

Klimaschutz und Versorgungssicherheit

Entwicklung einer nachhaltigen
Stromversorgung

Klimaschutz und Versorgungssicherheit

Entwicklung einer nachhaltigen Stromversorgung

von

Thomas Klaus, Charlotte Loreck, Klaus Müschen

Mit Unterstützung von:

Rolf Beckers, Alexander Boehringer, Sebastian Briem,
Andreas Burger, Thomas Charissé, Marion Dreher,
Christoph Erdmenger, Benno Hain, Christian Herforth,
Helmut Kaschenz, Guido Knoche, Kai Kuhnhenh,
Jürgen Landgrebe, Harry Lehmann, Kai Lipsius,
Benjamin Lünenbürger, Werner Niederle, Diana Nissler,
Andreas Ostermeier, Theresa Pfeifer, Axel Riedel,
Sylvia Schwermer, Rainer Sternkopf, Carla Vollmer,
Ulrike Wachsmann

Umweltbundesamt

Dessau-Roßlau, September 2009

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

ISSN 1862-4359

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Email: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 2.2 Thomas Klaus

Dessau-Roßlau, September 2009

Inhalt

Kurzfassung	3
1 Einleitung – Nachhaltige Energieversorgung	10
2 Klimaschutz	12
2.1 Ziele des Klimaschutzes	12
2.2 Klimaschutzpotentiale in der Stromversorgung	13
2.2.1 Ausbau der erneuerbaren Energien	14
2.2.2 Erhöhung der Energieeffizienz auf der Nachfrageseite	15
2.2.3 Erhöhung der Energieeffizienz auf der Angebotsseite	16
2.2.4 Carbon Capture and Storage (CCS)	18
2.2.5 Risikotechnologie Atomenergie	20
2.3 Der Emissionshandel – ein wichtiges Klimaschutzinstrument	22
3 Versorgungssicherheit	24
3.1 Verfügbarkeit der Energieträger	24
3.2 Sicherer Netzbetrieb	26
3.3 Stromausfälle	29
3.4 Deckung der Stromnachfrage	30
4 Kraftwerkspark und Versorgungssicherheit bis 2020	33
4.1 Aspekte zur Beurteilung der Versorgungssicherheit	33
4.1.1 Abbildung wettbewerblicher Strommärkte	33
4.1.2 Liberalisierung des Strommarktes und europäischer Stromhandel	33
4.1.3 Entwicklung des Kraftwerksbestandes	34
4.1.4 Kraftwerksneubauten	35
4.1.5 Kraftwerkseinsatzplanung	36
4.1.6 Entwicklung der Stromnachfrage	36
4.1.7 Regelbare Lasten	38
4.1.8 Elektromobilität	39
4.1.9 Einfluss der Windenergie auf den Regelleistungsbedarf	40
4.2 dena-Kurzanalyse	41
4.2.1 Modellsystem und Methodik	42
4.2.2 Angebotsseite	42
4.2.3 Nachfrageseite	46
4.2.4 Energiebilanz und Leistungslücke	47
4.2.5 Bewertung der Ergebnisse	48
4.2.6 Fazit zur Bewertung der dena-Kurzanalyse	49

4.3	Studie zum Monitoringbericht des BMWi	50
4.3.1	Modell und Annahmen	50
4.3.2	Ergebnisse	51
4.3.3	Fazit zur Bewertung der Studie zum BMWi-Monitoringbericht	56
4.4	UBA-Hintergrundpapier „Atomausstieg und Versorgungssicherheit“	57
4.5	Beurteilung der Versorgungssicherheit bis 2020	58
5	Perspektiven einer nachhaltigen Stromversorgung	60
5.1	Anforderungen an den Kraftwerkspark	60
5.1.1	Langfristige Klimaschutzziele	61
5.1.2	Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien und KWK	65
5.1.3	Residuale Last und Wirtschaftlichkeit konventioneller Kraftwerke	67
5.1.4	Regelleistung	75
5.1.5	Flexibilität konventioneller Kraftwerke	75
5.2	Versorgungssicherheit und nachhaltige Stromversorgung	76
6	Wirtschaftlichkeit und Strompreise	80
6.1	Wirtschaftlichkeit	80
6.2	Strompreise	81
	Literatur	84

Kurzfassung

Deutschland hat sich, wie viele andere Staaten, bereits im Jahr 1992 in Rio de Janeiro dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung verpflichtet.

Für die Entwicklung eines nachhaltigen Energiesystems setzt die Tragfähigkeit des Naturhaushalts die Leitplanken. Nur innerhalb dieses Rahmens können wir andere Nachhaltigkeitsanforderungen, wie Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit, optimieren.

Die Studie „Klimaschutz und Versorgungssicherheit“ des Umweltbundesamtes (UBA) zeigt, wie eine nachhaltige Stromversorgung möglich ist. Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit sind vereinbar – auch mit Atomausstieg und ohne in den nächsten Jahren weitere konventionelle Kraftwerke ohne Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu bauen.

Klimaschutzziele

Der Klimawandel ist bereits Wirklichkeit. Die Bekämpfung der Klimaveränderungen und ihrer dramatischen Folgen ist eine der zentralen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Drastische Minderungen der Emissionen an Treibhausgasen und Maßnahmen zur Anpassung an die nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels sind politische Handlungsmaximen.

Um gravierende Folgen des Klimawandels zu vermeiden, muss die Erderwärmung dauerhaft auf maximal 2 Grad Celsius (°C) gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden. Dafür müssen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 weltweit auf die Hälfte der Emissionen des Jahres 1990 sinken. Das bedeutet für die Industriestaaten, also auch für Deutschland, dass sie bis Mitte dieses Jahrhunderts ihre Treibhausgasemissionen um 80 Prozent (%) bis 95 % gegenüber 1990 mindern müssen.

Die energiebedingten CO₂-Emissionen tragen in Deutschland zu über 95 % der gesamten CO₂-Emissionen und zu rund 80 % aller Treibhausgasemissionen bei. Allein die Stromerzeugung, die in Deutschland zurzeit noch überwiegend auf fossilen Brennstoffen basiert, hat einen Anteil von rund 40 % an den gesamten deutschen CO₂-Emissionen. Daher hat die Stromerzeugung eine Schlüsselrolle für die Reduzierung klimaschädlicher Emissionen. Klimaschutz ist jedoch nur eine Anforderung an eine nachhaltige Entwicklung.

Der Weg zu einer nachhaltigen Stromversorgung

Um die langfristigen Klimaschutzziele im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung erfüllen zu können, muss ein grundlegender Wandel in der Stromversorgung stattfinden. Zentrale Elemente dafür sind der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien, die Senkung der Stromnachfrage durch Effizienzsteigerungen, der Ausbau der KWK und der Ausstieg aus der Atomenergienutzung.

Erneuerbare Energien müssen langfristig den überwiegenden Teil der Stromerzeugung übernehmen. Die Potentiale hierfür sind sowohl in Deutschland als auch weltweit vorhanden.

In einem ersten Schritt müssen wir bis 2020:

- den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf über 30 % und danach weiter steigern,
- die Stromnachfrage durch Effizienzsteigerungen um 11 % gegenüber dem Jahr 2005 senken und
- den Anteil der KWK an der Stromerzeugung auf 25 % erhöhen.

Da eine direkte Speicherung von Wechselstrom großtechnisch nicht möglich ist, muss jederzeit ein Leistungsausgleich zwischen Erzeugung (Einspeiseleistung) und Verbrauch (Last) erfolgen. Durch die schwankende Einspeisung und die Prognoseabweichungen bei Windenergie und Photovoltaik – die neben der Geothermie die größten Potentiale in Deutschland haben – ergeben sich hierfür große Herausforderungen.

Um große Mengen erneuerbarer Energien in die Stromversorgung zu integrieren, müssen und können wir neue technische Möglichkeiten nutzen. Die Frage lautet daher nicht, wie viel Strom aus erneuerbaren Energien das heutige Elektrizitätssystem verträgt, sondern: Wie muss unser zukünftiges Elektrizitätssystem aussehen, um Strom aus erneuerbaren Energien möglichst effektiv und kosteneffizient integrieren zu können?

Dazu sind die erneuerbaren Energien und auch die Nachfrageseite zukünftig stärker am Leistungsausgleich und bei der Bereitstellung von Regelleistung zu beteiligen, beispielsweise in virtuellen Kraftwerken. Zum Ausgleich von Einspeiseschwankungen aus erneuerbaren Energien bietet auch der großräumige europäische Leistungsausgleich erhebliche Potentiale. Als Ergänzung zu dem weiterhin schnell wachsenden Anteil erneuerbarer Energien ist zudem – für eine Übergangszeit – ein hochflexibler und emissionsarmer fossiler Kraftwerkspark erforderlich.

Das Phantom „Stromlücke“

Aktuell geht es jedoch in der öffentlichen Diskussion weniger um die Entwicklung einer nachhaltigen Stromversorgung, als viel mehr um die Frage der Versorgungssicherheit und des zukünftigen Bedarfs an Kraftwerksneubauten.

Die dabei häufig genutzten Begriffe „Stromlücke“ und „Defizit“ an verfügbarer Kraftwerksleistung suggerieren die Gefahr großräumiger Stromausfälle (Blackouts). Dem ist aber nicht so: Großräumige Stromausfälle können nur eintreten, wenn sehr seltene Ereignisse die vorgeschriebenen Sicherheitsreserven für den Netzbetrieb übersteigen oder wenn gegen die Anforderungen an einen sicheren Netzbetrieb – zum Beispiel durch menschliches Versagen – verstoßen wird.

Bei den mit den Begriffen „Stromlücke“ und „Defizit“ an verfügbarer Kraftwerksleistung beschriebenen Situationen handelt es sich um Kapazitätsknappheiten. Diese führen in funktionierenden Märkten möglicherweise zu Preisspitzen, jedoch nicht zu großräumigen Stromausfällen. Anhand der aktuellen Entwicklung im Energiemarkt ist nicht erkennbar, dass der Strommarkt momentan nicht funktioniert oder zukünftig nicht funktionieren wird.

