

Energie

Autoren

Alexander Wokaun

General Energy Research Department, Paul Scherrer Institut

Bernhard Aebischer

Centre for Energy Policy and Economics, ETH

Christof Appenzeller

Klimatologie, MeteoSchweiz

Jean-François Dupont

Les Electriciens Romands

Timur Gül

Energy Economics Group, Paul Scherrer Institut

Lukas Gutzwiller

Bundesamt für Energie BFE

Pamela Heck

Natural Catastrophes, Swiss Re

Roland Hohmann

Redaktion, OcCC, Bern

Christoph Rutschmann

Holzenergie Schweiz

Niklaus Zepf

Axpo Holding AG



1. Einleitung

Einbettung

In der Schweiz hat der Energieverbrauch im 20. Jahrhundert stark zugenommen (Abb. 1). Seit 1945 hat er sich ungefähr verachtfacht. Der massive Anstieg ist auf die Zunahme des Verbrauchs von Erdölbrennstoffen, Treibstoffen und Gas zurückzuführen. Aber auch der Stromverbrauch hat kontinuierlich zugenommen, während der Anteil der Kohle stark abgenommen hat. 2004 setzte sich der Energieverbrauch wie folgt zusammen: Erdölbrennstoffe 31.3%; Erdgas 25.7%; Elektrizität 23.1%; Gas 12.1%; Übrige 7.8%. Die folgenden Ausführungen sind vor dem Hintergrund dieser Entwicklung zu verstehen.

Im Zusammenhang mit der Klimaänderung ist vom Energiesektor meistens als Verursacher die Rede. Als wichtigste Quelle menschgemachter Treibhausgase spielt er bei Massnahmen zur Emissionsreduktion eine zentrale Rolle. Im vorliegenden Bericht nehmen wir einen anderen Blickwinkel ein und betrachten den Energiesektor als Betroffenen der Klimaänderung. Wie wirken sich die Erwärmung und die Veränderungen bei den Niederschlägen auf die Energieproduktion und die Energienachfrage aus?

Auf den Energieverbrauch durch den Verkehr gehen wir bewusst nicht ein. Wir nehmen dabei an, dass der Verkehr weniger von den direkten Auswirkungen der Klimaänderungen betroffen ist als von den indirekten Auswirkungen (Klimapolitik).

Die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Energiesektor wurden für folgende Themen detaillierter behandelt:

- Veränderung der Energienachfrage (Sommer, Winter)
- Etablierte Produktion elektrischer Energie (Wasserkraft, Kernenergie)
- Neue erneuerbare Energien (Wind, Holz)
- Wirtschaftliche Aspekte (Energiepreise, Versicherungen)

Diese Auswahl ist nicht umfassend, sondern stellt eine Auswahl interessanter und relevanter Fragestellungen dar. Die Klimaänderung beeinflusst auch andere wichtige Bereiche des Energiesektors, wie beispielsweise die Versorgungssicherheit, die Sicherheit des Leitungsnetzes sowie die Chancen anderer Energieformen (Geothermie, Solarenergie etc.). Diese Themen wurden von der Arbeitsgruppe im Rahmen der beschränkten Auswahl nicht behandelt.

Der Energiesektor wird von anderen Rahmenbedingungen stärker beeinflusst als von der Klimaänderung. Beispielsweise haben in der Vergangenheit Einflussfaktoren wie das Wirtschaftswachstum, die technologische Entwicklung, die Bevölkerungszunahme und die Öffnung des Strommarktes den Energiesektor geprägt und werden ihn auch in Zukunft prägen.

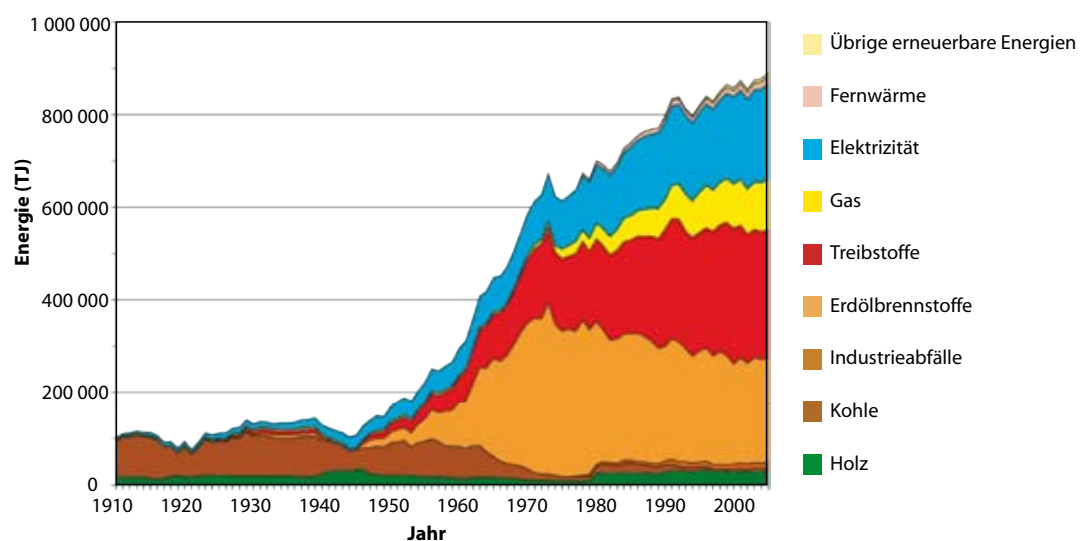


Abbildung 1: Energieverbrauch in der Schweiz, aufgeteilt nach den verschiedenen Energieträgern (1 TJ \approx 0.3 GWh). (Quelle: BFE Gesamtenergiestatistik 2005)

Überblick

Als Folge der Klimaänderung wird in Zukunft im Winter weniger Heizenergie und im Sommer mehr Kühlenergie verbraucht werden. Es kommt zu einer Verlagerung der Nachfrage von den Brennstoffen zu Strom. Die Zunahme der Klimatisierung ist vor allem im Dienstleistungssektor ausgeprägt.

Bei der Elektrizitätsbereitstellung wird sich die Klimaänderung nachteilig auf die Wasserkraft und die Kernenergie auswirken. Bei der Wasserkraft dürfte der geringere Wasserabfluss bis 2050 zu einer um 5–10% geringeren Produktion führen. Die Kernenergie wird bei ansteigenden Wassertemperaturen weniger Kühlleistung aus den Flüssen beziehen können. Im Sommer 2003 führte der Mangel an Kühlleistung zu einer um 4% geringeren Jahresproduktion. Hitzeperioden wie im Sommer 2003 werden bis 2050 zunehmen.

