie Umweltwissenschaften aufgegriffen. Insgesamt werden an der ETH Zürich aktuell rund 70 Vorlesungen gehalten, die sich mit unterschiedlichen Aspekten aus dem Energiesektor befassen. In den letzten Jahren hat die Zahl der Studentinnen und Studenten, die sich für eine Vertiefung in diesen Bereichen entschieden hat, deutlich zugenommen. Jährlich schliessen schätzungsweise gegen 100 Absolventinnen und Absolventen einen entsprechenden Masterstudiengang ab, was mit einer ähnlich grossen Zahl von Masterarbeiten einhergeht. Der Arbeitsmarkt wird in Zukunft vermehrt nach Akademikerinnen und Akademikern mit interdisziplinärer Ausbildung im Energiebereich nachfragen. Neben dem traditionellen Ingenieur-Knowhow wird vertieftes Wissen über die ökonomischen Zusammenhänge verlangt wer-

den. Die ETH Zürich hat dafür einen neuen Master-Studiengang in Energy Science and Technology (MEST) konzipiert. Ziel ist, einerseits die grundlegenden Zusammenhänge im Energiebereich zu vermitteln und andererseits eine Vertiefung in einem spezifischen Anwendungsbereich zu ermöglichen. Der Studiengang ist im Herbst 2007 lanciert worden und fand bei Studentinnen und Studenten internationaler Herkunft guten Anklang.

# Vision eines Transformationspfads für das Energiesystem im 21. Jahrhundert

30

Die im folgenden dargestellte Vision entspricht einem äusserst ehrgeizigen Transformationspfad für das schweizerische und globale Energiesystem. Er orientiert sich an der langfristigen Stabilisierung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes auf unter 500 ppm, was gemäss den Prognosen des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC) zu einer globalen, mittleren Temperaturerhöhung um etwa 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Stand führen würde. Die anvisierte Emissionsreduktion ist jedoch nur realisierbar, wenn sich die internationale Gemeinschaft intensiv darum bemüht, die Technologie wesentlich vorangebracht wird und geeignete ökonomische Rahmenbedingungen entsprechend rasch eingeführt werden.

Das ESC skizziert im folgenden einen Transformationspfad, der plausibel und konsistent ausfallen soll. Die primär naturwissenschaftliche und technologische Perspektive der Verfasser drückt sich dabei vorrangig in einer Kompatibilität mit den thermodynamischen Grundlagen der Energiewandlungsprozesse aus. Selbstverständlich ist damit nicht der einzig denkbare Weg beschrieben, um die ehrgeizigen Ziele zu erreichen und die dargestellten Herausforderungen zu bewältigen.

Die Vision des Transformationspfads berücksichtigt eine Reihe von bestehenden Konzepten und Überlegungen wie die Energieszenarien des Bundesamtes für Energie, die Roadmap der eidgenössischen Energiekommission (CORE) und das Weissbuch für Forschung und Entwicklung im Bereich der energieeffizienten Technologien<sup>4</sup>. Ebenso berücksichtigt sind z.B. die Perspektiven der Internationalen Energieagentur (IEA), die Szenarien des IPCC und der Stern Review on the Economics of Climate Change (2006).

## Globales Energiesystem

### Phase A (kurzfristig bis etwa 2025)

- Regierung, Wirtschaft und Gesellschaft aller Staaten haben sich auf klare Ziele für die Eindämmung des Klimawandels geeinigt. Dieser Konsens bezieht sich auf eine kurz-, mittel- und langfristige Reduktion der Treibhausgasemissionen und drückt sich in verbindlichen Massnahmen wie regulatorische und marktwirtschaftliche Lenkungsinstrumente aus. Landwirtschaft und Landnutzung werden entsprechend ihren Beiträgen an die Emissionen von Treibhausgasen in die Pflicht genommen. Die Reduktion des Energiebedarfs durch die Konsumenten und die Industrie wird durch gezielte Anreizsysteme vorangetrieben und durch marktwirtschaftliche Instrumente für die Entscheidungsfindung unterstützt.
- Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländer haben einen Schlüssel definiert, wie die zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen untereinander aufgeteilt werden. Die verbindliche Einigung berücksichtigt den Nachholbedarf und die geschichtliche Vorbelastung einzelner Staaten und liegt bis etwa 2015 vor.
- Der bestehende Gebäudepark wird in kürzeren Zeitabständen saniert und erneuert. Neubauten haben zwingend den «Niedrig-Energie»-Normen zu entsprechen. Gegen Ende der Phase A werden neue fossile Kraftwerke nurmehr gebaut, wenn dafür der Nachweis zur robusten Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> erbracht wird. Beim Verkehr werden Anreize zur Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen geschaffen.
- Ein bedeutender, am Verursacherprinzip angelegter Aufpreis für fossile Energieträger verhilft der Anwendung von effizienten und kohlenstoffarmen Technologien in allen Energiesektoren zum Durchbruch. Die Kernenergie wird nicht nennenswert ausgebaut, aber ebensowenig aufgegeben. Bestehende Kraftwerke können bis Ende der Phase A weiterlaufen, um Zeit für den Übergang zu gewinnen – sofern die Anlagen den

<sup>4</sup> Quelle: A White Book for R&D of energy-efficient technologies Steps towards a sustainable development; Eberhard Jochem, (Novatlantis 2004)

sicherheitstechnischen Anforderungen genügen.

- Materialkreisläufe werden weitgehend geschlossen. Zudem wird der Lebenszyklus von Materialien unter ökologischen Gesichtspunkten optimiert. Fallen eine Wiederverwendung oder eine stoffliche Verwertung ökologisch nicht günstiger aus, erhält eine energetische Verwertungsoption bei positivem Heizwert den Vorzug, beispielsweise das Mitverbrennen von Altmaterialien in der produzierenden Industrie als Ersatz für die Brennstoffe.
- Bis zum Ende der Phase A, etwa 2025, kann der weltweite CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei 30 bis 32 Gigatonnen CO<sub>2</sub>/Jahr stabilisiert werden<sup>5</sup>. Die Erdbevölkerung zählt dann zumal 7,5 bis 8 Milliarden Menschen. Die Emissionsbilanz wird ohne die Landnutzungseffekte gezogen.

