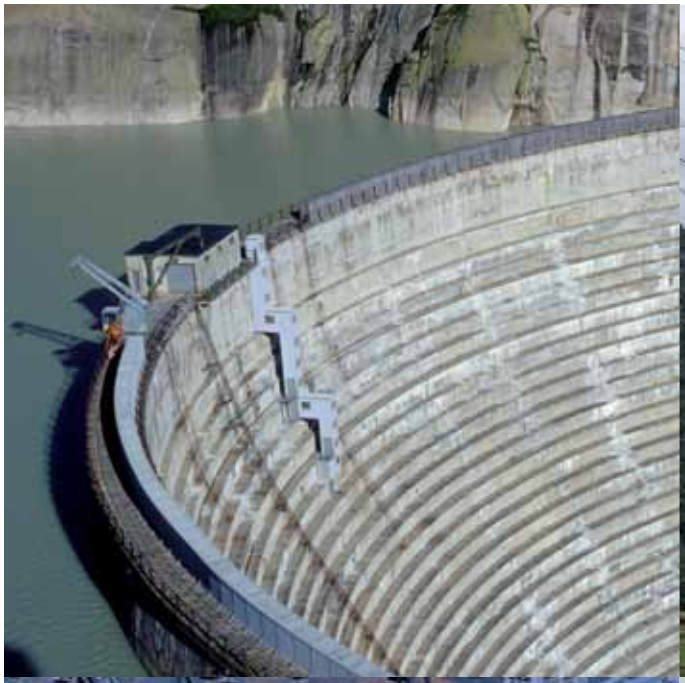
Akademien der Wissenschaften Schweiz
Académies suisses des sciences
Accademie svizzere delle scienze
Academias svizras da las scienzas
Swiss Academies of Arts and Sciences

Zukunft Stromversorgung Schweiz

Kurzfassung



Inhalt

Vorwort 3

Zusammenfassung 4

Eine brisante Aufgabe 6

Die Entwicklung der Nachfrage 8
Szenarien der Stromnachfrage 12

Möglichkeiten zur Stromerzeugung 13
Vergleich der verschiedenen Technologien 17

Stromübertragung und Stromspeicherung 18

Was Nachhaltigkeit konkret bedeutet 23
Die politischen Grundsatzentscheide von Bundesrat und Parlament 27

Die Position der Akademien Schweiz 29

Schlusswort 37

Literatur 39

Wissenschaft im Dienste der Gesellschaft

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz sind ein Verbund der vier schweizerischen Akademien der Wissenschaften: der Akademie der Naturwissenschaften (SCNAT), der Schweizerischen Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW), der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW) und der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW). Sie umfassen weiter das Kompetenzzentrum für Technologiefolge-Abschätzungen (TA-SWISS), Science et Cité und weitere wissenschaftliche Netzwerke.

Die wissenschaftlichen Akademien der Schweiz setzen sich gezielt für einen gleichberechtigten Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft ein und beraten Politik und Gesellschaft in wissenschaftsbasierten, gesellschaftsrelevanten Fragen. Sie vertreten die Wissenschaften institutionen- und fachübergreifend. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft verankert haben sie Zugang zu Expertise und Exzellenz und bringen Fachwissen in zentrale politische Fragestellungen ein.

Vorwort

Die Schweiz hat ein Stromversorgungsproblem. Das ist zwar schon lange bekannt, aber weil sich das Problem nicht häufig in dramatischen Ereignissen manifestierte, wurde es jahrzehntelang von der Bevölkerung und den Entscheidungsträgern in seiner Komplexität ignoriert. Experten hatten schon früh auf die Konsequenzen der Untätigkeit hingewiesen, aber ihre Warnungen wurden entweder in den Wind geschlagen oder flossen einseitig in politische Aussagen ein. Die Havarie des Kernkraftwerkes Fukushima Dai-ichi in Japan im März 2011 hat die Situation plötzlich verschärft: Der Ausstieg aus der Kernenergie scheint weitgehend beschlossene Sache zu sein und der damit zusammenhängende Ausfall eines erheblichen Teils der schweizerischen Stromversorgung zwingt Regierung, Politik und Stromindustrie, sich auf eine Gesamtstrategie zu einigen, um die Versorgungssicherheit mit langfristig koordinierten Massnahmen zu gewährleisten. Da es erhebliche Konsequenzen für die Gesamtbevölkerung geben wird, ist eine umfassende Information und eine demokratische Meinungsbildung unerlässlich.

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz wollen ihre Aufgabe als unabhängige Wissensvermittler wahrnehmen und mit neutralem Blick mögliche mittel- und längerfristige Entwicklungen aufzeigen und analysieren. Möglichst alle Aspekte des Stroms sollen dabei bedacht werden: die Erzeugung und die Beschaffung, der Transport, die Speicherung und der Verbrauch. Und zudem werden die Kriterien der Nachhaltigkeit beleuchtet.

Drei Mitglieder der Akademien der Wissenschaften Schweiz, die federführende Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW), die Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften (SCNAT) und die Schweizerische Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW) haben eine gemeinsame Arbeitsgruppe gebildet, welche das Thema bearbeitet und den vorliegenden Bericht verfasst hat. Es wird Ihnen auffallen, dass nicht in jedem Fall vollständige Übereinstimmung erzielt werden konnte. So wurden, wie es sich auch im öffentlichen Diskurs ergibt, verschiedene Szenarien formuliert und miteinander verglichen. Sollen erfolgversprechende Lösungswege gefunden und realisiert werden, braucht es wissenschaftlichen Sachverstand, Offenheit und Flexibilität, um auf sich verändernde äussere Einflüsse, Entwicklungen und Erkenntnisse reagieren zu können.

Ulrich W. Suter
Präsident SATW

Heinz Gutscher
Präsident Akademien der Wissenschaften Schweiz

> Wie schwer ist es, dass der Mensch recht abwäge, was man aufopfern muss gegen das, was zu gewinnen ist! Wie schwer, den Zweck zu wollen und die Mittel nicht zu verschmähen!
> Johann Wolfgang von Goethe, Die Wahlverwandtschaften, Erster Teil, 6. Kap., 1809

Zusammenfassung

Die schweizerische Energieversorgung im Allgemeinen und die Stromversorgung im Besonderen stellen für unsere Gesellschaft eine riesige Herausforderung dar. Der grosse Erneuerungs- und Ausbaubedarf bei der Produktion und Übertragung lässt einen grundlegenden Umbau des Elektrizitätssystems erwarten. Die Beschlüsse des Bundesrats und der Eidgenössischen Räte, schrittweise aus der Kernkraft auszusteigen und die neue Energiestrategie 2050 umzusetzen, verschärfen das Problem zusätzlich.

Aus Sicht der Akademien der Wissenschaften Schweiz soll sich dieser Umbau an den Nachhaltigkeitskriterien menschliches Wohlergehen, Versorgungssicherheit, Minimierung ökologischer Risiken, ökonomische Effizienz und Vermeidung systemgefährdender Risiken orientieren. Aufgrund der langfristigen Ausrichtung müssen kostenintensive Investitionen unter grosser Unsicherheit getätigt werden. Deshalb sind auch die Kriterien Flexibilität und Diversität zu berücksichtigen: Das System muss an neue Entwicklungen angepasst werden können und auf verschiedenen Pfeilern aufbauen.

Grundsätzlich soll der Umbau des Stromsystems sowohl auf der Nachfrage- als auch auf der Angebotsseite aufgrund korrekter Preissignale erfolgen. Dazu müssen die Strompreise alle externen Kosten einschliessen. Gesetzliche Vorschriften und zeitlich limitierte finanzielle Anreize sollen nur soweit eingesetzt werden, als die Marktkräfte zur Zielerreichung nicht genügen.

Die Akademien unterstützen die beiden Ziele der neuen Energiepolitik des Bundes, Energie effizienter zu nutzen und die erneuerbare Stromproduktion auszubauen. Zudem ist die stärkere Integration der schweizerischen Stromversorgung in den europäischen Markt anzustreben. Unterschiedliche Ansichten bestehen innerhalb der Akademien der Wissenschaften Schweiz hingegen darüber, ob die Kernkraft auch längerfristig genutzt werden soll oder nicht.

Im Rahmen der vorliegenden Studie äussern sich die Akademien der Wissenschaften Schweiz zu folgenden elektrizitätspolitischen Aspekten:

Nachfrageentwicklung

Obwohl die Stromnachfrage voraussichtlich weiter ansteigen wird, ist eine Nachfrageentwicklung anzustreben, wie sie im Szenario «Neue Energiepolitik» des Bundes postuliert wird (siehe Seite 12). Der Verbrauch soll durch Effizienzmassnahmen möglichst stark eingedämmt werden. Tendenziell gilt: Je tiefer der Elektrizitätsverbrauch ist, desto sicherer, wirtschaftlicher und weniger umweltbelastend ist auch die Stromversorgung.

Erneuerbare Stromversorgung

Der Strombedarf soll möglichst aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden. Dazu sind die in der Schweiz ökologisch und ökonomisch verantwortbaren Produktionspotenziale umfassend zu nutzen. Da fluktuierende Energiequellen an Bedeutung gewinnen werden, müssen auch die Speicherkapazitäten und das Stromnetz angepasst werden.

Förderstrategien für erneuerbare Energien

Die kostendeckende Einspeisevergütung soll laufend an die aktuellen Gestehungskosten angepasst werden. Mittelfristig soll sie ergänzt werden, zum Beispiel mit einer Quotenregelung mit Zertifikatehandel oder einem Ausschreibemodell, die eine grössere Marktnähe und eine stärkere dynamische Anreizwirkung für Innovationen aufweisen.

Aspekte einer erneuerbaren Stromversorgung im Ausland

Es ist abzusehen, dass die Schweiz noch längere Zeit Stromnettoimporteur bleibt. Der importierte Strom soll dabei möglichst aus erneuerbaren Quellen stammen. Damit Investitionen in ausländische Anlagen für die schweizerische Stromversorgung relevant werden, braucht es entsprechende Durchleitungskapazitäten, einen integrierten europäischen Strommarkt sowie ein Stromabkommen mit der EU.

Fossile Stromerzeugung

Auf den Bau von fossilen Kraftwerken im Inland soll möglichst verzichtet werden. Werden sie aus Gründen der Netzstabilität trotzdem gebaut, sollen die CO_2-Emissionen vollständig kompensiert werden, damit die Schweiz ihre Klimaziele dennoch erreichen kann. Investitionen in ausländische fossile Kraftwerke sind nicht sinnvoll.

Kernkraft

Damit die Schweizer Kernkraftwerke bis zu ihrer Abschaltung sicher weiterbetrieben werden können, sollen die Sicherheitsforschung fortgeführt und die daraus resultierenden Erkenntnisse umgesetzt werden. Dies gilt auch für die Forschung zur Endlagerung der radioaktiven Abfälle und für die Umsetzung der entsprechenden Lagerkonzepte. Sollen alle Optionen aufrechterhalten werden, muss auch die nukleare Forschung weitergeführt werden, insbesondere hinsichtlich der Entwicklung neuer Reaktorkonzepte. Sie dient auch der Ausbildung des notwendigen Fachpersonals.

Stromnetz

Beim Stromnetz besteht ein grosser Ausbau- und Erneuerungsbedarf. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich durch die neue Energiepolitik. Damit die Ausbauten zeitgerecht realisiert werden können, sollen die Bewilligungsverfahren gestrafft werden.

Stromspeicherung

Wenn neue erneuerbare Energiequellen einen grösseren Teil zur Energieversorgung leisten sollen, müssen entsprechende Speichermöglichkeiten geschaffen werden. Im Vordergrund steht der Ausbau der Speicherseen und der Pumpspeicherung. Damit die dezentrale Stromerzeugung optimal genutzt werden kann, sind auch die übrigen Speichertechnologien weiterzuentwickeln.

Effizienz und Suffizienz

Die Realisierung eines nachhaltigen Elektrizitätssystems setzt wesentlich verbesserte Effizienz und höhere Suffizienz voraus. Bund und Kantone sollen zusammen mit den beteiligten Akteuren die dazu geeigneten Rahmenbedingungen schaffen.

Liberalisierung des Strommarkts

Die Marktöffnung für alle Kundenkategorien soll so rasch als möglich umgesetzt werden. Die schweizerische Netzgesellschaft Swissgrid soll eine unabhängige Unternehmensstruktur erhalten.

Die schweizerische Stromversorgung im europäischen Kontext

Das schweizerische Elektrizitätssystem soll im Interesse der sicheren und wirtschaftlichen Versorgung des Landes im europäischen System integriert bleiben. Es ist alles daran zu setzen, dass die Schweiz an ein allfälliges künftiges europäisches Höchstspannungsnetz (Super Grid) angeschlossen wird. Dazu ist ein Stromabkommen mit der EU unverzichtbar.

Neuausrichtung der Elektrizitätsversorgungsunternehmen

Die Versorgungsunternehmen sollen neue Businessstrategien entwickeln, die Rendite und verkaufte Strommenge voneinander entkoppeln. Dazu braucht es Geschäftsfelder und Dienstleistungen, die auf Effizienz ausgerichtet sind.

Forschung, Entwicklung und Lehre

Die energiebezogene Forschung, Entwicklung und Lehre sollen verstärkt werden. Dabei ist insbesondere auch die sozio-ökonomische Forschung substanziell auszubauen.

Herausforderungen

Die Akademien weisen darauf hin, dass der Umbau des Stromsystems eine gewaltige wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Herausforderung ist. Nicht nur die Stromversorgung muss auf erneuerbare Quellen umgestellt werden; auch die fossilen Brenn- und Treibstoffe, die heute den grössten Teil des Energieverbrauchs decken, müssen ersetzt werden. Es gibt keinen klar vorgegebenen Weg, und alle Optionen haben neben Vorteilen auch Nachteile. Damit die bevorstehende Aufgabe bewältigt werden kann, braucht es einen breiten Diskurs und Lernprozesse, damit die neue Energiepolitik mit ihren erforderlichen Eingriffen von der Gesellschaft gemeinschaftlich getragen wird.

Eine brisante Aufgabe

Die schweizerische Stromversorgung steht in den kommenden Jahren vor einem grundlegenden Umbruch. Die inländische Stromproduktion und das elektrische Netz müssen in grossem Stil erneuert und ausgebaut sowie auf neue Gegebenheiten ausgerichtet werden. Mit dem letztjährigen Entscheid von Bundesrat und Parlament, schrittweise aus der Kernkraft auszusteigen und die neue Energiestrategie 2050 umzusetzen, hat die Aufgabe zusätzlich an Brisanz gewonnen.

Es ist heute in der Schweiz ein allgemein anerkanntes politisches Ziel, dass die Energieversorgung längerfristig nachhaltig gestaltet werden soll. Das Verständnis von Nachhaltigkeit ist jedoch durch Werte und Einstellungen geprägt. Entsprechend uneinheitlich sind die Vorstellungen, wie eine nachhaltige Energieversorgung konkret aussehen soll. Da die heutigen Entscheide Wirkungen haben, die weit in die Zukunft reichen, muss die Frage, was eine nachhaltige Energieversorgung bedeutet und wie sie erreicht werden kann, dringend geklärt werden.

Das Streben nach einem menschenwürdigen Leben für alle führt global gesehen zu einer weiteren wirtschaftlichen Entwicklung und damit verbunden zu einer vermehrten Nachfrage nach Energie. Die fossilen Energiequellen, die zur Befriedigung dieser Nachfrage noch immer überwiegend eingesetzt werden, sind die Hauptverursacher des vom Menschen verursachten Klimawandels. Dauerhaft und klimaschonend kann die Nachfrage nach Energie daher nur befriedigt werden, wenn Energieversorgung und -nutzung grundlegend umgebaut werden.

Dabei stehen zwei Stossrichtungen im Vordergrund: Die Nachfrage nach Energie muss erstens durch eine effizientere Nutzung und Selbstbeschränkung (Suffizienz) substanziell verringert werden; zweitens muss sich die Energieversorgung künftig auf erneuerbare Energiequellen abstützen. Der Investitionsbedarf für diesen Umbau des Energiesystems ist enorm, und er wird die Energiewirtschaft und die Konsumstrukturen grundlegend verändern. Gefragt sind hierzu international abgestimmte politische Rahmenbedingungen.

Zentrale Rolle der Stromversorgung

Die Schweiz sollte sich dringend mit der Frage auseinandersetzen, wie die Energieversorgung auf eine nachhaltige Basis gestellt werden könnte. Dabei spielt die Stromversorgung eine zentrale Rolle: In den kommenden Jahrzehnten erreichen die schweizerischen Kernkraftwerke das Ende ihrer sicherheitstechnischen Lebensdauer und die Bezugsrechte für Strom aus französischen Kernkraftwerken laufen aus – mit geringer Aussicht auf Erneuerung. Rund die Hälfte des heutigen Stromangebots steht dann nicht mehr zur Verfügung. Gleichzeitig wird die Nachfrage trotz Effizienzsteigerungen voraussichtlich weiter zunehmen: durch die Anwendung neuer Technologien, die Strom benötigen, durch die wachsende Bevölkerung, durch steigende Konsummöglichkeiten und durch die Substitution fossiler Energiequellen in den Bereichen Raumwärme (Wärmepumpen) und Mobilität (Elektrofahrzeuge).

Durch den Unfall im japanischen Kernkraftwerk Fukushima im März 2011 hat die Frage, wie die Schweiz ihre Stromversorgung sicherstellen will, weiter an Brisanz gewonnen. Die Kerntechnik hat – zumindest vorübergehend – an Akzeptanz verloren; die Bereitschaft zur «Energiewende» scheint gestiegen. Damit diese Energiewende gelingt, braucht es jedoch Entscheidungen unter Unsicherheit. Es müssen immer gewisse Risiken eingegangen werden, und es ist unklar, wie das dynamische System Mensch – Umwelt reagieren wird. Deshalb müssen die Entscheide so gefällt werden, dass die Stromversorgung einerseits gesichert bleibt, andererseits aber auch an veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden kann.