Die Chancen der neuen erneuerbaren Energien werden durch die Klimaänderung erhöht. Einerseits wird die Nachfrage nach CO₂-neutraler Energie als Reaktion auf die Klimaänderung und im Zuge der Klimapolitik steigen, andererseits nimmt die Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energien wegen der steigenden Preise der konventionellen Energien zu. Gemessen am heutigen Verbrauch kann der Beitrag der neuen erneuerbaren Energien zur Schweizer Stromversorgung bis 2050 auf über 10% (5500 GWh/a)¹ gesteigert werden. Die Windenergie kann dazu einen Beitrag leisten. Bei einem Vollausbau aller Windparkstandorte könnte das Gesamtpotenzial von 1150 GWh/a bis 2050 ausgeschöpft werden. Einzelanlagen weisen ein zusätzliches Potenzial von 2850 GWh/a auf. Bei einer Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit als Folge der Klimaänderung ist im Mittel mit einer höheren Stromproduktion aus Wind zu rechnen. Im Falle von Extremereignissen kann es zu Produktionsunterbrüchen an einzelnen Windparkstandorten kommen.

Auch die Holzenergie wird von der verbesserten Wettbewerbsfähigkeit der neuen erneuerbaren Energien profitieren. Das Energieholzpotenzial erlaubt in Zukunft mindestens eine Verdoppelung der heutigen Nutzung auf über 5 Mio. m³. Unter Berücksichtigung der langfristigen Trends der Waldwirtschaft und der Entwicklungen der Holzwirtschaft könnte das Potenzial sogar auf das Dreifache ansteigen. Die Konkurrenz bei der Holznutzung wird jedoch durch andere stoff-

liche Verwertungen zunehmen. Als Folge der Klimaänderung werden sich die Waldflächen ausdehnen und das Potenzial der Holzenergie weiter wachsen. Gleichzeitig wird die Akzeptanz der Holzenergie zunehmen, sofern Fortschritte bei der Reduktion der Feinstaubemissionen erzielt werden.

Insgesamt werden die höheren Energiepreise den Anstieg des Energieverbrauchs verlangsamen. Aus Überlegungen der Energieeffizienz wird es zu einer Verlagerung zu Strom kommen. Die Nachfrage nach CO₂-neutralen Energien (neue erneuerbare Energien und Kernenergie) wird zunehmen. Generell führt die Klimaänderung zu einer Zunahme der Unsicherheiten, weshalb Systeme mit kurzer Pay-back-Dauer bevorzugt werden.

Mit der Klimaänderung nimmt das Risiko von Betriebsunterbrüchen auch im Energiesektor zu. Beispiele dafür sind das Augusthochwasser 2005, welches zu Unterbrüchen bei den Laufkraftwerken führte, oder die hohen Wassertemperaturen im Sommer 2003, welche zu einer reduzierten Energieproduktion der Kernkraftwerke führte. Versicherungslösungen für Sachschaden und Produktionsausfälle werden an Bedeutung zunehmen.

Massnahmen

Die sich abzeichnende Versorgungslücke muss möglichst reduziert werden. Dazu ist das Energie-sparpotenzial voll auszuschöpfen und sind erneuerbare Energien sowie Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz verstärkt zu fördern. Das Stromeinsparpotenzial bis 2035 ist offensichtlich von den aufgewendeten Vermeidungskosten abhängig; das kumulierte Potenzial bis zu Kosten von 40 Rp./kWh wurde mit 10'000–15'000 GWh beziffert. Bei der Primärenergie liegt das theoretische Reduktionspotenzial bis 2050 insgesamt bei 60%, während die „Energieperspektiven 2035“ des Bundesamtes für Energie² und die „Road map“ der SATW³ ein technisches Einsparpotenzial von 20–25 % orten.

Die künftige Elektrizitätsproduktion soll CO₂-frei bleiben. Damit durch ein allfälliges neues fossiles Kraftwerk keine zusätzlichen Netto-Emissionen entstehen, müssten zusätzliche Massnahmen ergriffen werden (Verknüpfung mit massivem Wärmepumpeneinsatz und Einsparung im Heizenergiesektor, biologische Senken, Carbon Capture and Storage, Emissionshandel).

Diversifikation und Redundanz sind wirksame Massnahmen gegen die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Energiesektor. Ein breit abgestütztes Portfolio von konventionellen und erneuerbaren Energien schützt gegen Versorgungsengpässe bei einem einzelnen Energieträger. Ebenso ist z.B. ein Verbund von mehreren regionalen Biomassevergasungsanlagen mittlerer Grösse weniger störanfällig als ein einziges grosses Biomassekraftwerk. Bei den Verteilungsnetzwerken ist streng auf Redundanz zu achten, d.h. auf die Einrichtung von mindestens zwei unabhängigen Verbindungen zwischen je zwei Knoten.

Während die Notfallpläne der Landesversorgung darauf ausgelegt sind, kurzfristigen Engpässen zu begegnen, können sie langfristige Trends nicht auffangen. Deshalb ist es wichtig, Anpassungsmassnahmen auch seitens der Nachfrage ins Auge zu fassen. Neben technischen Massnahmen (z.B. Lastabwurf während Zeiten eines Spitzenverbrauchs an Elektrizität) ist hier auch das Verhalten der Konsumentinnen und Konsumenten entscheidend. Sie können den Bezug von Energiedienstleistungen, die nicht an den Produktionsprozess gekoppelt sind, an die Gegebenheiten eines geänderten Klimas anpassen.

Verknüpfung mit anderen Themen

Wasserwirtschaft

Wasserstände von Speichern und Laufgewässern; Konkurrenzsituation bei der Wassernutzung, u.a. mit der Landwirtschaft (Bewässerungsbedarf im Sommer)

Versicherungen

Verluste durch und Versicherung von Produktionsausfällen

Landökosysteme

Ausdehnung der Waldflächen, Zunahmen minderwertiger Energiehölzer

2. Energieverbrauch

Als Folge der Klimaänderung wird im Winter weniger Heizenergie und im Sommer mehr Kühlenergie verbraucht werden. Dadurch wird der Brennstoffverbrauch abnehmen und der Stromverbrauch zunehmen.

Ausgangslage

Im Rahmen der Energieperspektiven 2035/2050 des Bundesamtes für Energie (BFE) werden zwei Energieszenarien^{4,5} verglichen, um die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Energieverbrauch in der Schweiz zu untersuchen. Im Referenzszenario wird die Klimaänderung nicht berücksichtigt; im Szenario „Klima wärmer“ wird bis 2030 eine Temperaturzunahme von +2 °C in den Sommermonaten Juni bis August und von +1 °C in den übrigen Monaten gegenüber der Periode 1984–2002 angenommen. Die Strahlung nimmt um 5% zu.

Mit der Klimaänderung verändern sich auch meteorologische Kennwerte, die für die Berech-

nung des Wärme- und Klimatisierungsbedarfs wichtig sind. Als Folge der Erwärmung werden die Heizgradtage (vgl. Kasten) in der Heizperiode

Heizgradtage:

Differenz zwischen der erwünschten mittleren Raumtemperatur (20 °C) und der mittleren Aussentemperatur, summiert über alle Kalendertage mit $T < 12$ °C.

Kühlgradtage:

Differenz zwischen der mittleren Tagesaussentemperatur und der Referenztemperatur (18.3 °C), summiert über alle Kalendertage mit $T > 18.3$ °C.