## Phase B (mittelfristig bis etwa 2050)

- Für die Beanspruchung der Ressource «Klima» wird eine Kostenwahrheit etabliert. Der Versorgungsbereich, in welchem Niedertemperaturwärme erforderlich ist, kann in einer zunehmenden Zahl von Ländern weitgehend entkarbonisiert werden. Der Kraftwerkpark befindet sich ab 2020 bis 2045 im Umbruch: Der Mix an Primärenergieträgern besteht zu einem hohen Anteil aus CO<sub>2</sub>-armen Gas- und Kohlekraftwerken sowie aus erneuerbaren Quellen wie Sonne, Wind, Wasser und allenfalls Geothermie. Die nukleare Stromerzeugung der IV. Generation wird weiterhin einen Anteil an die Versorgung leisten, wenn sie den Nachweis zur inhärenten Sicherheit, zur Minimierung der radioaktiven Abfälle und zur Massenproliferation bei deutlich besserer Ausnützung des Brennstoffs erbringen kann. Eher unwahrscheinlich ist dagegen, dass die Fusion einen wesentlichen, kommerziellen Produktionsbeitrag bis zum Ende der Phase B, 2050, leisten kann.
- Technologien für die Speicherung von Elektrizität setzen sich ab 2020 bis 2050 kommerziell durch. Biomasse wird primär für die Elektrizitätsgewinnung bei stationären Anwendungen und in kleineren Anlagen

(< 10 MW) berücksichtigt, etwa für die Produktion von Industrierwärme und Strom.

- Der Transport von Personen und Gütern über kurze Strecken wird schrittweise elektrifiziert. Der Übergang im Strassenverkehr vollzieht sich in einer Periode von 30 bis 40 Jahren und führt vom normalen über Hybridautos zu vollelektrischen Fahrzeugen. Die für den Verkehr bestimmten Kohlenwasserstoffe werden zu überschaubaren Anteilen (unter 20%) auf synthetischer, biogener Basis hergestellt, sofern ökologische Nebenwirkungen vermieden werden können. Der Flug- und Schiffsverkehr sowie der grösste Teil des Güterverkehrs auf der Strasse benötigen über lange Strecken weiterhin fossile Treibstoffe.
- Die Verteilungsnetze und die Transportsysteme für Elektrizität werden den witterungsabhängigen Produktionsrhythmen grosser, erneuerbarer Energiequellen angepasst. Dazu sind eine effiziente Speicherung und neue Netzstrukturen erforderlich.
- Bei einer Erdbevölkerung von etwa 9 Milliarden Menschen werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis Mitte des Jahrhunderts auf etwa 20 Gigatonnen CO<sub>2</sub>/Jahr vermindert werden können. Diese Reduktion folgt tendenziell dem vom IPCC empfohlenen Stabilisierungspfad.

## Phase C (langfristig bis in die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts)

- Der Kraftwerkpark wird weitestgehend CO<sub>2</sub>-frei betrieben; erneuerbare Energieträger dominieren. Wärme wird aus der Sonne, aus der Umgebung, aus der erneuerbaren Biomasse und mithilfe von Wärmepumpen, die dafür eine geringe Elektrizitätsmenge benötigen, bereitgestellt. Kernkraftwerke und fossile Kraftwerke mit integrierter CO<sub>2</sub>-Sequestrierung besitzen allenfalls eine unterstützende Funktion. Robuste Netze für den effizienten Stromtransport über lange Strecken sind ebenso verfügbar wie dezentrale Speichersysteme.
- Der Transportbedarf wird im Langstreckenbereich (Flüge, Schiffe) noch mit flüssigen Kohlenwasserstoffen

<sup>5</sup> Alle Werte der CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanz sind ohne Landnutzungseffekte berechnet.

(mehrheitlich Erdölprodukte) gedeckt, für den übrigen Verkehr von Personen und Gütern kann CO<sub>2</sub>-freie Elektrizität genutzt werden. In kleinerem Mass werden zusätzlich biogene und allenfalls solarchemische Treibstoffe eingesetzt. Durch Elektrolyse hergestellter Wasserstoff besitzt eine äusserst ineffiziente Energieumwandlungskette, weswegen diesem Energieträger für den Einsatz im Verkehr keine grosse Chance eingeräumt wird.

- Die Elektrizitätserzeugung kann sich gegen Ende des 21. Jahrhunderts weitgehend auf erneuerbare Energieträger abstützen. Es dominiert wahrscheinlich die Photovoltaik, mit Abstand gefolgt von solarthermisch hergestellter Elektrizität sowie Wasserkraft und Windenergie. Je grösser der Anteil solar erzeugter Elektrizität ausfällt, umso höher wird der Primärenergiefluss – auch im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-freien fossilen, respektive nuklearen Stromerzeugung. Selbst bei einem Primärenergiebedarf von 6000 Watt / Kopf werden, bezogen auf die gesamte globale Sonneneinstrahlung, jedoch deutlich weniger als 1% der kontinentalen Erdoberfläche beansprucht. Allerdings sind dazu grosse technologische Fortschritte und vor allem eine massive Reduktion der Kosten erforderlich.
- Unter optimalen Bedingungen kann das Ziel einer «1 - Tonne - CO<sub>2</sub> / Kopf - und - Jahr - Gesellschaft» erreicht werden. Das heisst: Bei einer Erdbevölkerung von 9 bis 10 Milliarden Menschen werden gegen Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr als 10 Gigatonnen CO<sub>2</sub>/Jahr ausgestossen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das globale Wohlstandsniveau im Jahr 2100 etwa dem aktuellen der Schweiz entspricht.

