

Energiegespräch vom 2. September 2011 an der ETH Zürich:

Hintergrundinformation

Autoren: G. Andersson, R. Boes, K. Boulouchos¹⁾, L. Bretschger, F. Brütsch, M. Filippini, H. Leibundgut, M. Mazzotti, F. Noembrini

1. Ausgangslage, Ziele und Abgrenzung

Nach Erscheinen der Energiestrategie des Energy Science Center der ETH Zürich (ESC) im Jahr 2008 und der erfolgreichen Durchführung der öffentlichen Diskussionsveranstaltung „Klimagespräch 2009“ begann die ETH Zürich schon vor über einem Jahr mit der Planung einer Veranstaltung zur nachhaltigen Energiezukunft. Mit dem „Energiegespräch“ vom 2. September 2011 will die ETH Zürich ihre Rolle als „Honest Broker“ gegenüber der Öffentlichkeit zu wichtigen gesellschaftlichen Themen wahrnehmen. Die Ereignisse um Fukushima im März dieses Jahres und die darauffolgende intensive energiepolitische Debatte in der Schweiz geben diesem Anlass eine besondere Aktualität.

Anfangs April 2011 hat sich eine Arbeitsgruppe des ESC gebildet, um strategische Optionen für die Energiezukunft im Lichte dieser Ereignisse zu entwickeln und zu bewerten, dies auch mit Bezug auf die bundesrätlichen Beschlüsse vom Mai dieses Jahres. Ein spezifisches Ziel für eine führende Technische Hochschule ist es, Schwerpunkte für die langfristige Forschung und die Ausbildung unseres Nachwuchses zu erarbeiten, die auf die anstehenden Herausforderungen ausgerichtet sind.

Ein weiteres wichtiges Ziel besteht darin, die komplexen Zusammenhänge zwischen dem Energiesystem, unserer Umwelt und dem Wohlstand der Schweiz umfassend, sachgerecht und allgemeinverständlich darzustellen, um so zur robusten Entscheidungsfindung im politischen Gestaltungsprozess beizutragen. Dabei sollen existierende Wissenslücken und Unsicherheiten, sowie Zielkonflikte und der entsprechende Bedarf nach Güterabwägung transparent aufgezeigt werden. Der untersuchte Zeithorizont erstreckt sich dabei auf drei Phasen, nämlich: bis 2020, 2020 bis 2035, sowie 2035 bis 2050.

Die Erkenntnisse der Arbeitsgruppe, welche in das „Energiegespräch“ vom 2. September 2011 eingeflossen sind, dürfen dabei nicht als mit hoher Treffsicherheit versehene Prognosen interpretiert werden. Da die langfristige Zukunft grundsätzlich unbekannt ist, wurden Szenarien erarbeitet und wahrscheinliche Entwicklungen innerhalb einer plausiblen Bandbreite eingegrenzt. Dabei sollen diese Szenarien als Navigationsinstrument verstanden werden, mit dessen Hilfe Weggabelungen auf dem Transformationspfad hin zu einem nachhaltigen Energiesystem rechtzeitig erkannt und für anstehende Entscheidungen wissenschaftlich gestützte Grundlagen zur Verfügung gestellt werden. Schliesslich bezwecken diese Analysen keine direkt vergleichende Bewertung der Angebotsportfolien für die Stromerzeugung mit und ohne Kernenergie, sondern sie gehen vom vorerst gefällten Bundesratsbeschluss aus, und fragen nach Gestaltungsmöglichkeiten sowie den möglichen Grenzen und Risiken, aber auch Chancen für die Schweiz.

1) Koordinierender Autor

2. Arbeitsmethodik: Quellen, Annahmen und Randbedingungen

Herangezogen wurden für diese Analysen einerseits mehrere externe Quellen und andererseits das ETH- und ESC-interne Wissen der beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Zunächst wurden über zwanzig nationale und internationale Studien, Roadmaps, Szenarien und „White Papers“ mehrheitlich aus den letzten fünf Jahren vergleichend gesichtet, analysiert und auf Plausibilität sowie auf die Bandbreite von Einschätzungen und Prognosen hin überprüft. Ein Teil der Quellen lieferte Primärdaten, welche Eingang in unsere Berechnungsmodelle fanden. Zusätzlich steuerten die Mitglieder der Arbeitsgruppe ihren Kenntnisstand und denjenigen ihres Umfeldes bei. Dabei handelt es sich um schon publizierte eigene Ergebnisse wie auch um solche aus laufenden Forschungsvorhaben. Diese betreffen technologieorientierte und energiewirtschaftliche Fachgebiete.