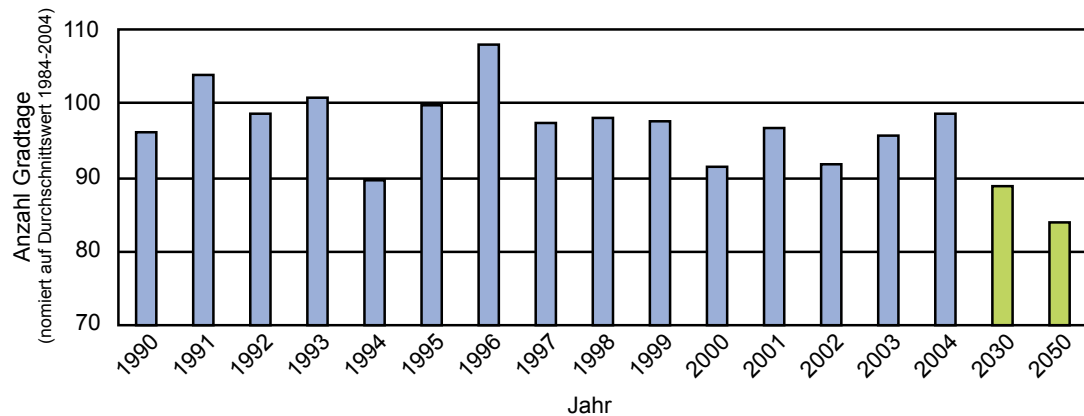


Abbildung 2: Jährliche Heizgradtage in den Jahren 1990–2004 normiert auf den Durchschnittswert der Periode 1984–2004. Für die Jahre 2030 und 2050 sind die erwarteten Werte des Szenarios „Klima wärmer“ aus den Energieperspektiven 2035/2050 des Bundesamtes für Energie BFE abgebildet.⁴

bis 2030 um rund 11% und bis 2050 um 15% gegenüber dem Durchschnittswert 1984–2004 abnehmen (Abb. 2).

Gegenläufig werden gemäss Energieperspektiven die Kühlgradtage (vgl. Kasten) in den Sommermonaten bis 2035 um rund 100% zunehmen. Für eine Temperaturzunahme von ungefähr 2.5 °C bis 2050 wie sie das Klimaszenario in diesem Bericht vorgibt wird eine Zunahme der Kühlgradtage von ungefähr 150% erwartet (Abb. 3).

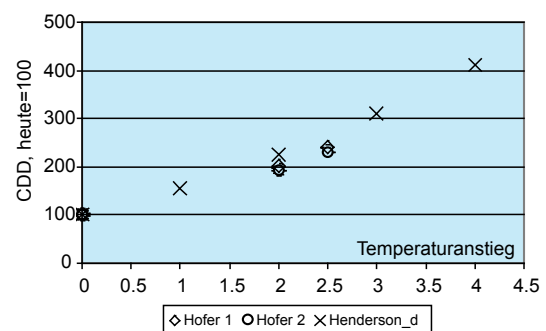


Abbildung 3: Veränderung der Kühlgradtage (CDD) bei einer Temperaturerhöhung in den Sommermonaten Juni–August zwischen 1 und 4 °C (100 = durchschnittliche Temperaturen heute in der Schweiz). Je nach Berechnungsart erhalten die Autoren leicht unterschiedliche Werte.⁴

Dienstleistungssektor

Die Nachfrage des Dienstleistungssektors⁴ nach Wärmeenergie wird in Zukunft auch ohne Klimaerwärmung wegen höherer Energieeffizienz und besserer Wärmedämmung leicht abnehmen. Trotz Wirtschaftswachstum wird der Bedarf bis 2035 von 22'200 GWh/Jahr auf 20'800 GWh/Jahr sinken. Nach 2035 dürften sich die Zunahme der Energieeffizienz und die Zunahme der beheizten Fläche ungefähr kompensieren, so dass die Wärmenachfrage im Jahre 2050 immer noch bei rund 20'800 GWh/Jahr liegen wird.

Als Folge der wärmeren Winter wird die Wärmenachfrage bis 2035 um weitere 13% auf ungefähr 18'000 GWh/Jahr sinken. Im Jahre 2050 liegt dann die Wärmenachfrage wegen der Klimaerwärmung ungefähr um 18% unter dem Referenzszenario (knapp über 16'700 GWh/Jahr). Der Strombedarf für Raumkühlung wird auch ohne Klimaänderung wegen der Zunahme von voll- und teilklimatisierten Flächen von ungefähr 1000 GWh/Jahr im Jahr 2000 auf rund 1500 GWh/Jahr im Jahr 2035 steigen. Der Anteil

der Klimatisierung an der Stromnachfrage steigt dadurch von 6% (2005) auf 7% (2035).

Wegen der Klimaänderung werden sowohl der spezifische Stromverbrauch der Raumkühlung als auch der Bedarf an Raumkühlung zusätzlich zunehmen. Die Zunahme der Kühlgradtage hat zur Folge, dass der spezifische Stromverbrauch für Raumkühlung um 46% zunehmen wird. Bezüglich der Nachfrage nach Raumkühlung wird angenommen, dass bis 2035 rund 50% der heute nicht klimatisierten Flächen teilklimatisiert und 50% der heute teilklimatisierten Flächen vollklimatisiert sein werden. Insgesamt wird die Stromnachfrage des Dienstleistungssektors für Klimatisierung bis 2035 auf ungefähr 3200 GWh/Jahr ansteigen und 115% über dem Referenzszenario liegen.

Bis 2050 werden die Kühlgradtage weiter zunehmen. Der spezifische Stromverbrauch für Raumkühlung steigt dadurch gegenüber dem Referenzszenario um ca. 70%. Aber auch der Anteil der klimatisierten Flächen wird weiter steigen, so dass bei einem Gebäudebestand wie im Referenzszenario die Stromnachfrage für die Klimatisierung zwischen 170% und 200% oder rund 2800 GWh/Jahr über der Nachfrage im Referenzszenario liegen dürfte.

Privathaushalte

Bei den Haushalten wird die Nachfrage nach Wärmeenergie ohne den Einfluss der Klimaerwärmung wegen verbesserter Energieeffizienz und Wärmedämmung von 55'000 GWh/Jahr im Jahr 2000 auf etwa 48'000 GWh/Jahr im Jahr 2035 abnehmen. Beim Warmwasserverbrauch beträgt die Abnahme 1 bis 2%. Als Folge der Klimaerwärmung wird der Raumwärmebedarf bis 2035 um weitere 10% abnehmen und bei 44'000 GWh/Jahr liegen. Bis 2050 wird sich der Heizwärmebedarf um zusätzliche 10% gegenüber dem Referenzverlauf reduzieren.

Als Folge der Klimaerwärmung wird im Sommer auch im Wohnungsbereich mit einer Zunahme des Stromverbrauchs für Klimatisierung gerech-

net. Geringe Mehrverbräuche sind auch bei den Kühl- und Gefriergeräten zu erwarten.