## Die besondere Situation der Schweiz

Das Beschreiben der qualitativen Merkmale für die energetische Zukunft der Schweiz konzentriert sich im folgenden auf diejenigen Aspekte, die vom vorgängig dargestellten, globalen Entwicklungstrend abweichen.

- Die günstige Ausgangslage und die hohe Qualität bei der Gebäudetechnik ermöglichen ein schnelleres Absenken der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Immobilienbereich. Dies bezieht sich auf den Strom- und Wärmebedarf. Im internationalen Vergleich ist etwa auf den Minergie-P-Standard und die konsequente Nutzung von Umgebungswärme hinzuweisen.
- Der Transportbedarf für Personen und Güter wird allmählich eine Sättigung erreichen. Demgegenüber weist der Rest der Welt einen Nachholbedarf auf. Beim Flugverkehr kann und muss ein vollständiges Einbinden in das CO<sub>2</sub>-Abgabesystem bereits in den nächsten 20 Jahren erfolgen.
- Die Wasserkraft stellt einen grossen Wettbewerbsvorteil für die kommenden Jahrzehnte dar, da sie die hauptsächliche Quelle zur Erzeugung von erneuerbarer Elektrizität bildet. Gleichzeitig handelt es sich um ein eigentliches Verhandlungspfund, das zur Stabilisierung des (zumindest mitteleuropäischen) Stromnetzes beitragen kann – als Ausgleich zum vermehrten Einsatz von witterungs- und ortsabhängig erzeugter Sonnen- und Windenergie.
- Bis etwa 2020 hat sich die Kostenwahrheit für alle nicht-erneuerbaren Primärenergieträger und Energieumwandlungstechnologien durchgesetzt. Ökonomische Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energieträger sind für eine Übergangsperiode zwischen 2010 und 2035 eingeführt, um die festgefahrenen Strukturen im aktuellen Energiesystem zu überwinden. Das Anreizsystem ist allerdings degressiv ausgerichtet. Die Schweiz beteiligt sich aktiv an der Erarbeitung von vorzugsweise marktwirtschaftlichen Lenkungsinstrumenten – in Zusammenarbeit mit den international führenden Ländern.

## Schlussfolgerung

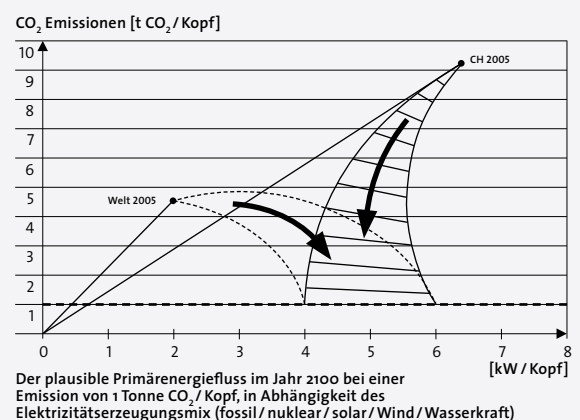
Bezogen auf die Struktur der Energiesysteme werden sich die Schweiz und die Welt gegen Ende des 21. Jahrhunderts zumindest teilweise angleichen. Dies bezieht sich zum einen auf den Primärenergiefluss pro Kopf<sup>6</sup>. Zum andern nähert sich die Schweiz auch beim energetisch bedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoss pro Kopf langsam aber stetig dem globalen Mittelwert an. Gemäss eher optimistisch einzustufender Szenarien des IPCC (A1T und B1) wird der globale Mittelwert beim realen pro-Kopf-Einkommen gegen Ende des 21. Jahrhunderts fast dem aktuellen Niveau in der Schweiz entsprechen. Unter dieser Annahme kann der globale Trend vereinfacht als Zielwert dargestellt werden, der sich auf den gegenwärtigen Zustand des schweizerischen Energiesystems bezieht. Aufgrund der drei angedachten Zeitphasen kann der Endpunkt des Transformationspfads folgendermassen festgesetzt werden:

- Für den Langstreckenverkehr sind rund 400 Watt/Kopf fossiler Primärenergie zu reservieren, in Form von Kohlenwasserstoffen. Damit verbunden ist ein Ausstoss von Treibhausgasen von unter 1 Tonne CO<sub>2</sub>/Kopf.
- Zur Deckung des Bedarfs für den kohlenstofffreien Wärmesektor (Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur) werden rund 1100 Watt/Kopf Primärenergie benötigt. Als Quellen stehen die Sonne (solarthermisch), Umweltwärme und Biomasse zur Verfügung.
- Der Bedarf an Endenergie in Form von Elektrizität liegt bei 1100 bis 1200 Watt/Kopf. (Der Primärenergiebedarf dafür beträgt je nach Stromerzeugungsart 2500 bis 4500 Watt/Kopf.) Das heisst: Die aktuellen Energiedienstleistungen, die sich auf den Strom beziehen, müssen inskünftig effizienter erbracht werden. Zusätzlich zu dieser Einsparung ist ein moderater Ausbau des Angebots erforderlich, um Wärmepumpen anzutreiben und den Bedarf an elektrischer Energie für den Kurz- und Mittelstreckenverkehr (Personen und Güter) abzudecken. Wichtige Voraussetzungen dafür sind der Ausbau der Infrastruktur (Versorgungsnetze), eine effiziente

und wirtschaftlich tragbare Speicherung der witterungs- und ortsabhängig anfallenden Energie aus erneuerbaren Quellen sowie allenfalls eine begrenzte Anzahl CO<sub>2</sub>-freier Kraftwerke für die Grundlastversorgung. Langfristig besitzt aber einzig solar erzeugte Elektrizität das Leistungspotenzial, um einen grossen Teil dieses Endenergiebedarfs zu decken.