Die vorliegenden quantitativen Ergebnisse weisen naturgemäss unterschiedlich starke Sensitivitäten hinsichtlich Randbedingungen und Annahmen auf. Bei den Annahmen sind die antizipierte Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung ebenso massgeblich wie die Palette der wirtschaftspolitischen Instrumente für die Energiepolitik. Dazu kommen aber auch Faktoren, welche den Verlauf der Lernkurven für einzelne Technologien beeinflussen und explizit einen starken Einfluss auf die langfristigen Kosten und implizit auf die Akzeptanz und Marktdurchdringung haben.

Als unverrückbare Randbedingung wurde die Einhaltung der globalen Klimaziele gemäss neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse gesetzt. Das strategische Ziel sieht vor, bis spätestens im Jahre 2100 die Emissionen auf eine Tonne CO₂/Kopf/Jahr zu senken; als Meilenstein dorthin sollen im Jahr 2050 1,5 (bis max. 2) Tonnen CO₂/Kopf/Jahr erreicht werden. Wenn plausible Werte für die Bevölkerungsentwicklung in der Schweiz und weltweit zugrunde gelegt werden, ergibt sich ab zirka 2020 ein in etwa gleicher pro Kopf CO₂-Ausstosses.

Die erlaubte Menge an CO₂ wurde dann auf die Sektoren von Industrie- und Gebäudewärme einerseits und auf die Personen- und Gütermobilität andererseits verteilt werden. Damit wurde unterstellt, dass die Stromerzeugung auch mittel- und langfristig einen marginalen CO₂-Ausstoss aufweist, was z.B. bei Gaskraftwerken die zwingende Ausrüstung mit CO₂-Abscheide- und Speichertechnik erfordert.

Die Absenkpfade der CO₂-Emissionen für die verschiedenen Sektoren gehen von ehrgeizigen, aber realistischen Effizienzpotentialen einerseits und von der Umstellung auf erneuerbare Energieträger andererseits aus. Für den Gebäudebereich wurde dabei eine wesentliche Beschleunigung der Renovationsrate mit minergieähnlichen Endenergie- und CO₂-Zielwerten durch entsprechende politische und wirtschaftliche Anreize postuliert. Zudem wurde – in Korrespondenz zum entsprechend geschätzten Stromangebot – die wachsende Ab- und Nahwärme aus vorwiegend biogenen Wärme-Kraft-Kopplungs- (WKK) und Geothermiekraftwerken berücksichtigt.

Beim Individualverkehr wurden die neuen EU-Richtlinien zugrunde gelegt und über das Jahr 2020 hinaus nach neuen technologischen Erkenntnissen extrapoliert, wobei ein langsam steigender Anteil an elektrischen und „Plug-in-Hybrid“-Antrieben unterstellt wurde. Die eingeschränkten Effizienzpotentiale des Güterverkehrs wurden durch Teilverlagerung der Langstreckentransporte auf die Schiene erweitert. Jedoch ergibt sich durch diese Massnahme und den starken Einsatz von Wärmepumpen – trotz raschem Ausrangieren von Elektroheizungen – ein zusätzlicher moderater Anstieg der Stromnachfrage, der in die weiteren Berechnungen einfließt.