Für die Schweiz liegen derzeit keine gesicherten Daten zur Klimatisierung der Wohnbauten vor. Die Befunde aus anderen Ländern sind nur begrenzt auf die Schweiz übertragbar, da Bauweisen, Heiz- und Kältetechniken, Einstellungen und Verhaltensweisen in den meisten Regionen stark von den hiesigen Verhältnissen abweichen. In der Schweiz wird davon ausgegangen, dass der spezifische Kühlbedarf im Wohnbereich geringer sein wird als im Dienstleistungsbereich (andere interne Lasten, Tages-/Nachtnutzungsrhythmen etc.) und dass die Klimatisierung im Wohnbereich mit überwiegender Mehrheit dezentral über Kompakt- oder Splitanlagen (mit Luft- oder Wasserkühlung) erfolgen wird. Insgesamt wird bis 2050 mit einer Zunahme des Stromverbrauchs von rund 10% gegenüber dem Referenzszenario gerechnet (Abb. 4).

Der erwartete zusätzliche Strombedarf für die Kühlung kann beschränkt werden, wenn zunehmend innovative Konzepte wie free cooling (Abgabe der Wärme an die Luft während der Nacht), Geocooling (Abgabe der Wärme an das Erdreich über dieselben Erdsonden, die im Winter Umgebungswärme für die Wärmepumpen liefern) oder solare Kühlung eingesetzt werden.

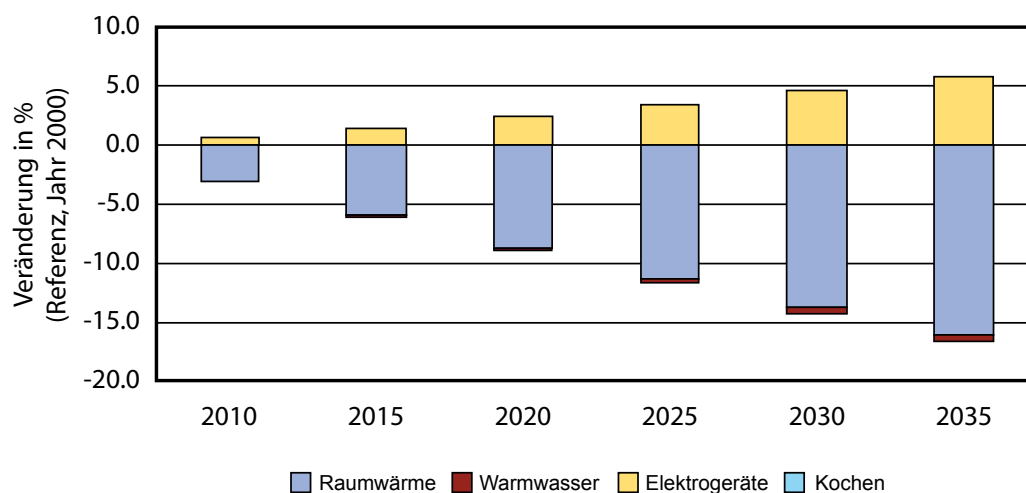


Abbildung 4: Veränderung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte nach Verwendungszwecken gegenüber dem Referenzszenario. (Heute: 75'000 GWh)⁵

3. Etablierte Elektrizitätsproduktion

Der inländische Strombedarf wird schon in naher Zukunft nicht mehr durch die heimische Energieproduktion gedeckt werden können. Bei der Wasserkraft wird es wegen der Klimaänderung zu Produktionseinbussen kommen. Vor dem Hintergrund der Klimaänderung muss die Versorgungslücke durch verstärkte Förderung von erneuerbaren Energien und Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz sowie durch neue, CO₂-freie Produktionskapazitäten geschlossen werden.

Ausgangslage

Die Stromproduktion der Schweiz ist dank den zwei Hauptpfeilern Wasserkraft und Kernenergie praktisch CO₂-frei. Der grösste Anteil aus konventionell-thermischen Anlagen stammt aus Kehrlichtverbrennungsanlagen und industriellen Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen.

Die Nettoleistung der fünf Kernkraftwerke beträgt 3220 MW. Sie produzieren jährlich etwa 25'000 GWh Strom, was rund 40% des Schweizer Strombedarfs entspricht. Um 2020 erreichen die ersten Kernkraftwerke das Ende ihrer Betriebsdauer. Die Produktionskapazitäten der Schweiz werden ab dann stark rückläufig sein. Gleichzeitig laufen die Stromimportverträge mit der Electricité de France (EDF) sukzessive aus.

Der Stromverbrauch dürfte in Zukunft weiter ansteigen. In der Vergangenheit nahm der Stromverbrauch bei einem BIP-Wachstum von 1% um 1.8% zu. Das BFE rechnet bis 2035 mit einem abgeschwächten Wachstum von 22.3% gegenüber 2003 bei einer Weiterführung der heutigen Politik. Im Falle der Einführung einer CO₂-Abgabe wäre das Wachstum leicht höher (+23.2%), da die beabsichtigte Steigerung der Energieeffizienz mit einer Zunahme des Stromverbrauchs einhergeht. Sofern sich der lineare Trend fortsetzt, wird die Stromnachfrage bis 2050 um rund 33% höher liegen als im Jahr 2003. Die Axpo⁶ kommt in ihren Szenarien zu leicht höheren Werten (Abb. 5). Die Bandbreite der verschiedenen Szenarien zeigt die Unsicherheiten bezüglich der künftigen Stromnachfrage.

Ab 2020 bis 2030 wird der inländische Strombedarf nicht mehr durch die heimische Stromproduktion und die bestehenden Importverträge gedeckt werden können. Ab 2012 wird im Winterhalbjahr der Stromimport den Stromexport regelmässig übersteigen.

Klimaänderung

Die Klimaänderung ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Stromproduktion. Die Wasserkraft ist stark abhängig vom Wasserangebot (Niederschlag

und Schmelzwasser), das unmittelbar durch die Klimaänderung beeinflusst wird. Die Kernenergie ist auf ausreichende Mengen an Kühlwasser angewiesen.