Nimmt man jedoch einen nicht funktionierenden Markt an, so sollten nicht die Symptome behandelt werden, wie dies mit Investitionsförderungen für den Neubau von Kraftwerken oder der Verlängerung der Laufzeiten von Atomkraftwerken (AKW) derzeit diskutiert wird, um mögliche Kapazitätsdefizite auszugleichen. Vielmehr sollten die möglichen Ursachen für den nicht funktionierenden Markt beseitigt werden, indem etwa das Marktdesign angepasst wird, um dauerhaft sichere Lösungen zu erhalten.

Zum Neubau von Kraftwerken gibt es grundsätzlich verschiedene Alternativen, die zugleich die Flexibilität am Strommarkt erhöhen. Hierzu gehören zum Beispiel:

- eine stärkere zeitliche Flexibilisierung der Nachfrage zur Steigerung der kurzfristigen Preiselastizität,
- die Senkung der gesamten Nachfrage durch Effizienzsteigerungen
- die Bereitstellung von Regelleistung durch regelbare Lasten,
- Laufzeitverlängerungen bei fossilen Bestandskraftwerken und
- in gewissem Umfang Stromimporte zum kurzfristigen Leistungsausgleich.

Diese Möglichkeiten haben insgesamt erhebliche technische Potentiale, und sie sind aus volkswirtschaftlicher Sicht in der Regel von Vorteil.

Keine neuen konventionellen Kraftwerke ohne KWK bis 2020 erforderlich

Bis zum Jahr 2020 besteht – auch mit dem Atomausstieg – kein Neubaubedarf an konventionellen Kraftwerken ohne KWK über die derzeit in Bau befindlichen Anlagen hinaus. Dies gilt selbst dann, falls die Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien und der KWK sowie für die Senkung der Stromnachfrage insgesamt deutlich verfehlt würden. Vor allem besteht bis zum Jahr 2020 kein Neubaubedarf an zusätzlichen konventionellen Grundlastkraftwerken ohne KWK.

Nur falls der Stromverbrauch ohne eine deutliche Zunahme der kurzfristigen Preiselastizität der Nachfrage erheblich stiege und die zuvor genannten Alternativen zum Kraftwerksneubau nur teilweise genutzt würden und falls zugleich die Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien und der KWK deutlich verfehlt würden, so bestünde ein zusätzlicher Bedarf für konventionelle Neubaukraftwerke. Dieser Bedarf ergäbe sich vor allem für Mittellast-, Spitzenlast- und Reservekraftwerken, jedoch weniger für Grundlastkraftwerke. Sollte sich künftig andeuten, dass die Ziele deutlich verfehlt würden, sollten jedoch vorrangig die bestehenden Instrumente, wie zum Beispiel das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) oder das KWK-Gesetz, angepasst oder ergänzt werden.

Sollte – zusätzlich zu den bereits in Bau befindlichen Kraftwerken – ein erheblicher Teil der momentan bestehenden und vielfach weit fortgeschrittenen Kraftwerksneubauplanungen realisiert werden, besteht – statt eines weiteren Neubaubedarfs – vielmehr die Gefahr volkswirtschaftlich ineffizienter Überkapazitäten, vor allem im Bereich der Grundlast. Die Diskussion über Laufzeitverlängerungen der Atomkraftwerke verschärft das Risiko massiver Überkapazitäten im Grundlastbereich zusätzlich. Die teilweise zu beobachtende Investitionszurückhaltung bei Kraftwerksneubauten zeigt daher, dass einige Investoren dies erkannt haben und der Markt insofern funktioniert.

Zurzeit kein Handlungsdruck

Vielfach wird über die Notwendigkeit einer sehr baldigen Entscheidung über den Neubau konventioneller Kraftwerke ohne KWK oder auch über Laufzeitverlängerungen für Atomkraftwerke diskutiert. Der in diesen Debatten suggerierte Handlungsdruck ist jedoch nicht gerechtfertigt, da die Versorgungssicherheit bis 2020 gewährleistet werden kann – wie oben dargestellt – auch mit Atomausstieg und ohne in den nächsten Jahren weitere konventionelle Kraftwerke ohne KWK zu bauen.

Für Reaktionen auf einen möglichen Kraftwerksbedarf für die Zeit nach 2020 sind bis etwa zum Jahr 2015 keine Entscheidungen erforderlich, da die durchschnittliche Realisierungsdauer neuer fossile Kraftwerke rund drei bis sieben Jahre beträgt.

In den nächsten Jahren besteht deshalb kein Handlungsbedarf, weder für einen Neubau konventioneller Kraftwerke ohne KWK noch für Laufzeitverlängerungen der dann noch betriebenen Atomkraftwerke.

Laufzeitverlängerungen für Atomkraftwerke stellen auch für die Zeit nach 2020 keine nutzbare Option dar, da die Atomenergie die Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung gravierend verletzt. Die Atomenergienutzung sollte daher schnellstmöglich beendet werden.

Entscheidungen über den Neubau konventioneller Kraftwerke ohne KWK können in einigen Jahren auf der Grundlage des dann zu erwartenden Kraftwerksbedarfs und vor allem des dann verfügbaren neuen Stands der Technik getroffen werden.

Wie sieht es nach 2020 aus?

Langfristig – vor allem für die Zeit nach 2020 – stellen der Ausbau der erneuerbaren Energien und die Steigerung der Energieeffizienz neue Anforderungen an den konventionellen Kraftwerkspark: Obwohl zum Beispiel die fluktuierend einspeisende Windenergie selbst keine Grundlastkapazität darstellt und ihr Leistungskredit sehr niedrig ist, verringert sie die residuale Grundlast deutlich, das heißt den Teil der Grundlast, der von konventionellen Kraftwerken zu decken ist. Der Ausbau der erneuerbaren Energien insgesamt wird den Bedarf an konventionellen Grundlastkraftwerken – also Kraftwerke mit hohen Ausnutzungsdauern, wie Atom- und neue Kohlekraftwerke – zukünftig deutlich senken.

Langfristig brauchen wir zwar auch neue fossile Kraftwerke. Es besteht jedoch vor allem ein zusätzlicher Bedarf an Spitzenlast- und Reservekraftwerken und gegebenenfalls ein Bedarf an neuen Mittellastkraftwerken für den Ersatz von Bestandsanlagen. Ein erheblicher Neubaubedarf an konventionellen Grundlastkraftwerken für die Zeit nach 2020 ist – auch mit Atomausstieg – sehr unwahrscheinlich, vor allem falls die Ziele der Bundesregierung für den Ausbau der erneuerbaren Energien und der KWK weitgehend erreicht werden.

Die in der öffentlichen Debatte um die Versorgungssicherheit geforderten Laufzeitverlängerungen für Atomkraftwerke oder die Förderung neuer – für die Grundlast bestimmter – konventioneller Kraftwerke sind also nicht nur überflüssig, sondern sie gehen auch in die falsche Richtung.

Nachhaltiges Energiesystem: mehr als Klimaschutz und Versorgungssicherheit

Nachhaltigkeit ist mehr als Klimaschutz. Zu den Anforderungen an ein nachhaltiges Energieversorgungssystem gehören auch Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit, Risikoarmut und Fehlertoleranz, Ressourcenschonung sowie umfassende Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung externer Kosten.

Zu den nicht nachhaltigen Stromerzeugungstechniken gehört die Atomenergienutzung. Sie sollte schnellstmöglich beendet werden.

Auch die Kohleverstromung ist aus Gründen des Klima-, Landschaft- und Ressourcenschutzes keine nachhaltige Technik.

Ebenso ist die Abscheidung und Speicherung des Kohlendioxids (CO₂), das so genannte carbon capture and storage (CCS), auf Basis fossiler Energieträger bei näherer Betrachtung nicht nachhaltig. Inwieweit CCS an fossilen Kraftwerken in Deutschland einen Beitrag für den Klimaschutz leisten kann, ist fraglich. Vor allem ist noch zu untersuchen, welche Kapazitäten sicherer Speicher tatsächlich zur Verfügung stehen und welche konkurrierenden Verwendungsoptionen für diese Speicher bestehen.

Global kann CCS, da die geologischen Speicher nur begrenzt vorhanden sind, eine Übergangstechnik für die Umstellung zu einem - überwiegend auf erneuerbaren Energien basierenden - nachhaltigen Energiesystem sein. Allerdings ist das Funktionieren der CCS-Technik noch nicht sichergestellt und mit ihrer großtechnischen Verfügbarkeit ist frühestens ab 2020 zu rechnen.

Für die Erfüllung der langfristigen Klimaschutzziele sind nicht nur drastische Emissionsminderungen bei der Stromerzeugung erforderlich, sondern auch in der Industrie. Die begrenzten, potentiell vorhandenen CO₂-Speicher sollten daher vorrangig für die Senkung der prozessbedingten Emissionen, zum Beispiel aus der Stahl- und Zementherstellung, und – falls zukünftig erforderlich – für eine Dekarbonisierung der Atmosphäre zur Verfügung stehen. Im Sinne des Vorsorgeprinzips ist dies geboten, solange noch keine belastbaren Informationen über die Kapazitäten der CO₂-Speicher bestehen.

Auch die Stromerzeugung auf Erdgas-Basis ist im strengen Sinne nicht nachhaltig. Sie sollte deshalb auch nur für eine Übergangszeit bis zu einem hauptsächlich auf erneuerbaren Energien basierenden System zum Einsatz kommen. Sie führt jedoch zu deutlich niedrigeren CO₂-Emissionen als die Stromerzeugung auf Basis von Kohle.

Langfristig bestehen ausreichend große Potentiale für eine nachhaltige Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien und Energieeffizienz.

Helfen neue fossile Kraftwerke dem Klimaschutz?