Viele offene Fragen

Konkret stellt sich eine Reihe von Fragen: Mit welchem Angebot soll die Nachfrage künftig gedeckt werden? Sollen neue Produktionskapazitäten im Inland aufgebaut werden oder will die Schweiz künftig vermehrt auf Importe zurückgreifen? Welche Konsequenzen hat dies für die Netzinfrastruktur? Und wie kann die Stromproduktion, die heute im Inland praktisch keine CO_2-Emissionen verursacht, auch in Zukunft mit den klimapolitischen Zielen in Einklang gebracht werden? Wie lassen sich die erneuerbaren Energien effektiv und effizient fördern? Ist der Weg, den die Schweiz einschlagen wird, mit der Entwicklung in der EU kompatibel?

Auch wirtschaftliche Fragen müssen beantwortet werden: Wie werden Investitionen in einem liberalisierten Strommarkt getätigt, in dem Produktion, Übertragung und Verteilung entbündelt sind? Wie sehen die künftigen Geschäftsmodelle der Energieversorgungsunternehmen aus, wenn diese mit einer dezentralen, erneuerbaren Stromproduktion, mit einer effizienteren Nutzung des Stroms durch die Konsumenten und mit dem Erhalt beziehungsweise Ausbau der Netzinfrastruktur vereinbar sein sollen? Und wird die Schweiz auch unter den neuen Bedingungen einen intensiven Stromhandel mit der EU treiben können?

Beitrag zur Meinungsbildung

Die künftige schweizerische Stromversorgung hängt wesentlich von technischen und wirtschaftlichen Entwicklungen ab, deren Verlauf die Schweiz nur bedingt beeinflussen kann. Auch die Präferenzen der einzelnen Stromkonsumentinnen und Stromkonsumenten sowie das Investitionsverhalten der Stromproduzenten und Netzbetreiber spielen eine zentrale Rolle. Und schliesslich prägen auch politische und juristische Entscheide die künftige Stromversorgung. Diese Entscheide betreffen beispielsweise die effiziente Stromnutzung, die erneuerbare Stromerzeugung, die Regulierungs- und Speicherproblematik, den Netzausbau oder die Liberalisierung des Strommarkts.

Die Entscheide der nächsten Zeit werden die Stromversorgung über Jahrzehnte hinweg beeinflussen. Es stellt sich daher die Frage, auf welcher Grundlage die anstehenden Weichenstellungen vorgenommen werden sollen. Die Akademien der Wissenschaften Schweiz möchten in dieser Situation explizit die Rolle eines unabhängigen Wissensvermittlers einnehmen. Sie wollen mit der vorliegenden Schrift einen Beitrag zur Meinungsbildung leisten, indem sie mittel- und längerfristige Entwicklungen aufzeigen.

Die Entwicklung der Nachfrage

Elektrizität wurde in den letzten Jahren zu einer immer wichtigeren Energieform für unsere Gesellschaft. Demzufolge hat auch der Stromverbrauch stetig zugenommen. Die vom Bundesrat im Rahmen der neuen Energiestrategie angestrebte Reduktion der Nachfrage lässt sich nur erreichen, wenn die verschiedenen technischen, ökonomischen, gesellschaftlichen und psychologischen Faktoren, welche die Entwicklung der Nachfrage steuern, mit griffigen Massnahmen beeinflusst werden.

In den letzten Jahren hat der Stromverbrauch kontinuierlich zugenommen. Die Schweiz benötigt heute 2,4 Mal so viel Strom wie vor 40 Jahren (vergleiche Abbildung 1). Das entspricht einer jährlichen Zunahme um gut 2 Prozent. Im letzten Jahrzehnt nahm der Verbrauch um durchschnittlich 1,3 Prozent pro Jahr zu. Nicht nur der absolute Verbrauch hat zugenommen, sondern auch die relative Bedeutung des Stroms: Sein Anteil am Endenergieverbrauch betrug 2010 23,6 Prozent, im Jahr 1970 waren es erst 15,4 Prozent. An diesem Trend dürfte sich in der nächsten Zeit kaum etwas ändern, ist Strom doch für viele Anwendungen attraktiv: Elektrische Geräte und Antriebe sind breit einsetzbar, technisch hoch entwickelt, energetisch effizient und im Betrieb nahezu emissionsfrei.

Vielfältige Einflussfaktoren

Wie sich die Nachfrage in den kommenden Jahren entwickeln wird, ist eine zentrale energiepolitische Frage. Um die Entwicklung abschätzen zu können, müssen neben technischen Faktoren auch ökonomische und soziale Aspekte berücksichtigt werden.

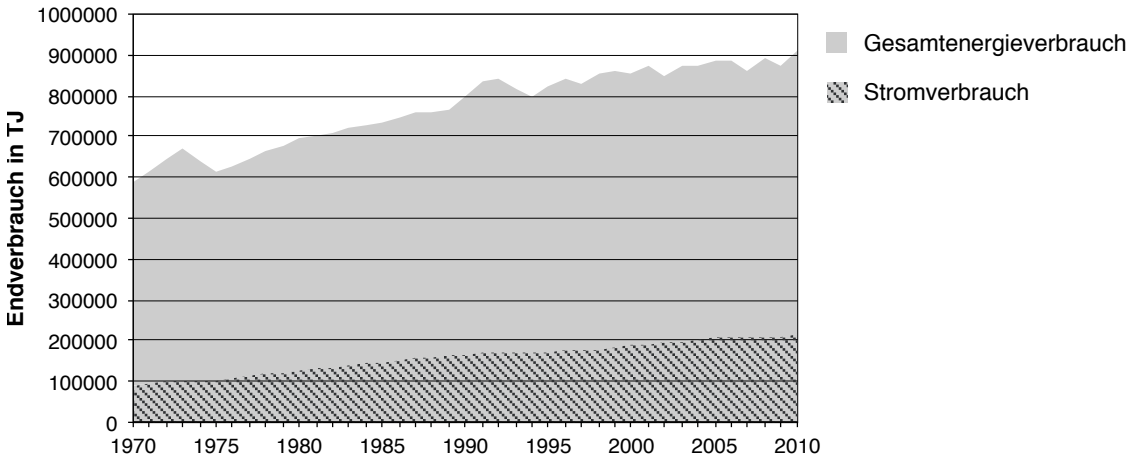


Abbildung 1: Entwicklung des Strom- und des Gesamtenergieverbrauchs 1970–2010 (BFE). Zwischen 1970 und 1985 liegen nicht für alle Jahre Zahlen vor. Diese wurden extrapoliert.

Ökonomische Faktoren

Wie bei anderen Gütern wird auch beim Strom die Nachfrage vom Preis beeinflusst. Kurzfristig haben Preissteigerungen nur eine beschränkte Wirkung, bleibt zum Stromsparen doch kaum eine andere Möglichkeit, als die Geräte weniger intensiv zu verwenden. Längerfristig bewirken Preissteigerungen, dass stromintensive Geräte durch effizientere ersetzt werden. Dennoch führen höhere Strompreise nicht zwingend zu einer geringeren Nachfrage. Steigen nämlich die Preise für andere Energieträger noch stärker, kann sogar eine höhere Stromnachfrage resultieren, etwa wenn fossile Energien durch Technologien ersetzt werden, die Strom benötigen. Soll der Stromverbrauch also über den Preis reduziert werden, müsste der Elektrizitätspreis demnach stärker ansteigen als die Preise der anderen Energieträger.

In den heutigen Strompreisen sind die externen Kosten nicht angemessen berücksichtigt. Dazu zählen etwa Beeinträchtigungen der Umwelt und der menschlichen Gesundheit. Auch die möglichen Schäden aus ungenügend versicherten Kernkraftwerken und Staudämmen sowie die externen Kosten der eingesetzten Materialien sind in den Preisen nicht enthalten. Dies kommt einer Subvention gleich: Der Strom wird zu billig verkauft und daher in grösseren Mengen konsumiert als dies ökonomisch gesehen sinnvoll wäre.

Die zunehmende Elektrifizierung und die Zunahme der erneuerbaren Stromproduktion lassen einen Anstieg der Strompreise erwarten. Preissteigernd wirken auch der Bedarf für Netzinvestitionen und die Internalisierung der externen Kosten. Bei einer realen Preissteigerung um 10 Prozent bis 2020, 30 Prozent bis 2035 und 50 Prozent bis 2050 ergibt sich ein Rückgang der Nachfrage um 6, 18 beziehungsweise 30 Prozent. Im ungünstigen Fall reagieren die Konsumenten nur mit einem Rückgang der Nachfrage um 3, 9 beziehungsweise 15 Prozent.

Neben dem Preis beeinflusst auch das mit dem Wirtschaftswachstum steigende Einkommen die Nachfrage. Die Einkommen sind in der Schweiz in den vergangenen Jahrzehnten real um knapp 1 Prozent pro Kopf und Jahr gestiegen. Bei einer Fortsetzung dieses Trends würde die Stromnachfrage demnach allein durch die Veränderung des Pro-Kopf-Einkommens bis 2050 um 5 bis 10 Prozent steigen. Im Ländervergleich zeigt sich jedoch, dass ein höheres gesamtwirtschaftliches Einkommen nicht unbedingt zu einem höheren Stromverbrauch führen muss, weil es für die Haushalte und die Industrie interessant sein kann, auf weniger energieintensive Prozesse umzustellen.

Technische Faktoren

Die technische Entwicklung beeinflusst die Stromnachfrage unterschiedlich: Einerseits werden elektrische Geräte und Antriebe durch neue Technologien effizienter. Anderseits führen neue Technologien zu neuen Stromanwendungen.

Die einzelnen Anwendungen verfügen über sehr unterschiedliche Effizienzpotenziale. Teilweise könnte der Strombedarf bereits mit der heute verfügbaren Technik um bis zu 80 Prozent vermindert werden. Auch stromintensive Grundstoffe könnten in beachtlichen Mengen substituiert werden. Effizienzpotenziale werden meist innerhalb von Re-Investitionszyklen realisiert, die sich jedoch teilweise über Jahrzehnte erstrecken. Insgesamt resultiert ein geschätztes jährliches Sparpotenzial von 1,0 bis 1,5 Prozent, sofern gesellschaftliche und psychologische Hemmnisse beseitigt werden.

Strom spielt für unsere Gesellschaft eine herausragende Rolle. Die Automatisierung und Mechanisierung der Wirtschaft, höhere Ansprüche an Qualität und Bequemlichkeit sowie die Alterung der Gesellschaft führen zu einem steigenden Stromverbrauch. Dazu kommen Substitutionseffekte, etwa wenn fossile Heizungen durch Wärmepumpen ersetzt werden. Alle diese Einflüsse dürften sich zu einem jährlichen Mehrbedarf von 0,4 bis 0,6 Prozent summieren.

Im Mobilitätssektor wird es zu einer teilweisen Substitution des Verbrennungsmotors durch den Elektromotor kommen. Zusätzlich erhöht sich der Stromverbrauch durch die angestrebte Verlagerung von der Strasse auf die Schiene.

Psychologische Faktoren

Individuen entscheiden nicht immer im klassisch-ökonomischen Sinn rational und konsistent. Hand-

lungsalternativen, das soziale Umfeld oder das Verhalten relevanter Akteure können das Verhalten des Einzelnen beeinflussen. Intuitiv würde man vermuten, dass umweltbewusste Personen weniger Strom benötigen. Dies ist aber nicht unbedingt der Fall. Die Wirkung des Umweltbewusstseins auf den Stromverbrauch wird daher oft überschätzt. Die Chancen, dass Strom sparsam eingesetzt wird, steigen aber, wenn die Akteure mit Informationen versorgt werden. Individuen sind eher bereit, ihren Stromkonsum zu reduzieren, wenn sie das Gefühl haben, einen Beitrag zur Verringerung der Stromnachfrage zu leisten. Sie handeln, wenn sie sich verantwortlich fühlen und über Handlungsmöglichkeiten verfügen. Dies ist aber nicht immer gegeben: So haben Mieter in der Regel keinen Einfluss, welche Haushaltgeräte angeschafft werden.

Ein paradoxer Effekt ergibt sich, weil mit effizienten Stromanwendungen Kosten eingespart werden. Dadurch werden Mittel für den Konsum anderer Güter frei – was wiederum eine Mehrnachfrage nach Energie auslösen kann. Solche Rebound-Effekte treten fast immer auf, wenn Energiedienstleistungen effizienter erbracht werden. Sie verringern die Spareffekte im Schnitt um mindestens zehn Prozent.

Schliesslich wirkt sich auch die Diskontierung ungünstig auf die Realisierung von Effizienzpotenzialen aus, also die Tatsache, dass künftige Kosten und Nutzen geringer bewertet werden als gegenwärtige. Je höher die Diskontrate, desto geringer ist die Bereitschaft, in Massnahmen zur Stromeffizienz zu investieren. Grundsätzlich sinkt die Diskontrate mit höherem Einkommen. Gut situierte Haushalte sind demnach eher zu Energiesparinvestitionen bereit.

Gesellschaftliche Faktoren

Konsumenten orientieren sich stark an sozialen Normen. Diese bestimmen also mit, ob Energie effizient eingesetzt wird. Die Bereitschaft, Strom sparsam einzusetzen, hängt davon ab, ob glaubwürdige Vorbilder vorhanden sind. Gesellschaftliche Tendenzen können bedeutende Treiber des Stromverbrauchs sein: Die Verbreitung von Computern aller Art oder energieintensive Freizeittätigkeiten sind Beispiele dafür. Sie lassen sich nur beschränkt durch staatliche Regulierungen beeinflussen. Entscheidend sind daher gesellschaftliche Lernprozesse, die durch staatliche Rahmenbedingungen gefördert werden können. Zu diesen Lernprozessen gehört auch die Suffizienz, die auf die Veränderung von Konsummustern abzielt. Suffizienz bedeutet, freiwillig und bewusst energiesparsame Optionen zu wählen.

Die Auswirkungen der psychologischen und gesellschaftlichen Faktoren sind quantitativ kaum zu fassen. Unter der Annahme, Effizienz, Suffizienz sowie Strukturen und Technologien, die sich an Nachhaltigkeit orientieren, werden sich durchsetzen, kann der dadurch bedingte Rückgang der Stromnachfrage bis 2035 auf 20 Prozent und bis 2050 auf 30 Prozent veranschlagt werden. Im ungünstigsten Fall finden bis 2050 keine verbrauchsrelevanten Lernprozesse statt.

Soziodemographische Faktoren

Das Bevölkerungswachstum hat in den letzten Jahrzehnten massgeblich zum Anstieg der Stromnachfrage beigetragen und wird vermutlich weiterhin ein wichtiger Faktor bleiben. Zudem wird sich die Bevölkerungsstruktur verändern: Der Anteil an älteren Personen nimmt zu, die Mitgliederzahl je Haushalt ab, und die Wohnfläche pro Kopf wird grösser. Alle diese Faktoren führen tendenziell zu einer Zunahme des Stromverbrauchs. Es ist mit einem Zuwachs von 14 beziehungsweise 17 Prozent bis 2035 beziehungsweise 2050 zu rechnen.

Umweltfaktoren

Der Stromverbrauch wird auch durch Umwelteinflüsse geprägt, etwa durch die Umgebungstemperatur. Wenn sich die Witterungsverhältnisse in den kommenden Jahren verändern, wirkt sich das auch auf die nachgefragte Strommenge und deren jahreszeitliche Verteilung aus. Gewisse Stromanwendungen dürften eine deutliche Ausweitung erfahren, beispielsweise Klima- und Bewässerungsanlagen im Sommer oder Beschneiungsanlagen im Winter.

Beeinflussung der Stromnachfrage

Die Stromnachfrage wird, wie beschrieben, durch vielfältige Faktoren beeinflusst. Es ist ein zentrales energiepolitisches Ziel, Energiedienstleistungen mit einem möglichst geringen Energieeinsatz bereitzustellen. Dies gilt grundsätzlich auch für die Elektrizität. Allerdings kann ein höherer Stromeinsatz unter Umständen unter dem Strich zu einem geringeren Gesamtenergieverbrauch und CO_2-Ausstoss führen, beispielsweise wenn elektrisch betriebene Wärmepumpen fossile Heizungen ersetzen.

Der Strompreis wurde in der Schweiz bisher kaum als Instrument eingesetzt, um den Verbrauch zu beschränken. Er enthält zwar Abgaben an die Gemeinwesen in Form von Konzessionsgebühren, Wasserzinsen und Förderabgaben. Doch diese Abgaben wurden primär aus finanziellen Gründen eingeführt. Die Politik könnte den Strompreis durch Energiesteuern, Abgaben oder Subventionen direkt beeinflussen, um so die Nachfrage zu steuern. Zudem könnte die Nachfrage durch eine flexible Tarifstruktur besser an das Angebot angepasst werden. In sehr einfacher Form geschieht dies heute bereits mit dem Hoch- und Niedertarif.

Auch neue Geschäftsmodelle könnten die Nachfrage positiv beeinflussen. Finanzielle Gründe wie hohe Renditevorgaben, knappe Investitionsbudgets oder Kreditrestriktionen verhindern immer wieder, dass Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz umgesetzt werden. Als mögliches Gegeninstrument bietet sich das Contracting an, bei dem der Endverbraucher das Energiemanagement an einen Dritten auslagert.

Eine weitere finanzielle Hürde ist das Investor-Nutzer-Dilemma. Wenn der Nutzen von Energiesparinvestitionen nicht beim Investor anfällt, wie dies zum Beispiel bei Mietwohnungen der Fall ist, haben die Investoren wenig Anreiz, effizientere, aber teurere Geräte zu beschaffen. Auch mangelnde Kenntnisse bei Architekten, Planern und Bauherren führen zu Investitionen, die nicht energieeffizient sind. In diesen Fällen können energetische Mindestvorgaben sowie Labels wie die Energieetikette wirkungsvolle Instrumente sein. Daneben können auch Verbote (zum Beispiel von Glühbirnen oder fest installierten Widerstandsheizungen) die Stromnachfrage beeinflussen.