Die etablierten Energien Wasserkraft und Kernenergie werden durch die künftige Klimaänderung wie folgt beeinflusst:

- Kurzfristig steht wegen der abschmelzenden Gletscher ein grösseres Wasserangebot für die Wasserkraft zur Verfügung und sie wird im Sommer mehr Strom produzieren. Langfristig werden das Wasserangebot und die Produktion im Sommer abnehmen. Für die Reduktion der Abflussmengen sind abnehmende Niederschläge und erhöhte Verdunstung verantwortlich.⁷ Der geringere Wasserabfluss dürfte bis 2050 zu einer um durchschnittlich 7% geringeren Wasserkraftproduktion führen.⁸ Zudem wird im Mittelland als Folge der Klimaänderung mit einer Zunahme von Hochwassern gerechnet. Ein Teil dieses Wassers kann nicht für die Stromproduktion genutzt werden. Der Verlust bei der Stromproduktion ist daher höher, aber nicht quantifizierbar.
- Wegen der höheren Wassertemperaturen kann die wassergekühlte Kernenergie im Sommer weniger Kühlleistung aus den Flüssen beziehen und die Produktion wird abnehmen. Im Sommer 2003 musste die Leistung der Kernenergie während 2 Monaten um 25% gedrosselt werden. Dies reduziert die Strommenge im Jahr um 4%. Die Wassertemperaturen in den Flüssen werden bis 2050 weiter ansteigen (vgl. Kapitel Wasserwirtschaft). Als Folge davon wird es zu Produktionseinschränkungen kommen.
- Mit der Klimaänderung wird der Druck zur Reduktion der fossilen Energien zunehmen. Wasserkraft, Kernenergie und die neuen erneuerbaren Energien tragen als CO₂-freie Energieformen nicht zur Klimaänderung bei und werden nicht durch allfällige Lenkungsabgaben belastet.

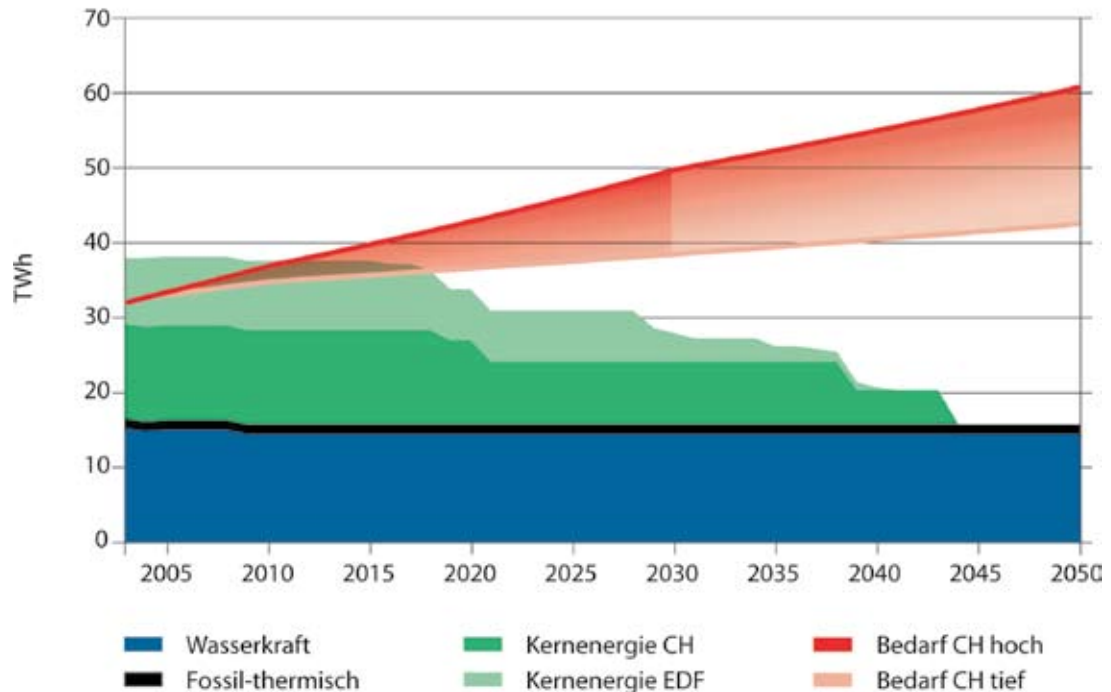


Abbildung 5: Produktionskapazitäten und Stromverbrauch in der Schweiz im Winterhalbjahr. Gemäss der Prognose wird ab 2012 (Szenario hoher Strombedarf) bis 2019 (Szenario tiefer Strombedarf) der inländische Strombedarf im Winter nicht mehr durch die heimische Stromproduktion und die bestehenden Importverträge gedeckt werden können.⁶ (1 TWh = 1000 GWh)

Massnahmen

Die Elektrizitätsproduktion sollte CO₂-frei bleiben. Vor dem Hintergrund der Klimaänderung stehen folgende Massnahmen zur Schliessung der Versorgungslücke im Vordergrund:

- Verstärkte Förderung von erneuerbaren Energien und Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz sowie durch Ausschöpfen des Stromeinsparpotenzials. Ausser Forschung und Entwicklung sind auch Pilotanlagen nötig, um die Machbarkeit solcher Technologien zu demonstrieren und Erfahrungen zu sammeln. Durch die Steigerung der Energieeffizienz wird allerdings die Stromnachfrage tendenziell erhöht werden.
- Bereitstellen neuer, CO₂-freier Produktionskapazitäten. Zur Schliessung der Versorgungslücke wurden kürzlich ein Gaskombikraftwerk als Übergangslösung und ein neues Kernkraftwerk als langfristige Lösung vorgeschlagen. Damit dadurch keine zusätzlichen Nettoemissionen entstehen, müssten zusätzliche Massnahmen ergriffen werden (biologische Senken, Carbon Capture and

Storage (CCS), Emissionshandel). Die Carbon Capture and Storage-Technologien werden erst ab 2030 oder später zur Verfügung stehen. Speziell die Lagerung ist kritisch, da sie – ähnlich wie die Tiefenlagerung bei der Kernenergie – über lange Zeiträume erfolgt und somit ein politisches Thema ist. Dies gilt sowohl für eine Lagerung in der Schweiz als auch im Ausland.

- Die Schweiz wird politisch und demokratisch darüber entscheiden, wie sie ihre künftige Energieversorgung gestalten möchte. Zur Vorbereitung eines fundierten Entscheides braucht es eine umfassende und objektive Zusammenstellung aller (natur-, sozial- und wirtschafts-) wissenschaftlichen Fakten. Die Entscheide hinsichtlich der zukünftigen Elektrizitätserzeugung beeinflussen den Grad der internationalen Abhängigkeit der schweizerischen Energieversorgung durch Gas-, Strom- oder andere Importe. Deshalb ist eine möglichst weitgehende Ausschöpfung der Potenziale der einheimischen erneuerbaren Energien anzustreben.

4. Neue erneuerbare Energien

Die direkten Auswirkungen der Klimaänderung auf die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien werden zwischen neutral und leicht positiv eingestuft. Während das Wachstum der Biomasse tendenziell begünstigt wird und die solare Einstrahlung leicht zunimmt, wirken sich Extremereignisse potenziell negativ aus. Bedeutsamer als diese direkten Einflüsse ist die Tatsache, dass steigende Energiepreise und die Klimaschutzstrategien die Rahmenbedingungen für die Förderung und Einführung der erneuerbaren Energien verbessern werden.

Gemessen am heutigen Verbrauch kann der Beitrag der neuen erneuerbaren Energien (neE) zur Stromversorgung der Schweiz von heute 3% auf 10% (5500 GWh/a) im Jahr 2035 gesteigert werden.⁹ Bis 2050 ist eine weitere Steigerung möglich. Im Wesentlichen beinhalten diese 10% grosse Teile der Potenziale für Kleinwasser- und Windkraft, substanzielle Beiträge von Biomasse und Geothermie sowie einen relativ kleinen Beitrag der Fotovoltaik. Das Potenzial der neE wird durch die höheren Produktionskosten beschränkt.