In der öffentlichen Debatte gibt es das Argument, dass moderne Kohlekraftwerke gut für den Klimaschutz seien, weil ein neues Kohlekraftwerk pro Kilowattstunde Strom weniger CO₂ ausstößt als ein altes. Um zu beurteilen, welchen Beitrag eine solche CO₂-Ersparnis beim erforderlichen Umbau des Kraftwerksparks leisten kann, ist jedoch ein Blick auf das Gesamtsystem notwendig:

Um die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung zu begrenzen und langfristig zu senken, ist der Emissionshandel in der Europäischen Union (EU) – in Kombination mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien und der Steigerung der Energieeffizienz – das zentrale Instrument. Die Obergrenze der CO₂-Emissionen im Emissionshandel, das so genannte Cap, ist bis zum Jahr 2020 festgelegt. Es muss auch nach 2020 stark sinken, um die langfristigen – für 2050 anvisierten – Klimaschutzziele erreichen zu können.

Eine Betrachtung der langfristigen europäischen Klimaschutzziele und der spezifischen CO₂-Emissionen der Kraftwerke zeigt erstens: Die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen dürfen im Jahr 2050 nur noch weniger als ein Drittel der heutigen Werte betragen, müssen also unter 150 g/kWh_e sinken. Zweitens: Obwohl neue Kohlekraftwerke deutlich höhere Wirkungsgrade und deshalb geringere CO₂-Emissionen pro erzeugter Kilowattstunde erreichen als alte Kohlekraftwerke, reichen diese Effizienzgewinne bei weitem nicht für eine CO₂-Minderung in der Größenordnung aus, wie sie der Klimaschutz erfordert. Drittens: Unter den fossilen Alternativen ohne CCS führt nur der Ersatz alter Kohlekraftwerke durch neue hocheffiziente Erdgas-gefeuerte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke mittelfristig zu ausreichenden CO₂-Minderungen.

Eine starke Kohlenutzung mit heutiger Kraftwerkstechnik würde zudem langfristig – das heißt weit nach 2020 und bei zukünftig stetig sinkendem Cap – den CO₂-Zertifikatepreis in die Höhe treiben.

Da die Amortisationszeit neuer fossiler Kraftwerke rund 20 Jahre und deren technische Lebensdauer über 40 Jahre beträgt, bestünde mit einem massiven Neubau an Kohlekraftwerken das Risiko der Festlegung auf einen emissionsintensiven fossilen Kraftwerkspark und das Risiko von Fehlinvestitionen für die Kraftwerksbetreiber.

Der Weiterbetrieb bestehender fossiler Kraftwerke bis 2020 ist europaweit nicht mit höheren Emissionen verbunden, da die Gesamtmenge an CO₂-Emissionen in diesem Zeitraum durch den Emissionshandel begrenzt ist.

Da wir zukünftig deutlich weniger konventionelle Grundlastkraftwerke brauchen werden als bisher, ist es für langfristig günstige CO₂-Preise daher insgesamt von Vorteil, einige fossile Bestandskraftwerke für gewisse Zeit weiterhin zu betreiben, falls diese Kapazitäten notwendig sind, statt neue emissionsintensive Grundlastkraftwerke zu bauen.

Wirtschaftlichkeit der Stromversorgung

Für das Kriterium der umfassenden Wirtschaftlichkeit in der Stromversorgung sind die vollständigen externen Kosten der Energienutzung zu berücksichtigen, wie das der Emissionshandel für die externen Kosten der CO₂-Emissionen bereits teilweise leistet.

Unter Berücksichtigung der externen Umweltkosten liegen die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der Stromerzeugung aus verschiedenen erneuerbaren Energien – wie zum Beispiel der Windenergie mit rund 8,0 ct/kWh – bereits heute unter denen der fossilen Stromerzeugung. Zudem wird sich das Kostenverhältnis zukünftig weiter zu Gunsten der erneuerbaren Energien verbessern.

Der Umbau des Kraftwerksparks im Sinne der Nachhaltigkeit ist mit umfangreichen, jedoch volkswirtschaftlich vorteilhaften Investitionen verbunden. Daher sollten wir jetzt die Chance nutzen, das Energiesystem entsprechend den zukünftigen Anforderungen zu gestalten.

Markthemmnisse beseitigen und Stromnetze ausbauen

Wo der Markt bisher nicht optimal funktioniert, sollten Hemmnisse beseitigt werden. Dies gilt vor allem für den Gasmarkt, wo die Liberalisierung noch weniger weit fortgeschritten ist, jedoch auch für den Strommarkt. Der europaweite wie regionale Ausbau der Stromnetze muss vorangetrieben werden, um einen gesamteuropäischen Strommarkt zu schaffen, um erneuerbare Energien auch zukünftig integrieren und die europaweiten Potentiale erneuerbarer Energien optimal nutzen zu können.

Handlungsempfehlungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den langfristigen Zielen für einen nachhaltigen Kraftwerkspark die folgenden Handlungsempfehlungen an die Politik:

- Ausbau der erneuerbaren Energien und der KWK weiter vorantreiben,
- Stromnachfrage durch Effizienzsteigerungen senken,
- Erfolg der Instrumente für erneuerbare Energien, KWK und Effizienz kontrollieren,
- Atomausstieg wie gesetzlich festgelegt fortsetzen,
- Emissionshandels-Cap langfristig ambitioniert senken,
- Laufzeit fossiler Bestandskraftwerken nicht beschränken,
- Neubau von Kraftwerken ohne KWK nicht fördern,
- Liberalisierung des Erdgasmarktes fortsetzen,
- Transportwege und Bezugsquellen für Erdgas diversifizieren,
- Erdgas durch Effizienzmaßnahmen, vor allem im Wärmesektor, einsparen,
- Ausbau des Stromnetzes vorantreiben.

Die Kriterien der Nachhaltigkeit und insbesondere der Klimaschutz erfordern einen grundlegenden Umbau der Stromversorgung. Dieser Umbau braucht Zeit und ist mit großen Investitionen verbunden, die sich jedoch volkswirtschaftlich lohnen.

Entscheidungen, die wir heute über die weitere Entwicklung des Kraftwerksparks treffen, wirken mindestens bis zur Mitte des Jahrhunderts. Daher sollten wir bereits heute die richtigen Weichen für eine nachhaltige Entwicklung stellen.

1 Einleitung - Nachhaltige Energieversorgung

Der Klimawandel ist bereits Wirklichkeit. Die Bekämpfung der Klimaänderungen und ihrer dramatischen Folgen ist eine der zentralen Herausforderungen dieses Jahrhunderts. Drastische Minderungen der Emissionen an Treibhausgasen und Maßnahmen zur Anpassung an die nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels sind politische Handlungsmaxime. Die energiebedingten CO₂-Emissionen tragen in Deutschland zu über 95 Prozent (%) der gesamten CO₂-Emissionen und zu rund 80 % aller Treibhausgasemissionen bei¹. Die Energieversorgung - dazu gehören Strom, Wärme und Verkehr - ist damit in Deutschland der Hauptverursacher klimaschädigender Emissionen. Allein die Stromerzeugung, die in Deutschland zurzeit noch zu knapp 60 % auf fossilen Brennstoffen basiert, hat einen Anteil von rund 40 % an den gesamten deutschen CO₂-Emissionen.

Die aktuelle Zusammensetzung und die zukünftige Entwicklung des Kraftwerksparks haben damit eine maßgebliche Bedeutung für die Reduzierung klimaschädigender Emissionen. Zugleich ist der Kraftwerkspark Gegenstand einer kontroversen aktuellen Debatte, die nicht nur den Klimaschutz, sondern auch die Versorgungssicherheit betrifft. Dabei vermischen sich teilweise politische Forderungen mit technischen und ökonomischen Betrachtungen zu einem verzerrten Bild der realen Situation. Dieses Papier soll zu einer Versachlichung beitragen. Das Umweltbundesamt (UBA) stellt darin dar, wie sich der Kraftwerkspark zukünftig entwickeln sollte, um den Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung Rechnung zu tragen. Der Schwerpunkt des Papiers liegt dabei auf den wesentlichen Nachhaltigkeitsanforderungen Klimaschutz, Versorgungssicherheit und umfassende Wirtschaftlichkeit. Diese sind im Einklang mit weiteren Anforderungen zu erfüllen, um eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten.

Dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung hat sich Deutschland - gemeinsam mit vielen anderen Staaten - im Zuge der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung bereits im Jahr 1992 in Rio de Janeiro verpflichtet. Die Bundesrepublik setzt diese Verpflichtung mit der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie um, die unter anderem auch Vorgaben für eine nachhaltige Energieversorgung und damit auch für die Entwicklung der Stromversorgung enthält.

Eine nachhaltige Entwicklung befriedigt die Bedürfnisse der heutigen Generation, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können². Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung umfasst die Dimensionen der ökologischen, ökonomischen und der sozialen Nachhaltigkeit.

Die im Energiewirtschaftsgesetz daran angelehnten Anforderungen an die Elektrizitätsversorgung - sicher, wirtschaftlich und umweltfreundlich - werden häufig gleichrangig dargestellt. Ohne den Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen ist jedoch ein dauerhaftes Überleben der Menschheit unter angemessenen Bedingungen nicht möglich. Einem Energiesystem, das die natürlichen Ressourcen übernutzt, fehlt die Grundlage für eine weitere soziale und wirtschaftliche Entwicklung³, und es widerspricht dem Grundsatz generationenübergreifender Gerechtigkeit. Die ökologische Tragfähigkeit ist daher als letzte, unüberwindliche Schranke für alle menschlichen Aktivitäten zu akzeptieren.⁴

¹ UBA [2008 a]

² Hauff [1987]

³ Ohne eine Begrenzung des Klimawandels ist zum Beispiel eine volkswirtschaftlich günstige Entwicklung in den kommenden Jahrzehnten nicht möglich, siehe auch Stern [2006].

