

ZUR ZUKUNFT DER STROMVERSORGUNG

Ein Umbau der Stromversorgung ist dringlich um einen Anstieg der Emissionen zu verhindern und die knapper werdenden fossilen Ressourcen zu schonen. Die erneuerbaren Energien müssen attraktiver gegenüber fossilen Kraftwerken werden. Die notwendigen Investitionen für eine neue Infrastruktur sind enorm, jedoch moderat gegenüber den Klimakosten, die ohne ein Umsteuern entstünden. Finanzieren liessen sich diese Investitionen durch CO₂-Emissions-Zertifikate, was allerdings auf supranationaler Ebene koordiniert werden muss.

Keywords: Erneuerbare Energien, Kraftwerke, Schwellenländer, Supranationale Kooperation, Strom, Zukunft

Sven Hirsch und Cornelia Daheim

Die umweltverträgliche Energieversorgung ist eine zentrale Herausforderung dieses Jahrhunderts – getrieben durch den zunehmenden Energiebedarf einer wachsenden Weltbevölkerung und den parallelen Druck zur Senkung von Emissionen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Strom macht heute bereits zwanzig Prozent des Weltenergiebedarfs aus – mit steigender Tendenz durch die generelle Elektrifizierung, das Wachstum einer globalen Mittelschicht mit Zugang zu stromverbrauchenden Produkten und die Elektromobilität. Ein wichtiger Baustein zur Bewältigung globaler Zukunftsherausforderungen ist daher die klimaneutrale Stromversorgung. Der Handlungsdruck ist hoch, denn laut aktuellem Wissensstand kann nur ein sofortiges, radikales Umsteuern irreversible Klimaumbrüche verhindern. Auch wenn bisher die globale politische Rahmensetzung fehlt, zeigen entsprechende Initiativen von Unternehmen, Regionen, Städten und Interessensverbänden die Bereitschaft und das Bewusstsein zur notwendigen Veränderung. Es scheint, als seien sich alle einig, nur über die genaue Form des Umbaus und die Verteilung der Kosten besteht Uneinigkeit.

Wie viel Energie brauchen wir?

Der weltweite Bedarf an Strom wird sich – unter business-as-usual-Bedingungen – laut Prognosen der International Energy Agency (IEA) in den nächsten 25 Jahren annähernd verdoppeln (vgl. WEO 2011). Indien und China werden durch nachholende Wirtschaftsentwicklung und anhaltendes Bevölkerungswachstum ihren Bedarf mehr als verdreifachen und benötigen ca. vierzig Prozent des weltweiten Elektrizitätsbedarfs. Doch obwohl der Pro-Kopf-Strombedarf der Schwellenländer zwar kontinuierlich ansteigt, wird er auch mittelfristig nur einen Bruchteil der Pro-Kopf-Verbräuche der Indust-

rieländer mit ihren energieintensiven Lebensstilen betragen.

Bereits heute werden hier in rasantem Tempo neue Kraftwerkskapazitäten geschaffen – limitierende Faktoren sind vor allem Herstellungskapazitäten, Netzausbau und Rohstoffverfügbarkeit. In den westlichen Ländern hingegen stagniert oder sinkt der Stromverbrauch zumeist. Dort werden kaum zusätzliche Kraftwerke benötigt, doch veraltete und ineffiziente Kapazitäten müssen dringlich ersetzt oder modernisiert werden. Die Laufzeiten bestehender Kraftwerke begrenzen zusätzlich einen schnellen Umbau. Die Ausgangslage ist damit vollkommen verschieden: In Schwellenländern werden neue Systeme gebaut, in den Industrieländern wird das bestehende System umgebaut.