Soll der effiziente Einsatz von Strom umfassend gefördert werden, reichen einzelne Massnahmen nicht aus. Es braucht eine integrale Strategie, die verschiedene Instrumente kombiniert: Gebote und Verbote, marktwirtschaftliche Instrumente, finanzielle Anreize und Informationskampagnen.

Szenarien der Stromnachfrage

In den letzten Jahren wurden verschiedene Szenarien zur Entwicklung der Stromversorgung erarbeitet, insbesondere auch vom Bundesamt für Energie (BFE). Nach der Katastrophe im Kernkraftwerk Fukushima hat das BFE überarbeitete Szenarien vorgelegt. Diese bildeten die Grundlage für den Entscheid des Bundesrats, längerfristig aus der Kernkraft auszusteigen.

In Bezug auf die Nachfrage geht das BFE von zwei Politikvarianten aus: In der Variante «Weiter wie bisher» werden die bisherigen energiepolitischen Massnahmen weitergeführt. Die Variante «Neue Energiepolitik» hingegen orientiert sich am Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft. Sie geht davon aus, dass die Politik einschneidende Massnahmen ergreifen wird, insbesondere eine Lenkungsabgabe mit hohen Abgabesätzen. Daraus ergeben sich zwei mögliche Entwicklungen des Stromendverbrauchs (vergleiche Tabelle 1): Mit dem Szenario «Weiter wie bisher» wird die Stromnachfrage bis 2050 um einen Drittel zunehmen, mit dem Szenario «Neue Energiepolitik» wird die Stromnachfrage nach anfänglicher weiterer Zunahme bis 2050 gegenüber 2010 um etwa 6 Prozent abnehmen.

Im Rahmen des Projekts «Zukunft Stromversorgung Schweiz» haben die Akademien der Wissenschaften Schweiz eine eigene Einschätzung der Verbrauchsentwicklung vorgenommen (vergleiche Tabelle 1). Auch sie haben zwei Verbrauchsentwicklungen ermittelt: Beim Szenario «Referenzentwicklung» werden die verschiedenen Bestimmungsfaktoren der Stromnachfrage von der Politik nicht verändert. Das Szenario «Beeinflusste Entwicklung» hingegen nimmt an, dass zusätzliche politische Instrumente eingeführt werden, um die Stromnachfrage zu senken. Bei der Variante «Referenzentwicklung» muss mit einer Zunahme des Stromverbrauchs bis 2050 um 14 Prozent gerechnet werden; bei der Variante «Beeinflusste Entwicklung» hingegen wird der Stromverbrauch bis 2035 leicht abnehmen, danach bis 2050 wieder ungefähr auf den heutigen Wert ansteigen.

Die Schätzungen der Akademien liegen also für die Referenzentwicklung deutlich unter dem entsprechenden Szenario des BFE. Grund dafür ist in erster Linie die Erwartung, dass die Strompreise in den nächsten Jahren ohnehin steigen werden und ein gesellschaftlicher Wandel stattfinden wird. Die Schätzung «Beeinflusste Entwicklung» hingegen stimmt sehr gut mit dem Politikszenario «Neue Energiepolitik» des BFE überein.

Tabelle 1: Entwicklung der Stromnachfrage bis 2050.

Stromendverbrauch (TWh)	2010	2020	2035	2050
Szenarien BFE				
Weiter wie bisher	60	66	72	79
Neue Energiepolitik	60	62	59	56
Szenarien Akademien Schweiz				
Referenzentwicklung	60	62	64	68
Bandbreite		58–64	54–69	52–76
Beeinflusste Entwicklung	60	57	56	58
Bandbreite		55–62	50–65	50–75

Möglichkeiten zur Stromerzeugung

Die Schweiz stützt sich bei der Stromversorgung heute im Wesentlichen auf die beiden Säulen Wasserkraft und Kernenergie. Da das Potenzial der Wasserkraft bereits weitgehend ausgeschöpft ist und die Kernenergie längerfristig nicht mehr zur Verfügung stehen soll, müssen andere Produktionsformen diese Lücke künftig decken. Die möglichen Alternativen haben alle ihre spezifischen Vor- und Nachteile und erfordern weitreichende Anpassungen am Stromsystem.

Die schweizerische Stromerzeugung beruht heute im Wesentlichen auf den beiden Säulen Wasserkraft, die etwa 56 Prozent zur Gesamtproduktion beisteuert, und Kernkraft, die einen Produktionsanteil von knapp 40 Prozent hat (vergleiche Abbildung 2). Die neuen erneuerbaren Energiequellen – Photovoltaik, Windkraft, Biomasse (inkl. Abfall) – tragen hingegen erst rund 2 Prozent bei. Der Rest entfällt auf konventionell-thermische und andere Kraftwerke.

Die Schweiz war bis vor kurzem stets ein Nettostromexporteur, produzierte also über das ganze Jahr gesehen mehr Strom als sie selbst verbrauchte. In den letzten Jahren entwickelte sich die Schweiz immer mehr zum Stromimporteur und zwar nicht nur wie bereits seit längerem im Winter, sondern zunehmend auch über das Jahr hinweg betrachtet. Bis 2050 wird sich die Situation weiter verschärfen: Die bestehenden Kernkraftwerke werden ausser Betrieb gehen. Zudem können privilegierte Bezugsrechte aus französischen Kernkraftwerken nicht mehr genutzt werden. Es ist absehbar, dass deshalb bedeutende neue Produktionskapazitäten bereitgestellt werden müssen.

Wird der Grundsatzentscheid von Bundesrat und Parlament, aus der Kernkraft auszusteigen, umgesetzt, steht eine bis jetzt zentrale Produktionsart längerfristig nicht mehr zur Verfügung. Als Alternativen bieten sich der Ausbau der Wasserkraft, die Stromerzeugung aus den neuen erneuerbaren Quellen, fossile Kraftwerke

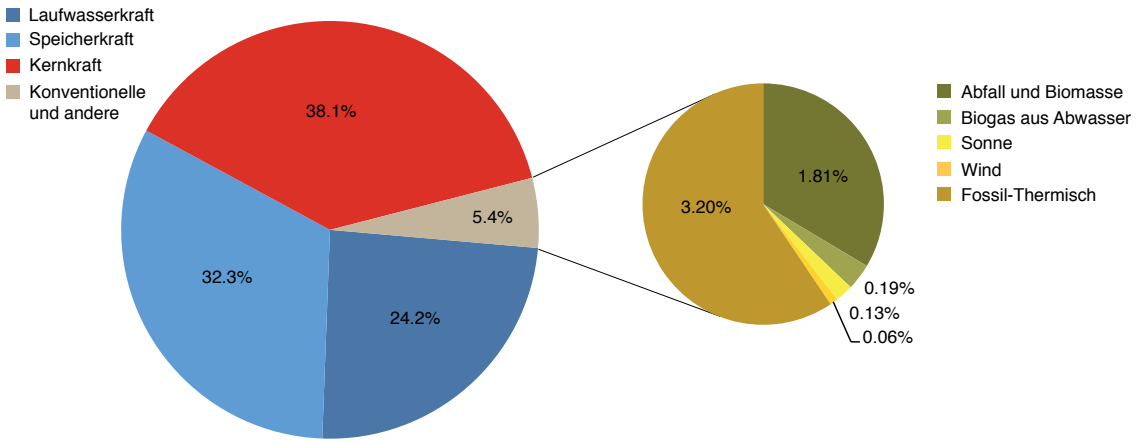


Abbildung 2: Stromerzeugung in der Schweiz im Jahr 2010 (BFE 2011).

sowie die Wärmekraftkopplung an. Die schweizerische Stromproduktion verursacht heute praktisch keine CO_2-Emissionen. Ob dies so bleiben wird, hängt von den gewählten Technologien ab. Der Bundesrat unterstützt grundsätzlich das klimapolitische Ziel, die Erhöhung der globalen mittleren Temperatur auf maximal +2 °C gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen. Dazu müssen die Industrieländer ihre Emissionen bis 2050 um mindestens 80 Prozent verringern. Für die Schweiz bedeutet dies: Gut die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs muss eingespart oder durch nicht-fossile Energien erbracht werden. Würden die Kernkraftwerke durch fossile Kraftwerke ersetzt, ohne dass das produzierte CO_2 abgeschieden und gespeichert werden kann, würde die Stromerzeugung künftig 20 Prozent der heutigen CO_2-Emissionen emittieren und damit das gesamte im Jahre 2050 verfügbare CO_2-Kontingent beanspruchen.

Wasserkraft

Die Wasserkraft ist die wichtigste einheimische erneuerbare Energiequelle und die Stromproduktionstechnologie mit dem geringsten spezifischen CO_2-Ausstoss. Die Laufkraftwerke tragen etwa einen Viertel, die Speicherkraftwerke knapp einen Drittel zur Stromerzeugung bei. Etwa 60 Prozent der Produktion fallen im Sommer an. Die installierte Leistung aller Wasserkraftwerke beträgt 14,3 GW, die mittlere jährliche Energieproduktion rund 36 TWh. Die Wasserkraft hat eine wichtige volkswirtschaftliche Bedeutung, nicht zuletzt für die (Gebirgs-)Kantone. Die Wasserkraft könnte künftig einen wichtigen Beitrag leisten, um die schwankende Produktion aus Wind- und Solaranlagen auszugleichen. Dadurch eröffnen sich neue wirtschaftliche Chancen. Allerdings sind Pumpspeicherwerke wirtschaftlich nur rentabel, wenn die energetischen Verluste von 15 bis 25 Prozent durch genügend grosse Preisunterschiede ausgeglichen werden können.

Wie jede Energieproduktionsform weist auch die Wasserkraft ökologische Nachteile auf. Am stärksten ins Gewicht fallen die Auswirkungen auf die Gewässer, verändern die Stauanlagen doch das Abflussverhalten der Flüsse. Dennoch schneidet die Wasserkraft im Gesamtvergleich vorteilhaft ab.

Das technisch nutzbare Potenzial der Wasserkraft wird auf 42 TWh geschätzt, wovon heute mit 36 TWh bereits etwa 85 Prozent genutzt werden. Berücksichtigt man, dass das Gewässerschutzgesetz bei Konzessionserneuerungen eine Erhöhung der Restwassermengen verlangt, resultiert ein Ausbaupotenzial von 2 TWh. Der Bundesrat strebt neu eine Steigerung um 3,2 TWh an. Dazu müsste auch die Kleinwasserkraft stark ausgebaut werden, welche die Umwelt in Relation zur installierten Leistung stärker belastet.

Biomasse

Die Biomasse (inklusive Abfall) leistet heute einen Beitrag von 2 Prozent zur schweizerischen Elektrizitätsproduktion und ist damit die wichtigste neue erneuerbare Stromquelle. Der überwiegende Teil des mit Biomasse erzeugten Stroms stammt aus Kehrichtverbrennungsanlagen (Anteil Biomasse: ca. 50 Prozent). Positiv hervorzuheben ist, dass die Nutzung von Biomasse aus Abfällen oder extensivem Anbau weitgehend CO_2-neutral ist. Allerdings kann dieser Vorteil durch klimawirksame Schadstoffe zunichte gemacht werden. Da die Gestehungskosten stark von der Anlagenart, der Auslastung und vom Brennstoff abhängen, sind generelle Aussagen zur Wirtschaftlichkeit nicht möglich.

Biomasse kann für die Stromgewinnung, die Wärmeerzeugung und die Herstellung von Biotreibstoffen verwendet werden. In den neuen Energieperspektiven des BFE wird etwa ein Drittel des Potenzials für die Biomasseverstromung eingesetzt und deren Beitrag auf 3,8 TWh geschätzt (siehe auch Wärmekraftkopplung).

Photovoltaik

Die Photovoltaik trägt noch wenig zur schweizerischen Stromerzeugung bei (0,13 Prozent im Jahr 2010). Sie ist zurzeit die weitaus teuerste Produktionsart, weist aber das mittelfristig grösste realisierbare technische Potenzial auf. Die meisten Zellen bestehen heute aus kristallinem Silizium und erreichen Modulwirkungsgrade zwischen 15 und 20 Prozent. Sie werden zunehmend durch günstigere und ressourcenschonendere Dünnschichtsolarzellen konkurrenziert. Deren Modulwirkungsgrad liegt jedoch

erst bei etwa 10 Prozent. Um jährlich 1 TWh elektrische Energie zu erzeugen, werden im Mittelland circa 7 km^2 kristalline Modulfläche benötigt. In den Alpen ist die Ausbeute deutlich höher und zudem jahreszeitlich besser verteilt.

Die Photovoltaik stösst im Betrieb kein CO_2 und keine Luftschadstoffe aus, ist aber nicht ständig verfügbar. Wegen der geringen Energiedichte der Sonnenstrahlung werden bedeutende Materialmengen benötigt, die teilweise ökologisch problematisch sind. Die Herstellung der Komponenten verursacht Emissionen und hochgiftige Abfälle. Die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik verbessert sich laufend. Die Solarindustrie erwartet, dass die Gestehungskosten bis 2020 dem Strompreis für Haushalte entsprechen werden.

Das technische Potenzial der Photovoltaik ist enorm. Die gut geeigneten Gebäudeflächen werden auf 100 bis 150 km^2 geschätzt. Darauf lassen sich mit der heute verfügbaren Technik 12 bis 18 TWh Solarstrom pro Jahr erzeugen. In der Angebotsvariante «Erneuerbar» der neuen Energieszenarien des Bundes wird eine Solarstromproduktion von 10,4 TWh angenommen, wofür etwa 80 km^2 Modulfläche benötigt werden. Längerfristig ist auch die Nutzung von Infrastruktur- und Freiflächen denkbar.

Solarthermische Elektrizität

Im Gegensatz zur solarthermischen Warmwassererzeugung, die in der Schweiz bereits Anwendung findet, wird die solarthermische Stromerzeugung aufgrund der relativ geringen direkten Sonneneinstrahlung wohl nur eine untergeordnete Rolle spielen. Einen wichtigen Beitrag zum künftigen Energiemix könnte hingegen der Import von solchem Strom aus dem Mittelmeerraum leisten. Solarthermische Kraftwerke – über mehrere Zeitzonen verteilt und durch leistungsfähige Netze miteinander verbunden – können dank Wärmespeichern praktisch rund um die Uhr Strom nach Bedarf liefern.

Windkraft

Die Windkraft ist heute global gesehen die wichtigste neue erneuerbare Stromquelle. In der Schweiz waren Anfang 2011 28 grössere und 19 kleinere Anlagen installiert, mit einer Leistung von insgesamt 42,3 MW und einer jährlichen Produktionserwartung von 0,074 TWh.

Bei den ökologischen Aspekten sind die relativ geringen CO_2-Emissionen hervorzuheben. Bemängelt werden hingegen die Auswirkungen auf die Landschaft und die für die Anwohner lästigen Geräusche und Blendwirkungen. Die Stromgestehungskosten hängen stark von den lokalen Windverhältnissen ab. Das Ausbaupotenzial der Windkraft wird in der Schweiz auf 4 TWh geschätzt; es soll mit 800 Grossanlagen bis 2050 erschlossen werden. Dieser Betrag wird auch in den neuen Energieszenarien des Bundes in der Angebotsvariante «Erneuerbar» angenommen. Die Windkraft kann also auch in der Schweiz einen beachtlichen Beitrag zur Stromversorgung liefern. Allerdings erfolgt die Einspeisung fluktuierend, sodass die übrigen Erzeugungsanlagen flexibler eingesetzt werden müssen als bisher. Dazu braucht es Stromspeicher-, Übertragungs- und Regelkapazitäten.

Geothermie

Die Schweiz verfügt über ein hohes Potenzial, um mit Erdwärme Strom zu erzeugen. Allerdings existieren dazu noch keine entsprechenden Anlagen. Bohrungen zur Erschliessung tiefer geothermischer Ressourcen sind aber im Gang. Die konventionelle tiefe Geothermie nutzt heisses Wasser im Untergrund zur Stromerzeugung. Im Mittelland sind dazu Bohrungen von etwa drei Kilometern nötig. Bei Bohrtiefen von fünf Kilometern können Temperaturen von rund 200 °C und ein elektrischer Wirkungsgrad von etwa 15 Prozent erreicht werden. Sind keine wasserführenden Gesteinsschichten vorhanden, müssen zwei Bohrungen durchgeführt und das trockene Gestein dazwischen aufgebrochen werden. Ein erstes derartiges Projekt musste in Basel nach Erdstössen allerdings abgebrochen werden.

Ökologische Auswirkungen entstehen hauptsächlich beim Bau, insbesondere bei der Erschliessung des Reservoirs. Je nach geologischer Situation kann das zirkulierende Wasser zudem toxische oder radioaktive Substanzen aus dem Untergrund lösen. Die Wirtschaftlichkeit lässt sich mangels Erfahrungen schwer einschätzen. Das theoretische Potenzial

der Geothermie ist sehr hoch. Das wirtschaftlich nutzbare Potenzial hingegen ist viel tiefer; es dürfte bis 2050 1,5 bis 3,5 TWh betragen.

Kernkraft

Die fünf schweizerischen Kernkraftwerke liefern 26 TWh Bandenergie pro Jahr; dazu kommen 17 TWh aus Beteiligungen an französischen Kernkraftwerken. Die Kernkraft wird in den nächsten Jahren weiterhin einen wichtigen Beitrag zum schweizerischen Strommix leisten, allerdings nicht bis zum Ende der Betrachtungsdauer 2050, falls der Ausstiegsbeschluss wie vorgesehen umgesetzt wird.

Die schweizerischen Kernkraftwerke sind sicherheitstechnisch nachgerüstete Leichtwasserreaktoren der Generation II. Sie wurden nach dem Unglück in Fukushima einer weiteren Sicherheitsüberprüfung unterzogen. Anlagen der Generation III, deren Design konsequent auf den Schutz gegen die Auswirkungen schwerer Störfälle ausgelegt ist, sind in einigen Ländern im Bau. Reaktoren der Generation IV sind Gegenstand der heutigen Forschung und Entwicklung. Beim Betrieb der Reaktoren fallen praktisch keine CO_2-Emissionen an, jedoch in den vor- und nachgelagerten Prozessen zur Aufbereitung und Entsorgung der Brennstoffe.