Die Klimaänderung erhöht die Chancen der neE. Der steigende Energiebedarf und die (beschlossenen sowie antizipierten) Massnahmen zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen erhöhen die Nachfrage nach CO₂-neutraler Energie. Gleichzeitig sinkt der Subventionsbedarf bei höheren Energiepreisen. Bei gleich bleibenden Subventionen ist mit einer schnelleren Marktdurchdringung zu rechnen.

Die Produktion der neE wird durch Umweltfaktoren auf unterschiedlichen Zeitskalen beeinflusst. Die Effizienz der erneuerbaren Energieformen ist u.a. vom Wetter und Klima abhängig und wird durch die Klimavariabilität und durch Extremereignisse beeinträchtigt. Das vorliegende Klimaszenario zeigt eine Änderung der Mittelwerte und macht keine Aussagen über die Veränderung der Variabilität. Es gibt Hinweise, dass sich die Temperaturvariabilität im Sommer etwas verstärkt und im Winter etwas verringert. Variationen im Klima könnten auch in die Mittelfristplanung bei der Produktion der neE einfließen. Ein möglicher Ansatz wäre die Modellierung der ganzen Kette von klimatischen Randbedingungen als Eingangsdaten bis zur Energieproduktion.

Windenergie Potenzial

Die Schweiz hat heute etwa 5.4 MW¹ an Windkraft installiert und produziert rund 5.4 GWh/a ihres Stroms aus Windkraft. Das entspricht kaum 0.01%

der gesamten inländischen Stromproduktion im Jahr 2003. Auch mit den rund 15 GWh Strom aus Fotovoltaik im Elektrizitätsnetz ist der Beitrag neuer erneuerbarer Energien bislang gering.

Das Potenzial der Windkraft in der Schweiz ist begrenzt. Bis 2035 ist ein Ausbau der Windkraft auf 600 GWh/a möglich. Bis 2050 könnte bei einem Vollausbau aller Windparkstandorte das Gesamtpotenzial von 1150 GWh/a ausgeschöpft werden. Gemessen an der Stromproduktion von 2003 wäre der Anteil der Windkraft 1.8%. Das Potenzial von Einzelanlagen beläuft sich auf weitere 2850 GWh/a.⁹

Die generellen technischen Möglichkeiten zur Integration von Windenergie ins Elektrizitätsnetz umfassen die Vorhaltung von Backup-Kapazitäten, die Abschaltung überschüssiger Windkraft und die Speicherung. In der Schweiz lässt sich die Windenergie selbst bei vollständiger Nutzung des Potenzials problemlos in das Stromnetz integrieren. Selbst bei einem Vollausbau der Windkraft würde sie die Stabilität der Elektrizitätsnetze nicht beeinflussen. Kurzfristige Fluktuationen im Windkraftangebot können mit Wasserkraft gut aufgefangen werden. Neue Speichertechnologien wie Wasserstoff werden in Zukunft die Ausgleichsmöglichkeiten zusätzlich verbessern.

Klimaänderung

Der Einfluss der Klimaänderung auf die mittleren Windgeschwindigkeiten in der Schweiz ist unklar. Allenfalls wird es zu einer Veränderung der mittleren Windgeschwindigkeit und zu einer Zunahme von Extremereignissen kommen. Beides würde die Produktion von Windenergie beeinflussen. Die mittlere Windgeschwindigkeit beeinflusst unmittelbar die elektrische Ausgangsleistung: Bei einer Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit ist im Mittel mit einer höheren Stromproduktion aus Wind zu rechnen. Im Falle von Extremereignissen kann es zu Produktionsunterbrüchen an einzelnen Standorten kommen. Ein Ausfall aller Windkraftanlagen ist jedoch statistisch unwahrscheinlich.

Massnahmen

Auswirkungen des Klimawandels auf die Nutzung der Windkraft sind für die Schweiz eher von indirekter Natur. Die eigentliche Herausforderung besteht im verstärkten Ausbau der Windkraft in angrenzenden Ländern. Folgende Massnahmen tragen zur optimalen Integration von Windenergie bei:

- Verbesserte Windvorhersagen bei gleichzeitiger Verkürzung der Fahrplanmeldezeiten, mittels derer die erwartete Stromproduktion dem Netzbetreiber im Voraus zu Planungszwecken bekannt gemacht wird. Je kürzer die Fahrplanmeldezeiten, desto grösser die Vorhersagegenauigkeit der zu erwartenden Stromproduktion aus Windkraft.
- Bessere planerische Grundlagen für die Berücksichtigung von Umweltschutzes, insbesondere des Natur- und Landschaftsschutzes.
- Netzverbände – je größer das Netz, desto geringer der Bedarf an Backup-Leistung, d.h. an konventioneller Erzeugungskapazität, die bereit stehen muss, um kurzfristig eine Produktionsminderung bei der Windenergie infolge ungünstiger Windverhältnisse zu kompensieren.
- Transparente, vernetzte und gut funktionierende Märkte können die Kosten der Integration von Windkraft erheblich senken. Insofern kann eine Liberalisierung des Strommarktes hilfreich sein, wenn sie über ein möglichst grosses Einzugsgebiet sowohl die Einspeisung als auch den Lastausgleich ermöglicht.

Biomasse: Holzenergie Potenzial

Das gesamte ökologische Biomassenpotenzial betrug 2001 insgesamt 34'000.⁹ Holz, Feldgehölz, Hecken und Obstbau steuerten mit 12'800 GWh den grössten Anteil bei (Abb. 6). Das ökologische Biomassenpotenzial lässt eine deutliche Steigerung der Stromproduktion zu. Einerseits sind Steigerungen der Menge der für die energetische Nutzung geeigneten Biomassensortimente zu erwarten, andererseits wird die Entwicklung der Umwandlungstechnologie den Verstromungswirkungsgrad um einen Faktor 2 bis 3 steigern können.

2004 wurden in der Schweiz 2.8 Mio. m³ Holz vorwiegend zu Heizzwecken genutzt. Insbesondere die automatischen Holzheizungen haben im vergangenen Jahrzehnt stark zugenommen. Das Energieholzpotenzial erlaubt in Zukunft mindestens eine Verdoppelung der heutigen Nutzung auf über 5 Mio. m³, vorausgesetzt, es werden es Fortschritte bei der Reduktion der Feinstaubemissionen erzielt.¹⁰ Langfristige Trends der Waldwirtschaft (standortgerechte Baumarten, abgestufte ökologische Waldbewirtschaftung, extensive Waldpflege, regionales maschinelles Ernten) sowie Entwicklungen der Holzwirtschaft (Erhöhung der Sägekapazität) lassen das Potenzial auf das Dreifache ansteigen. Allerdings wird die Konkurrenz bei der Holznutzung durch andere Holzverwerter (Baustoffe) zunehmen. Angebot und Nachfrage werden den Preis und somit die Holzverwendung bestimmen.