Auf der Hand liegt auch: Die Weichen für die mittel- bis langfristige Entwicklung werden in den nächsten zehn Jahren gestellt. Wenn weiter hauptsächlich fossile Kraftwerke gebaut würden, so stiegen die Emissionen ins Unkontrollierbare. Doch der notwendige Aufbau klimaneutraler Energie kann mit dem Bedarf nach neuen Kapazitäten noch nicht Schritt halten, besonders in den Schwellenländern. Die Senkung des Energiebedarfs ist folglich elementar, um diese Lücke kurzfristig zu schließen. Es gilt, die Energieintensität nachhaltig zu senken, das heisst die Wirtschaftsleistung vom Energiebedarf zu entkoppeln. Die Einsparpotenziale in Haushalten, Transport und Industrie sind enorm – Effizienzgewinne könnten die Energiekosten bis 2020 um 25 Prozent senken. Jedoch zahlen sich die notwendigen Investitionen in Sparmassnahmen wie Nutzung von industrieller Abwärme oder Stadtbegrünung (zur Begrenzung des Klimatisierungsbedarfs) unterschiedlich schnell aus und nicht immer kommen die Ersparnisse dem Investor zugute. Hier müssen Wege etabliert werden, wie der

Profit aus Einsparmassnahmen direkt und mit einem kurzfristig ausgerichteten Anreizsystem an den Investor zurückfliessen kann, zum Beispiel über lokale Klimafonds.

Welche Technologien benötigen wir?

Ein Umbau muss zügig erfolgen, doch neue Technologien im Energiesektor benötigen lange Entwicklungszyklen. Mittelfristig werden die Haupttechnologien auf denen basieren, die heute marktreif sind: Klimaneutrale Fossile, Kernkraft, Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie und Biomasse. Bestimmender Faktor für die Energieerzeugung von morgen ist die Emission von Treibhausgasen: Kohlendioxid (CO₂) aber auch Methan und Lachgas. Die Einführung von CO₂-Emissionspreisen in weiteren Regionen bzw. ihre Erhöhung würde die Wirtschaftlichkeit der fossilen Kraftwerke stark beeinflussen. Kohle ist aufgrund der zwei- bis dreifachen Emission stärker betroffen als Gas, das als relativ klimafreundliche fossile Alternative gilt. Die Abscheidung von CO₂ (carbon capture and storage – CCS) könnte fossile Kraftwerke nahezu emissionsfrei machen. Das spart Kosten für Emissionszertifikate einerseits, verursacht aber andererseits erhebliche Kosten für die Abscheidung, den Transport und die Lagerung von CO₂. Die meisten Experten gehen von mindestens zehn Jahren aus, bis diese Technologie in ausreichenden Kapazitäten installiert werden kann. Obwohl die dauerhafte Sicherheit der unterirdischen Speicherung längst nicht garantiert ist und auch die Wirtschaftlichkeit von CCS in Frage steht, werden heute dennoch Kohlekraftwerke mit der Option auf Nachrüstung gebaut (capture ready). Besonders in Ländern mit eigenen Kohlevorkommen (zum Beispiel China, USA, Australien) ist der Anreiz hoch, so flexibel auf zukünftige Emissionsregulationen reagieren zu können.

Weil regenerative Energien und die Kernkraft hingegen keine Emissionskosten zu tragen haben, werden sie verstärkt in den Markt getrieben. Windkraft ist auf Land (on-shore) konkurrenzfähig, und auf dem Wasser (off-shore) ist die Wirtschaftlichkeit absehbar. Die etablierte Wasserkraft ist aufgrund der dauerhaften Verfügbarkeit als Regelenergie besonders interessant. Thermische Solarenergie (concentrated solar power – CSP) ist heute bereits in südlichen Ländern rentabel und Photovoltaik (PV) profitiert von schnellen technologischen Lernraten und Skaleneffekten – sie wird in fünf bis zehn Jahren abhängig vom Standort wettbewerbsfähig sein. Grosse