Bei der langfristigen Entwicklung der Stromnachfrage sind die Unsicherheiten am grössten. Gearbeitet wurde mit drei Szenarien („Hoch“, „Mittel“ und „Niedrig“), die einer plausiblen Bandbreite (unter Ausschluss extremer Werte) aus deutlich mehr Parameterkombinationen entsprechen. Für

jede Nachfragehöhe wurde ein wahrscheinliches Angebotsportfolio aus verschiedenen Stromerzeugungstechnologien durchgerechnet. Nebst der postulierten Entwicklung der einzelnen Gesteungskosten wird das Ausbaupotenzial durch jeweils spezifische Ressourcenknappheiten beeinflusst. Diese betreffen einerseits den Strom aus Biomasse und andererseits die Windkraft und den Ausbau der Wasserkraft, wobei für die beiden letztgenannten die möglicherweise sinkende gesellschaftliche Akzeptanz den weiteren Ausbau begrenzen könnte.

Soziale Akzeptanz kann auch ein begrenzender Faktor für die Option der Stromproduktion durch Kombikraftwerke mit CO₂-Abscheidung und Lagerung in der Schweiz, wie auch unter Umständen für die petrothermale Geothermie. Für letztere und für biogene WKK-Anlagen kann auch die sinnvoll nutzbare Wärme limitierend wirken. Wichtig ist zudem das optimale Zusammenspiel der einzelnen Stromerzeugungsarten – die unterschiedlich flexibel sind oder vorhersehbar anfallen – untereinander und mit der Stromnachfrage. Im Modell wurden in diesem Zusammenhang zusätzlich die typischen Strombedarfsmuster im Tagesgang und im saisonalen Verlauf dargestellt. Daraus entstehen gewisse Grenzen bezüglich des Ausbaus der Photovoltaik, die ansonsten fast alle Nachhaltigkeitskriterien inkl. einer antizipierten massiven Kostenreduktion über die nächsten Jahrzehnte erfüllt. Vorteilhaft für die Schweiz ist aber diesbezüglich der geplante Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke. Hinzu kommt die erwartete Abnahme der Batteriekosten für die Kurzzeitspeicherung von Überschüssen aus Solarstrom.

Dieser technologieorientierte Ansatz lieferte anschliessend einen Input in das energiewirtschaftliche Modell, welches einerseits volkswirtschaftliche Auswirkungen für jedes Szenario errechnet und andererseits über Preiselastizitäten die eingangs errechneten Niveaus von Angebot und Nachfrage für den Strom und für die anderen Sektoren neu schätzt. Nach wenigen Iterationen erhält man somit plausible Werte für die massgebenden Grössen.

3. Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

A: Schlüsselergebnisse aus technologischer Sicht

1. Übergeordnete Struktur des gesamten Energiesystems

Auch bei einem langfristigen und gestaffelten Ausstieg aus der Kernenergie muss die nationale Energiepolitik zwingend auf die globalen Klimaziele ausgerichtet sein (2050: < 2 t CO₂/Kopf/Jahr, 2100: ~ 1 t CO₂/Kopf/Jahr). Dies bedingt für die Schweiz im Jahr 2050 einen CO₂-freien Wärmesektor, minimalen CO₂-Ausstoss bei der Stromerzeugung sowie eine effiziente, teilelektrifizierte Mobilität. Weitere einschränkende Randbedingungen (Ressourcenknappheit und Nutzungskonflikte, Risiko- und Akzeptanzprobleme, Gesamtwirtschaftlichkeit u.a.) müssen in die Bewertung von Optionen einfließen.

2. Bandbreite der Stromnachfrage

Insbesondere bei der Elektrizität werden sich – je nach Szenario abhängig von Wirtschaftswachstum, Bevölkerungsentwicklung, Effizienzerhöhung – Angebot und Nachfrage im Jahr 2050 voraussichtlich in einer Bandbreite von etwa 67 bis 92 TWh Bruttoerzeugung einpendeln. Darin ist der Strombedarf für Wärmepumpen und teilelektrische Mobilität eingerechnet. Werte im oberen Bereich (Szenario „Hoch“) würden den breiten Einsatz von Grosskraftwerken (Gas und/oder Nuklear) zwingend erfordern. Werte im tieferen Bereich (Szenario „Niedrig“) würden zwar den Umfang der notwendigen neuen erneuerbaren Energien reduzieren, bzw. den Bedarf nach Stromimporten und/oder Gaskraftwerken langfristig verringern. Die Werte

dieses Szenarios basieren aber auf äusserst optimistischen, nicht allein von der Energiepolitik abhängigen Randbedingungen, und stellen deswegen keine genügend robust abgestützte Entscheidungsgrundlage dar.