⁴ UBA [2002]

Es kann also nur darum gehen, wie die heutige Menschheit den ihr verbliebenen Spielraum am besten nutzen kann.

Aus der Tragfähigkeit des Naturhaushalts ergeben sich die Leitplanken für die Entwicklung eines nachhaltigen Energiesystems. Nur innerhalb dieses Rahmens können wir andere Nachhaltigkeitsanforderungen wie Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit optimieren.

Das UBA hat aus den bereits genannten drei Nachhaltigkeitsdimensionen die spezifischen **Anforderungen an ein nachhaltiges Energieversorgungssystem** abgeleitet:⁵

- Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit,
- soziale Verträglichkeit,
- Risikoarmut und Fehlertoleranz,
- konsequente Ressourcenschonung,
- bedarfsgerechte Nutzungsmöglichkeit und dauerhafte Versorgungssicherheit,
- umfassende Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung externer Kosten⁶,
- Zugangs- und Verteilungsgerechtigkeit,
- Internationale Kooperationen⁷.

Daher sind die Kriterien Klimaverträglichkeit sowie dauerhafte Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit, die dieses Papier als Schwerpunkte betrachtet, zwar wichtig, sie sind aber im Einklang mit allen weiteren Kriterien zu erfüllen, um eine nachhaltige Energieversorgung - und damit auch Stromversorgung - zu gewährleisten.

Kapitel 2 beschreibt Klimaschutzziele und die Potentiale in der Stromversorgung diese zu erreichen. Kapitel 3 und 4 nennen wesentliche Aspekte zur Beurteilung der Versorgungssicherheit und bewerten die Entwicklung der Versorgungssicherheit in der deutschen Stromversorgung für den Zeitraum bis 2020 auf Basis dieser Ausführungen und der Analyse verschiedener Studien. Kapitel 5 gibt einen Ausblick auf eine nachhaltige Stromversorgung der Zukunft und zeigt, welche Weichen bereits heute auf dem Weg dorthin zu stellen sind. Kapitel 6 beleuchtet Wirtschaftlichkeit und Preise in der Stromversorgung.

Gemeinsam mit diesem Papier veröffentlichen wir die Studie „Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung“⁸, die die Firma BET⁹ für das UBA erstellte. Diese Studie behandelt neben allgemeinen Aspekten der Versorgungssicherheit vor allem die Ergebnisse, Vorgehensweise, Annahmen und Schlussfolgerungen der von der Deutschen Energie-Agentur (dena) erstellten „Kurzanalyse der Kraftwerks- und Netzplanung in Deutschland bis 2020“¹⁰. Diese Kurzanalyse wird in der öffentlichen Debatte häufig als Beleg für eine vermeintliche Gefährdung der Versorgungssicherheit angeführt. Die BET-Studie bietet weitere vertiefende Informationen, deren Darstellung im Rahmen des vorliegenden Papiers zu weit führen würde.

⁵ UBA [2002]

⁶ Neben Arbeits-, Kapital- und Ressourcenkosten müssen auch externe ökologische und soziale Kosten einbezogen werden.

⁷ Internationale Kooperationen, um Konfliktpotentiale durch regionalen Mangel an Ressourcen zu vermeiden.

⁸ BET [2008]

⁹ Die Firma BET (Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH) ist ein Beratungsunternehmen der Energie- und Wasserwirtschaft.

¹⁰ Dena [2008]

2 Klimaschutz

Dieses Kapitel stellt die mittel- und langfristigen weltweiten, europäischen und deutschen Klimaschutzziele dar, beschreibt Potentiale zur Minderung von Treibhausgasen in der Stromversorgung und stellt die wesentlichen politischen Maßnahmen zu ihrer Erschließung vor.

2.1 Ziele des Klimaschutzes

Der Klimawandel findet bereits statt. Steigende Durchschnittstemperaturen, eine Änderung der Niederschlagsmuster, ein Anstieg des Meeresspiegels, eine Häufung extremer Wetterereignisse und die damit verbundenen Konsequenzen wie zunehmende Hochwassergefahren, Ertragsgefährdung in der Landwirtschaft oder negative gesundheitliche Wirkungen bergen erhebliche weltweite Gefahren für Menschen und Volkswirtschaften, gefährden die Stabilität der Ökosysteme und damit allgemein eine nachhaltige Entwicklung. Diese Gefahren können zukünftig noch deutlich zunehmen, falls wir nicht umsteuern.

Um gravierende Folgen zu vermeiden, muss die Erderwärmung auf maximal 2 Grad Celsius (°C) gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden. Diese politisch festgelegte Zielvorgabe der EU basiert auf den wissenschaftlichen Ergebnissen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), des so genannten Weltklimarates¹¹. Bei einem darüber hinausgehenden Temperaturanstieg können die Kosten für die Anpassung sowie die möglichen Schäden dramatisch ansteigen.

Um das Zwei-Grad-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 66 % zu erreichen, ist eine Stabilisierung der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre bei maximal 400 parts per million (ppm) CO₂-Äquivalente notwendig.¹² Die EU strebt eine Stabilisierung bei 450 ppm CO₂-Äquivalenten an, mit der eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit verbunden ist, das Zwei-Grad-Ziel zu erreichen.¹³

Dafür müssen die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 weltweit auf die Hälfte der Emissionen des Jahres 1990 sinken. Das bedeutet für die Industriestaaten, also auch für Deutschland, dass sie bis Mitte dieses Jahrhunderts ihre Treibhausgasemissionen um 80 %¹⁴ bis 95 %¹⁶ gegenüber 1990 mindern müssen.¹⁷ Zögern bedeutet also wachsende

¹¹ IPCC [2007 a]

¹² EU Climate Change Expert Group [2008]

¹³ ebd.

¹⁴ UBA [2005]

¹⁵ Enquete-Kommission [2002] S. 36: „Ökologische Ziele (87): Die weltweite Reduzierung der energiebedingten Treibhausgase ist Kern einer auf Nachhaltigkeit angelegten Energie- und Verkehrspolitik. Ziel muss die Stabilisierung des Weltklimas sein. Notwendig ist demnach, den weltweiten CO₂-Ausstoß bis 2050 gegenüber dem heutigen Niveau um etwa 50 % zu senken. Die Kommission sieht es als notwendig an, dass die Treibhausgasemissionen in den Industrieländern, also auch in Deutschland, bis zum Jahr 2020 um 40, bis 2030 um 50 und bis 2050 um 80 Prozent gegenüber 1990 reduziert werden müssen. So würde den mehr als 80 Prozent der Weltbevölkerung in den Entwicklungsländern eine nachhaltige Entwicklungsperspektive ermöglicht.“

ebd. S.345: „Alle Interventionsszenarien sollten weiterhin auf das von der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 13. Deutschen Bundestages vorgegebene Ziel hinarbeiten, die Treibhausgasemissionen Deutschlands im Jahre 2050 gegenüber 1990 um 80 % zu reduzieren.“

¹⁶ IPCC [2007 b], Chapter 13, S. 776, Box 13.7

Klimaschäden und steigende Kosten, sowohl für spätere Klimaschutzbemühungen als auch für Maßnahmen zur Anpassung an die nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels.

Die Beschlüsse zu einer gemeinsamen Klima- und Energiepolitik der EU sehen vor, den Ausstoß an Treibhausgasen um 20 % bis zum Jahr 2020 zu reduzieren. Bieten die anderen Vertragsstaaten hinreichende Minderungsverpflichtungen an, will die EU ihren Treibhausgasausstoß um 30 % senken. Das so genannte Klima- und Energiepaket der EU, das mehrere Richtlinien zur Umsetzung des Minderungsziels umfasst, hat der Europäische Rat am 11. und 12. Dezember 2008 verabschiedet¹⁸. Zudem hat die EU vorgeschlagen, dass die Mitgliedstaaten gemeinsam mit anderen Industriestaaten ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 reduzieren¹⁹.

Mit den Maßnahmen, die die Bundesregierung im August 2007 in Meseberg beschlossen hat, verfolgt sie das Ziel, die nationalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 um 40 % zu senken. Mit diesen Beschlüssen wurden die Eckpunkte des Integrierten Energie- und Klimaprogramms (IEKP)²⁰ festgelegt, mit den primären Zielen, die Energieeffizienzpotentiale der verschiedenen Sektoren besser zu nutzen und die erneuerbaren Energien weiter konsequent auszubauen.

2.2 Klimaschutzpotentiale in der Stromversorgung

Verschiedene Veröffentlichungen zeigen, welche Potentiale zur Minderung von Treibhausgasen in Deutschland vorhanden sind. Für die energiebedingten CO₂-Emissionen entspricht das 40-Prozent-Ziel der Bundesregierung einer jährlichen Emission von maximal 571 Millionen (Mio.) Tonnen (t) CO₂ im Jahr 2020. Das UBA identifizierte acht Maßnahmen für Strom, Wärme und Verkehr, um dieses Ziel bis zum Jahr 2020 zu erreichen. Darauf aufbauend stellte das UBA in der Studie „Atomausstieg und Versorgungssicherheit“ im Einzelnen dar²¹, wie sich das 40-Prozent-Ziel im Stromsektor umsetzen lässt. Auch die Studie „Energieszenarien für den Energiegipfel 2007“ von EWI/Prognos²² zeigt, dass das Ziel einer 40-prozentigen CO₂-Minderung für Deutschland erreichbar ist.

Wie Deutschland seine Treibhausgasemissionen bis 2050 mit dem Atomausstieg und ohne den Einsatz von CCS²³ um rund 80 % gegenüber 1990 senken kann, stellt das Leitszenario 2008 des Bundesumweltministeriums (BMU)²⁴ dar. Eine vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag von Greenpeace/EREC erstellte Studie²⁵ zeigt ein Szenario, in dem auch weltweit die globale Senkung der CO₂-Emissionen bis 2050 um 50 % gegenüber 1990 ohne Atomenergie und CCS erreicht wird.