Potenziale stecken in der Verbesserung des Wirkungsgrades durch neue Halbleitermaterialien, bessere Integration (zum Beispiel konzentrierte oder thermische PV) oder einfachere Produktionsprozesse: auf Folie gedruckte organische Solarzellen sind heute schon Realität. Solarzellen könnten in absehbarer Zukunft kostengünstig als Beschichtung aufgetragen werden und Strom «zum Nulltarif» produzieren. Energiegewinnung aus Biomasse und Abfall wird ebenfalls stark ausgebaut. Zunehmend gewinnen weitere regenerative Quellen an Bedeutung: Geothermie, Gezeitenkraft und Wellenkraft bergen riesige Potenziale. Sie sind heute bereits gut entwickelt, müssen allerdings noch wettbewerbsfähig werden. Die Kernkraft gilt ebenso als ein wesentlicher Baustein zur Reduktion der Klimagase. Sie ist in vielen Ländern etabliert (zum Beispiel Frankreich, USA, Russland), und trotz Fukushima hält zum Beispiel auch China an seinem ambitionierten Atomprogramm fest. Neue Reaktorgenerationen widmen sich hauptsächlich der Reaktorsicherheit und der besseren Brennstoffnutzung – Reaktoren der vierten Generation werden nach aktuellen Schätzungen jedoch frühestens ab 2030 einsatzbereit sein, staatliche Förderungen vorausgesetzt. Die Kernenergie profitiert stark von der Emissionsproblematik der fossilen Kraftwerke, weil sie bereits heute die «günstigste» Energieform darstellt. Klar ist jedoch auch: Die Risiken und Folgekosten der Kernkraft durch Reaktorunfälle und Endlagerung werden nicht vom Erzeuger getragen. Da diese externen Kosten schwer kalkulierbar sind, wird Kernenergie noch lange für viele die «günstigste» Form der Energieerzeugung bleiben. Der weitere Blick in die Zukunft sieht vielversprechende Technologien, die den Energiesektor revolutionieren könnten, bei denen jedoch bisher schwer absehbar bleibt, wann und ob sie nutzbar werden – wie zum Beispiel Fusionsenergie, nukleare Laufwellenreaktoren (die ihr Brennmaterial selbst erbrüten und zusätzlich inhärent sicher sein sollen) oder kleinste «Energiesammler», die thermische Energie oder Bewegungsenergie in Elektrizität umwandeln.

Wie sauber ist «emissionsfreie» Energie?

Jedes Kraftwerk verursacht in seinem Lebenszyklus in Herstellung, Wartung, Betrieb und Rückbau Treibhausgase und weitere Umweltfolgen – diese werden jedoch bisher selten systematisch bei Planungsvorgängen erfasst und in die Entscheidungen miteinbezogen. Im Fokus der Kritik stehen wesentlich die konventionellen Kraftwerke. Bei der Kernenergie herrscht auch nicht nur über ihre Sicherheits-

risiken, sondern auch über deren Umweltbilanz Uneinigkeit; Schätzungen schwanken zwischen dem niedrigen Niveau der erneuerbaren Energien und dem Fünffachen, weil Förderung, Aufbereitung und dauerhafte Entsorgung der Brennstäbe energieintensiv sind. Bei der «sauberen» Kohle, also bei Kraftwerken mit CCS, sind die Risiken der unterirdischen Speicherung von CO₂ schwer abzusehen, was die Haftungsfrage ähnlich brisant macht wie bei der Kernenergie. Aber auch die Erneuerbaren haben negative Umweltfolgen: Stauseen für Wasserkraftwerke verändern gesamte Ökosysteme, Windräder gefährden Vögel, Bohrungen für Geothermie können Erdbeben auslösen und das Grundwasser verschmutzen. Hinzu kommt die höhere Sichtbarkeit als bei konventionellen Kraftwerken. Umweltschützer und Bürgerinitiativen bekämpfen heute vielerorts regenerative Grossprojekte, was zunächst paradox erscheint. Tatsächlich muss die Frage nach den Umweltfolgen und der Lebenszyklus-Perspektive für alle Energieformen gestellt werden – dies ist jedoch bisher kaum gängige Praxis und würde – wenn es in alle Planungen Eingang fände – einen «Game-Changer» darstellen.