Kernreaktoren enthalten ein grosses Inventar an radioaktiven Stoffen. Das Risiko schwerer Unfälle ist bei der Berücksichtigung des Standes der Technik gering. Das maximal mögliche Schadensausmass ist jedoch stets immens, wie die Katastrophen in Tschernobyl und Fukushima zeigten. Dazu kommen die radioaktiven abgebrannten Brennelemente sowie Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, die dauerhaft sicher entsorgt werden müssen. Mit der gesetzlich vorgeschriebenen Tiefenlagerung besteht ein Konzept, wie diese Abfälle sicher entsorgt werden könnten.

Fossil-thermische Stromproduktion

Global gesehen wird der grösste Teil des Stroms mit fossilen Energien erzeugt, allen voran mit Kohle. In der Schweiz existieren lediglich wenige fossil-thermische Kraftwerke in Industriebetrieben, die für den Eigenbedarf produzieren; ihr Beitrag zur Landesversorgung liegt bei 3 Prozent. Gaskombikraftwerke (GuD) erreichen hohe Wirkungsgrade von bis zu 60 Prozent. Diese lassen sich erhöhen, falls ein Teil der Wärme genutzt wird. GuD können sowohl zur Deckung der Grundlast als auch zur Kompensation fluktuierender erneuerbarer Energien eingesetzt werden. Der Hauptnachteil der fossilen Stromerzeugung sind die hohen spezifischen CO_2-Emissionen. Solange die Abtrennung und Speicherung des CO_2 (das so genannte Carbon Capture and Storage CCS) noch nicht möglich ist, lassen sich diese kaum reduzieren.

GuD-Anlagen weisen tiefe Investitionskosten auf. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt stark von den Brennstoffpreisen und von den allfälligen CO_2-Kosten ab. Das technische Potenzial ist durch die Kapazität der Gaszuleitungen limitiert. Die heutige Transitgasleitung genügt, um den absehbaren Bedarf der Schweiz zu decken. Wegen zurzeit fehlenden Gasspeichern lassen sich Unterbrüche in der Gaszufuhr aus dem Ausland nur für wenige Stunden überbrücken.

Wärmekraftkopplung

Bei der Wärmekraftkopplung (WKK) wird gleichzeitig Strom und Wärme erzeugt. Der dabei realisierbare hohe Gesamtwirkungsgrad setzt eine gesicherte Stromabnahme und einen ausreichenden Wärmebezug voraus. Die WKK ist im Ausland weit verbreitet, in der Schweiz wird erst rund 2,5 Prozent des Stroms mit WKK produziert. Zurzeit stammen 38 Prozent der zum Betrieb der Anlagen benötigten Energie aus regenerativen Energiequellen. Allgemein gültige ökologische und wirtschaftliche Kennwerte können für die WKK nicht angegeben werden, weil eine Vielfalt an Technologien, Brennstoffen, Anlagegrössen und Produktionsformen zum Einsatz kommen.

Die WKK steht in Konkurrenz zu etablierten Technologien, beim Strom in erster Linie mit Grosskraftwerken, bei der Wärme mit fossilen oder erneuerbaren Systemen. In der Schweiz ist das Wärmepotenzial sowohl in der Industrie als auch im Gebäudebereich beschränkt. Die WKK ist vor allem im Industriebereich interessant sowie in Gebäuden, bei denen eine Isolation der Gebäudehülle und der Einsatz von Wärmepumpen nicht möglich sind.

Vergleich der verschiedenen Technologien

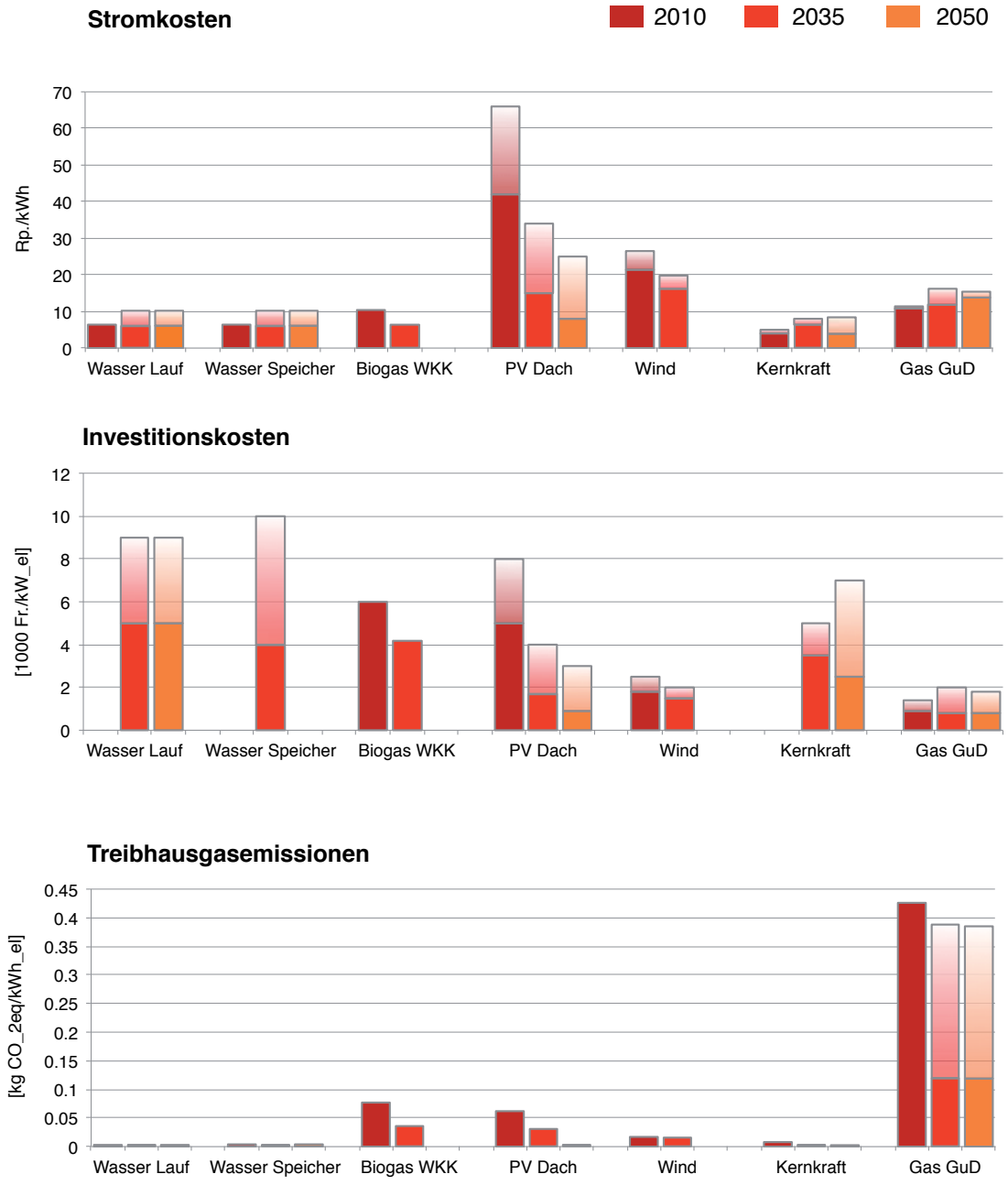


Abbildung 3: Vergleich von ausgewählten Stromproduktionsarten unter den Gesichtspunkten Stromkosten, Investitionskosten und Treibhausgasemissionen für die Jahre 2010, 2035 und 2050. Die helleren Schattierungen geben die Bandbreite an. Die heutigen und erwarteten Stromkosten, Investitionskosten und Treibhausgasemissionen der wichtigsten Stromproduktionsarten in der Schweiz basieren auf Lebenszyklusanalysen. Die tiefen Emissionswerte der GuD ab 2035 und entsprechend höheren Kosten schliessen die CO_2-Abscheidung und Speicherung mit ein. Die Zahlen einer einzelnen Anlage können von diesen Werten stark abweichen, je nach Standort, Auslastung, Lebensdauer und Verzinsung oder aufgrund von Bauverzögerungen. Jede Produktionsart hat zudem ganz spezifische Produktionscharakteristiken. Während der Stromverbrauch im Winter am höchsten ist, produzieren die Wasserkraft und die Photovoltaik im Sommer am meisten Strom. Die Elektrizität aus Photovoltaik und Windkraft fällt fluktuierend an. Je nach Anlagentyp sind zudem weitere Anlagen erforderlich wie Speicher oder Stromleitungen. (Datenquelle: Hirschberg 2010)

Stromübertragung und Stromspeicherung

Das elektrische Übertragungs- und Verteilnetz spielt im Stromsystem eine zentrale Rolle. Es hilft, Wirtschaft und Gesellschaft mit dem benötigten Strom zu bedienen, und erlaubt auch den für die Versorgungssicherheit bedeutenden Stromhandel mit dem Ausland. Bereits heute besteht beim Stromnetz ein grosser Erneuerungs- und Ausbaubedarf. Dazu kommt, dass das Netz künftig aufgrund der veränderten Produktionsverhältnisse völlig neuen Anforderungen genügen muss.

In der Diskussion um die künftige Stromversorgung wurden Netzfragen bis vor kurzem kaum angesprochen. Allenfalls gaben einzelne Projekte für Hochspannungsleitungen zu reden. Auch heute noch werden die Probleme in erster Linie bei der Stromproduktion und bei den Stromkosten gesehen. Doch ohne leistungsfähiges Netz können Wirtschaft und Gesellschaft nicht mit Strom versorgt werden. Das Stromnetz ist dabei nicht nur die technische Grundlage, um den Strom von den Kraftwerken zu den Verbrauchern zu transportieren, sondern es ermöglicht auch den für die sichere Versorgung wichtigen Stromhandel mit dem Ausland. Das elektrische Netz, bestehend aus Übertragungs- und Verteilnetz, muss die auftretenden Stromflüsse jederzeit ohne Überlastungen bewältigen können, und die Netzbetreiber haben dafür zu sorgen, dass die Elektrizität den Verbrauchern jederzeit mit der nötigen Spannung und Frequenz zur Verfügung steht.

Die Umsetzung der neuen Energiestrategie ist gerade beim Netz eine besondere Herausforderung, die nur mit grossen Anstrengungen zu meistern sein wird: Der Endverbrauch und die nachgefragte Leistung nehmen tendenziell zu, die Erzeugung erfolgt zunehmend dezentral und fluktuierend und im Zuge der Strommarktliberalisierung wird sich der Stromhandel weiter intensivieren. Zudem besteht bereits heute ein gewichtiger Ausbau- und Anpassungsbedarf sowohl beim Verteil- als auch beim Übertragungsnetz.

Ausbaubedarf

Die gesamte Länge des schweizerischen Stromnetzes beträgt heute ungefähr 145 000 Kilometer. Das Übertragungsnetz (220 kV und 380 kV) ist rund 6800 Kilometer lang und bildet das Rückgrat der Stromversorgung. Ursprünglich diente es dazu, den Strom von den Kraftwerken zu den Verbrauchern zu transportieren. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts wurden zunehmend auch grenzüberschreitende Leitungen für den Energieaustausch mit den umliegenden Ländern gebaut. Diese Leitungen ermöglichen den Stromhandel und sind daher für die Versorgungssicherheit wichtig.

Das heutige Übertragungsnetz, teilweise vor mehr als 50 Jahren gebaut, genügt den heutigen Anforderungen nicht mehr. Sowohl das Netz der allgemeinen Versorgung als auch das Stromnetz der SBB müssen erneuert und ausgebaut werden. Der Bundesrat hat die strategischen Leitungen für die allgemeine Stromversorgung und die Bahnstromversorgung sowie die dringend zu realisierenden Ausbauprojekte im Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL) festgelegt.

Der Netzplan zeigt die wichtigsten Schwachstellen des Übertragungsnetzes (vergleiche Abbildung 4):

Es fehlen leistungsfähige Ost-West-Verbindungen, die Kapazität im Wallis reicht für den Abtransport der dort erzeugten Elektrizität nicht aus, und auch andere Leitungen müssen verstärkt werden. Mit dem Netzausbau gemäss SÜL können wesentliche, aber nicht alle Kapazitätsengpässe behoben werden. Die geschätzten Kosten belaufen sich auf 6 Milliarden Franken. Da Photovoltaikanlagen auf der untersten, lokalen Netzebene und Windkraftwerke ins regionale Netz einspeisen, müssen auch die regionalen und lokalen Verteilnetze ausgebaut und an die neuen Anforderungen angepasst werden. Etwa die Hälfte der Kosten, die heute von den Haushalten für den Strom aufgewendet werden, entfallen auf die Netzkosten, der grösste Teil davon auf die Verteilnetze. Die erforderlichen Erneuerungsmassnahmen führen zu zusätzlichen Kosten, sind aber für eine sichere Stromversorgung unverzichtbar.

Umstritten sind vor allem die Höchst- und Hochspannungsleitungen. Sie beeinträchtigen das Landschaftsbild und verursachen elektromagnetische Felder. Dadurch stossen sie meist auf Widerstände in der Bevölkerung, was zu sehr langwierigen Bewilligungsverfahren führt. Häufig wird auch die Forderung erhoben, Hochspannungsleitungen seien zu verkabeln, so wie dies auf den niedrigeren Spannungsebenen bereits zum grössten Teil der Fall ist. Tatsächlich ist die Ausdehnung des elektromagnetischen Feldes bei erdverlegten Kabelleitungen kleiner als bei Freileitungen. Doch die Erdverlegung einer Hochspannungsleitung bedeutet ebenfalls einen starken Eingriff in die Landschaft. Die Projektanten der Leitungen führen in der Diskussion meistens an, die Investitionskosten seien bei einem Kabel um ein Mehrfaches höher als bei einer Freileitung. Das Bundesgericht hat 2011 jedoch festgehalten, dass in dieser Abwägung nicht nur die Investitionskosten berücksichtigt werden dürfen, sondern dass die Kosten über die gesamte Betriebsdauer der Leitung hinweg betrachtet werden müssen.

Strommarktliberalisierung

Die von der EU ausgehende Liberalisierung des Strommarkts, die in der Schweiz mit dem Stromversorgungsgesetz 2008 für Grosskunden eingeleitet wurde, hat bedeutende Auswirkungen auf die Elektrizitätsversorgung. Da prinzipiell allen Interessierten Zugang zum Markt gewährleistet werden soll, können auf den Netzen Engpässe entstehen, die durch Auktionen bewirtschaftet werden müssen.

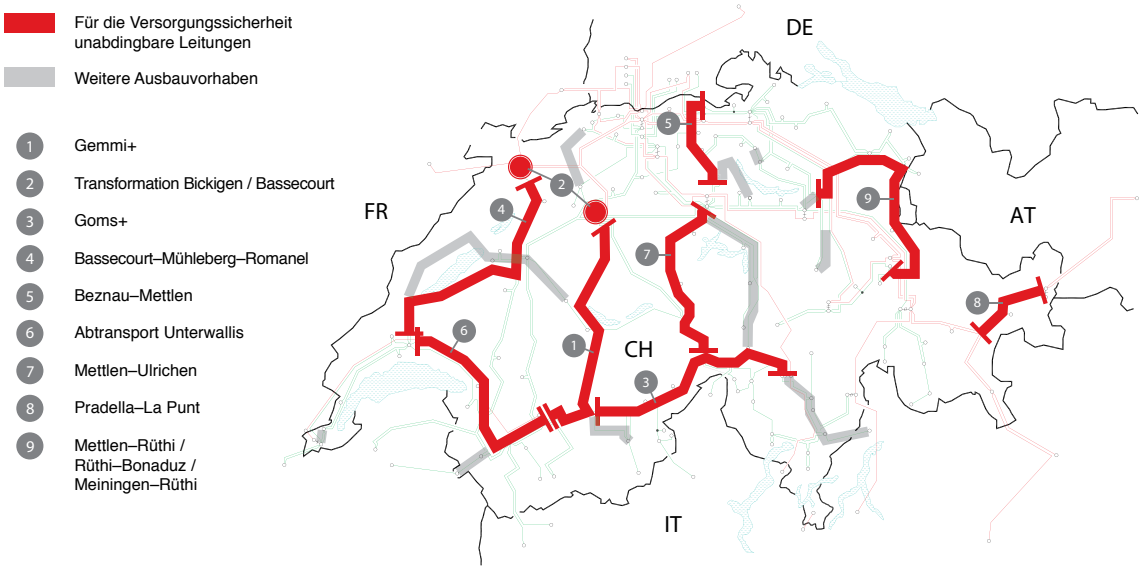


Abbildung 4: Dringende Erneuerungs- und Ausbauprojekte des Stromnetzes – Stand September 2011 (Quelle: Swissgrid).

Im europäischen Rahmen soll künftig durch den gleichzeitigen Handel von Energie und Transportkapazität eine gemeinsame Preisbildung erfolgen (implizite Auktion). Dadurch können die Netzkapazitäten besser ausgenützt werden.

Bei einer Marktkopplung werden die einzelnen Märkte zusammengeschlossen. Die nationalen Anbieter stimmen Angebot und Nachfrage gemeinsam für den zusammengeschlossenen Markt ab; die Abstimmung erfolgt also nicht mehr nur bilateral an der Grenze wie bisher. Die Vergabe der Grenzkapazitäten geschieht unter Einhaltung der physikalischen Grenzen der Netze und einer grenzspezifischen Sicherheitsmarge. Treten bei der Optimierung Engpässe auf, so sind Preisanpassungen möglich. Eine Weiterentwicklung der Marktkopplung ist die so genannte flussbasierte Zuteilung von Netzkapazitäten (flussbasierte Allokation). Der Vorteil der Allokation ist, dass die bisherigen Sicherheitsmargen reduziert werden können. Dadurch nimmt die grenzüberschreitend verfügbare Netzkapazität zu und die Sicherheit im gesamten Netz wird erhöht. Da Netzplanung und Marktgestaltung miteinander verknüpft sind, sollten sie nicht getrennt voneinander betrachtet werden.