¹⁷ Ein angemessener Minderungsbeitrag ist auch von weniger entwickelten Ländern einzufordern. Unter Berücksichtigung des Prinzips der gemeinsamen aber differenzierten Verantwortung und Kapazitäten sind dabei die spezifischen Umstände der weniger entwickelten Länder, besonders ihre notwendige wirtschaftliche Entwicklung, zu berücksichtigen.

¹⁸ Das so genannte Klima- und Energiepaket der EU ist am 5. Juni 2009 im Europäischen Amtsblatt erschienen.

¹⁹ KOM [2009]:

²⁰ IEKP [2007]

²¹ UBA [2008 c]

²² EWI/Prognos [2007]; EWI: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln

²³ CCS: Carbon Capture and Storage, CO₂-Abtrennung und Speicherung

²⁴ BMU [2008]

²⁵ Greenpeace/EREC [2008]

Energieeinsparung, effiziente Energieumwandlung und die erneuerbaren Energien sind die drei Säulen, auf denen die energiebedingten Emissionsminderungen beruhen. Die wichtigsten Potentiale für Deutschland stellen wir im Folgenden kurz dar und diskutieren auch die mögliche Rolle von CCS und die Probleme bei der Atomenergienutzung.

2.2.1 Ausbau der erneuerbaren Energien

Die verstärkte Nutzung der erneuerbaren Energien ist ein zentraler Punkt für eine nachhaltige Energieversorgung. Damit werden endliche fossile Ressourcen geschont, die Importabhängigkeit vermindert sowie die CO₂-Emissionen gesenkt²⁶. Weltweit liegt das technisch nutzbare Potential erneuerbarer Energien selbst bei strengen Restriktionen in der Größenordnung des Sechsfachen des derzeitigen weltweiten Verbrauchs an Endenergie. Erneuerbare Energien können also auch einen noch steigenden weltweiten Energiebedarf grundsätzlich vollständig und auf Dauer decken.²⁷ Auch in Deutschland sind ausreichend große Potentiale vorhanden, um den Ausbau der erneuerbaren Energien weit voranzutreiben²⁸.

Das Leitszenario 2008 des BMU²⁹ stellt dar, wie Deutschland seine Treibhausgasemissionen bis 2050 um rund 80 % gegenüber 1990 senken kann. In diesem Szenario steigt der Beitrag erneuerbarer Energien zur Stromversorgung kontinuierlich an, während die fossilen Energieträger und die Atomenergie ihre Bedeutung verlieren. Im Jahr 2050 haben die erneuerbaren Energien einen Anteil von knapp 81 % an der Bruttostromversorgung, wobei ein Teil des erneuerbaren Stroms zum Beispiel aus solarthermischen Kraftwerken im Mittelmeerraum importiert werden soll.

Die Potentiale für erneuerbaren Strom in Deutschland sind allerdings deutlich größer³⁰. Die Abbildung 2-1 zeigt die Zusammensetzung der Bruttostromerzeugung nach Energieträgern für 2005, für das Jahr 2050 nach BMU-Leitszenario sowie die Potentiale für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland. Vor allem Photovoltaik und Geothermie bieten noch erhebliche weitere Ausbaupotentiale gegenüber der im Leitszenario für 2050 dargestellten Entwicklung. Diese langfristig nutzbaren inländischen Potentiale umfassen mit 565 Terrawattstunden (TWh) circa 92 % des Bruttostromverbrauchs des Jahres 2005. Erneuerbare Energien können somit die derzeitige jährliche Stromproduktion aus Kohle- und Atomkraftwerken vollständig ersetzen.

Zentrales Instrument für die Umsetzung der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien zur Strombereitstellung ist das EEG, das innerhalb des IEKP novelliert wurde.

²⁶ Vor allem bei Biomasse ist jedoch darauf zu achten, dass neben dem Klimaschutz auch die anderen Anforderungen an ein nachhaltiges Energieversorgungssystem, zum Beispiel bei den Emissionen der klassischen Luftschadstoffe, erfüllt werden.

²⁷ BMU [2006]

²⁸ BMU [2009 b]

²⁹ BMU [2008]

³⁰ BMU [2009 b]

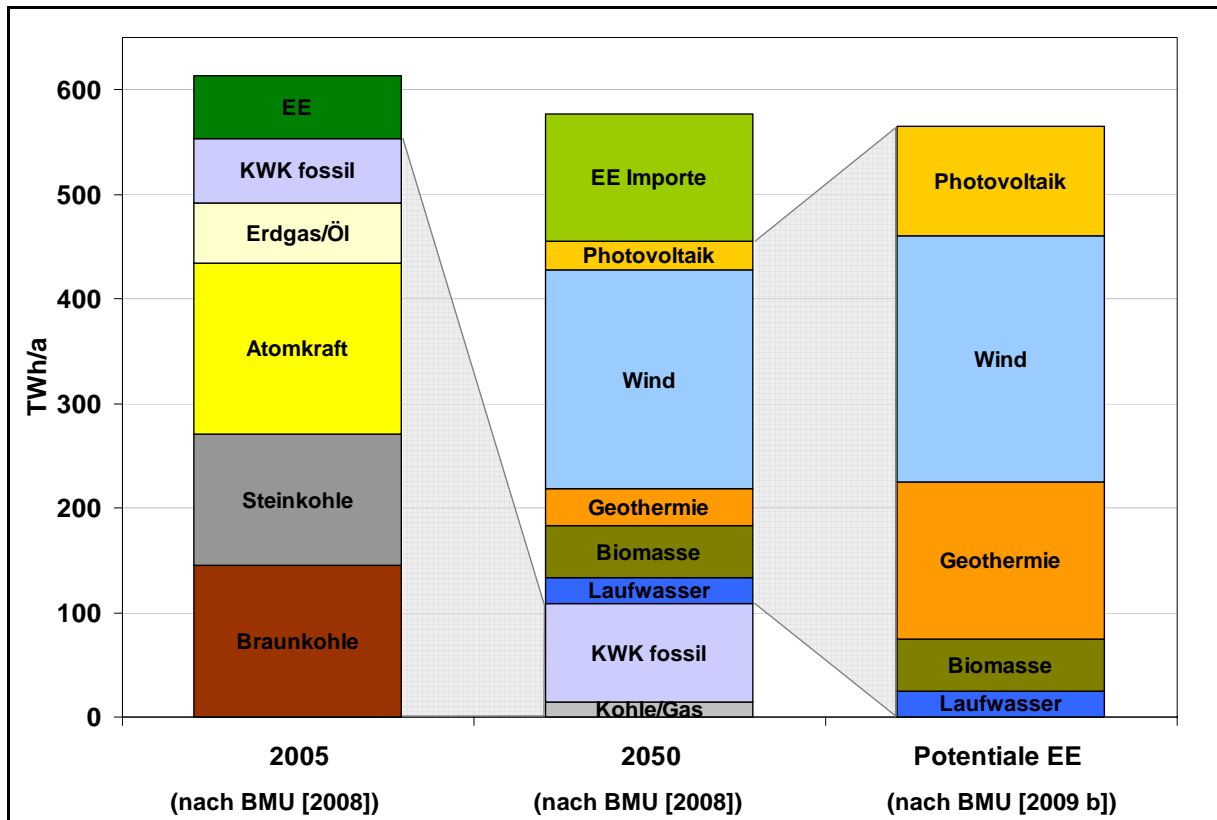


Abbildung 2-1: Zusammensetzung der Bruttostromerzeugung für 2005, für 2050 nach BMU-Leitszenario und langfristig nutzbare Potentiale für die erneuerbare Stromerzeugung in Deutschland

2.2.2 Erhöhung der Energieeffizienz auf der Nachfrageseite

In Deutschland besteht das Ziel, den Stromverbrauch bis zum Jahr 2020 um 11 % gegenüber 2005 zu senken. Dass dies machbar ist, zeigt ein Blick auf die vorhandenen Stromsparpotentiale, die deutlich größer sind.

Eine Studie des Wuppertal-Instituts im Auftrag der E.ON AG³¹ beschreibt Energieeffizienzpotentiale, die in den nächsten zehn Jahren erschließbar sind. Für Strom beziffert die Studie die Sparpotentiale mit insgesamt 110 TWh, die aus Endkundensicht wirtschaftlich sind – das entspricht 18 % des Bruttostromverbrauchs³² im Jahr 2005. Dies betrifft vermiedenen Stromverbrauch vor allem in Industrie und Gewerbe durch den Einsatz effizienter Pumpen und verbesserter Beleuchtung, Kühlung, Lüftung und Klimatisierung. In den Haushalten sind die größten, volkswirtschaftlich gewinnbringenden Stromsparpotentiale: die Verringerung der Stand-by-Verluste an Audio-, Video- oder TV-Geräten sowie eine Effizienzsteigerung bei Kühlgeräten, Beleuchtung und Heizungspumpen. Aus Endkundensicht lohnend ist auch der Austausch strombetriebener Nachtspeicherheizungen, die

³¹ WI [2006]

³² Der Bruttostromverbrauch beinhaltet neben dem Endenergieverbrauch auch den Eigenstromverbrauch der Kraftwerke und die Netzverluste. Die Einsparung einer bestimmten Menge elektrischer Endenergie vermeidet zusätzlich die Energiemenge, die in Kraftwerken und Netzen zu ihrer Erzeugung und Bereitstellung notwendig gewesen wäre. Mit einem Einsparpotential an Endenergie ist daher ein noch größeres Einsparpotential am Bruttostromverbrauch verbunden als hier angegeben.

allein in den privaten Haushalten zusammen mehr als 3 %³³ des deutschen Bruttostromverbrauchs ausmachen.

Ebenso beschreibt eine Studie von McKinsey - im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) - Energieeffizienzpotentiale, die bis zum Jahr 2020 erschließbar sind, und die zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs um 117 TWh pro Jahr führen³⁴.