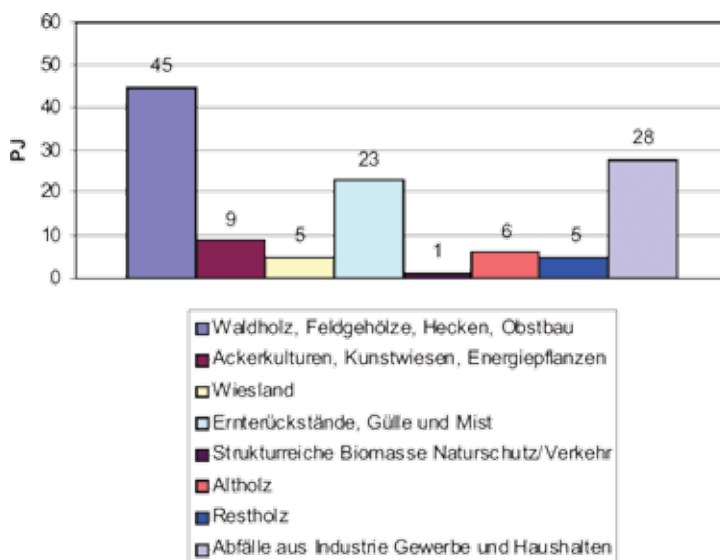


Abbildung 6: Ökologisches Biomassenpotenzial im Jahr 2001 aufgeteilt auf verschiedenen Quellen.⁹
(1 PJ = 278 GWh)

Auswirkung Klimaänderung

Die Klimaänderung wird sich mehrheitlich positiv auf die Nutzung von Holzenergie auswirken. Einerseits werden sich die Waldflächen ausdehnen (vgl. Kapitel Ökosysteme) und das Potenzial der Holzenergie zunehmen. Andererseits wird die Akzeptanz von erneuerbaren Energien und von Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz als Reaktion auf die Klimaänderung und im Zuge der Klimapolitik steigen. In Politik, Verwaltung und Wirtschaft wächst die Bereitschaft, die Nutzung der Holzenergie durch Massnahmen zu fördern.

Die Klimaänderung und die vermehrte Nutzung von Holzenergie werden Auswirkungen auf die Wälder haben. Das Waldbild wird sich verändern. Insgesamt wird es in den Wäldern nicht mehr Holz geben, doch gleichzeitig wird der Anteil an Energieholz und an minderwertigem Holz steigen. Eine allfällige Zunahme von Extremereignissen, wie beispielsweise der Wintersturm Lothar im Dezember 1999, wird für grosse Biomassenverluste und entsprechende Zwangsnutzungen sorgen.

Kurzfristige Klimavorhersagen

Aussergewöhnliche Klimabedingungen wie die europäische Hitze- und Dürreperiode im Sommer 2003, aber auch die kalten Winter in den 1960er Jahren beeinflussen die Energieproduktion und den Energiekonsum schon im heutigen Klima. Seit einiger Zeit wird versucht, diese Klimaschwankungen mit Hilfe von numerischen Klimamodellen vorherzusagen. Wie das Wetter hat das Klimasystem jedoch chaotische Eigenschaften, und Vorhersagen reagieren höchst empfindlich auf kleine Unsicherheiten in den Anfangsbedingungen. Neu entwickelte Wahrscheinlichkeitsvorhersagen berücksichtigen nun diese Sensitivität, indem nicht eine einzelne, sondern viele Vorhersagen

mit leicht verschiedenen Anfangsbedingungen gerechnet werden. Aus diesem Ensemble von Vorhersagen kann dann z.B. die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines kalten Januars oder eines warmen Sommers (Abb. 7) berechnet werden. Solche kurzfristigen Klimavorhersagen müssen momentan noch mit Vorsicht interpretiert und angewendet werden; ihre Qualität variiert je nach Region auf der Erde und insbesondere auch je nach der gewünschten Vorhersagezeit. Wahrscheinlichkeitsaussagen erlauben es aber, das zu erwartende Wetter über mehr als eine Woche vorzusagen, und bieten damit dem professionellen Bereich wie dem Energiemanagement interessante Planungsmöglichkeiten.^{11,12}

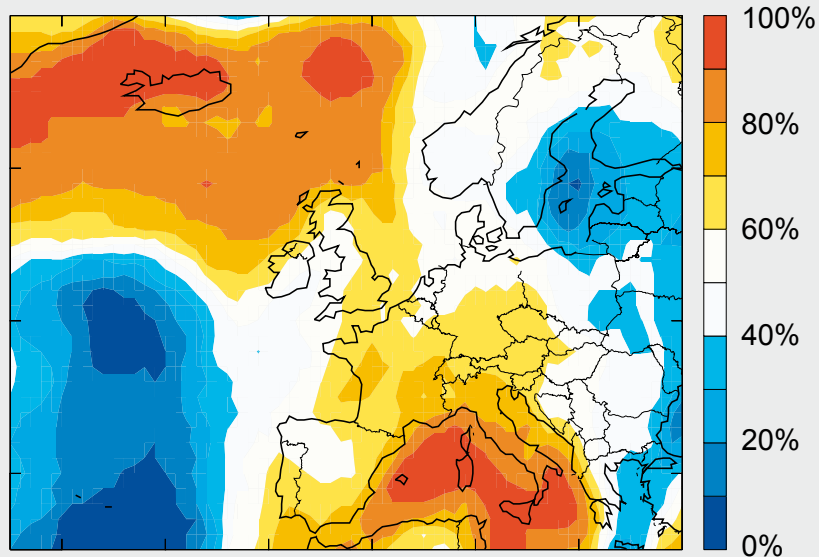


Abbildung 7: Wahrscheinlichkeit, dass Temperaturen im Sommer 2003 über dem klimatologischen Mittel liegen: Vorhersage vom 1. Mai 2003.

5. Wirtschaftliche Aspekte

Es besteht weitgehender Konsens, dass wegen der Verknappung der Erdölressourcen und wegen der Klimaänderung die Energiepreise steigen werden. Diese Tendenz bewirkt eine Senkung der Energieintensität des Bruttonationalproduktes und eine Abschwächung der Zunahme des globalen Energieverbrauchs. Geeignete Anpassungsmassnahmen im Energiesektor begrenzen nicht nur die Schadenskosten, sondern verringern auch die Kosten des Energiesystems selbst, so dass sich im günstigen Fall echte Synergien zwischen Adaptation und Mitigation ergeben.