Infrastrukturelle Voraussetzungen

Heute wird der Bedarf im Tagesverlauf recht gut prognostiziert und je nach Höhe werden immer teurere Kraftwerke zugeschaltet. Mit der zunehmenden Integration von fluktuierenden (intermittierenden) Stromerzeugern wie Sonne und Wind verschärft sich das Problem, die Stromproduktion mit dem schwankenden Bedarf in Einklang zu bringen. Durch die Starrheit des aktuellen Infrastruktur-Modells müssen Ersatzkapazitäten vorgehalten werden. Aber auch bei durchgängig laufenden Kraftwerken wie mit Kernenergie müssen Regelkraftwerke die Lastspitzen ausgleichen, was ebenfalls mit Zusatzkosten verbunden ist. Dabei könnte der Bedarf an die Produktion angepasst werden, indem die Verbraucher gesteuert und koordiniert werden. Werden Lastspitzen vermieden, so sinkt der Bedarf an Kraftwerkskapazitäten und damit letztlich der Strompreis. Das intelligente Stromnetz (smart grid) bringt diese Regelbarkeit des Bedarfs und ist somit notwendige Voraussetzung für den Umbau des Energiesystems. Zum Ausgleich aller Schwankungen werden zudem weitere Technologien benötigt. Für den schnellen Lastausgleich eignen sich Batterien, Schwungräder, Supramagneten, Flüssigsalz oder komprimierte Luft. Das Hauptproblem bleibt die Überbrückung saisonaler Schwankungen. Heute existieren nur Pumpspeicher-

kraftwerke oder Stauseen als grosse Energiepuffer, doch die Potenziale sind vielerorts erschöpft. Eine Option besteht beispielsweise darin, zum Ausgleich der Lastspitzen in Kontinentaleuropa grosse Pumpspeicher in Skandinavien zu errichten – dafür wäre allerdings ein verlustarmes transeuropäisches Hochspannungsnetz notwendig. Als interessante Speicheralternative gilt synthetisches Methan, das mit Stromüberschuss aus Wasser hergestellt wird. Dieses künstliche Erdgas wird in existierende Erdgasleitungen eingespeist und bei Bedarf zum Beispiel in Gaskraftwerken klimaneutral verstromt. Zudem kann diese Technologie an jedem Ort installiert werden, was den Bedarf an grossen internationalen Leitungskapazitäten begrenzt.

Der Ausbau und die Modernisierung der Netze sind mit hohen Kosten verbunden, da auch zusätzliche Leitungen zu dezentralen Produzenten errichtet werden müssen. Ein lokaler Lastausgleich verringert Leitungsverluste und spart Kosten zum Aufbau grosser Überlandleitungen. Ein gesamteuropäisches Stromnetz schafft weitere Möglichkeiten der Stabilisierung, wird aber lange Zeit zum Aufbau brauchen. Der Netzausbau ist dringlich, wobei für Netzbetreiber bisher keine Anreize für diese Investitionen bestehen. Es wird schnell klar, dass hier eine politische Weichenstellung gefragt ist, auch über nationale Grenzen hinweg.

Dezentralität bringt neue Akteure

Mit den erneuerbaren Energiequellen hat sich eine neue dezentrale Erzeugung etabliert, die von vielen Kunden als positiv empfunden wird. Die Modularität der Erzeugung ermöglicht durch geringe Investitionsbarrieren den Eintritt neuer Produzenten: Privatleute, Gemeinschaften und Stadtwerke. Das ermöglicht eine schnelle Skalierung der Technologie, weil viele Marktteilnehmer ihre Investitionen unabhängig tätigen können. Die Marktmacht der grossen Versorger schwindet zunächst, doch die Marktchancen locken zunehmend finanzkräftige Investoren – einerseits die bestehenden Player, andererseits grosse Fonds oder Konsortien. Die Energieversorgung hat in der Gesellschaft schon heute eine höhere Sichtbarkeit erlangt und durch die Vielzahl der Produzenten wird sie zunehmend Gegenstand des allgemeinen Interesses. Die breitere Machtbasis führt zu einer gemeinsamen Verantwortung und Transparenz der Energieversorgung, was letztlich die Akzeptanz schafft für notwendige Investitionen und Massnahmen.

Verschiebung der Wertschöpfungskette

Die Einspeisevergütungen sinken mit den Stromgestehungskosten, wodurch die Erneuerbaren sukzessiv in den freien Strommarkt eingegliedert werden. Wie könnte ein Strommarkt aussehen, wenn Photovoltaik so günstig ist, dass jedes Dach damit gedeckt wird? Die Vielzahl der Produzenten wird neue Formen der Preisbildung erfordern, Preise müssten entweder von Erzeugergemeinschaften ausgehandelt oder staatlich festgelegt werden. Das Verschalten und intelligente Routen der Energie wird so ein neuer Markt, was die Wertschöpfungskette nachhaltig verändern wird. Gewinnchancen liegen dann vermehrt im Kundenzugang und der Vernetzung, neue Akteure engagieren sich bereits in diesem Markt (zum Beispiel IBM und Google). Die Anpassung zwischen Angebot und Nachfrage ist das Geschäftsmodell der Energiespeicher, welche die täglichen, wöchentlichen und jahreszeitlichen Schwankungen ausgleichen. Diese werden einen grösseren Stellenwert in der garantierten Versorgung einnehmen. In der Konsequenz bedeutet dies, dass Strom nachhaltig günstiger wird, die garantierte Verfügbarkeit von Strom jedoch mit einem Preisaufschlag bezahlt wird.