Das wichtigste politische Instrument zur Förderung des Stromsparens ist die auf EU-Ebene verankerte, so genannte Öko-Design-Richtlinie („Richtlinie zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte“), die verbindliche Effizienzstandards für bestimmte Gerätegruppen vorgibt.

2.2.3 Erhöhung der Energieeffizienz auf der Angebotsseite

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Auf der Angebotsseite kann die KWK wegen der besonders hohen Brennstoffausnutzung einen wesentlichen Beitrag zur besseren Energieeffizienz leisten.

Bei der KWK werden Strom und Wärme - in einigen Fällen auch mechanische Energie oder Kälte - gleichzeitig produziert³⁵. Das KWK-Potential ergibt sich prinzipiell aus den verfügbaren und wirtschaftlichen Wärmesenken. Je nach Stromkennzahl³⁶ der zur Wärmedeckung eingesetzten KWK-Anlagen ergibt sich aus dem Wärmenutzungspotential ein Stromerzeugungspotential.

Zur Erhöhung der Stromerzeugung aus KWK-Kraftwerken gibt es zwei Möglichkeiten: zum einen die weitere Erschließung verfügbarer und wirtschaftlicher Wärmesenken und zum anderen Maßnahmen zur Erhöhung des Gesamtnutzungsgrads bei gleicher Wärmeauskopplung, die mit einer Erhöhung der Stromkennzahl gegenüber bestehenden Anlagen einhergeht.

Die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“³⁷ schätzt das mittel- und langfristige technische Potential für die KWK-Stromerzeugung in Deutschland auf 220 bis 380 TWh. Dies entspricht 36 bis 62 % des Bruttostromverbrauchs des Jahres 2005. Eikmeier³⁸ beziffert das Strompotential mit 351 TWh (57 % des Bruttostromverbrauchs 2005), das sich aus einem Wärmepotential von 328 TWh (rund 32 % des Nutzwärmeverbrauchs 2004) ableitet, sofern moderne KWK-Anlagen mit einer Stromkennzahl von circa 1 zum Einsatz kommen.

Schon die Modernisierung aller bestehenden KWK-Anlagen und die damit verbundene Erhöhung der Stromkennzahl kann die KWK-Stromproduktion erheblich steigern. Während die Enquete-Kommission neben der Modernisierung die Potentiale primär in der Industrie, dezentralen Nahwärmenetzen oder der Objektversorgung sieht, nennt Eikmeier

³³ siehe WI [2005]; dort sind für Haushalte 19,6 TWh und für den Bereich Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (GHD) 2,6 TWh aus Nachtspeicher-Heizungen angegeben. Elektrische Direktheizungen sind nicht einberechnet.

³⁴ McKinsey [2007]

³⁵ Neben der Kraft-Wärme-Kopplung bietet auch die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung erhebliche Effizienzpotentiale.

³⁶ Die Stromkennzahl ist der Quotient aus der Stromproduktion und der gleichzeitig produzierten Wärmemenge.

³⁷ Enquete-Kommission [2002]

³⁸ Eikmeier et al. [2005]

als wichtigstes Teilpotential die Fernwärme-KWK, die circa zwei Drittel des gesamten Potentials ausmacht.

Die unterschiedliche Bewertung ergibt sich aus der Verwendung verschiedener Modelle und einer unsicheren Datenbasis, die Schätzungen notwendig macht. Nach den zitierten Studien steht jedoch übereinstimmend ein ausreichendes Potential zur Verfügung, um das Ziel der Bundesregierung zu erreichen, den KWK-Anteil an der Stromerzeugung von momentan 12 % auf 25 % im Jahr 2020 zu erhöhen.

Das hierzu wichtigste Instrument ist - neben der Berücksichtigung größerer Anlagen im Emissionshandel - das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG), das innerhalb des IEKP novelliert wurde. Kleinere Anlagen bis 50 kW_e werden ab Januar dieses Jahres mit einem Klimaschutz-Impulsprogramm mit einem gestaffelten Investitionszuschuss gefördert. Mehrere tausend Anträge sind bislang für dieses sehr erfolgreiche Programm eingegangen.

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads fossiler Kraftwerke

Die spezifischen CO₂-Emissionen - also die pro Kilowattstunde Strom entstehenden CO₂-Emissionen - sind bei der ungekoppelten Stromerzeugung allein abhängig von den Eigenschaften des Brennstoffs und vom elektrischen Wirkungsgrad des Kraftwerks. In der Vergangenheit ließen sich beträchtliche Wirkungsgradsteigerungen bei fossilen Kraftwerken erreichen. Durch die thermodynamischen und werkstofftechnischen Grenzen sind jedoch die Potentiale für zukünftige Effizienzsteigerungen bei der Stromerzeugung begrenzt.

Die Abbildung 2-2 zeigt im oberen Teil die Entwicklung der elektrischen Wirkungsgrade von Braunkohle-, Steinkohle- und Erdgaskraftwerken: jeweils für alte Kraftwerke (Stand vor 1970), für Kraftwerke nach dem heutigen Stand der Technik und den Erwartungswert für Neubaukraftwerke für die Zeit nach 2015 (Zukunft). In welchem Maße langfristig weitere Verbesserungen erzielt werden können, ist aus heutiger Sicht nicht sicher zu beurteilen. Der untere Teil der Abbildung zeigt die aus den Wirkungsgraden resultierenden spezifischen CO₂-Emissionen für Braunkohle-, Steinkohle- und Erdgaskraftwerke.

Die spezifischen CO₂-Emissionen von Braunkohlekraftwerken liegen auch bei der zukünftig zu erwartenden Technik mit über 800 Gramm pro Kilowattstunde (g/kWh) höher als die der meisten anderen Kraftwerkstypen. Die spezifischen CO₂-Emissionen von neuen Steinkohlekraftwerken betragen zwischen 735 g/kWh (Stand der Technik) und 680 g/kWh (Zukunft).

Erdgas-Kraftwerke emittieren pro erzeugte Kilowattstunde Strom erheblich weniger CO₂ als die modernsten Kohlekraftwerke - dies gilt selbst für die älteren, so genannten Kombi-Kraftwerke mit einem deutlich niedrigeren Wirkungsgrad. Erdgas-GuD-Anlagen³⁹ haben mit derzeit circa 350 g/kWh - und zukünftig 335 g/kWh - die geringsten spezifischen Emissionen. Die Abbildung zeigt, dass die größten Effizienz- und Klimaschutzpotentiale mit dem Ersatz alter Kohlekraftwerke durch neue Erdgaskraftwerke erschließbar sind.

Wirkungsgradsteigerungen allein, die mit dem Ersatz alter Kohlekraftwerke durch neue Kohlekraftwerke gleicher Leistung erzielbar sind, reichen nicht aus, um die langfristigen europäischen Klimaschutzziele zu erfüllen. Dies zeigen die Ausführungen in Abschnitt 5.1.1 „Langfristige Klimaschutzziele“.

³⁹ GuD: Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

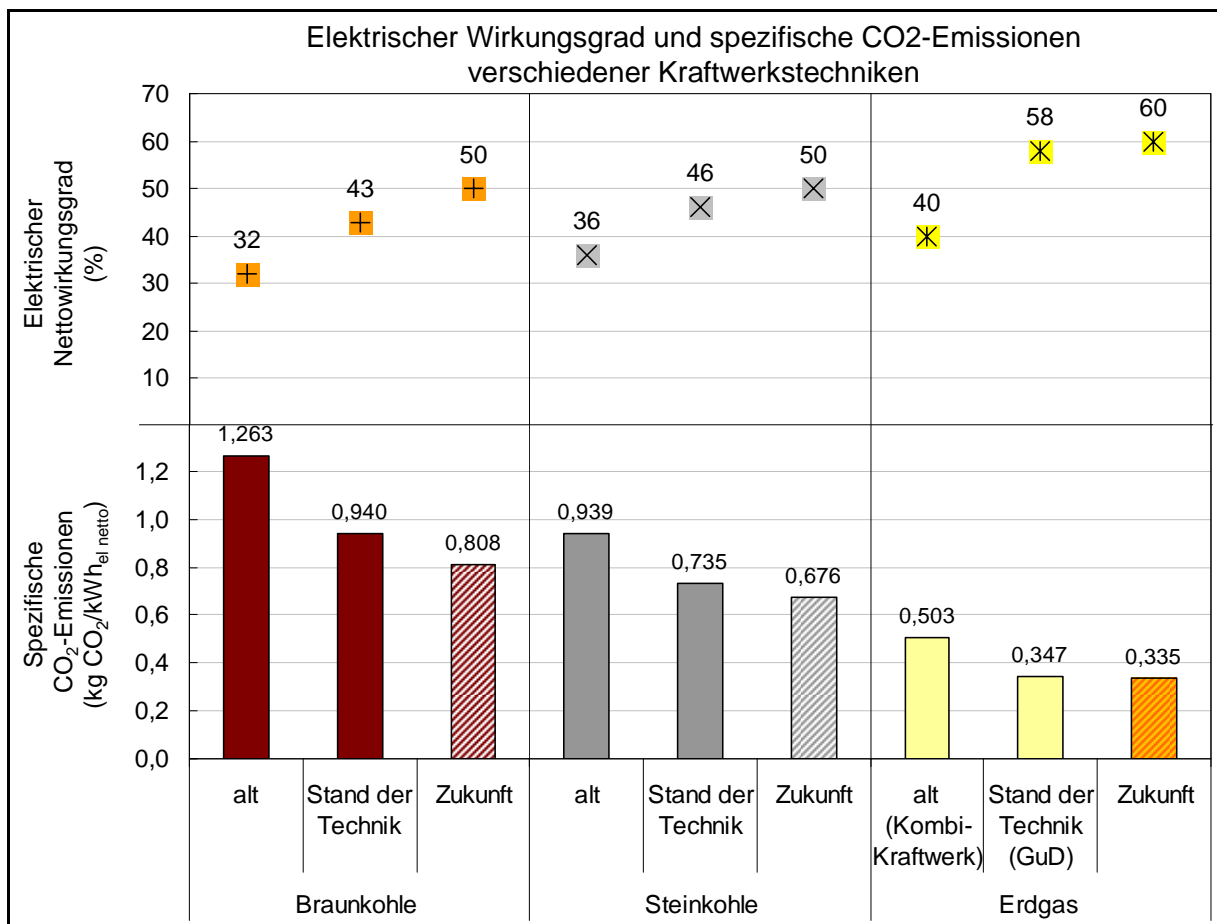


Abbildung 2-2: Elektrischer Wirkungsgrad und spezifische CO₂-Emissionen verschiedener Kraftwerkstechniken⁴⁰