Geht man von einem ehrgeizigen, aber dennoch realistischen Nachfrageszenario „Mittel“ aus, ergibt sich über die Jahre 2020/2035/2050 ein Stromerzeugungsbedarf von etwa 70/75/79 TWh, bei einer klimakompatiblen Reduktion der fossilen Energieträger im Wärme- und Mobilitätssektor um etwa 15/38/64 % gegenüber dem Stand von 2010. Dabei ist eine zunehmende Verlagerung von Erdöl auf Erdgas, insbesondere im Wärmesektor, zu erwarten.

3. Plausible Zusammensetzung des Stromangebotsportfolios im Jahr 2050

Bei dem unterstellten Nachfrageszenario „Mittel“ wird die im überschaubaren Mass ausbaubare Wasserkraft mit knapp 50 % weiterhin einen wichtigen „Sockelbeitrag“ leisten. Sollten die restlichen 40 TWh ohne Nuklearenergie gedeckt werden, ergibt sich folgendes Bild für das erforderliche Zusatzstromangebot im Jahr 2050:

Die Photovoltaik als langfristig sehr wichtiger Pfeiler würde zusätzliche 15 - 20 % des gesamten, über das Jahr gemittelten Strombedarfs beisteuern, die heimische Biomasse und Abfallenergie bis zu 10 %, die Geothermie 0 - 10 %, der Ausbau der Wasserkraft etwa 5 % und die Windenergie-Gewinnung weniger als 5 %. Je nach der tatsächlich einsetzenden langfristigen Entwicklung müssten also im Jahr 2050 etwa 10 - 15 % des Strombedarfs, d.h. 8 - 12 TWh, durch Gaskraftwerke und/oder den verstärkten Import aus dem Ausland (vorzugsweise Energie aus Wind und Sonne) abgedeckt werden. Bei den Gaskombikraftwerken ist ab Beginn/Mitte der 20er-Jahre die Ausrüstung mit Anlagen zur CO₂-Abtrennung und Lagerung erforderlich, bedarf aber noch weiterer F+E- Anstrengungen.

Gaskombikraftwerke sowie biogene WKK sind aufgrund ihrer Flexibilität eine wertvolle Komponente in einem von erneuerbaren Energien dominierten Elektrizitätssystem, da sie dessen Robustheit auch bei extremen Bedingungen gewährleisten.

Während die Wasserkraft ganzjährig einen konstanten Beitrag liefert, fallen die relativen Beiträge der anderen Stromerzeugungstechnologien für das Winter- und Sommerhalbjahr unterschiedlich aus: Im Sommer fällt langfristig vor allem der Beitrag der Photovoltaik ins Gewicht, während im Winter durch den erhöhten Wärmebedarf primär der Beitrag aus Biomasse und u.U. der Geothermie zum Zuge kommt. Auch der grössere Teil des Beitrags der Gaskraftwerke würde im Winter erfolgen.

Allerdings ist auch bei einer im Jahresmittel ausgeglichenen Import-/Exportbilanz weiterhin mit einem regen Stromaussenhandel zu rechnen, denn die Entwicklung geht rapide in Richtung eines gemeinsamen europäischen Elektrizitätsmarktes.

4. Ein differenziertes Verständnis von Effizienz

Unter Energieeffizienz versteht man im herkömmlichen Sinn die Minimierung der erforderlichen Primärenergie für die Bereitstellung einer nachgefragten Energiedienstleistung. Dementsprechend sind Ansätze bekannt, wie man allen Sektoren (Stromverbrauch, Gebäude mit niedrigen Energie-Kennwerten/minimalen CO₂-Emissionen, energieeffiziente Verkehrssysteme) die Verluste entlang der Energieumwandlungskette minimieren kann.