Damit die Konsumenten ihre Lieferanten tatsächlich selber bestimmen können, sind Produktion, Handel und Vertrieb des Stroms von dessen Transport zu trennen. Konsumenten und Produzenten benötigen einen diskriminierungsfreien Netzzugang. Für den Stromwettbewerb ist es entscheidend, dass das Verteil- und Übertragungsnetz als natürliches Monopol unabhängig von den Stromproduzenten funktioniert. Deshalb ist die (unabhängige) nationale Netzgesellschaft Swissgrid für den Betrieb und den Ausbau des Übertragungsnetzes zuständig. Alle Marktteilnehmer sollen das Netz auf allen Ebenen zu fairen Bedingungen nutzen können. Gleichzeitig müssen die Netzbetreiber wirtschaftlich in der Lage sein, das Netz sicher zu betreiben und bedarfsgerecht auszubauen; dafür müssen ihnen die Netznutzungsgebühren eine angemessene Rendite ermöglichen. Die Eidgenössische Elektrizitätskommission (ElCom) ist für die Einhaltung dieser Spielregeln zuständig. Sie überwacht den freien Netzzugang, die Netznutzungstarife und die Versorgungssicherheit.

Die Strommarktliberalisierung brachte eine stärkere Entkopplung der effektiven von den kommerziellen Stromflüssen. Die effektiven Stromflüsse werden heute zunehmend vom Stromhandel bestimmt, der sich an den Produktions- und Verkaufspreisen orientiert, was für den Netzbetrieb eine zusätzliche Herausforderung bedeutet. Dazu kommen weitere Belastungen: Verschiedene Länder und Regionen sind stark von Importen abhängig, und die leistungsstarken regionalen Windparks produzieren unregelmässig Strom. Da weder in der Schweiz noch im übrigen Europa die Übertragungsnetze in den letzten Jahren im nötigen Masse ausgebaut wurden, werden die Netze immer häufiger an den physikalischen Grenzen betrieben. Damit steigt die Gefahr von Störungen, im schlimmsten Fall sogar von Blackouts.

Stromaustausch und Stromhandel

Der internationale Stromaustausch ist für die schweizerische Elektrizitätsversorgung von grosser Bedeutung. Infolge des saisonalen Verlaufs der Wasserführung variiert die Stromproduktion über das Jahr hinweg: Im Sommer exportiert die Schweiz in der Regel Strom, im Winter weist sie eine Deckungslücke auf. Der Stromaustausch ermöglicht es den Elektrizitätsunternehmen, die Kraftwerke optimal einzusetzen und die Reservekapazitäten gering zu halten. Die Schweiz konnte ihre Produktionsüberschüsse lange Zeit exportieren und profitiert auch heute noch vom Stromhandel, indem sie Energie in Schwachlastzeiten importiert und im Gegenzug Spitzenenergie exportiert. Wegen der steigenden Einspeisung von Solarstrom in Deutschland ist dies zeitweise nicht mehr möglich, wenn viel Solarstrom anfällt. Trotzdem nimmt die Schweiz im europäischen Kontext immer noch eine bedeutende Stellung ein. Längerfristig kann sie diese Stellung aber nur behaupten, wenn die Elektrizität auch tatsächlich transportiert werden kann.

Der Stromhandel mit dem Ausland hat der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft in den letzten

Jahren jeweils Nettoerträge in Milliardenhöhe eingebracht. Der Einbezug der Schweiz in den europäischen Stromverbund ist nicht nur für die Volkswirtschaft von Bedeutung, sondern auch für die Versorgungssicherheit. Die Schweiz hat deshalb ein grosses Interesse, dass ihre Elektrizitätswirtschaft im europäischen Stromhandel eine wichtige Rolle spielen kann. Voraussetzung dazu ist, dass das schweizerische Übertragungsnetz in das europäische Netz integriert bleibt. Deshalb muss die schweizerische Ausbauplanung in den europäischen Planungsprozess eingebunden werden.

Immer mehr Entscheide, die für die hiesige Elektrizitätswirtschaft wichtig sind, werden jedoch nicht mehr in der Schweiz oder in den Fachgremien der europäischen Stromwirtschaft gefällt, sondern in den Gremien der EU. Solange die Schweiz kein bilaterales Stromabkommen mit der EU abgeschlossen hat, ist sie nicht in allen relevanten EU-Gremien vertreten. Die Verhandlungen zu einem solchen Abkommen gestalten sich schwierig, obwohl auch die EU ein Interesse an einem erfolgreichen Abschluss hat.

Netzintegration von Strom aus erneuerbaren Quellen

Die neuen erneuerbaren Energien, insbesondere Wind- und Sonnenenergie, werden künftig einen grösseren Beitrag zur Stromversorgung leisten. Dementsprechend werden sie die Struktur der Netze mitbestimmen. Die Einspeisung der erneuerbaren Energien erfolgt dezentral und, soweit es sich um Strom aus Photovoltaik- und Windkraftwerken handelt, fluktuierend. In Teilnetzen mit hoher dezentraler Einspeisung kann sich die Stromflussrichtung sogar ändern. Dies stellt neue Anforderungen an den Betrieb der Netze. Bei Solarkraftwerken hängt die Leistung linear von der Sonneneinstrahlung ab, bei Windkraftwerken steigt sie mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Zudem muss bei Windkraftwerken bei Windgeschwindigkeiten von ca. 90 km/h mit einer plötzlichen Volllastabschaltung gerechnet werden.

Grosse Mengen an Solar- oder Windstrom können nur dann in das Netz integriert werden, wenn ausreichende Speicherkapazitäten vorhanden sind. Um mit solchen Energiequellen ebenso viel Strom zu erzeugen wie mit fossilen oder nuklearen Kraftwerken, muss bei Windkraftwerken etwa das Vierfache, bei Photovoltaikanlagen etwa das Zehnfache an Leistung installiert werden. Je nach Witterung speisen Photovoltaik- und Windkraftwerke fast keinen oder gegen 100 Prozent der gesamten installierten Leistung in das Netz. Dieses muss demnach so ausgelegt sein, dass es diese enormen Leistungsschwankungen aufnehmen kann. Zudem braucht es Ersatzkraftwerke oder Speichermöglichkeiten, um die Schwankungen auszugleichen.

Produzieren Photovoltaik und Wind wenig Strom, können in der Schweiz Speicherkraftwerke die fehlende Energie produzieren. Ist die Erzeugung hingegen höher als die Nachfrage, kann die überschüssige Leistung durch Hochpumpen von Wasser, durch Zurückfahren der Speicherkraftwerke, durch zeitliche Verlagerung des Stromkonsums, allenfalls auch durch Export abgebaut werden. Genügt dies nicht, müssen Photovoltaik- oder Windanlagen vom Netz genommen werden. Je mehr Strom fluktuierend erzeugt wird, desto eher wird das heutige Stromsystem an seine Flexibilitätsgrenzen kommen, sofern die Pumpspeicherung nicht massiv ausgebaut wird.

Speichermöglichkeiten

Die Speicherung von überschüssigem Strom ist in jedem Fall mit beachtlichen Kosten und Energieverlusten verbunden. Obwohl intensive Anstrengungen unternommen werden, neue Speichertechnologien zu entwickeln, steht vorderhand die bewährte Pumpspeicherung als wirtschaftlich günstigste Lösung im Vordergrund. Weitere Speichermöglichkeiten sind Batterien, Superkondensatoren, die Umwandlung von Strom in Druckluft, Wasserstoff sowie in künstliche flüssige oder gasförmige Energieträger oder in mechanische Energie. Alle diese Speichertechnologien haben ihre spezifischen Anwendungsbereiche, die im Falle von technologischen Durchbrüchen an Bedeutung gewinnen könnten.

Netztechnische Innovationen

Die heutigen Stromnetze sind überwiegend Wechselstromnetze. Die Netzbetreiber haben deshalb nur geringe Möglichkeiten, die Stromflüsse zu kontrollieren. Dies kann dazu führen, dass einzelne Übertragungsleitungen überlastet sind, während andere Leitungen im gleichen Gebiet unter ihren Kapazitätsgrenzen arbeiten. Mit Hilfe von flexiblen Wechselstromübertragungssystemen (so genannte FACTS-Einrichtungen, Flexible Alternative Current Transmission Systems) können die Stromflüsse aktiv beeinflusst werden. Damit lassen sich Leitungsüberlastungen verhindern und Übertragungsverluste reduzieren.

Eine Alternative zu Wechselstromsystemen sind Gleichstromsysteme. Insbesondere wird die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) für Stromtransporte über grosse Strecken, für Seekabel und für die Verbindung asynchroner Netze verwendet. Die HGÜ erfordert allerdings kosten- und platzintensive Umrichterstationen. Da die Vernetzung bei Gleichstrom viel schwieriger zu bewerkstelligen ist als bei Wechselstrom, wird die HGÜ heute vorwiegend für Punkt-zu-Punkt-Übertragungen verwendet. Wirtschaftlich ist die Gleichstromübertragung heute ab Distanzen von 500 Kilometern, bei Seekabeln kann sie sich ab 40 Kilometern lohnen. Neu entwickelte Systeme reduzieren die Break-Even-Distanz auf etwa 150 Kilometer. Zurzeit laufen Untersuchungen, ein neues europäisches Höchstspannungsnetz (European DC Super Grid) aufzubauen, das vorwiegend mit Gleichstrom betrieben werden soll. Für die schweizerische Stromversorgung wäre der Anschluss an ein derartiges Höchstspannungsnetz wesentlich. Mit einem solchen Netz liesse sich auch Strom nach Europa transportieren, der in grossen Solarkraftwerken in den nordafrikanischen Wüsten erzeugt wird.

Ein wichtiger Bestandteil des künftigen Stromnetzes wird das «Smart Grid» sein, das Stromerzeugung, Stromverbrauch und Stromspeicherung vernetzt. Damit kann die Energieeffizienz im Netz erhöht werden. Es stellt jedoch keine eigentliche Revolution dar, da das heutige Netz bereits zahlreiche «smarte» Komponenten enthält. Die Integration von dezentralen Stromerzeugungsanlagen in intelligente Netze wird es der Elektrizitätswirtschaft erlauben, die Nachfrage mit Hilfe von Preissignalen an die fluktuierende Produktion anzupassen. Die Kunden erhalten die Möglichkeit, mit zeitlichen Verbrauchsverschiebungen auf Preissignale zu reagieren. Den Energieversorgern wiederum erlaubt das Smart Metering, die Nachfrage besser zu steuern und über die bisherigen Mittel wie Nachtstromtarif und Rundsteuerung hinaus eine Verstetigung der Nachfrage zu erreichen.

Was Nachhaltigkeit konkret bedeutet

Nachhaltigkeit gilt heute als weitgehend anerkanntes Ziel der Energiepolitik. Was Nachhaltigkeit konkret bedeutet, lässt sich allerdings nicht so ohne weiteres definieren. Aufgabe der Wissenschaft ist es daher nicht, konkrete Handlungsempfehlungen zu geben, sondern Nachhaltigkeitsbewertungen zu erarbeiten, die rationale Entscheide ermöglichen. Dabei gilt es insbesondere im Auge zu behalten, dass wir unsere Entscheide stets unter Unsicherheit fällen müssen.

Nachhaltigkeit gilt heute als anerkanntes politisch-gesellschaftliches Leitbild. Der Begriff «Nachhaltigkeit» bezieht sich dabei auf die Definition, wie sie im Bericht der World Commission on Environment and Development (WCED) 1987 erstmals festgehalten wurde (Brundtland-Bericht). Nachhaltigkeit umfasst dabei die intra- und intergenerationale Gerechtigkeit, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen menschlichem Wohlergehen und knappen, fragilen ökologischen Ressourcen sowie den bewussten Umgang mit Unsicherheiten und Risiken.
Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Ziele sich aus dieser Definition für die Gestaltung des künftigen Elektrizitätssystems ergeben und wie sich die Aspekte der Nachhaltigkeit als Grundlage für Bewertungen nutzen lassen, damit anhand von Nachhaltigkeitsbewertungen politisch-gesellschaftliche Entscheide getroffen werden können.

Grundsätzliche Überlegungen

Der Brundtland-Bericht selbst definiert nur allgemeine Ziele: Eine (globale) Gesellschaft ist dann nachhaltig, wenn sie allen Menschen ein menschenwürdiges Leben ermöglicht und dieses Ziel auf eine Weise realisiert wird, dass künftige Gesellschaften bei der Realisierung ihrer eigenen Ziele nicht mit unvertretbaren Risiken konfrontiert werden. Im Hinblick auf die Kriterien, die sich daraus für die künftige Stromversorgung ergeben, sind für die Akademien der Wissenschaften Schweiz folgende Überlegungen massgebend:

1. Trotz der offenen Definition kann der Begriff Nachhaltigkeit nicht beliebig verwendet werden. Nachhaltigkeitsbewertungen bewegen sich daher in einem mehr oder weniger eng abgesteckten Rahmen. Folgt man der am Earth Summit 1992 in Rio etablierten Idee, geht es um das Wohlergehen aller unter Berücksichtigung der Fragilität und Endlichkeit der Ökosysteme. Entsprechend lassen sich sozio-kulturelle und institutionelle Aspekte nicht aus solchen Bewertungen ausklammern.

2. In Bezug auf die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit existieren heute gut etablierte Grundregeln: Langfristig sollen in erster Linie erneuerbare Ressourcen genutzt werden. Diese sind im Rahmen ihrer Regenerationsrate zu nutzen, wobei die Abgabe von Umwandlungsprodukten wie etwa Abgase die Regenerationsfähigkeit der Ökosysteme nicht übersteigen darf. Die Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen ist legitim, wenn eine adäquate Substitution möglich ist. Grossrisiken, die zu langfristig irreparablen Schäden führen können, sind zu vermeiden.

3. Nachhaltigkeit und damit auch Nachhaltigkeitsbewertungen sind immer mit Unsicherheiten verbunden. Energiesysteme sind komplex, dynamisch und weisen Rückkoppelungen auf (gesellschaftliche Reaktionen, Technologieentwicklungen, Marktmechanismen, politische Steuerungsinstrumente, internationale Vernetzung, individuelles Verhalten). Gerade bei den gesellschaftlichen Lernprozessen wird deutlich, wie diese Unsicherheiten die Nachhaltigkeitsbewertungen einschränken: Welche Lernprozesse in den Bereichen Technologieentwicklung, Steuerungsinstrumente oder Verhalten stattfinden werden, lässt sich kaum abschätzen. Lernprozesse können iterativ erfolgen oder revolutionäre Durchbrüche beinhalten.

4. Auch wenn die allgemeine Definition der Nachhaltigkeit relativ klar ist, gibt es grosse Interpretationsspielräume, wie die Diskussion um die Kernkraft zeigt. Nachhaltigkeitsbewertungen können daher nur Eckpunkte setzen. Die von der Politik häufig verlangte «Gewissheit» kann auch mit dem besten Bewertungsverfahren nicht erreicht werden.

5. Aus der Tatsache, dass Nachhaltigkeit mit Unsicherheiten behaftet ist, darf aber nicht geschlossen werden, dass Nichtstun die beste Lösung wäre. Die Konsequenz ist vielmehr, dass auch die Forderung nach Flexibilität und Diversität erfüllt werden muss: Entscheide sind so zu fällen, dass sie künftige Innovationen und Lernprozesse nicht behindern.

Wenn Nachhaltigkeit mit Unsicherheit behaftet ist und Nachhaltigkeitsziele unterschiedlich interpretiert werden können, kann die Wissenschaft der Gesellschaft auch keine konkreten Handlungsempfehlungen geben. Aufgabe der Wissenschaft ist es vielmehr, die gesellschaftlich ausgehandelten Nachhaltigkeitsziele kritisch zu analysieren und allenfalls weitere vorzuschlagen. Ihre Aufgabe ist es auch, Risiken zu identifizieren, zu qualifizieren und zu quantifizieren sowie Massnahmen zur Risikominimierung vorzuschlagen. Die Wissenschaft macht zudem auf die Grenzen von Bewertungs- und Zielsystemen aufmerksam und strebt so einen undogmatischen Umgang mit diesen Instrumenten an.

Kriterien für die Nachhaltigkeitsbewertung

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz haben sich für die weiteren Überlegungen folgende Kriterien als allgemeine Orientierungshilfe zu Grunde gelegt:

- **Menschliches Wohlergehen:** Das Elektrizitätssystem soll einen Beitrag zur individuellen Lebensqualität leisten. Allen Menschen wird Zugang zur Stromversorgung gewährt, die Elektrizität kann für die Realisierung von wichtigen materiellen und immateriellen Gütern genutzt werden und gesundheitliche Schäden werden vermieden. Risiken werden gerecht über die Generationen verteilt: Die heutige Generation sollte keine Entscheide fällen, von denen sie alleine profitiert, während die kommenden Generationen die Risiken tragen. Da gesellschaftliche Partizipation zum Wohlergehen gehört, setzt ein nachhaltiges Stromsystem gesellschaftliche Akzeptanz voraus.

- **Versorgungssicherheit:** Eine sichere Stromversorgung ist ein zentrales Anliegen der schweizerischen Energiepolitik. Dazu müssen die Energieträger, die dazugehörigen Produktionsanlagen und die dafür notwendigen Materialien in ausreichendem Mass zur Verfügung stehen. Zudem muss das Netz stabil bleiben, wenn das grösste Kraftwerk oder die stärkste Leitung ausfallen sollten oder wenn grosse Mengen an fluktuierendem Strom eingespiesen werden.