Die Abbildung zeigt auch, dass der Wirkungsgrad eines Kraftwerkes kein geeigneter Indikator für den Klimaschutz ist. Es ist für den Klimaschutz nicht entscheidend, ob neue Kraftwerke „hocheffizient“ (im Sinne von Energie-Effizienz) sind, sondern dass sie niedrige spezifische CO₂-Emissionen aufweisen (CO₂-Effizienz). Durch Effizienzsteigerungen sind zukünftig nur noch geringe Senkungen der spezifischen CO₂-Emissionen möglich, da sich diese reziprok zu den Wirkungsgradsteigerungen verhalten. Eine Halbierung der spezifischen CO₂-Emissionen würde daher eine Verdopplung des Wirkungsgrades erfordern, was aus thermodynamischen Gründen nicht mehr möglich ist.

2.2.4 Carbon Capture and Storage (CCS)

Das UBA hat ein ausführliches Positionspapier zu CCS - der technischen Abscheidung und anschließende Speicherung von CO₂ im Untergrund (englisch: Carbon Capture and Storage) - veröffentlicht.⁴¹ Zentrale Aussagen dieses Papiers sind: CCS auf Basis fossiler Energieträger ist nicht nachhaltig. Inwieweit CCS einen Beitrag für den Klimaschutz leisten kann, ist aus Sicht des UBA aus mehreren Gründen fraglich. Da neben den fossilen Rohstoffen

⁴⁰ elektrischer Netto-Wirkungsgrad bei Nennleistung

⁴¹ UBA [2009 c]

auch die geologischen Speicher nur begrenzt vorhanden sind⁴², kommt CCS nur für einen Übergangszeitraum – zum Beispiel für Staaten mit großen Kohlevorkommen oder Staaten, deren Energiebedarf stark steigt – in Betracht. Zudem ist das Funktionieren der CCS-Technik noch nicht sichergestellt und mit ihrer großtechnischen Verfügbarkeit frühestens ab 2020 zu rechnen. CCS steht in Deutschland daher nicht für Kraftwerksneubauten in den nächsten Jahren zur Verfügung.

CCS vermindert nicht die Produktion des CO₂, sondern erzeugt tatsächlich - wegen des Energieaufwands für die Abscheidung, den Transport und die Einlagerung - sogar deutlich mehr CO₂ je produzierter nutzbarer Einheit, zum Beispiel pro Kilowattstunde Strom. Der zusätzliche Brennstoffaufwand verbraucht die begrenzten fossilen Ressourcen schneller. Durch diesen zusätzlichen Energieaufwand und die unvollständige Abscheidung sind fossile Kraftwerke mit CCS nicht CO₂-frei, sondern nur CO₂-reduziert, sie emittieren also weiterhin einen Teil des produzierten Treibhausgases. Je nach Brennstoff und verwendeter CCS-Technik werden derartige Kraftwerke selbst unter optimistischen Annahmen - bei zukünftig zu erwartenden Kraftwerkswirkungsgraden und Betriebskenngrößen sowie der zeitgleichen Verfügbarkeit von CCS-Komponente und Kraftwerk - noch spezifische CO₂-Emissionen von rund 40 bis 60 g/kWh bei Erdgas, 80 bis 130 g/kWh bei Steinkohle und rund 100 bis 150 g/kWh bei Braunkohle haben.⁴³

Über die gesamte Prozesskette hat CCS weitere Umweltwirkungen, beispielsweise den Natur- und Landschaftsverbrauch für den zusätzlich erforderlichen Bergbau und mögliche Wechselwirkungen mit anderen Substanzen im Boden und Grundwasser, was etwa zu einer Versauerung des Grundwassers sowie zu einer Beeinträchtigung von Ökosystemen führen kann. CCS kann zudem - abhängig von der gewählten Abscheidetechnik - einen zusätzlichen Reinigungsmittel- und Wasserverbrauch zur Folge haben.

CCS hat auch einen Einfluss auf die Flexibilität der Kraftwerke. Große Braunkohlekraftwerke, die besonders viel CO₂ emittieren, dienen zumeist der Stromproduktion in der Grundlast. Das An- und Abfahren dieser Kraftwerke ist - auch ohne CO₂-Abscheidung - ein komplexer Prozess, der je nach Anlagenzustand bis zu mehreren Stunden dauern kann. Da die CO₂-Abscheidung ein zusätzlicher und sehr komplexer Prozess ist, wird die Flexibilität der Braunkohlekraftwerke durch die CO₂-Abscheidung tendenziell weiter abnehmen. Grundsätzlich gilt dies auch für die wesentlich flexibler zu fahrenden Steinkohle- und Gaskraftwerke, sobald diese mit einer CO₂-Abscheidung ausgestattet würden. Zukünftig sind jedoch vor allem hochflexible Kraftwerke für den Erhalt der Versorgungssicherheit erforderlich (siehe Abschnitt 5.1 „Anforderungen an den Kraftwerkspark“).

Von zentraler Bedeutung ist jedoch die Frage, welche Kapazitäten sicherer Speicher für CCS zur Verfügung stehen. Die konkrete geologische Erkundung ist noch lange nicht weit genug fortgeschritten, um verlässliche Aussagen über die Kapazität und Sicherheit der Speicher für abgeschiedenes CO₂ und somit über die nutzbare „Reichweite“ von CCS als mögliche Klimaschutztechnik geben zu können. Es besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf an allen Gliedern der CCS-Kette. Daher können erst in etwa zehn

⁴² Nutzungskonkurrenz zu nachhaltigen Techniken der Energienutzung wie z.B. Geothermie reduzieren die für die CO₂-Speicherung verfügbaren Potentiale zusätzlich.

⁴³ Da bisher keine CCS-Kraftwerke mit vollständiger Prozesskette existieren, werden folgende Annahmen zu den Betriebskenngrößen verwendet: Wirkungsgrade ohne CCS ca. 60% für Erdgas-GuD-Kraftwerke sowie 50% für Braun- und Steinkohlekraftwerke, erhöhter Brennstoffbedarf: 25%, CO₂-Abscheiderate: 85 bis 90%, Leckagerate des Speichers vernachlässigbar klein, zeitgleiche Verfügbarkeit von CCS-Komponente und Kraftwerk. Steht beispielsweise die CO₂-Abscheidung während 10% der Betriebszeit des Kraftwerks nicht zur Verfügung, erhöhen sich die spezifischen CO₂-Emissionen für Braunkohle unter sonst gleichen Annahmen auf ca. 170 bis 220 g/kWh, oder das Kraftwerk kann während dieser Zeit nicht genutzt werden.

bis 15 Jahren verlässlichere Aussagen dazu getroffen werden, in welchem Umfang CCS tatsächlich einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann.⁴⁴

Das UBA plädiert deshalb dafür, die großtechnische CO₂-Abscheidung erst auf Grundlage möglichst weitgehender Nachweise zu geeigneten Speichern voranzutreiben. Erst vor diesem Hintergrund lässt sich beurteilen, wie viel CO₂-Emissionen die CCS-Technik tatsächlich mindern kann. Diese Beurteilung hilft, Fehlinvestitionen in Abscheidetechnik und Transportinfrastruktur zu vermeiden.

Die Klimaschutzziele sind aufgrund der Potentiale der erneuerbaren Energien und Energieeffizienz auch ohne CCS in der Stromerzeugung erreichbar. Eine Entwicklung des Kraftwerksparks hingegen, die die Klimaschutzziele nur durch Einsatz von CCS erreichen könnte, würde aus heutiger Sicht ein Risiko für die Erreichung dieser Ziele darstellen.

Selbst falls die CCS-Technik für die Zeit nach 2020 großtechnisch verfügbar sein sollte, ist zu berücksichtigen, dass für die Erfüllung der langfristigen Klimaschutzziele nicht nur Emissionsminderungen bei der Stromerzeugung erforderlich sind, sondern auch in der Industrie. Besonders schwierig ist dies bei prozessbedingten Emissionen, zum Beispiel aus der Stahl- und Zementherstellung. Die begrenzten, potentiell vorhandenen CO₂-Speicher sollten daher vorrangig für die Senkung der prozessbedingten Emissionen, und falls zukünftig erforderlich, für eine Dekarbonisierung der Atmosphäre zur Verfügung stehen. Im Sinne des Vorsorgeprinzips ist dies geboten, solange noch keine belastbaren Informationen über die Kapazitäten der CO₂-Speicher bestehen.