Entwicklung der Energiepreise

Die Energiepreise werden nicht mehr auf das tiefe Niveau der Periode 1985–2000 zurückkehren und können aufgrund von politischen Verwerfungen mittel- bis langfristig weiter ansteigen. Folgende Entwicklungen tragen dazu bei:

- Die globale Energienachfrage nimmt stark zu. Die International Energy Agency (IEA) rechnet mit einem Anstieg der Nachfrage von 50% bis 2030.¹³ 60% des Anstiegs müssten durch Erdöl und Erdgas gedeckt werden.
- Auch in der Schweiz wird die Nachfrage nach Energiedienstleistungen weiter zunehmen (vgl. Abschnitt 3). Gleichzeitig kommt es als Folge der Klimaänderung zu einer Verlagerung von Heizenergie (Brennstoffe) im Winter zu Kühlenergie (Strom) im Sommer (vgl. Abschnitt 2). Je nach Szenario kann die gesteigerte Nachfrage mit weniger Endenergie gedeckt werden, wobei der Anteil elektrischer Energie in den Effizienzstrategien zunimmt.
- Die Energieproduktion durch Wasserkraft und Kernenergie wird in der Schweiz als Folge der Klimaänderung im Sommer bei gleich bleibenden Fixkosten abnehmen.
- Die Klimaänderung erhöht die Variabilität im hydrologischen Kreislauf. Bei mehr Extremereignissen wird es zu mehr Betriebsunterbrüchen und Schäden kommen. Beispiele dafür sind das Augusthochwasser 2005, welches zu Unterbrüchen bei den

Flusskraftwerken führte, oder die hohen Wassertemperaturen im Sommer 2003, welche zu einer reduzierten Energieproduktion der Kernkraftwerke führte.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Entwicklung der Energiepreise ist die Frage, ob die externen Kosten der CO₂-Emissionen nachhaltig internalisiert werden (z.B. durch Zertifikate, Lenkungsabgaben, Fördermassnahmen). Über die langfristige Entwicklung der CO₂-Gesetzgebung bestehen grosse Unsicherheiten. Sie hängen zum einen von den Öl-, Gas- und Strompreisen ab. Bei hohen Energiepreisen ist anzunehmen, dass die politisch vorgegebenen CO₂-Kosten sinken, da sie die Kosten der fossilen Energien zusätzlich steigern würden. Zum anderen sind die CO₂-Kosten stark davon abhängig, ob sich global sämtliche Staaten an Klimaschutzvereinbarungen im Sinne des Kyoto-Protokolls beteiligen. Sofern auch in Zukunft wichtige Staaten abseits stehen, wird es zu einer geografischen Verschiebung der Energieproduktion kommen. Insgesamt werden die höheren Energiepreise eine Dämpfung des Energieverbrauchs bewirken. Aus Überlegungen der Energieeffizienz wird es zu einer Verlagerung zu Strom kommen. Die Attraktivität der CO₂-neutralen Energien (neue erneuerbaren Energien und Kernenergie) wird zunehmen. Generell führt die Klimaänderung zu einer Zunahme der Unsicherheiten, weshalb Systeme mit kurzer Pay-back-Dauer bevorzugt werden.

Ökonomische Modellierung von Anpassungs- und Vermeidungsmassnahmen

Als Folge der Klimaänderung wird sich der Anteil des Bruttosozialproduktes, der für den Konsum frei verfügbar ist, aus folgenden Gründen verringern:

- Die durch die Klimaänderung verursachten Schäden müssen von der Volkswirtschaft behoben werden.
- Es müssen Vorbeugungsmassnahmen gegen Schäden getroffen und finanziert werden.
- Klimaschutzmassnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen erfordern zusätzliche Aufwendungen.

Wirtschaftlich werden die ersten beiden Positionen als Adaptationskosten zusammengefasst, das dritte Massnahmenbündel umfasst die Mitigationskosten. Um zu einer optimalen langfristigen Strategie zu gelangen, müssen künftige Kosten und Nutzen der Klimaänderung abgeschätzt und verglichen

werden. Dazu werden der künftige Konsum und die künftigen Wohlfahrtsverluste je nach Zeithorizont mit einem Zinssatz von typischerweise 1.5 bis 5% diskontiert. Diese nüchterne, ökonomische Betrachtungsweise hat den Vorteil, dass sie auf eine optimale Verhaltensweise der globalen Staatengemeinschaft hinweist: Sowohl das Nichtstun als auch ein Überschiessen bei den Massnahmen sind teurer als eine massgeschneiderte Klimaschutzpolitik, welche die langfristige Wohlfahrt maximiert.

Aus derartigen Analysen kann abgeleitet werden, dass sich eine gezielte Klimaschutzpolitik wirtschaftlich auszahlt, dass dadurch die Wohlfahrtsverluste minimiert werden und in der Grössenordnung von weniger als 2% der Referenzentwicklung ohne Klimaänderung bleiben und dass schliesslich als Folge von Klimaschutzmassnahmen der Anteil der Energiekosten am Bruttosozialprodukt leicht abnimmt.

Literatur und Anmerkungen

- 1 GWh/a = Gigawattstunden pro Jahr. 1 GWh = 1 Milliarde kWh. 1 Petajoule (PJ) = 278 GWh. MW = Megawatt (Leistung)
- 2 Bundesamt für Energie BFE. Energieperspektiven 2035. Bern, 2007.
- 3 Road map Erneuerbare Energien Schweiz - Eine Analyse zur Erschliessung der Potenziale bis 2050. SATW-Bericht Nr. 39. Schweiz. Akademie der Technischen Wissenschaften SATW, 2007.
- 4 B. Aebischer, G. Catenazzi. Energieverbrauch der Dienstleistungen und der Landwirtschaft. Ergebnisse der Szenarien I bis IV. Bundesamt für Energie, Bern, 2007.
- 5 P. Hofer. Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 1990–2035. Ergebnisse der Szenarien I a Trend und I b Trend und der Sensitivitäten Preise hoch, BIP hoch und Klima wärmer. Bundesamt für Energie, Bern, 2007.
- 6 Axpo. Stromperspektiven 2020. 2005.
- 7 P. Horton, B. Schaepli, A. Mezghani, B. Hingray, and A. Musy. Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. Bundesamt für Energie, Bern, 2005.
- 8 M. Piot. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. Wasser, Energie, Luft, 2005.
- 9 S. Hirschberg, C. Bauer, P. Burgherr, S. Biollaz, W. Durisch, K. Foskolos, P. Hardegger, A. Meier, W. Schenler, T. Schulz, S. Stucki und F. Vogel. Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen. Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten. PSI-Bericht Nr. 05-04, Villigen, 2005.
- 10 Zusätzliche 2.5 Mio. m³ Holz heizen ungefähr 1 Mio. energieeffiziente Wohnungen und ersetzen ca. 0.5 Mio. t Heizöl.
- 11 C. Appenzeller, P. Eckert. Towards a seasonal climate forecast product for weather risk and energy management purposes. ECMWF Report, Seasonal forecasting user meeting 2000, 2001, 40–44.
- 12 M. A. Liniger, W. A. Müller, C. Appenzeller. Saisonale Vorhersagen. Jahresbericht der MeteoSchweiz 2003.
- 13 IEA, World Energy Outlook 2004. (<http://www.worldenergyoutlook.org>).