- Daraus ergibt sich ein Primärenergiebedarf von etwa 4000 bis 6000 Watt/Kopf, der die gesamte Energienachfrage nachhaltig abdecken kann. Der präzise Wert ist davon abhängig, mit welcher Art von CO<sub>2</sub>-freier Primärenergie die Elektrizität erzeugt wird, und welche Effizienzsteigerungen erzielt werden. Dem primär einzuhaltenden Ziel entspricht jedoch die Emissionslimite von 1 Tonne CO<sub>2</sub>/Kopf.
- Für die entsprechende Transformation des globalen Energiesystems im 21. Jahrhundert lässt sich überschlagsmässig nachweisen, dass die begrenzt verfügbaren fossilen Energiequellen zur Gestaltung des Übergangs doch ausreichen.

Abbildung 13: Die Emissionsgrenze für die Treibhausgase von 1 Tonne CO<sub>2</sub>/Kopf lässt sich gegen Ende des 21. Jahrhunderts in der Schweiz und weltweit realisieren. Dazu gilt es, die realistischen Effizienzpotenziale auszuschöpfen und alle Energiesektoren weitgehend zu entkarbonisieren.



<sup>6</sup> Die Primärenergieflüsse basieren auf den Primärenergiefaktoren der Energieträger allein.

# Vision eines Transformationspfads für das Energiesystem im 21. Jahrhundert

Eine zielführende Wegbeschreibung für das Energiesystem in der Schweiz ist in Abbildung 13 dargestellt. In den kommenden Jahrzehnten gilt es die Energieeffizienz zu steigern; danach begünstigt der Einsatz von kohlenstoffarmen und -freien Primärenergieträgern die weitere Absenkung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses. Der klimakompatible Transformationspfad ist somit durch einen sehr hohen Anteil von Elektrizität am gesamten Energiemix gekennzeichnet, der zunehmend CO<sub>2</sub>-frei erzeugt werden kann (Abbildung 14).

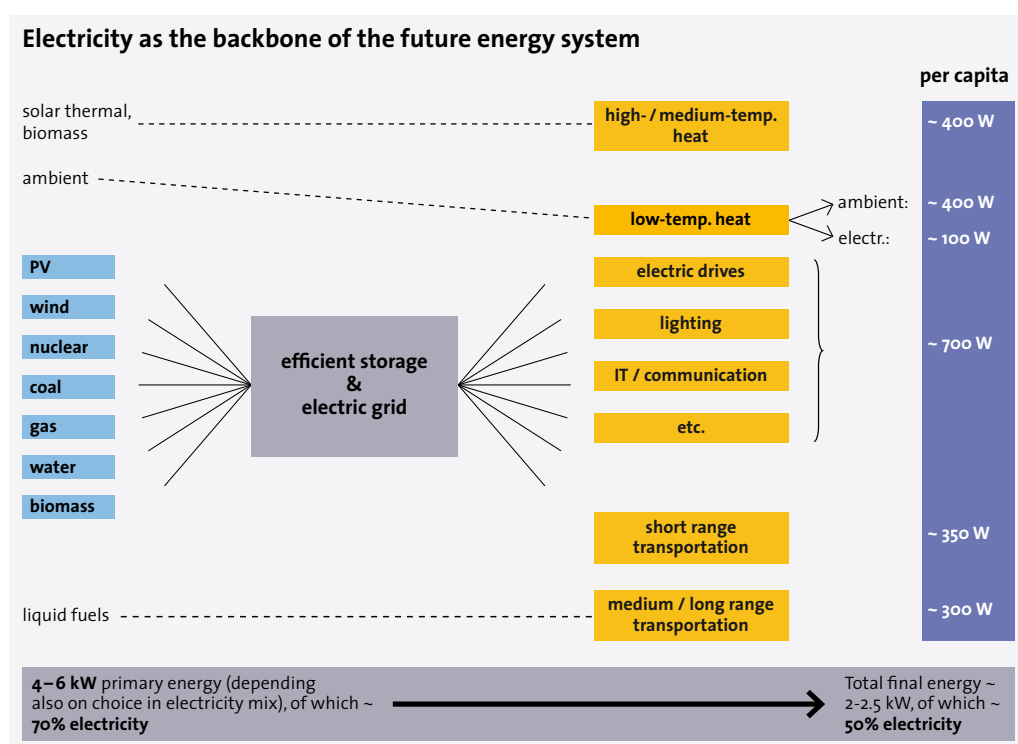
Der Transformationspfad verhält sich in den kommenden 2 bis 3 Jahrzehnten kompatibel zum qualitativen Ziel des 2000-Watt-Konzepts (verstanden als eine Metapher für den weltweit reduzierten Primärenergiebedarf). Für die Zeit danach setzt die Vision des ESC aber auf das übergeordnete Ziel, die Treibhausgasemissionen bei 1 Tonne CO<sub>2</sub>/Kopf zu beschränken. Das legt die Schwerpunkte auf eine zielgerichtete Substitution kohlenstoffhaltiger Energieträger und somit auf eine effiziente Dekarbonisierung

der meisten Prozessteile im Energiesystem. Mit einem Primärenergiebedarf von 4000 bis 6000 Watt / Kopf kann das globale Energiesystem daher nachhaltig gestaltet werden. Dafür anzustreben sind die entsprechende Qualität und die wirtschaftlich vertretbare Verfügbarkeit der Energiequellen.

Zu betonen ist, dass sich der ehrgeizige, an der Technologie orientierte Transformationspfad nur realisieren lässt, wenn auch die ökonomisch und sozialwissenschaftlich angemessenen Rahmenbedingungen umgesetzt werden. Dies spricht für die Notwendigkeit eines konsistenten und zielgerichteten «Policy Design».

Eine langfristig ausgerichtete und in sich konsistente Energiepolitik ist breit abzustützen. Dies bedingt: externe Kosten sind zu berücksichtigen und bisher kostenlos bezogene Ressourcen wie die Klimaqualität sind zu monetarisieren. Die politische Unterstützung und die Akzeptanz auf der ganzen Welt werden für die Umsetzung dieser Massnahmen von entscheidender Bedeutung sein.

Abbildung 14: Die strategischen klimarelevanten Ziele für das zukünftige Energiesystem lassen sich durch eine Kombination von Effizienzsteigerungen in der Umwandlungskette und der Vergrösserung des Anteils von CO<sub>2</sub>-armer Elektrizität am Energiemix erreichen.