2.2.5 Risikotechnologie Atomenergie

Die Atomenergie gehört ebenfalls nicht zu den nachhaltigen Formen der Stromerzeugung. Sie ist ein prominentes Beispiel dafür, dass neben dem Klimaschutz auch andere Nachhaltigkeitskriterien in der Energieversorgung entscheidend sind, vor allem das Kriterium Risikoarmut und Fehlertoleranz, aber auch das der Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit. Die Atomenergienutzung sollte daher schnellstmöglich beendet werden. Der Beschluss zum Atomausstieg in Deutschland⁴⁵ ist deshalb eine wichtige Randbedingung auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem.⁴⁶

Die wesentlichen Argumente gegen die Nutzung der Atomenergie, bei denen es letztlich immer um die Gefährdung von Mensch und Umwelt geht, lassen sich - entlang der Brennstoffkette - folgendermaßen zusammenfassen:

Der **Uranabbau** verursacht Schäden für Mensch und Umwelt. Kontaminiertes Wasser, das aus den Uranbergwerken herausgepumpt wird, hat eine erhöhte Uran- und Radiumbelastung in umgebenden Gewässern und im Sediment zur Folge. Die Freisetzung radioaktiven Staubs und Radongases gefährdet Menschen, die in den Uranminen arbeiten oder in der Umgebung wohnen. Je nach Abbautechnik gefährden Laugungsflüssigkeiten wie Schwefelsäure zusätzlich die Umwelt.⁴⁷

⁴⁴ McKinsey [2008]

⁴⁵ BGBl. [2002]

⁴⁶ Für die Analyse der durch Radioaktivität verursachten Risiken der Atomkraft, aus der sich letztlich die Argumente gegen ihre Nutzung herleiten, ist das Bundesamt für Strahlenschutz zuständig. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen sind eine wichtige Randbedingung für die Arbeit des UBA zu nachhaltiger Energieversorgung.

⁴⁷ Kreusch et al. [2006]

Das **Risiko beim Betrieb der Atomkraftwerke** betrifft einerseits die Gefahr von Unfällen - das bisher schlimmste Beispiel ist hier die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl. Andererseits hat auch die Diskussion, welche Gefährdung von einer Atomanlage im Normalbetrieb ausgeht, durch die im Dezember 2007 vorgestellte Kinderkrebsstudie⁴⁸ im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) neue Nahrung erhalten.

Der **radioaktive Abfall** strahlt über Jahrmillionen⁴⁹ und muss deshalb sicher über lange Zeiträume von der Biosphäre ferngehalten und endgelagert werden. Bislang ist ungeklärt, wie und wo dies am besten geschieht.

Der Einsatz der Atomenergie zur Stromerzeugung birgt immer auch das Risiko der **Nutzung radioaktiver Stoffe als Waffe**. Dazu gehören nicht nur die „klassische“ Atombombe und die Gefahr der Proliferation⁵⁰, sondern auch die Gefahr von Terroranschlägen auf Atomkraftwerke mit katastrophalen Folgen in der Umgebung durch die Freisetzung großer Mengen Radioaktivität. Diese Diskussion hat sich seit den Terroranschlägen vom 11. September 2001 noch verstärkt.

Die am häufigsten auftretende waffentechnische Anwendung ist jedoch der Einsatz von Munition, die abgereichertes Uran („depleted uranium“, DU) enthält, das bei der Herstellung der Brennelemente für Atomkraftwerke entsteht. Die weiträumige Verteilung feinsten giftiger, radioaktiver Stäube infolge des Waffeneinsatzes und deren Eingang in die Nahrungskette führen zu Strahlenschäden, die sowohl Krebserkrankungen als auch die Schädigung des Erbgutes und dadurch Missbildungen in der nächsten Generation zur Folge haben können.⁵¹

Im Zusammenhang mit den genannten negativen Konsequenzen für Mensch und Umwelt stellt sich die Frage, wie die **Folgen der Atomenergienutzung monetär zu bewerten** sind, und wer die damit entstehenden Kosten trägt. In dem Maße, in dem sie nicht der Atomkraftwerksbetreiber, sondern die Gesellschaft trägt, entstehen Wettbewerbsverzerrungen gegenüber anderen Formen der Energieerzeugung.

Wettbewerbsverzerrungen entstehen außerdem aufgrund **expliziter und impliziter Subventionen** für die Atomenergie - ohne sie wäre die Atomstromerzeugung einzelwirtschaftlich nicht rentabel.⁵² Seit Beginn der Förderung im Jahr 1956 bis heute flossen insgesamt gut 40 Milliarden (Mrd.) Euro (€) von Bund und Ländern in Form expliziter Subventionen in die nukleare Forschung, während die Forschung an erneuerbaren Energien und Energieeffizienz zusammen seit 1974 mit 6 Mrd. € gefördert wurde. Im Jahr 2006 standen knapp 400 Mio. € aus dem Bundeshaushalt für die nukleare Energieforschung und die Beseitigung kerntechnischer Anlagen zur Verfügung. Die Atomkraft profitiert zudem in erheblichem Umfang von impliziten Subventionen. Besonders die derzeitigen Regelungen zur Haftung bei Unfällen in Atomkraftwerken sowie zu den Rückstellungen,

⁴⁸ Ausführliche Informationen sowohl zu der Studie als auch zu der weiteren Beurteilung der Studie durch ein Expertengremium finden sich auf der Homepage des Bundesamts für Strahlenschutz (<http://www.bfs.de/bfs>).

⁴⁹ Kreusch et al. [2006]. Der AK END (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandort des BMU) geht davon aus, dass es möglich ist, eine Isolationsdauer in der Größenordnung von circa 1 Million Jahren für einen Standort nachzuweisen, die zum Schutz der Biosphäre notwendige Isolationsdauer ist jedoch gegebenenfalls größer. Die Halbwertszeit verschiedener langlebiger Radionuklide, die im Abfall von Atomkraftwerken enthalten sind, variiert stark (z. B. Uran 235: 704 Mio. Jahre; Plutonium 239: 24.110 Jahre).

⁵⁰ Proliferation beschreibt die verbotene Weitergabe waffentauglicher radioaktiver Substanzen.

⁵¹ Prof. Dr. Albrecht Schott, Physiologie, FU Berlin (a.D.) hat zu dieser Thematik geforscht. Seine Untersuchungen an britischen Veteranen aus dem zweiten Golfkrieg führten 2004 zur Anerkennung der Klage eines geschädigten Veteranen vor einem Gericht in Edinburgh (Schott [2004]).

⁵² für eine ausführlichere Darstellung siehe UBA [2008 b]

die die Betreiber für die spätere Stilllegung und Entsorgung der Anlagen bilden, stellen Vorteile mit subventionsähnlicher Wirkung in Milliardenhöhe dar.⁵³

Die Politik sollte die Subventionen zugunsten der Atomkraft abbauen und gleichzeitig die externen Kosten der Atomenergie internalisieren, damit die Verursacher und nicht die Gesellschaft diese tragen.

Da die Atomenergie kein Element einer nachhaltigen Stromversorgung darstellt, der Atomausstieg in Deutschland beschlossen ist und die langfristigen Klimaschutzanforderungen auch ohne Atomenergie erfüllbar sind, wird sie in diesem Papier nicht weiter betrachtet.

2.3 Der Emissionshandel – ein wichtiges Klimaschutzinstrument

Der europäische Emissionshandel ist das wichtigste Instrument für die Einhaltung der europäischen Klimaziele, das die fossilen Kraftwerke betrifft. Mit seiner Einführung unterliegen die CO₂-Emissionen des Kraftwerksparks nicht mehr allein nationaler Gesetzgebung.

Funktionsweise des EU-Emissionshandels

Die im Emissionshandelssystem festgelegte Obergrenze der Emissionen, das so genannte Cap, begrenzt die CO₂-Emissionen der emissionshandelspflichtigen fossilen Kraftwerke und großer Industrieanlagen europaweit. Anlagenbetreiber benötigen Zertifikate für die CO₂-Emissionen ihrer Anlagen und können diese auch untereinander handeln. Die europaweit kostengünstigsten CO₂-Minderungspotentiale werden dadurch zuerst erschlossen. Eine durch Senkung des Caps vorgegebene europaweite CO₂-Minderung im Emissionshandelssektor führt so zu möglichst niedrigen Vermeidungskosten.

Das Cap stellt aber nicht nur die Obergrenze der CO₂-Emissionen dar, sondern praktisch auch die Untergrenze: Die Anlagenbetreiber im Emissionshandelssektor werden die gesamte erlaubte CO₂-Menge emittieren. CO₂-Einsparungen in einer emissionshandelspflichtigen Anlage haben deshalb keinen Einfluss auf die Gesamtmenge der CO₂-Emissionen des Emissionshandelssektors, sondern nur auf den Zertifikatspreis⁵⁴.

Für die Einhaltung der europäischen Klimaziele ist die kontinuierliche, ambitionierte Senkung des Caps im europäischen Emissionshandel entscheidend. Die EU-Kommission hat im Dezember 2008 mit der neuen Emissionshandelsrichtlinie beschlossen, das Cap von 2013 bis zum Jahr 2020 linear zu senken⁵⁵. Der dafür bestimmte jährliche

⁵³ Auf Basis einer vereinfachten Modellrechnung schätzt das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) den Vorteil, der mit der derzeitigen Rückstellungspraxis verbunden ist, auf jährlich mindestens 175 Mio. € (DIW [2007]). Schätzungen der Begünstigung durch die begrenzte Versicherungspflicht reichen bezogen auf die Stromproduktion von 5 bis 185 Cent/kWh (Thomas et al. [2007]). Für die Stromproduktion der Atomkraftwerke im Jahr 2008 (148,8 TWh) ergibt sich damit eine jährliche Begünstigung zwischen 7 und 274 Mrd. €.

⁵⁴ Die Gesamtemissionen im Emissionshandelssektor bis zum Jahr 2020 steigen daher auch nicht bei einem Weiterbetrieb bestehender fossiler Kraftwerke und würden ebenso bei einer möglichen Laufzeitverlängerung der Atomkraftwerke in diesem Zeitraum nicht sinken.

⁵⁵ Die lineare Senkung ergibt sich aus der jährlichen Reduzierung um einen festen Betrag. Dieser beträgt 1,74 % der durchschnittlichen jährlichen Gesamtmenge der Zertifikate, die über die nationalen Zuteilungspläne der Mitgliedstaaten für den Zeitraum 2008 bis 2012 zugeteilt wurden (siehe KOM [2008], Artikel 9).