- **Ökologische Verträglichkeit:** Ein nachhaltiges Energiesystem berücksichtigt ökologische Risiken. Eine vorrangige Stellung kommt dem Klimaschutz zu: Wenn der Klimawandel auf ein tragbares Mass begrenzt werden soll, dürfen weltweit bis Ende dieses Jahrhunderts die

CO_2-Emissionen nur noch 1 Tonne pro Jahr und Kopf betragen. Für die Schweiz bedeutet dies: Bis 2050 müssen die jährlichen CO_2-Emissionen aus der Energienutzung von heute rund 6 Tonnen pro Kopf (ohne Flugverkehr) auf 2 Tonnen (inkl. Flugverkehr) zurückgehen.

- **Ökonomische Effizienz:** Elektrizität ist Produktionsfaktor und Konsumgut zugleich. Wirtschaft und Konsumenten haben ein Interesse an kostengünstigem Strom. Aus Sicht der Nachhaltigkeit sollte der Strom aber nicht einfach möglichst billig angeboten werden. Vielmehr soll der Strompreis die tatsächlichen Kosten unter Einschluss der Risiken widerspiegeln. Ökonomische Effizienz setzt einerseits Kostenwahrheit voraus, andererseits aber auch, dass die Rahmenbedingungen nicht verzerrt sind und die Marktregulierung wettbewerbsneutral ausgestaltet wird.

- **Vermeidung von systemgefährdenden Risiken:** Jedes Elektrizitätssystem hat seine spezifischen Risiken. Es liegt in der Verantwortung jeder Generation, autonom über den Umgang mit diesen Risiken zu entscheiden. Es sollen jedoch keine Risiken eingegangen werden, die einen Zusammenbruch des gesellschaftlichen Systems bewirken können.

Da Infrastrukturentscheidungen im Energiebereich eine Perspektive von 40 bis 50 Jahren haben und entsprechend mit Unsicherheiten behaftet sind, müssen zudem zwei weitere Forderungen berücksichtigt werden:

- **Flexibilität:** Die Entwicklungspfade, die wir heute beschreiten, dürfen künftige, bessere Pfade nicht ausschliessen. Da wir diese besseren Pfade noch nicht kennen, muss das System flexibel an neue Entwicklungen angepasst werden können.

- **Diversität:** Da ein System grundsätzlich leichter veränderbar ist, wenn es auf vielen Pfeilern aufbaut, ist bei der künftigen Stromversorgung auf Diversität zu achten.

Quantitative Nachhaltigkeitsbewertung der Stromerzeugung

Die Wissenschaft hat in den letzten Jahren verschiedene Systeme entwickelt, mit denen die Nachhaltigkeit von Stromerzeugungstechnologien bewertet werden kann. Der bis heute umfassendste Versuch erfolgte im EU-Projekt «NEEDS», das den Betrachtungszeitraum bis 2050 abdeckt. Das NEEDS-Projekt untersuchte neben fossilen Kraftwerken (Steinkohle, Braunkohle und Erdgas) und nuklearen Technologien (Druckwasser- und Brutreaktoren) auch eine Reihe von regenerativen Ressourcen (Biomasse, Solarkraft und Wind). Insgesamt wurden 26 Technologien unter den Gegebenheiten in Deutschland, Frankreich, Italien und der Schweiz untersucht. In einer breit abgestützten Untersuchung wurden zunächst eine Reihe von Kriterien und Indikatoren definiert, die anschliessend quantifiziert und gewichtet wurden:

- 11 ökologische Indikatoren zu den Bereichen Energieressourcen und Bodenschätze, Klimawandel, Auswirkungen auf das Ökosystem bei normalem Betrieb beziehungsweise im Falle eines schweren Unfalls und spezielle chemische sowie mittel- und hochradioaktive Abfälle.

- 9 ökonomische Indikatoren zu den Auswirkungen für die Kunden (Strompreis), die Gesamtwirtschaft (Beschäftigung, Stromerzeugungsautonomie) und die Energieversorger (finanzielle Risiken, Betrieb).

- 16 soziale Indikatoren zu den Bereichen Sicherheit und Zuverlässigkeit, politische Stabilität und Legitimität, Risikowahrnehmung (Normalbetrieb und Unfälle), terroristische Bedrohung sowie Wohnumfeldqualität (Landschaftsbild, Lärm).

Bei der Bewertung der Stromerzeugungstechnologien anhand dieser Indikatoren lassen sich klare Muster feststellen:

- Ökologische Aspekte: Die externen Gesamtkosten sind bei Wasserkraft, Kernkraft und Windenergie

am niedrigsten. Die Nuklearenergie ist jedoch wegen den radioaktiven Abfällen und möglichen Unfällen umstritten; die damit verbundenen Risikoaversions- und Wahrnehmungsaspekte beeinträchtigen die Akzeptanz der Kernkraft.

- Ökonomische Aspekte: Aus Sicht der Kunden und unter Schweizer Bedingungen produzieren die Kernenergie und die Wasserkraft den billigsten Strom. Die hohen Investitionskosten stellen jedoch ein Risiko für Investoren dar, da diese Technologien über lange Zeit stabile Betriebsbedingungen erfordern. Einige der neuen erneuerbaren Energien sind ökonomisch vielversprechend, haben aber entweder ein verhältnismässig niedriges Potenzial (Biogas) oder sind noch nicht ausgereift (tiefe Geothermie).

- Soziale Aspekte: Die geringsten gesundheitlichen Auswirkungen haben Wasserkraft, Kernenergie und Windenergie. Photovoltaik findet in der Öffentlichkeit die grösste Akzeptanz und schafft die meisten direkten Arbeitsplätze pro produzierter Kilowattstunde, jedoch nicht in allen Branchen. In energieintensiven Sektoren kann der Effekt auch negativ sein.

Im Hinblick auf die bevorstehenden Entscheide sind gewichtete Gesamturteile von besonderem Interesse. Solche lassen sich zum Beispiel mit Hilfe von Multi-Kriterien-Analysen (MCDA) erstellen. Je nach Gewichtung der Indikatoren fällt die Nachhaltigkeitsbewertung unterschiedlich aus, sodass es keine «richtigen» oder «falschen» Ergebnisse gibt. Werden wirtschaftliche Aspekte stärker gewichtet, geht dies in der Regel zu Lasten der erneuerbaren Energien. Eine stärkere Gewichtung der ökologischen Aspekte geht hingegen zu Lasten der fossilen Energien. Eine Betonung der sozialen Aspekte schliesslich ist für die Kernenergie nachteilig.

Der Einfluss der menschlichen Risikobewertung

Ein entscheidender Faktor bei der Wahl zwischen verschiedenen Technologien ist die unterschiedliche Wahrnehmung von Chancen und Risiken in Bevölkerung und Politik. Müssen Alternativen bewertet und zwischen ihnen entschieden werden, setzt dies in der Regel voraus, dass Kriterien gegeneinander abgewogen werden müssen, die sich teilweise widersprechen.

Bei diesem Prozess spielen die Eigenheiten der menschlichen Informationsverarbeitung eine zentrale Rolle. Die psychologische Forschung unterscheidet zwischen einem raschen «Bauchgefühlmodus» (System I) und einem langsamer arbeitenden «analytischen Modus» (System II). Die System-I-Verarbeitung geschieht automatisch und führt zu sehr schnellen, intuitiven, emotionalen Bewertungen. Sie ist stammesgeschichtlich sehr alt und dient primär der eigenen Sicherheit, indem sie hilft, Risiken sofort zu erkennen und zu meiden. Studien zeigen, dass Informationen zu Risiken besonders stark beachtet und für glaubwürdig gehalten werden und daher auch besser in Erinnerung bleiben.

Das analytische System II, bei dem Fakten abgewogen und logisch untersucht werden, arbeitet bewusst und langsam. In vielen Fällen dominiert das System I über das stammesgeschichtlich jüngere System II. Dies ist der Grund, warum sich Menschen oft über die falschen Dinge besorgt zeigen. Es erklärt auch, warum manchmal rasch entschieden wird und Konsequenzen zu wenig mitbedacht werden, oder warum langfristige Risiken wie der Klimawandel zugunsten anderer Prioritäten weniger bedrohlich wirken.

Rationale Entscheide beruhen auf dem Zusammenspiel beider Systeme. Beide Arten der Informationsverarbeitung spielen daher bei den Entscheiden, die von der Bevölkerung oder von der Politik getroffen werden müssen, eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Die politischen Grundsatzentscheide von Bundesrat und Parlament

Der Bundesrat und das Parlament haben im vergangenen Jahr einen wichtigen Grundsatzentscheid getroffen: Erstens soll der Strom effizienter genutzt und der Verbrauch in Richtung des Szenarios «Neue Energiepolitik» beeinflusst werden. Zweitens sollen die bestehenden Schweizer Kernkraftwerke am Ende ihrer sicherheitstechnischen Betriebsdauer nicht ersetzt werden.
Für die künftige Stromerzeugung hat der Bundesrat die drei Angebotsvarianten «Fossil zentral und Erneuerbar», «Fossil dezentral und Erneuerbar» sowie «Erneuerbar» definiert. Der Bundesrat befürwortet demnach einen Ausbau der Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen sowie nötigenfalls der fossilen Stromproduktion (primär Wärmekraftkopplungsanlagen, sekundär Gaskombikraftwerke) und der Importe. Alle drei Untervarianten sehen den gleichen massiven Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen unter weitgehender Ausschöpfung der technischen Potenziale vor.
Für die Akademien der Wissenschaften Schweiz stellt sich nun die Frage, wie dieser Grundsatzentscheid hinsichtlich der auf den vorangegangenen Seiten formulierten Nachhaltigkeitsziele einzuordnen ist.

- **Menschliches Wohlergehen:** Das Szenario «Neue Energiepolitik» muss trotz der angestrebten Reduktion der Nachfrage keinen Verlust an Wohlergehen bedeuten, sofern Wohlergehen nicht nur quantitativ über den materiellen Konsum definiert wird. Bei den Angebotsvarianten müssen die Auswirkungen auf die Gesundheit und das Landschaftsbild sowie die indirekten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekte berücksichtigt werden. Stützt sich die Stromproduktion mehrheitlich auf erneuerbare Energien, ist mit tendenziell höheren Strompreisen und Strompreisspitzen zu rechnen. Zudem steigt bei gegebener Netzstruktur das Risiko von Stromunterbrüchen. Der fossilen Stromproduktion wiederum fehlt die breite Akzeptanz, was zu sozialen und politischen Konflikten führen dürfte. Allerdings weisen auch die energiepolitischen Instrumente, mit denen der Verbrauch gemäss der «Neuen Energiepolitik» gesenkt werden soll, ein erhebliches Konfliktpotenzial auf.

- **Versorgungssicherheit:** Bislang ist unklar, wie sich die «Neue Energiepolitik» auf die Versorgungssicherheit auswirken würde. Das angestrebte Ziel einer national ausgeglichenen Energiebilanz wird wohl kaum zu erreichen sein. Offen ist insbesondere, in welchem Ausmass die «Neue Energiepolitik» Stromimporte voraussetzt und inwieweit sie den Stromhandel behindert oder unterstützt. Unklar ist schliesslich auch, zu welchem Preis der vorgesehene Importbedarf auf dem europäischen Markt gedeckt werden kann.

- **Ökologische Verträglichkeit:** Die Angebotsvariante «Erneuerbar» schneidet gemäss den Berechnungen des Bundesamtes für Energie mit CO_2-Emissionen in der Schweiz von lediglich 1 Million Tonnen im 2050 am besten ab. Wird ein Teil des Stroms dezentral in Wärmekraftkopplungsanlagen erzeugt, erhöhen sich die CO_2-Emissionen auf 3 bis 4 Millionen Tonnen. Mit Gaskombikraftwerken würden die CO_2-Emissionen auf 5 bis 6 Millionen Tonnen steigen.

- **Ökonomische Effizienz:** Die ökonomischen Auswirkungen der «Neuen Energiepolitik» wurden bislang nur grob abgeschätzt. So bezifferte der Bundesrat die volkswirtschaftlichen Mehrkosten bei einem Verzicht auf neue Kernkraftwerke pro Jahr auf 0,4 bis 0,7 Prozent des Bruttoinlandprodukts verglichen mit dem Szenario «Weiter wie bisher» und dem Ersatz der bestehenden Kernkraftwerke. Mit welchen Instrumenten die «Neue Energiepolitik» realisiert werden kann, ist noch unklar. Bei den Varianten, die den Ausbau der Erneuerbaren forcieren, besteht die Gefahr, dass wettbewerbsverzerren-

de Subventionen ausgerichtet werden. Inwiefern für energieintensive Wirtschaftszweige Übergangslösungen gefunden werden müssen, ist ebenfalls offen.

- **Vermeidung von systemgefährdenden Risiken:** Bei der Risikobeurteilung einer Energietechnologie ist zu berücksichtigen, ob diese eine Systemgefährdung darstellen kann. Ein Systemrisiko ist beispielsweise ein schwerer Nuklearunfall. Auch ein mittlerer Temperaturanstieg von deutlich mehr als 2 °C stellt ein Risiko für das «System Schweiz» dar. Diese zwei Risiken sind allerdings so verschieden, dass sie kaum miteinander verglichen werden können. Durch die Abschaltung der Schweizer Kernkraftwerke kann ein schwerer Nuklearunfall in der Schweiz ausgeschlossen werden. Demgegenüber hat die Schweiz auf den Klimawandel nur einen geringen direkten Einfluss. Problematisch aus Sicht der Nachhaltigkeit ist, wenn den künftigen Generationen erhebliche Risiken aufgebürdet werden: So müssen in jedem Fall die angefallenen nuklearen Abfälle entsorgt werden, und der Klimawandel wird die späteren Generationen stärker treffen als die heutige. Risiken gibt es grundsätzlich bei jeder Technologie: Die Wasserkraft etwa hat ein grosses, wenn auch räumlich und zeitlich beschränktes Schadenspotenzial. Und erneuerbare Energien verursachen Umweltrisiken wie Sonderabfälle, deren Tragweite heute noch nicht abgeschätzt werden kann.

Die Beurteilung des politischen Grundsatzentscheides anhand der allgemeinen Nachhaltigkeitsziele ergibt ein uneinheitliches Resultat. Unstrittig ist, dass auf der Nachfrageseite die Effizienzstrategie der «Neuen Energiepolitik» mit dem Nachhaltigkeitsziel übereinstimmt, Ressourcen möglichst schonend zu nutzen. Wie die entsprechende Politik dazu aussehen soll, ist allerdings noch weitgehend unklar. Nicht vergessen werden darf in diesem Zusammenhang, dass die Schweiz zwar im Vergleich mit anderen entwickelten Volkswirtschaften einen geringen Energieverbrauch und eine tiefe Umwelt- und Klimabelastung aufweist, dass diese Bilanz aber trügerisch ist: Berücksichtigt man auch den Energieverbrauch, der mit der Einfuhr von Grundstoffen, Materialien und Fertigprodukten verbunden ist, zeigt sich, dass die Schweiz in Tat und Wahrheit eine 9000-Watt- beziehungsweise eine 10-Tonnen-CO_2-Gesellschaft ist.

Ein weniger klares Bild ergibt sich auf der Angebotsseite: Die verschiedenen Varianten des Bundesrates weisen in Bezug auf die definierten Nachhaltigkeitsziele ihre spezifischen Stärken und Schwächen auf. Wie die einzelnen Angebotsvarianten umgesetzt werden sollen, ist ebenfalls noch weitgehend offen. Unklar ist schliesslich auch, inwieweit der politische Grundsatzentscheid den zentralen Aspekt der Unsicherheit berücksichtigt und inwieweit er der Forderung nach Diversität und Flexibilität gerecht wird. Der anstehende Umbau des schweizerischen Elektrizitätssystems muss diese Offenheit jedoch berücksichtigen: Unsere heutigen Entscheide sind Entscheide unter Unsicherheit. Auch bei einer konsequenten Orientierung an den Kriterien der Nachhaltigkeit gibt es keine risikofreien Entwicklungspfade.

Die Position der Akademien Schweiz

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz begrüssen, dass der Bund einen klaren Rahmen für die Energiepolitik der nächsten Jahre schaffen will. Sie unterstützen grundsätzlich die in der neuen Energiepolitik enthaltene Ausrichtung, Energie effizienter zu nutzen und die erneuerbare Stromproduktion auszubauen. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Integration der schweizerischen Stromversorgung in den europäischen Markt. Der Verzicht auf neue Kernkraftwerke wird kontrovers beurteilt.

Ist die Rede von der künftigen Elektrizitätsversorgung, dreht sich die Diskussion meist nur um die Stromerzeugung. Dies wird der Komplexität der Problematik jedoch in keiner Weise gerecht. Faktoren wie Nachfragestrukturen, Stromnetz und Aussenbeziehungen bestimmen die Stromzukunft genauso wie die vielfachen Abhängigkeiten und Rückkopplungen innerhalb des Stromsystems.
Die Akademien der Wissenschaften Schweiz weisen auf die gewaltigen Herausforderungen hin, die mit der neuen Energiepolitik verbunden sind, und machen insbesondere auf die Umsetzungsproblematik aufmerksam. Sie plädieren für einen breiten gesellschaftlichen Diskurs, damit eine gemeinschaftlich getragene neue Energiepolitik erarbeitet werden kann. Im Folgenden werden – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einige wesentliche Aspekte dazu beleuchtet.

Nachfrageentwicklung

Eine Nachfrageentwicklung, wie sie im Szenario «Neue Energiepolitik» postuliert wird, soll unabhängig vom beschlossenen Verzicht auf neue Kernkraftwerke angestrebt werden.