Im Kontext eines zukünftigen Energiesystems, das insbesondere beim Strom mit einem erhöhten Netztransport- und Speicherbedarf einhergeht, ist die Effizienz dieser Vorgänge von grosser Bedeutung. Dies gilt einerseits wegen der zunehmenden Dezentralisierung der Stromerzeugungsinfrastruktur und andererseits wegen der zeitlichen Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage. Typische Verluste des Netztransports betragen heute etwa 7 % des Gesamtstromverbrauchs diejenigen der Speicherung (Strom-zu-Strom) sind je nach Methode unterschiedlich: Bei modernen – aber noch sehr teuren – Batterien liegen die Verluste um 15 %, bei neuen Pumpspeicherkraftwerken um 20 %, bei Druckluftspeicherung 30 % bis 55 %, und bei der saisonalen chemischen Speicherung über Wasserstoff und/oder Methan bei 55 % bis 65 %.

Relevant für die Schweiz werden auch in Zukunft – wie schon heute – die Speicherseen sein. Dazu kommen für die kurzfristige (Stunden) und die mittelfristige (Tage bis wenige Wochen) Speicherung die deutlich ausgebaute Pumpspeicherkapazität und zunehmend weiterentwickelte elektrochemische Speicher (Batterien). Unterstellt man einen zusätzlichen Speicherbedarf, z.B. für die Hälfte des Photovoltaik- und Windstroms im Jahr 2050, ergeben sich damit etwa weitere 2 TWh Speicher- und Netzverluste (in unserem Modell berücksichtigt als Mindererzeugung). Dies ist etwa dreimal so viel wie heute (1 % des Stromverbrauchs); die entsprechende Kapazität wäre aber nebst dem Netzausbau eine Voraussetzung für die fortschreitende Integration des Schweizer Elektrizitätssystems in den europäischen Raum.

5. Erforderliche technische Lösungen

Die Zusammenführung von Stromangebot und -nachfrage stellt eine Herausforderung dar, zu deren Bewältigung nicht nur der Ausbau der physikalischen Infrastruktur („Angebots-Hardware“: Speicher und Netze) gefordert ist. Auch beim Management (Erfassung, Steuerung/Regelung) der Verbraucherseite sind wesentliche Fortschritte erforderlich. Dazu gehören nicht nur intelligente Geräte und Sensoren/Aktuatoren für die Haushalte und Dienstleistungen, sondern auch flexible Produktionsprozesse in der Industrie. Zusätzlich ist der Bedarf nach intelligenter Verknüpfung aller Teilsysteme über noch zu entwickelnde Software eindeutig ausgewiesen.

Nicht zuletzt werden weitere Fortschritte bei der noch jungen Fachdisziplin der „Energiemeteorologie“ erforderlich sein. Diese muss mit verbesserten Prognose-Modellen für die Wind- und Photovoltaik-Stromeinspeisung einen wichtigen Beitrag zur kosten- und energieeffizienten Gewährleistung der Systemstabilität leisten.

Ein wichtiges Element des zukünftigen intelligenten Energiesystems wird schliesslich die Mehrfachnutzung einer gegebenen Primärenergie für verschiedene Zwecke entlang der Energieumwandlungskette sein. Unter vielen Forschungsprojekten an der ETH Zürich sind in diesem Zusammenhang beispielhaft zu erwähnen:

- a) Die kombinierte Stromproduktion aus dezentralen biogenen Kraftwerken mit Kälte im Sommer und Wärme im Winter durch die gleiche Anlage;
- b) Die Nutzung der Abwärme von Datenzentren und Hochleistungscomputern durch flüssig-gekühlte Chips für die energetische Klimatisierung von Gebäuden.

B: Schlüsselergebnisse aus energiewirtschaftlicher Sicht

1. Energieangebot und Wirtschaft

Ein verändertes und mit dem Ziel der Nachhaltigkeit verringertes Energieangebot ändert das Preisgefüge in einer Wirtschaft, d.h. es verursacht höhere Energiepreise, während die anderen Produktionsfaktoren wie Arbeit und Kapital im Vergleich dazu billiger und damit attraktiver werden. Aufgrund der rückläufigen Entwicklung der Energienachfrage und des allgemeinen Wirtschaftswachstums steigt der Anteil der Energieausgaben am Einkommen über die Zeit hinweg nur moderat; die energieunabhängigen Ausgaben erhöhen sich im Lauf der Zeit stetig, da über eine gesteigerte Energieeffizienz zusätzliches Einkommen geschaffen wird. Ein sinkender Energieverbrauch führt zu einem breiten Strukturwandel mit Chancen für die innovationsintensiven Branchen und Risiken für die energieintensiven Bereiche.