Von der Energieabhängigkeit zur Rohstoffabhängigkeit

Die Energie- und Rohstoffssicherheit ist eine der höchsten Prioritäten jedes Staates, Grundlage für Aufbau und Erhalt von Industrie und Infrastruktur. Die Energieversorgung erfolgt wesentlich über fossile und nukleare Primärenergieträger (2010 in Deutschland 90 Prozent), die meisten Länder sind vom kontinuierlichen Primärenergieimport abhängig (Import 2010 in Deutschland 70 Prozent, vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technik 2009). Wohlstand und Macht der ressourcenreichen Länder sind eng und teilweise ausschliesslich mit dem Verkauf dieser Rohstoffe verknüpft. Rohstoffarme Länder können ihre Energieversorgung über erneuerbare Energien realisieren und werden so zunehmend energetisch unabhängig. Länder mit grossen fossilen Vorräten verlieren im Gegenzug stetig an Bedeutung, was ganze Weltregionen destabilisieren könnte. Technologische Güter, wie auch die erneuerbaren Energien, benötigen zu ihrer Produktion spezielle Rohstoffe wie seltene Erden. Der weltweite Bedarf explodiert gerade, doch diese Stoffe sind knapp und ungleich in der Welt verteilt (vgl. Fraunhofer ISI 2009) – der Zugang zu diesen Stoffen wird zur Achillesferse. China hat im vergangenen Jahr erstmals die Ausfuhr seltener Erden beschränkt und damit die

Produktion von Windkraftanlagen behindert. Die Rohstoffindustrie muss neue Fördermöglichkeiten und Gebiete erschliessen, denn der Bedarf übersteigt schon heute die Fördermengen. Andererseits muss ein konsequentes Recycling seltener Rohstoffe erfolgen und nach besser verfügbaren Ersatzstoffen gesucht werden, um langfristig die Versorgung zu stabilisieren. Auch wenn der höhere Anteil Erneuerbarer an der Stromproduktion stärkere Unabhängigkeit von fossilen Ressourcen verspricht, erhöht sich also zeitgleich die Abhängigkeit von weiteren Ressourcen.

Die Rechnung bitte!

Deutlich ist: Der Umbau zur emissionsfreien Elektrizität bedeutet hohe Investitionen. Betrachtet man diese Kosten jedoch aus Sicht der Lebenszyklusanalyse und unter Einbeziehung externer Kosten (wie zum Beispiel Kosten, die eben durch Emissionen entstehen), wirken sie im Vergleich zu bisherigen Kosten gering. Zudem werden die Kosten für die Erneuerbaren weiter sinken, wohingegen die Brennstoffkosten für fossile Kraftwerke aufgrund der Rohstoffverknappung stetig steigen. Auch bisher entstehen durch das heute dominant fossile System hohe externe Kosten, die wesentlich von der Gesellschaft getragen werden. Die Wirkung der Treibhausgase ist global, womit die externen Kosten ebenfalls globalisiert werden. Stellt man die gesamten Kosten für einen Umbau wiederum den potenziellen Kosten gegenüber, die ohne Umbau entstünden und wir die Folgen eines rapiden Klimawandels weltweit zu bewältigen hätten, bleibt nur die Schlussfolgerung, dass die Investitionen notwendig sind. Die grosse Herausforderung besteht in der Verteilung der Kosten und einer supranational koordinierten Vorgehensweise. Diese wiederum würde nationale Kosten deutlich reduzieren, was jedoch im aktuellen politischen Klima schwer umsetzbar scheint. Dennoch muss schnell ein Mechanismus gefunden werden, der die Regulation des Gemeinguts Klima ermöglicht und die Allmende-Tragik vermeidet. Zentraler Hebel für die Verteilung der Kosten ist ein hoher CO₂-Preis, der emissionsfreie Kraftwerke günstiger und Fossile teurer macht. Die Frage der Verteilung der Kosten zwischen Industrieländern als «Altverursacher» mit immer noch extrem hohem Pro-Kopf-Verbrauchen und dem Anspruch der Entwicklungs- und Schwellenländer auf bezahlbares wirtschaftliches Wachstum bleibt hier bisher ungelöst. Ein wesentlicher Beitrag der Industrienationen bestünde darin, die erneuerbare Energieerzeu-