## Einleitung und Plausibilität

Die Transformation der Energiesysteme in einen nachhaltigen Zustand wird von der ESC-Arbeitsgruppe als plausible Vision beschrieben. Daraus ergeben sich Grundlagen, worauf sich die Konsequenzen für Lehre und Forschung an der ETH Zürich abstützen lassen. Die folgenden Aussagen besitzen eine qualitative Gültigkeit. Zum aktuellen Zeitpunkt ist es nicht sinnvoll, unmittelbar daraus einen operativen Forschungsplan abzuleiten. Denn dem skizzierten Pfad sind Hürden und Weggabelungen eigen, die den systembedingten Unsicherheiten von Prognosen entsprechen. Zum einen gründet die Vision auf der Annahme, dass die Bedrohung durch den Klimawandel ernst genommen wird. Zum andern bleiben viele Fragen noch unbeantwortet. Wann das Zeitalter der fossilen Brennstoffe zu Ende sein wird, hängt nicht nur vom Ressourcenpotenzial ab, sondern bestimmen die Produzenten und die Konsumenten mit. Die Fördermengen einzelner Staaten werden zudem politisch festgesetzt. All dies kann das fossile Zeitalter verlängern respektive verkürzen. Trifft Letzteres ein, wird das Energie sparen noch bedeutsamer werden als im Transformationspfad berücksichtigt.

Oder: Um die Auswirkungen des Klimawandels zu mindern, sind Technologien zur Abscheidung und Speicherung von flüchtigem CO<sub>2</sub> für eine längere Übergangsphase sehr wichtig. Diese können zur zeitlichen Ausdehnung des Angebots fossiler Brennstoffe beitragen. In der Vision des ESC werden diese Technologien als wichtige Bestandteile eines nachhaltigen Mix für die kommenden Jahrzehnte genannt; Fragen zur institutionellen Umsetzung und zu den Risiken sind aber nicht umfassend geklärt. Offene Fragen bestehen zudem für die Entwicklung der Energienachfrage. Die technische und wirtschaftliche Vernunft verlangt, die enormen Energiesparpotenziale auszuschöpfen. Ob dies, wie dem Transformationspfad zugrunde gelegt, tatsächlich eintritt, hängt unter anderem von einem ausreichenden Mass an wirtschaftlichen Anreizen ab.

Unsicherheiten betreffen ebenso die Nutzung der Sonne zur Stromerzeugung. Lassen sich die Kosten dafür nicht im beschriebenen Zeitrahmen reduzieren, bleibt Solarstrom teuer. Gute Produktionsstandorte werden dadurch besonders wertvoll und begehrte. Ein solches Szenario würde ebenfalls vom Transformationspfad abweichen und bedingt daher eine verstärkte und beschleunigte Nutzung zusätzlicher Primärenergiequellen, unter anderem von fossilen Energieträgern mit CO<sub>2</sub>-Sequestrierung und von nuklearen Brennstoffen; aber auch dafür sind wesentliche technologische Fortschritte, der politische Wille zur Institutionalisierung geeigneter Rahmenbedingungen sowie die Klärung erheblicher Risiko- und Akzeptanzprobleme erforderlich.

Insgesamt erscheint ein langfristig festgesetzter Forschungsschwerpunkt im Bereich Photovoltaik als überaus sinnvoll und lohnenswert, dies im Rahmen einer internationalen Forschungszusammenarbeit.

## Forschung in Schlüsselbereichen

Die Arbeitsgruppe des ESC hat die Prioritäten für zukünftige Schlüsselthemen definiert. Dafür wurden einerseits die Einschätzungen der Mitglieder berücksichtigt, und andererseits die Befragungsergebnisse zu einer qualitativen Bewertungsmatrix zusammengefasst. Drei Parameter wurden für die Gesamtbedeutung beigezogen: der Beitrag zum zukünftigen Energiesystem, die akademische Herausforderung sowie die Relevanz für die schweizerische Industrie. Eine zusätzliche Einstufung erfolgte anhand der wahrgenommenen aktuellen Wettbewerbsposition respektive des Potenzials für ein zukünftiges Wachstum.

Eine quantitative Bewertung dieser Komponenten ist nicht möglich; trotzdem hat die Arbeitsgruppe 15 aus ursprünglich 30 vorgeschlagenen Themenbereichen ausgewählt, deren Bedeutung für die Zukunft als überaus hoch eingestuft wird. Bei rund zwei Dritteln dieser Auswahl

besteht ein Konsens darüber, dass die Forschung an der ETH Zürich eine starke Position inne hat, die unbedingt zu verteidigen ist. Für die restlichen Themen werden demgegenüber gezielte Massnahmen vorgeschlagen, um ihre Bedeutung zu stärken.

Zu den Forschungsfeldern, die sich durch eine starke Wettbewerbsposition auszeichnen, gehören die solaren Brennstoffe, elektrische Versorgungsnetze, Technologien für einen umweltfreundlichen Verkehr, die Leistungselektronik, intelligente Sensoren und Regelungstechnik sowie die Energieökonomie. Zu den starken Bereichen, die unter anderem in Zusammenarbeit mit dem PSI respektive der Empa erforscht werden, gehören ausserdem die Nuklearenergie (Spaltung), Brennstoffzellen, Verbrennungssysteme und Niedrigst-Energie-Gebäude.