Bei tiefem Stromverbrauch ist die Stromversorgung bei gleicher Produktionsstruktur tendenziell sicherer, wirtschaftlicher und weniger umweltbelastend als bei hohem Verbrauch. Damit ein tiefer Verbrauch erreicht werden kann, braucht es neben griffigen Massnahmen zur effizienten Bereitstellung von Energie, die häufig mit Stromeinsatz verbunden ist, auch tiefgreifende Verhaltensänderungen. Dies muss aber nicht zu einem Verlust an Lebensqualität führen.
Elektrizität wird künftig eine noch wichtigere Rolle für die Energieversorgung spielen als heute. Damit die «Neue Energiepolitik» Erfolg haben kann, ist es notwendig, dass die Nachfrage nach Strom zurückgeht beziehungsweise deutlich weniger ansteigt, als es bei einer Fortschreibung der bisherigen Entwicklung geschehen würde. Dies gelingt nur, wenn der Preis deutlich ansteigt. Es ist davon auszugehen, dass die Preise der fossilen Energieträger in Zukunft real zunehmen werden. Dies dürfte sich auch auf den Strompreis in der Schweiz auswirken. Es ist jedoch fraglich, ob dieser Anstieg (zusammen mit anderen Massnahmen wie zum Beispiel Vorschriften) ausreichen wird, um die angestrebten Ziele zu erreichen. Sollte dies nicht der Fall sein, müsste der Preis mit Hilfe von Steuern oder Abgaben zusätzlich erhöht werden.
Der Bundesrat hat mit seinem Entscheid vom 18. April 2012 ein erstes Paket an Effizienzmassnahmen bestimmt. Sie zielen aus Sicht der Akademien der Wissenschaften Schweiz in die richtige Richtung, insbesondere weil sie nicht nur die Stromnutzung betreffen, sondern auch Gebäude, Industrie,

Dienstleistungen und Mobilität einschliessen. Allerdings werden damit die durch die «Neue Energiepolitik» angestrebten Stromeinsparungen bis 2050 erst zu 55 Prozent erreicht. Aus diesem Grund sind weitere Massnahmen notwendig. In diese Richtung zielt auch die angekündigte Prüfung einer Energieabgabe.

Erneuerbare Stromversorgung

Der Strombedarf soll soweit als möglich aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden. Dazu sind die in der Schweiz ökologisch und ökonomisch verantwortbaren Produktionspotenziale der erneuerbaren Energien umfassend zu nutzen. Da fluktuierende Energiequellen an Bedeutung gewinnen werden, müssen auch die Speicherkapazitäten ausgebaut und das Stromnetz angepasst werden.

Der Aufbau einer Stromversorgung, die sich grösstenteils auf erneuerbare Energien abstützt, ist ein anspruchsvolles Unterfangen. Dies gilt sowohl für den Ausbau der Wasserkraft wie auch für jenen der neuen erneuerbaren Energien, die erst am Anfang ihrer Entwicklung stehen. War bisher die Stromversorgung alleinige Aufgabe der Elektrizitätswirtschaft, werden mit dem Ausbau der dezentralen erneuerbaren Energien immer mehr auch Private zu Stromanbietern – mit entsprechenden Konsequenzen für das Stromsystem. Eine Vollversorgung der Schweiz aus erneuerbaren Quellen ist aufgrund der vorhandenen technischen Potenziale grundsätzlich möglich. Es genügt aber nicht, nur die Energiemengen bereitzustellen. Die stark fluktuierende Erzeugung muss auch ins Netz integriert werden können.

Eine Herausforderung stellen die Widerstände in der Bevölkerung dar. Es ist zu befürchten, dass sie sich wesentlich verstärken werden, wenn im grossen Stil Windkraft- und Photovoltaikanlagen gebaut werden sollen. Wenn es nicht gelingt, eine von der Bevölkerungsmehrheit getragene Strategie zu erarbeiten, ist der angestrebte Umbau des Energiesystems zum Scheitern verurteilt.

Der (für die Zukunft erwartete) Strompreis ist auch für die Entwicklung des Angebots wesentlich. Die neuen erneuerbaren Energien werden sich längerfristig nur dann auf breiter Front durchsetzen, wenn sie wettbewerbsfähig sind. Es wäre volkswirtschaftlich nicht tragbar, die angestrebte Vollversorgung aus erneuerbaren Quellen durch Subventionen erzwingen zu wollen. Die Strompreise beeinflussen auch die Investitionen in die Entwicklung dieser Technologien. Werden für die Zukunft keine höheren Preise erwartet, gibt es kaum Investitionsanreize, sodass mögliche Kostensenkungen gar nicht realisiert werden.

Die zunehmende Einspeisung von Strom aus fluktuierenden Quellen hat starke Auswirkungen auf das Elektrizitätssystem. Bisher war das Stromangebot auf den Bedarf ausgerichtet: Laufkraftwerke und Kernkraftwerke deckten die Grundlast, die Speicherkraftwerke die Mittel- und Spitzenlast. Mit der steigenden fluktuierenden Einspeisung sinkt der Anteil der Grundlast. Bei einer mehrheitlich erneuerbaren Stromversorgung können die Grundlastkraftwerke nicht mehr permanent mit gleicher Leistung produzieren. Es braucht deshalb Kraftwerke, die flexibel eingesetzt werden können, neben Speicherkraftwerken sind dies vor allem Gaskombikraftwerke und Gasturbinen. Allerdings sinkt bei einem flexiblen Einsatz deren Jahresnutzungsdauer und damit ihre Wirtschaftlichkeit, da der Marktpreis weiterhin durch billigere Grenzproduzenten, vor allem Kern- und Kohlekraftwerke, bestimmt wird und nur während kurzen Perioden hohe Erlöse erzielt werden können. Wenn sich die Back-up-Anlagen wirtschaftlich nicht rechnen, besteht das Risiko, dass ungenügend in sie investiert wird.

Bei der Gesetzgebung und der Organisation des Strommarkts ist deshalb im Auge zu behalten, dass die Elektrizitätsversorgung künftig zu einem bedeutenden Teil auf fluktuierender Einspeisung beruhen wird.

Förderstrategien für erneuerbare Energien

Die kostendeckende Einspeisevergütung soll laufend an die aktuellen Gestehungskosten angepasst werden. Mittelfristig soll sie ergänzt werden, zum Beispiel mit einer Quotenregelung mit Zertifikatehandel oder mit einem Ausschreibemodell, die eine grössere Marktnähe und eine stärkere dynamische Anreizwirkung für Innovationen aufweisen.

Der Umbau des Energiesystems stellt hohe Anforderungen an das energiepolitische Instrumentarium. Neben Steuern, Lenkungsabgaben und Vorschriften kommen auch Förderinstrumente in Frage, mit denen erneuerbare Energien gezielt unterstützt werden. Heute ist in der Schweiz und in verschiedenen europäischen Ländern die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) etabliert; sie ist effektiv, um Technologien anzuschieben, aber wirtschaftlich nicht effizient. Die Akademien der Wissenschaften Schweiz unterstützen die Vorschläge des Bundesrates vom 18. April 2012 zur Anpassung der KEV und für weitere Massnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien.

Mittelfristig entscheidend ist, dass das gewählte Förderinstrument die technische und wirtschaftliche Entwicklung beschleunigt. Dies wird am ehesten mit einer Quotenregelung (inklusive Zertifikatehandel) erreicht. Auch ein Ausschreibemodell wäre denkbar. Zusätzlich sollten Energieproduktionsformen belohnt werden, die kontinuierlich oder flexibel abrufbaren Strom erzeugen. Neben der Anwendungsförderung muss weiterhin in Forschung und Entwicklung investiert werden.

Aspekte einer erneuerbaren Stromversorgung im Ausland

Stromimporte sollen möglichst aus erneuerbaren Quellen stammen. Damit Investitionen schweizerischer Elektrizitätsversorgungsunternehmen in ausländische Anlagen für die schweizerische Stromversorgung relevant werden können, braucht es entsprechende Durchleitungskapazitäten, einen integrierten europäischen Strommarkt sowie ein geeignetes Stromabkommen mit der EU.

Die Schweiz entwickelt sich immer mehr zum Stromimporteur und zwar nicht nur wie bereits seit längerem im Winter, sondern zunehmend auch über das ganze Jahr hinweg betrachtet. Dieser Importbedarf wird noch während längerer Zeit andauern, wie auch die bundesrätlichen Energieszenarien bestätigen. Der Verzicht Deutschlands, Österreichs und Italiens auf die Kernkraft und die wegen des Klimawandels angestrebte Reduktion der fossilen Stromerzeugung lassen die Vermutung zu, dass Strom in Europa künftig knapper wird. Dass die Schweiz ihre Stromlücke alleine mit Importen deckt, ist deshalb aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit nicht empfehlenswert.

Wenn Importe unabwendbar sind, dann sollen sie nicht aus Anlagen erfolgen, die in der Schweiz abgelehnt werden. Mit dem Ausstieg aus der Kernkraft ist der Import von Nuklearstrom ebenso unglaubwürdig wie der Import fossil erzeugten Stroms. Grundsätzlich soll daher erneuerbar erzeugte Elektrizität eingeführt werden.

Investitionen in solarthermische Anlagen in Südeuropa oder Windfarmen in Nordeuropa werden deshalb – falls verfügbar – für die schweizerischen Elektrizitätsunternehmen zu einer bedenkenswerten Option. Damit solche Investitionen tatsächlich einen Beitrag an die schweizerische Stromversorgung leisten können, müssen jedoch mehrere Bedingungen erfüllt sein: Es braucht Durchleitungskapazitäten, um den Strom in die Schweiz zu führen, der europäische Strommarkt muss integriert sein, und der Zugriff auf die entsprechenden Produktionsanlagen muss durch ein bilaterales Stromabkommen gesichert werden. Dieses muss dem Umstand Rechnung tragen, dass die EU-Richtlinie über die Förderung von erneuerbaren Energien (RES) anspruchsvolle Ausbauvorgaben für die einzelnen Länder vorgibt. Da die EU von der Schweiz entsprechend grosse Anstrengungen verlangen wird, muss im bilateralen Stromabkommen Strom aus schweizerischen Investitionen im EU-Raum als schweizerische Produktion anerkannt werden.

Fossile Stromerzeugung

Auf den Bau von fossilen Kraftwerken im Inland soll möglichst verzichtet werden. Werden sie aus Gründen der Netzstabilität trotzdem gebaut, sollen die CO_2-Emissionen vollständig kompensiert werden, damit die Erreichung der Schweizer Klimaziele nicht in Frage gestellt wird. Investitionen in ausländische fossile Kraftwerke sind nicht sinnvoll.

Die Energiestrategie 2050 des Bundes zeigt, dass sich in allen Szenarien eine Stromlücke öffnet, die sich selbst mit starken nachfragesenkenden Massnahmen und einer massiven Förderung der erneuerbaren Energien nicht vollständig decken lässt. Da auf den Bau von neuen Kernkraftwerken verzichtet werden soll, könnten sich die inländischen Stromproduzenten veranlasst sehen, als Ersatz für die Kernkraftwerke neue Gaskombikraftwerke oder fossile Wärmekraftkopplungsanlagen zu bauen.
Die Akademien der Wissenschaften Schweiz halten ein solches Ausweichen für verfehlt; sie befürworten vielmehr den konsequenten Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion. Ihrer Ansicht nach kommen fossile Kraftwerke nur als Notlösung in Frage und sind aus Sicht des Klimaschutzes nur zulässig, wenn sie die Erreichung der Schweizer Klimaziele nicht gefährden. Dazu müssen die CO_2-Emissionen vollständig kompensiert werden, so wie dies das geltende CO_2-Gesetz und der Bundesrat verlangen. Die Akademien der Wissenschaften Schweiz müssen allerdings zur Kenntnis nehmen, dass der Bundesrat in seiner Information vom 18. April 2012 die fossile Stromerzeugung zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit als notwendig erachtet.
Investitionen in ausländische fossile Kraftwerke bedeuten eine Auslagerung der Klima- und Umweltverantwortung und sind daher aus ethischen Gründen abzulehnen.

Kernkraft

Damit die Schweizer Kernkraftwerke bis zu ihrer Abschaltung sicher weiterbetrieben werden können, sollen die Sicherheitsforschung fortgeführt und die daraus resultierenden Massnahmen umgesetzt werden. Dies gilt auch für die Forschung zur Endlagerung der radioaktiven Abfälle und die Vorbereitungen zur Umsetzung der entsprechenden Lagerkonzepte. Die Forderung nach Diversität und Flexibilität impliziert ebenfalls, dass die nukleare Forschung weitergeführt wird, insbesondere hinsichtlich der Entwicklung neuer Reaktorkonzepte. Sie dient auch der Ausbildung des notwendigen Fachpersonals.

Für die dicht besiedelte Schweiz ist es zwingend notwendig, dass sich kein Reaktorunfall mit systemgefährdenden Auswirkungen ereignet. Investitionen in Forschung und Nachrüstungen sollen helfen, die Risiken der heutigen Kraftwerke auf tiefem Niveau zu halten. Anlagen der Generation III/III+ gelten zwar als viel sicherer, fallen aber aufgrund der politischen Grundsatzentscheide und der vermuteten mangelnden Akzeptanz in der Bevölkerung als Option zumindest mittelfristig ausser Betracht.
Die von den Kernkraftwerken produzierten radioaktiven Abfälle müssen von der Umwelt für sehr lange Zeit ferngehalten werden. Mit der Tiefenlagerung ist grundsätzlich ein Konzept vorhanden, wie diese Abfälle entsorgt werden könnten. Dennoch besteht auch in diesem Bereich weiterer Forschungsbedarf.

Stromnetz

Beim Stromnetz besteht bereits heute ein grosser Ausbau- und Erneuerungsbedarf. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich durch die neue Energiepolitik. Damit die Ausbauten zeitgerecht realisiert werden können, sollen die Bewilligungsverfahren gestrafft werden.

Ein leistungsfähiges Netz ist für die Versorgungssicherheit ebenso wichtig wie die Stromproduktion und hat daher eine erhebliche volkswirtschaftliche Bedeutung. Eine bewusste Inkaufnahme von Schwachstellen wäre unverantwortlich.
Beim Übertragungsnetz besteht aufgrund des fortgeschrittenen Alters der Anlagen ein grosser Investitionsbedarf für Erneuerungen. Zusätzlich ergibt sich ein Ausbaubedarf, damit neue Pumpspeicherkraftwerke integriert und Engpässe behoben werden können. Der Bundesrat hat die dringend zu realisierenden Leitungsbauprojekte im Sachplan Übertragungsleitungen festgelegt. Diese Projekte sollen nun zügig realisiert werden. Damit die notwendigen Ausbauten zeitgerecht getätigt werden können, soll das Bewilligungsverfahren gestrafft werden.
Die effiziente und sichere Integration der dezentralen und teilweise fluktuierenden Stromeinspeisung

erfordert sowohl einen Ausbau des bestehenden Netzes als auch die Entwicklung eines intelligenten Netzes (Smart Grid) auf der Verteilebene. Zudem wird mit steigender Einspeisung in die unteren Netzebenen die Koordination zwischen Übertragungsnetz und Verteilnetzen wichtiger.

Stromspeicherung

Wenn die Stromerzeugung aus neuen erneuerbaren Quellen einen grösseren Anteil zur Energieversorgung leisten soll, müssen entsprechende zentrale und dezentrale Speichermöglichkeiten geschaffen werden.

Windkraft und Photovoltaik produzieren grösstenteils nicht so, wie es der Nachfrage entspricht. Da Einspeisung und Verbrauch jederzeit übereinstimmen müssen, lässt sich eine Stromversorgung, die sich überwiegend auf erneuerbare Quellen abstützt, nur realisieren, wenn auch entsprechend ausreichende Speicherkapazitäten zur Verfügung stehen. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke spielen daher auch künftig eine wichtige Rolle für die Stromversorgung. Nach der Realisierung der im Bau oder in Projektierung befindlichen Anlagen wird eine Pumpleistung von etwa 5 GW zur Verfügung stehen. Dies genügt noch nicht, um bei einer voll erneuerbaren Stromversorgung die Leistungsüberschüsse aus der Windkraft und der Photovoltaik zu verwerten. Zudem muss künftig mehr Energie vom Sommer auf den Winter umgelagert werden. Deshalb muss nicht nur die Produktionskapazität, sondern auch die Speicherkapazität erhöht werden.
Die Pumpspeicherung ist heute die kostengünstigste Möglichkeit zur Stromspeicherung. Allerdings ändert sich ihr Einsatz: Bisher diente sie in erster Linie dazu, billigen Strom aus Kohle- und Kernkraftwerken zu verwerten. Künftig geht es darum, zeitlich schlecht planbare Leistungsüberschüsse aus der Windkraft und der Photovoltaik abzubauen und höhere Regelleistungen einzuspeisen. Die wirtschaftlichen Bedingungen der Pumpspeicherung wandeln sich also.

Andere Speichertechnologien wie Druckluftspeicherkraftwerke, Erzeugung und Lagerung von Wasserstoff durch Elektrolyse oder Akkumulatoren sind heute nur in besonderen Fällen konkurrenzfähig. Thermische Energiespeicher (Wärmespeicher) werden in solarthermischen Kraftwerken standardmässig eingesetzt und erlauben eine Stromproduktion praktisch rund um die Uhr. Bei einer stark dezentralisierten Stromerzeugung erscheint eine dezentrale Speicherung grundsätzlich sinnvoll, insbesondere wenn die Produzenten von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen in den Strommarkt einbezogen werden sollen.

Effizienz und Suffizienz

Die Realisierung eines nachhaltigen Elektrizitätssystems setzt wesentlich verbesserte Effizienz und höhere Suffizienz voraus. Bund und Kantone sollen zusammen mit den beteiligten Akteuren die dazu geeigneten Rahmenbedingungen schaffen.

Wenn das Elektrizitätssystem auf erneuerbare Energieträger umgestellt werden soll, muss der Strom wesentlich effizienter genutzt werden als heute. Damit das Wirtschaftswachstum, die Bevölkerungszunahme sowie die Elektrifizierung im Wärme- und Transportsektor nicht zu einer Erhöhung des Verbrauchs führen, müssen Effizienz- und Suffizienzgewinne möglichst realisiert werden. Dabei spielen folgende Faktoren eine wichtige Rolle:

- Strompreis: Bleibt der Strompreis auf dem heutigen Niveau, werden Effizienz- und Suffizienzpotenziale kaum realisiert. Eine markante Preiserhöhung ist bereits zu erwarten, wenn Marktverzerrungen beseitigt werden. Wissen die Nutzer, dass die Preise längerfristig substanziell steigen werden, haben sie einen Anreiz, in Effizienzmassnahmen zu investieren. Allerdings kann ein hoher Strompreis auch zu einer Verlagerung auf fossile Energieträger führen.