gung mit den Erlösen der CO₂-Zertifikate wettbewerbsfähig zu machen. Dann erst werden diese Energieformen weltweit in ausreichender Kapazität installiert – und je früher dieser Zeitpunkt erreicht ist, umso mehr fossile Kraftwerke werden weltweit vermieden.

Fazit

Ein rascher Umbau der Elektrizitätsversorgung ist notwendig aufgrund von wachsendem Energiebedarf, der Endlichkeit fossiler Ressourcen, dem Bedürfnis nach Energiesicherheit und dem Druck zur Reduktion von Emissionen. Ein Baustein wird die unmittelbare Umsetzung von Effizienzsteigerung sein, die einen schnellen Bedarfsanstieg begrenzt. Die Weichenstellung muss auf heute etablierten Technologien aufbauen. Neben den erneuerbaren Energien und der Kernkraft ist CCS eine weitere Lösungsoption zur Emissionsminderung für bestehende Kohlekraftwerke. Die notwendige Vorbedingung ist der Umbau der Netze und die Schaffung von Speichermöglichkeiten – einhergehend mit hohen Investitionen. Die Kosten für den Umbau der Energiesysteme sind enorm, aber moderat im Verhältnis zu den Klimakosten, die ohne ein Umsteuern entstünden. Ebenfalls sind die Kosten im Vergleich zu den externen Kosten der bisher vorherrschenden fossilen Verbrennung vergleichsweise gering. Ein Umsteuern erscheint damit nicht nur logisch, notwendig und machbar, sondern unausweichlich – der grundlegende Hebel ist die Einführung eines hohen CO₂-Preises. Dies macht die zentrale Herausforderung deutlich, die der Umbau mit sich bringt: die der politischen Steuerung und Verteilung der Kosten, insbesondere auf supranationaler Ebene und in Bezug auf die Verteilung zwischen Industrie- und Entwicklungsländern. Hier sind die Industrielän-

der mit ihrem im Verhältnis hohen Pro-Kopf-Verbrauch gefragt, eine Vorreiterrolle einzunehmen und die radikale und umfassende Vision eines neuen Stromsystems umzusetzen – sei dies auf globaler Ebene oder auf der Ebene von Grossregionen, wie es viele für die nächste Stufe der Klimawandelpolitik halten.



Cornelia Daheim

Cornelia Daheim ist geschäftsführende Gesellschafterin bei Z_punkt und betreut Projekte für Schlüsselkunden aus verschiedenen Branchen sowie im Rahmen europäischer Forschungsverbünde. Sie ist zudem Gründerin und Chair des German Node des Millennium Projects und studierte Literaturwissenschaft, Anglistik und Psychologie in Essen und London.



Dr. Sven Hirsch

Dr. Sven Hirsch ist Senior Foresight Consultant bei Z_punkt mit dem Schwerpunkt quantitative Methoden und der Kompetenz in technologischen Themen. An der ETH Zürich beschäftigt er sich mit medizinischer Bildverarbeitung und forscht an der Simulation von biologischen, regulativen Netzwerken. Er promovierte in Physik und studierte audiovisuelle Medien an der Kunsthochschule für Medien, Köln.

Quellen

WEO (2011): World Energy Outlook 2011, International Energy Agency, 2011.
McKinsey (2009): Wettbewerbsfaktor Energie als Chance für die deutsche Wirtschaft, 2009.
Bundesministerium für Wirtschaft und Technik, Energiedaten, Stand August 2011.
Fraunhofer ISI (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Karlsruhe.