Bei den Forschungsbereichen, die demgegenüber noch wesentlich zu verstärken sind, handelt es sich:

- um die Speicherung von elektrischer Energie, zum Beispiel mit elektrochemischen und elektrostatischen Komponenten: Zu entwickeln sind Systeme mit hoher Energiespeicher- und Leistungsdichte, die eine hohe Wandlungseffizienz, eine lange Lebensdauer, niedrige Investitionskosten sowie eine günstige Umweltbilanz im gesamten Lebenszyklus aufweisen. Auf der Anwendungsseite muss es zudem gelingen, witterungs- und ortsabhängig anfallende, in der Regel dezentrale, erneuerbare Energieträger ins gesamte Elektrizitätssystem optimal einzubinden.
- um die Photovoltaik: Neben der Grundlagenforschung ist der Transfer neuer Konzepte bis hin zur kostengünstigen Massenproduktion voranzutreiben. Ebenso braucht es die Entwicklung und Charakterisierung neuer Solarzellen, die auf Dünnschichtsystemen beruhen, unter Nutzung neuer Werkstoffe, multifunktionaler Schichten und Interfaces. Von speziellem Interesse sind die Erhöhung des Wirkungsgrades sowie Verfahren und Herstellungsprozesse, die zur maximalen Materialnutzung und zu kurzen energetischen Rückzahlzeiten führen. Ausserdem sind Solarzellen ge-

sucht, die ein hohes Potenzial für das radikale Senken der Investitionskosten besitzen.

- um hybride Systeme und kombinierte thermodynamische Zyklen, um intermittierende erneuerbare Energiequellen optimal einzubinden: Dazu gehören Kraftwerke für eine kombinierte Energieerzeugung, etwa solarthermisch und fossil respektive Biomasse und fossil. Ebenso zu erforschen sind die Hochtemperaturenergiespeicherung, die effiziente Nutzung von Mittel- und Niedertemperaturwärme sowie geeignete Arbeitsmedien für die kombinierten Zyklen.
- um «Materialwissenschaften und Energie»: Der Aufbau dieses Forschungsbereichs setzt auf folgende Schwerpunkte:
  - a. Erforschen von Materialien für die Energiewandlung und -speicherung, beispielsweise Hochtemperaturmaterialien, Permanentmagnete und Materialien für neue Photokatalysatoren;
  - b. Erforschen von Materialien für die Photovoltaik, etwa organische sowie Nanopartikel- oder Quantentopf-Zellen;
  - c. Erforschen von Materialien für neue Katalysatoren (bei Verbrennungsprozessen) respektive für Energiespeicher;
  - d. Erforschen von Materialien für Wind- und Wasserturbinen sowie für Nuklear- und Höchstspannungssysteme.
- um die Entwicklung neuer Bioenergieträger: Dazu sind auf der einen Seite das Pflanzenwachstum und die ökologischen Auswirkungen beim grossflächigen Anbau von Energiepflanzen sowie auf der anderen Seite die Nutzung der Pflanzen zu betrachten. Im konkreten geht es um neue Katalysatoren, um die Mikrobenbewirtschaftung und um die Prozessoptimierung für eine effiziente und industriell nutzbare Umwandlung von Biomasse zu Brennstoffen.
- um die integrierte Abscheidung und sichere Lagerung von CO<sub>2</sub>: Gesucht sind technische und institutionelle Lösungsansätze für Kraftwerke und andere grossin-

dustrielle Energieumwandlungsanlagen. Die globale, langfristige Sicht wird kurzfristigen wirtschaftlichen Überlegungen vorangestellt.

- um rechnergestützte Methoden für die Beschreibung und Optimierung von Multiskalenprozessen (von der Nano- bis zur Systemebene) unter Berücksichtigung unterschiedlicher physikalischer Mechanismen. Die Verfügbarkeit modernster leistungsfähiger Computerhardware für solche Berechnungen ist für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der energiewissenschaftlichen Forschung an der ETH Zürich von zentraler Bedeutung.
- um die Realisierung von intelligenten Algorithmen, Sensoren, Aktuatoren sowie Informations- und Kommunikationstechniken zur Überwachung, Funktionsbeeinflussung und Gesamtoptimierung komplexer energietechnischer Systeme. Davon profitieren intelligente Verkehrssysteme, Kraftwerke, Gebäude, Endgeräte und deren Vernetzung.
- um integrierte Modelle, welche die ressourceneffiziente und emissionsfreie Produktion von industriellen Gütern berücksichtigen: Die Schwerpunkte bei der Energiesystemanalyse konzentrieren sich auf das technische Design und den Betrieb von energetisch und stofflich effizienten industriellen Prozessen sowie den Einsatz von sauberen, sicheren und ökonomisch konkurrenzfähigen Systemen zur dezentralen Energieerzeugung.
- um ein «Policy-Design»: Ein wichtiges Forschungsgebiet ist die Entwicklung von wirksamen Instrumenten zur Umsetzung der energiepolitischen Ziele. Ein solches Instrumentarium ist aber über die einzelnen Fachdisziplinen hinaus zu entwickeln, da sich Massnahmen auf mehrere Gebiete auswirken und allenfalls negative Effekte auslösen können. Für die themenübergreifende Forschung ist die ETH Zürich prädestiniert, da hier die verschiedenen Fachdisziplinen vertreten sind.
- um den Bereich «Energie und Entwicklung»: Der Zugang zu sauberer Energie ist ein wichtiges Element für

die Entwicklung von Ländern und Regionen; davon profitieren die gesamten Volkswirtschaften, und auch Privathaushalte und Unternehmen. Die Energieversorgung steht in einer starken Wechselwirkungen mit der Wirtschaft und der Gesellschaft, ebenso wie mit der Gesundheit der Menschen und der Umwelt. Ein systematisches Erforschen der Wechselwirkungen führt zu fundierten Empfehlungen für den Aufbau der schnell wachsenden Energiesysteme in Entwicklungsländern.

Aufgrund einer eingehenden Prioritätsanalyse durch das Energy Science Center ist jedes der oben genannten Themen im Rahmen einer oder mehrerer eigener Professuren zu bearbeiten. Daher umfasst der Vorschlag an die Schulleitung der ETH Zürich die Schaffung von rund 10 neuen Professuren. Diese sollen eine Schlüsselposition in der künftigen Energieforschung erhalten. Mehrere Professuren sollen von der Privatwirtschaft wesentlich finanziell unterstützt werden. Das ESC ist dabei willens und in der Lage, zusammen mit den einzelnen Departementen und der ETH Foundation, einen aktiven Beitrag zu leisten, um prioritäre Bereiche zu definieren und um das Interesse der Industrie zu konkretisieren. Auf vielfältige bestehende Kontakte kann dazu zurückgegriffen werden.