2. Langfristiges Wachstum ist auch mit einer nachhaltiger Energieversorgung möglich

Der über Jahrzehnte dauernde Umbau des Energiesystems in Richtung minimaler Umweltemissionen und geringer Gefährdungen des Menschen bedeutet eine kontinuierliche gesellschaftliche Investition mit stetigem Ertrag. Die wirtschaftliche Entwicklung wird gegenüber einem Wachstum mit den bisherigen Energieträgern etwas verlangsamt, die Wachstumsraten sind aber weiterhin positiv. Im Jahr 2050 liegt das Einkommensniveau mit nachhaltiger Energieversorgung etwa ein Jahre hinter einer Entwicklung, die die Klimapolitik zwar berücksichtigt, dies aber ohne etappenweisem Ausstieg aus der Kernenergie. Vom Umbau des Energiesystems profitieren die Sektoren mit hohem Cleantech- und Investitionsanteil besonders stark. Dies sind vor allem die Elektroindustrie und weitere Teile der Maschinenindustrie, die eine über den bisherigen Werten liegende Wachstumsrate erreichen. Die strukturschwächeren und energieintensiven Sektoren wachsen dagegen etwas langsamer als der Durchschnitt der Wirtschaft.

3. An die politischen Rahmenbedingungen müssen hohe Anforderungen gestellt werden

Die benötigte Anpassung von Maschinen- und Anlagenparks sowie der Bauten und der Infrastruktur erfordert eine ausreichende Höhe an Investitionen, die nur bei einer kontinuierlichen Politik über einen langen Zeitraum erreicht werden können. Nur eine langfristig konsistente Energiepolitik schafft die Planungssicherheit für die langlebigen Investitionen im Energiesektor und in den verwandten Bereichen.

Der Umbau des Energiesystems erfordert unternehmerische Anstrengungen und Kreativität unter schwierigen Bedingungen. Einerseits werden Nutzen und Kosten von Investoren normalerweise asymmetrisch wahrgenommen, wodurch die Kosten die Entscheidungen übermäßig beeinflussen. Andererseits schaffen die Unwägbarkeiten der internationalen Energie- und Klimapolitik ein unsicheres Umfeld für langfristige Investitionsentscheidungen.

C: Fazit

Die Umsetzung der Bundesratsstrategie ist bei einer konsequenten, langfristig orientierten Energiepolitik sowohl aus technologischer wie auch aus energiewirtschaftlicher Sicht realisierbar. Voraussetzungen dafür sind:

- Optimale wirtschaftspolitische Instrumente;
- Forschungsinduzierte Fortschritte bei den einzelnen Technologien;
- Übergeordnete Ansätze für die effiziente Verknüpfung von Nachfrage und Angebot des Stroms über Speicher- und Netzsysteme.

Insgesamt ergibt sich aus technologischer Sicht ein optimistisches Bild, denn im Jahre 2050 kann der überwiegende Teil des Stroms in der Schweiz im Jahresmittel über „heimische“ Primärenergie erzeugt werden, während die importierte Primärenergie durch die gezielte Entkarbonisierung vor allem des Wärmesektors markant abnehmen würde. Die optimale Stromerzeugung der Zukunft wird also in ein nachhaltig gestaltetes Gesamtenergiesystem eingebettet sein.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht führt der etappenweise Ausstieg aus der Kernenergie zu neuen wirtschaftlichen Potentialen und Perspektiven. Die ausgelöste Verstärkung von Innovationen und Investitionen wird eine Reindustrialisierung der Schweiz mit einer hoch technologisierten Produktion auslösen. Obwohl der Umbau des Energiesystems eine Reihe von grossen technischen Herausforderungen beinhaltet, kommt dem Wille der Entscheidungsträger, den Umbau langfristig konsequent voranzutreiben, eine ebenso grosse Bedeutung zu.

Zürich, 01. 09. 2011