- Verbrauchsmuster: Veränderte Verbrauchsmuster können einen wesentlichen Beitrag zur effizien-

teren Stromnutzung leisten. Neben höheren Strompreisen lassen sie sich auch durch neue Stromangebote, «smart metering», veränderte Alltagsroutinen und gesellschaftliche Werthaltungen erzielen.

- Soziale Lernprozesse: Effizienz und Suffizienz gehören noch nicht zu den sozialen Grundnormen. Die geforderten Effizienz- und Suffizienzziele lassen sich aber ohne neue Normbildungen nicht erreichen. Dies ist auf unterschiedlichen Ebenen möglich: Lebensqualität wird nicht mehr primär über den Konsum von Gütern definiert, suffiziente Verhaltensweisen erhalten eine höhere soziale Stellung und Energielabels regen zum sparsamen Energieverbrauch an.

- Politische Instrumente: Welche sozialen Lernprozesse stattfinden, lässt sich weder steuern noch vorhersagen. Es ist aber möglich, durch geeignete Rahmenbedingungen Lernprozesse zu fördern. Daneben können auch gezielte Massnahmen ergriffen werden: Gerätestandards werden kontinuierlich verschärft, bestimmte Stromanwendungen werden verboten oder der Stromverbrauch wird mit einer Lenkungsabgabe direkt beeinflusst.

Liberalisierung des Strommarkts

Die Marktöffnung für alle Kundenkategorien soll so rasch als möglich umgesetzt werden. Die schweizerische Netzgesellschaft Swissgrid soll eine unabhängige Unternehmensstruktur erhalten.

Seit 2009 ist in der Schweiz der freie Marktzugang für Grosskunden möglich. Nun muss der Markt auch noch für alle anderen Konsumenten geöffnet werden. Dabei geht es nicht nur um die freie Wahl des Lieferanten. Der Strommarkt kann nur dann unverzerrt funktionieren, wenn die Strompreise die wirklichen Kosten widerspiegeln. Bisher nicht berücksichtigte externe Kosten müssen daher in die Preisbildung einfliessen. Damit wird auch die ökonomische Grundlage für die «Neue Energiepolitik» geschaffen.

Die Strommarktliberalisierung erfordert die Trennung von Produktion und Netz, da dieses ein natürliches Monopol darstellt, das reguliert werden muss. Das Übertragungsnetz wird spätestens 2013 in das Eigentum der nationalen Netzgesellschaft Swissgrid übergehen. Damit der Markt funktionieren kann, ist es wichtig, dass Swissgrid künftig unabhängig von den Stromproduzenten und regionalen Verteilern handeln kann.

Die Liberalisierung hat beachtliche Auswirkungen auf die Stromwirtschaft. Mit der Ausgliederung des Übertragungsnetzes ändert sich ihre Struktur. Die volle Marktöffnung führt für Versorger und Stromkonsumenten zu neuartigen Geschäftsbeziehungen, nicht zuletzt weil es künftig möglich sein soll, dass die Stromkunden auf Preissignale reagieren können. Schliesslich stellt sich mit Blick auf die Liberalisierung und die steigende dezentrale Stromeinspeisung auch die Frage, ob der sehr kleinräumige Aufbau der Elektrizitätswirtschaft mit vielen kleinen Elektrizitätsversorgungsunternehmen zukunftsfähig ist.

Die schweizerische Stromversorgung im europäischen Kontext

Das schweizerische Elektrizitätssystem soll im Interesse der sicheren und wirtschaftlichen Versorgung des Landes im europäischen System integriert bleiben. Dazu ist ein Stromabkommen mit der EU unverzichtbar.

Das schweizerische Elektrizitätssystem ist heute integraler Bestandteil des europäischen Strommarkts. Dieser wird sich aus technischen, wirtschaftlichen und politischen Gründen stark verändern. Dies hat auch Folgen für die Schweiz: Die Entwicklung in der EU beeinflusst nicht nur die schweizerische Gesetzgebung, sondern auch die Versorgungssicherheit, die Stromflüsse und damit die Anforderungen an das Übertragungsnetz. Für die Schweiz ist es wichtig, dass sie an ein künftiges europäisches Höchstspannungsnetz (Super Grid) angeschlossen wird. Die Abhängigkeit ist aber nicht einseitig: Auch

der europäische Stromverbund ist auf ein leistungsfähiges schweizerisches Stromsystem angewiesen. Die Schweiz und die EU haben deshalb beide ein Interesse an einer intensiven Zusammenarbeit. Damit die schweizerischen Elektrizitätswerke und Behörden bei der Weiterentwicklung des europäischen Verbundsystems mitwirken können, braucht es das bereits erwähnte bilaterale Abkommen. Sollte dieses nicht zustande kommen, entstehen für die Schweiz beträchtliche Risiken. Die Verhandlungen zu einem solchen Stromabkommen sind zwar im Gange, gestalten sich aber schwierig. So hat die Schweiz die von der EU geforderte Marktliberalisierung bisher nicht realisiert. Dazu kommen zwei weitere strittige Punkte: der schweizerische Durchleitungsvorrang für Elektrizität aus französischen Kernkraftwerken und die Übernahme der EU-Richtlinie über die Förderung von erneuerbaren Energien (RES).

Neuausrichtung der Elektrizitätsversorgungsunternehmen

Die Elektrizitätversorgungsunternehmen sollen neue Businessstrategien entwickeln, welche Rendite und verkaufte Menge voneinander entkoppeln. Dazu braucht es Geschäftsfelder und Dienstleistungen, die auf Effizienz ausgerichtet sind.

Wenn Wirtschaftsakteure Erfolg haben wollen, müssen sie sich an veränderte Rahmenbedingungen anpassen. Wird das bisherige Elektrizitätssystem so umgestaltet, dass die eingangs formulierten Ziele bis 2050 erreicht werden, stehen den Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) weitreichende Anpassungsaufgaben bevor. Obwohl letztlich jede Unternehmung diese Aufgabe für sich selbst wird lösen müssen, sollen dabei folgende Punkte beachtet werden:

- Strukturen: Ob die anstehenden Aufgaben mit der bestehenden Struktur der Elektrizitätswirtschaft gelöst werden können, ist fraglich, weil sowohl die Diversifizierung der Produktion als auch die Eingliederung in den europäischen Strommarkt zu veränderten Rahmenbedingungen führen werden.

- Businessmodelle: Alle EVU müssen sich auf zwei zentrale Herausforderungen einstellen: Der Strommarkt wird weiter liberalisiert. Und wenn Effizienz und Suffizienz zu zentralen Zielen werden, werden die EVU ihre Gewinne künftig nicht mehr primär über die Menge an verkauftem Strom erwirtschaften, sondern mit neuen Angebots- und Kundenbeziehungsmodellen.

- Investitionen: Dass die EVU einen Grossteil der Investitionen für den Umbau des Stromsystems leisten müssen, steht ausser Frage. Wo, in welche Anlagen und mit welchen Strategien sie investieren, bleibt im Rahmen der staatlichen Vorgaben letztlich eine betriebswirtschaftliche Entscheidung.

Forschung, Entwicklung und Lehre

Die energiebezogene Forschung, Entwicklung und Lehre sollen verstärkt werden. Dabei ist insbesondere auch die sozio-ökonomische Forschung substanziell auszubauen.

Die vorangehenden Überlegungen machen deutlich, dass der Umbau des Stromsystems mehrere Jahrzehnte erfordern wird. Dabei spielen die Fortschritte in Wissenschaft und Technik eine massgebende Rolle. Je effektiver Forschung und Entwicklung vorangetrieben werden, desto ökonomischer und ökologischer kann der Umbauprozess gestaltet werden.
Dabei geht es zunächst einmal um naturwissenschaftlich-technische Aspekte, etwa um verbesserte Energietechnologien (Photovoltaik, Biomasse) oder um neu zu entwickelnde Technologien (Stromspeicherung, Smart Grid, Geothermie, Kernreaktoren der Generation IV). Der technische Fortschritt ist eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung, dass die Infrastruktur zur Bereitstellung und Nutzung der Elektrizität ökonomisch und ökologisch verbessert werden kann.

Deshalb erfordert der Umbau des Elektrizitätssystems auf der anderen Seite auch einen massiven Ausbau der wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Forschung. Ökonomische Fragen betreffen etwa die volkswirtschaftlichen Auswirkungen, die Internalisierung externer Kosten oder die optimale Gestaltung von Lenkungsmassnahmen oder des Strommarkts. Ebenso relevant sind sozialwissenschaftliche Fragen etwa zum Konsumentenverhalten, zum Umgang mit Unsicherheiten und Risiken, zur Akzeptanz neuartiger Technologien, zur gesellschaftlichen Organisation (Selbstversorgung von Regionen, Innovationsfähigkeit von Strukturen) oder zu gesellschaftlichen Lernprozessen. Wichtig ist auch der Systemaspekt, der sich zum Beispiel in der Netzproblematik und in der internationalen Vernetzung äussert. Es gilt, die Komplexität des gesamten sozio-technischen Systems «Stromversorgung» mitsamt den Rückkopplungen zu verstehen.
Konkreter Forschungsbedarf besteht insbesondere bei folgenden Punkten:

- Entwicklung eines Energiesystemmodells, das alle Produktionsarten, die Übertragung und Speicherung des Stroms, die Importe und Exporte sowie den Verbrauch umfasst und Kosten, Risiken, Akzeptanz, Ressourcenverbrauch, wirtschaftliche Auswirkungen und Umweltbelastung berücksichtigt;

- Entwicklung von Szenarien, wie konkrete Vorgaben (Verfügbarkeit von Strom und Wärme, Preise, Umweltanforderungen) gesellschaftlich, ökonomisch und politisch umgesetzt werden können unter Berücksichtigung der möglichen internationalen Entwicklung;

- Elektrizitätsspeicherung sowie thermische beziehungsweise thermochemische Energiespeicherung: Entwicklung, Lebenszyklusanalyse, Kosten und Risiken;

- Optimierung der Materialflüsse sowohl bei häufigen als auch bei seltenen Materialien.

Die Schweiz verfügt mit den beiden ETHs, den Universitäten und den Fachhochschulen, mit einer innovativen Wirtschaft, aber auch mit bewährten Förderinstitutionen (Schweizerischer Nationalfonds SNF, Kommission für Technologie und Innovation KTI, Ressortforschung) über eine ausgezeichnete Basis, um die dringend nötigen Fortschritte zu erzielen. Eine kontinuierliche, verstärkte Förderung von Forschung und Entwicklung drängt sich nicht nur auf, weil so der Umbau des Stromsystems möglichst wirtschaftlich erfolgen kann, sondern weil sie auch zu einem Klima der Innovation beiträgt und so die schweizerische (Clean-Tech-)Industrie unterstützt. Die Akademien der Wissenschaften Schweiz begrüssen daher, dass der Bundesrat gemäss seinem Entscheid vom 18. April 2012 wieder vermehrt Mittel für Pilot- und Demonstrationsanlagen einsetzen will.
Der Um- und Ausbau des gesamten Energiesystems erfordert in der Forschung, der Entwicklung und der Umsetzung ausreichende Fachkräfte – ob Handwerker oder Forscherin. Lehre und Ausbildung sind entscheidende Faktoren für den Erfolg der Energiestrategie 2050 und sollten daher auf allen Ausbildungsstufen verstärkt werden.

Schlusswort

Der angestrebte Umbau des Elektrizitätssystems ist eine riesige Herausforderung. Erschwerend kommt hinzu, dass nicht nur die Stromversorgung auf erneuerbare Quellen umgestellt werden muss, sondern dass auch die fossilen Brenn- und Treibstoffe, die heute den überwiegenden Teil des Energieverbrauchs decken, langfristig durch erneuerbare Energien ersetzt werden müssen. Die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen ist eine Aufgabe, die mehrere Jahrzehnte dauern und grosse Investitionen erfordern wird. Sie ist umso schwieriger zu lösen, je länger mit der Umsetzung zugewartet wird. Es braucht dazu nicht nur einen technologischen Wandel, sondern auch einen gesellschaftlichen.

Der vorliegende Bericht hat massgebliche Handlungsfelder angesprochen und mögliche Optionen skizziert. Er zeigt auf, dass es keinen eindeutig vorgegebenen Weg gibt und dass alle Optionen neben Vorteilen immer auch Nachteile haben. Die grosse Aufgabe besteht darin, eine Balance zwischen den Vor- und Nachteilen zu finden. Zielkonflikte sind dabei nicht zu umgehen. Das betrifft nicht nur die Technologien, sondern auch die Menschen, die zu Recht eine ausgewogene Verteilung der Lasten und Nutzen erwarten. Da in einem demokratischen Land ein gesellschaftlicher Umbau nur freiheitlich vollzogen werden kann, wird die Schweiz nicht umhinkommen, einen «Gesellschaftsvertrag» für diesen Umbau zu erarbeiten – so wie sie das beispielsweise beim Aufbau der Altersvorsorge, dem nationalen Finanzausgleich oder der Realisierung der grossen Bahnprojekte bereits erfolgreich gemacht hat. Für ein derart umfassendes Vorhaben braucht es nicht nur einen starken politischen Willen, sondern auch entsprechende Rahmenbedingungen und den Willen vieler Akteure, ihren konkreten Beitrag zur Erreichung des gemeinsamen Ziels zu leisten.

Literatur

Akademien der Wissenschaften Schweiz, «Denk-Schrift Energie», 2007, Bern

Bundesamt für Energie BFE, «Energieperspektiven 2035 Band 1 – 5», 2007, Bern

Bundesamt für Energie BFE, «Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2010», 2011, Bern

Bundesamt für Energie BFE, «Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates – Aktualisierung der Energieperspektiven 2035», 2011, Bern

Hirschberg S., Bauer C., Schenler W., Burgherr P., «Nachhaltige Elektrizität: Wunschdenken oder bald Realität», Energie-Spiegel (ISSN 1661-5115), Nr. 20, Juni 2010

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, «Road Map Erneuerbare Energien Schweiz», SATW Schrift Nr. 39, 2006, Zürich

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, «Erneuerbare Energien – Herausforderungen auf dem Weg zur Vollversorgung», SATW Schrift Nr. 42, 2011, Zürich

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, «Wie soll Strom aus erneuerbaren Energien gefördert werden?», Kompaktbroschüre, 2012 (in Produktion), Zürich

Simmons-Süer, B., Atukeren, E., Busch, C., «Elastizitäten und Substitutionsmöglichkeiten der Elektrizitätsnachfrage», KOF-Studien Nr. 26, ETH Zürich, 2011, Zürich

Zur Entstehung des Berichts

Die Erarbeitung des Berichts erfolgte unter Leitung eines von den Akademien eingesetzten Steuerungsausschusses mit neun Mitgliedern. Insgesamt über 50 Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung verfassten die Grundlagen für die einzelnen Kapitel. Dabei wurden wissenschaftliche Erkenntnisse und neue einschlägige Arbeiten berücksichtigt. Auf eigene Forschungsarbeiten wurde verzichtet. Neben der hier vorliegenden Kurzfassung (in Deutsch und Französisch) existiert eine nur online und nur in Deutsch verfügbare Langfassung.

Die Kurzfassung sowie die Kapitel 1 und 6 der Langfassung wurden durch den Steuerungsausschuss des Projekts verfasst. Die Kapitel 2 bis 5 der Langfassung wurden in enger Zusammenarbeit mit den Expertinnen und Experten erstellt. Diese haben in unterschiedlicher Art und Tiefe mitgewirkt.

Kurz- und Langfassung wurden im Rahmen von Workshops im Juli 2011 und Januar 2012 einem mehrstufigen Review-Prozess unterworfen.

Disclaimer

Die Autoren der Langfassung und die Experten sind durch den Inhalt und die Schlussfolgerungen der Kurzfassung nicht gebunden.

Impressum

Steuerungsausschuss / Autoren

Irene Aegerter, Marco Berg, Paul Burger, Heinz Gutscher, Stefan Hirschberg, Eduard Kiener, Gebhard Kirchgässner, Christoph Ritz, Andreas Zuberbühler

Redaktion

Felix Würsten, Beatrice Huber

Experten

Reza Abhari, Göran Andersson, Silvia Banfi, Bruno Bébié, Konstantinos Boulouchos, Lucas Bretschger, Ulrich Bundi, Paolo Burlando, Rudolf Dinger, Christof Duthaler, Daniel Favrat, Klaus Fröhlich, Werner Graber, Maxi Grebe, Lino Guzzella, Matthias Gysler, Peter de Haan, Walter Hauenstein, Sandra Hermle, Michael Höckel, Peter Houzer, Peter Jansohn, Eberhard Jochem, Klaus Jorde, Tony Kaiser, Wolfgang Kröger, Kurt Küffer, Filippo Leuchthaler, Marco Mazzotti, Anton Meier, Martin Michel, Rudolf Minder, Peter Molinari, Andrew Neville, Stefan Nowak, Hans Pauli, Michel Piot, Christian Plüss, Horst-Michael Prasser, Reto Rigassi, Christian Schaffner, Anton Schleiss, Ulrich Schmocker, Hans-Jörg Schötzau, Renate Schubert, Heinrich Schwendener, Gunter Siddiqi, Michael Siegrist, Aldo Steinfeld, Samuel Stucki, Bernadette Sütterlin, Renato Tami, Jakob Vollenweider, Marcel Wickart , Alexander Wokaun, Hansruedi Zeller, Niklaus Zepf, Pieter Zuidema

Layout

Esther Volken, ProClim–

Bilder

KWO, R. Bösch; Christoph Ritz, ProClim–; Christoph Kull, OcCC; Fotolia

Akademien der Wissenschaften Schweiz: Zukunft Stromversorgung Schweiz – Kurzfassung
1. Auflage, Juli 2012
ISBN 978-3-907630-31-4

Die Kurzfassung und die Langfassung sind abrufbar unter www.akademien-schweiz.ch