## Ausbildung

Der seit Herbst 2007 angebotene Lehrgang «Master of Science in Energy Science and Technology» ist in den kommenden Jahren auf eine konsequente Unterstützung angewiesen. Mit dem grossen Engagement der Professoren-schaft allein ist es aber nicht getan. Vor allem gilt es, talentierten Nachwuchs aus einem internationalen Umfeld zu rekrutieren. Dazu braucht es ein Stipendiensystem, das in Zusammenarbeit mit der Industrie erarbeitet werden kann. Im weiteren ist die Realisierung eines Graduiertenprogramms auf Stufe Doktorat im Bereich Energie vorstellbar. Zudem ist der Aufbau einer berufsbegleitenden Ausbildung für das Management integrierter Energiesysteme zu planen.

## Wissenstransfer und Dienstleistungen an der Gesellschaft

Der Kontakt mit Wirtschaft und Gesellschaft ist für die Ausbildung und Forschung im Energiebereich unerlässlich. Geknüpft werden kann dieser, indem:

- mögliche Kooperationsfelder zwischen der ETH Zürich und der Industrie identifiziert und langfristig wirksame Leuchtturmprojekte entwickelt werden;
- qualitativ hochstehende Weiterbildungsangebote zu den Themen Energietechnologie und Energiemanagement erarbeitet werden;
- das ESC als ETH-Institution gestärkt wird, um wichtige wissenschaftliche Beiträge für die öffentliche Diskussion und für die politische Agendabildung, in koordinierter Vermittlungsfunktion («honest-broker»), zu leisten.

## Nationale Zusammenarbeit

Innerhalb des ETH-Bereichs können Synergiepotenziale ausgeschöpft werden. Dafür können etwa die bestehenden Kompetenzzentren für Energie und Mobilität (CCEM) respektive für Umwelt und Nachhaltigkeit (CCES) genutzt werden. Ebenso ist die Zusammenarbeit mit Universitäten und Fachhochschulen, wo immer sinnvoll, zu suchen. Mit den wichtigen Akteuren der Energiepolitik (unter anderem die Bundesämter) soll ein kontinuierlicher Austausch gepflegt werden.

## Internationales Umfeld

Die Zusammenarbeit mit den weltweit besten Fachpersonen und Institutionen ist ein Schlüsselement für einen nachhaltigen Erfolg der Forschungsarbeit. Vielversprechende Vertiefungsoptionen bieten dazu die im Jahr 2007 geknüpften Kontakte zur Alliance for Global Sustainability und zu den Partnern der IDEA League, der europäischen Allianz der führenden technisch-naturwissenschaftlichen Forschungsuniversitäten. Neben der ETH Zürich gehören ihr das Imperial College London, die TU Delft, die RWTH Aachen und Paris Tech an. Sowohl für die Lehre als auch für die Forschung soll die Zusammenarbeit in diesem Verbund weiter gefestigt und konkretisiert werden. Gleichzeitig dazu verhilft ein Aufbau von weiteren akademischen Allianzen mit führenden Institutionen aus aufstrebenden Ländern wie China, Indien und Singapur zur strategisch wichtigen globalen Präsenz. Entsprechende Kooperationen werden zur Zeit geprüft bzw. sind im Aufbau.

Zu dieser Publikation haben  
folgende Personen beigetragen:

**Prof. Reza S. Abhari**

Institut für Energietechnik  
ML J 35  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
abhari@lsm.iet.mavt.ethz.ch  
www.lsm.ethz.ch

**Prof. Göran Andersson**

Institut für Elektrische Energieübertragung  
ETL G 26  
Physikstrasse 3  
8092 Zürich  
andersson@eeh.ee.ethz.ch  
www.eeh.ee.ethz.ch

**Prof. Kay W. Axhausen**

Institut für Verkehrsplanung &  
Transportsysteme  
HIL F 32.3  
Wolfgang-Pauli-Strasse 15  
8093 Zürich  
axhausen@ivt.baug.ethz.ch  
www.ivt.ethz.ch

**Prof. Konstantinos Boulouchos**

Institut für Energietechnik  
ML J 39  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
boulouchos@lav.mavt.ethz.ch  
www.lav.ethz.ch

**Prof. Lucas Bretschger**

Professur für Ökonomie / Ressourcenökonomie  
ZUE F 7  
Zürichbergstrasse 18  
8032 Zürich  
lbretschger@ethz.ch  
www.cer.ethz.ch

**Prof. Paolo Burlando**

Institut für Umweltingenieurwissenschaften  
HIL G 33.1  
Wolfgang-Pauli-Strasse 15  
8093 Zürich  
burlando@ifu.baug.ethz.ch  
www.ifu.ethz.ch

**Dr. Claudia Casciaro**

Energy Science Center  
ML K 20  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
casciaro@esc.ethz.ch  
www.esc.ethz.ch

**Dr. Keith Frederick Evans**

Geologisches Institut  
HIL D 22.3  
Wolfgang-Pauli-Strasse 15  
8093 Zürich  
keith.evans@erdw.ethz.ch  
www.geology.ethz.ch

**Prof. Massimo Filippini**

Centre for Energy Policy & Economics  
ZUE E 15  
Zürichbergstrasse 18  
8032 Zürich  
mfilippini@ethz.ch  
www.cepe.ethz.ch

**Prof. Klaus Fröhlich**

Institut für Elektrische Energieübertragung  
ETL H 28  
Physikstrasse 3  
8092 Zürich  
froehlich@eeh.ee.ethz.ch  
www.eeh.ee.ethz.ch

**Prof. Domenico Giardini**

Institut für Geophysik  
HPP P 6.1  
Schafmattstrasse 30  
8093 Zürich  
giardini@sed.ethz.ch  
www.geophysics.ethz.ch

**Prof. Wilhelm Gruitsem**

Institut für Pflanzenwissenschaften  
LFW E 56.1  
Universitätstrasse 2  
8092 Zürich  
wilhelm.gruissem@ipw.ethz.ch  
www.pb.ethz.ch

**Prof. Lino Guzzella**

Institut für Mess- und Regeltechnik  
ML K 32.1  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
guzzella@imrt.mavt.ethz.ch  
www.imrt.ethz.ch

**Prof. Christoph A. Heinrich**

Institut Isotopengeologie / Mineral. Rohstoffe  
NW F 83  
Clausiusstrasse 25  
8092 Zürich  
heinrich@erdw.ethz.ch  
www.igmr.ethz.ch

**Prof. Stefanie Hellweg**

Institut für Umweltingenieurwissenschaften  
HIL G 35.2  
Wolfgang-Pauli-Strasse 15  
8093 Zürich  
stefanie.hellweg@ifu.baug.ethz.ch  
www.ifu.ethz.ch

**Prof. Volker Hoffmann**

Professur für Nachhaltigkeit und Technologie  
KPL H 11  
Kreuzplatz 5  
8032 Zürich  
vhoffmann@ethz.ch  
www.sustec.ethz.ch

**Prof. Konrad Hungerbühler**

Institut für Chemie- und  
Bioingenieurwissenschaften  
HCI G 133  
Wolfgang-Pauli-Strasse 10  
8093 Zürich  
konrad.hungerbuehler@chem.ethz.ch  
www.icb.ethz.ch

**Prof. Eberhard Jochem**

Centre for Energy Policy & Economics  
ZUE E 5  
Zürichbergstrasse 18  
8032 Zürich  
ejochem@ethz.ch  
www.cepe.ethz.ch

**Prof. Johann W. Kolar**

Prof. Leistungselektronik und Messtechnik  
ETL H 22  
Physikstrasse 3  
8092 Zürich  
kolar@lem.ee.ethz.ch  
www.pes.ee.ethz.ch

**Prof. Petros Koumoutsakos**

Institut für Computational Science  
CAB H 69.2  
Universitätstrasse 6  
8092 Zürich  
petros@ethz.ch  
www.icos.ethz.ch

**Prof. Wolfgang Kröger**

Institut für Energietechnik  
ML J 13.1  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
kroeger@mavt.ethz.ch  
www.lsa.ethz.ch

**Prof. Hansjürg Leibundgut**

Institut für Hochbautechnik  
HIL E 15.1  
Wolfgang-Pauli-Strasse 15  
8093 Zürich  
leibundgut@hbt.arch.ethz.ch  
www.hbt.arch.ethz.ch

**Prof. Edoardo Mazza**

Institut für Mechanische Systeme  
CLA J 21.1  
Tannenstrasse 3  
8092 Zürich  
mazza@imes.mavt.ethz.ch  
www.ifm.ethz.ch

**Prof. Marco Mazzotti**

Institut für Verfahrenstechnik  
ML G 27  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
marco.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch  
www.ipe.ethz.ch

**Prof. Hans-Erwin Minor**

Versuchsanstalt für Wasserbau /  
Hydrologie / Glaziologie  
VAW E 31  
Gloriastrasse 37 / 39  
8092 Zürich  
minor@vaw.baug.ethz.ch  
www.vaw.ethz.ch

**Prof. Reinhard Nesper**

Laboratorium für Anorganische Chemie  
HCl H 139  
Wolfgang-Pauli-Strasse 10  
8093 Zürich  
reinhard.nesper@inorg.chem.ethz.ch  
www.solid.ethz.ch

**Prof. Horst-Michael Prasser**

Labor für Kernenergiesysteme  
ML K 13  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
hprasser@lek.mavt.ethz.ch  
www.lek.mavt.ethz.ch

**Prof. Philipp Rudolf von Rohr**

Institut für Verfahrenstechnik  
ML H 19  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch  
www.ipe.ethz.ch

**Prof. Roland W. Scholz**

Institut für Umweltentscheidungen  
CHN J 74.2  
Universitätstrasse 16  
8092 Zürich  
roland.scholz@env.ethz.ch  
www.ied.ethz.ch

**Prof. Renate Schubert**

Professur für Nationalökonomie  
WEH G 11  
Weinbergstrasse 35  
8092 Zürich  
schubert@wif.gess.ethz.ch  
www.econ.ethz.ch

**Prof. Daniel Spreng**

Energy Science Center  
c/o Centre for Energy Policy & Economics  
ZUE F 2  
Zürichbergstrasse 18  
8032 Zürich  
dspreng@ethz.ch  
www.cepe.ethz.ch

**Prof. Aldo Steinfeld**

Institut für Energietechnik  
ML J 42.1  
Sonneggstrasse 3  
8092 Zürich  
aldo.steinfeld@pre.iet.mavt.ethz.ch  
www.pre.ethz.ch

**Dr. Ayodhya Nath Tiwari**

Laboratorium für Festkörperphysik  
PFA J 29  
Technoparkstrasse 1  
8005 Zürich  
tiwari@phys.ethz.ch  
www.tfp.ethz.ch

**Prof. Alexander Wokaun**

Institut für Chemie- und  
Bioingenieurwissenschaften  
HCl G 11 7  
Wolfgang-Pauli-Strasse 10  
8093 Zürich  
alexander.wokaun@chem.ethz.ch  
www.icb.ethz.ch

Vedankt wird die Mitwirkung folgender

ESC-Beiratsmitglieder:

Dr. Bernhard Eschermann, ABB Schweiz

Dr. Ronald Ganz, Erdöl-Vereinigung

Dr. Walter Hauenstein,

Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Dr. Tony Kaiser, Alstom (Schweiz) AG

Dr. Hajo Leutenegger,

Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG

Dr. Wolfgang Steiger, VW Wolfsburg

Dr. Walter Steinmann, Bundesamt für Energie

Dr. Manfred Thumann,

NOK Nordostschweizerische Kraftwerke AG