

**Der beschlossene Ausstieg aus der Kernenergie und die ehrgeizigen Klimaschutzziele erfordern einen Umbau des Stromerzeugungssystems in Deutschland. Es stellt sich daher die Frage, welche Stromerzeugungstechniken denn in einem zukünftigen Stromerzeugungssystem eingesetzt werden sollen.**

## Kriterien

Bei einer solchen Entscheidung sind aus Sicht der Gesellschaft nicht nur die Stromerzeugungskosten, sondern auch externe Effekte mit zu berücksichtigen. Vor allem drei Kriterien sind entscheidend:

- die Emissionen von Treibhausgasen pro erzeugter kWh sollten möglichst gering sein; dies gilt natürlich für den gesamten Lebenszyklus der Stromerzeugungstechnik.
- die Umwelteinwirkungen und die daraus folgenden Gesundheitsrisiken, Umweltschäden und Materialschäden sollten möglichst gering sein, auch dies über den gesamten Lebenszyklus betrachtet und Normalbetrieb und Unfälle umfassend;
- die Strombereitstellungskosten pro kWh sollten möglichst gering sein, dabei ist die Bereitstellung zum Zeitpunkt der Nachfrage entscheidend.

Das letztere Kriterium ist wichtig, weil höhere Stromkosten die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie schwächen. Private Haushalte, die mehr für Strom ausgeben müssen, haben weniger Geld für den Erwerb anderer Waren und Dienstleistungen übrig, was die Binnennachfrage verringert und ggf. zu einem Rückgang von Arbeitsplätzen führt. Haushalte mit geringem Einkommen sind überdies von Strompreiserhöhungen besonders betroffen.

Als weiteres Kriterium kommt insbesondere das Erreichen einer hohen Versorgungssicherheit in Betracht. Dieses Kriterium kann konkretisiert werden als Vermeidung von unvorhergesehenen Preiserhöhungen von Energieträgern, verursacht durch eine unvorhergesehene plötzliche Verknappung oder Lieferunterbre-

chung, dies ist nicht zu verwechseln mit erwarteten Preissteigerungen, diese sind in der Investitionsrechnung und damit in den Stromerzeugungskosten enthalten. Eine aussagekräftige Methode zur Quantifizierung des Ausmaßes der Versorgungssicherheit gibt es bisher allerdings nur in Ansätzen, sodass dieses Kriterium hier nur qualitativ berücksichtigt wird.

Ein weiterer Aspekt der Versorgungssicherheit besteht darin, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Technik dann Strom erzeugt, wenn Strom benötigt wird, je nach Technik unterschiedlich hoch ist. Wenn kein Wind weht oder die Sonne nicht scheint, können die entsprechenden Anlagen auch keinen Strom liefern. Dieser Aspekt muss natürlich berücksichtigt werden, und er wird hier dadurch berücksichtigt, dass die Kosten für die Bereitstellung von Ersatzkapazität oder Speicherung den Stromerzeugungskosten zugeschlagen werden.

Im Folgenden wird überdies angenommen, dass die Knappheit endlicher Ressourcen (fossile Energieträger, Eisen, Silizium, Germanium usw.) entsprechend der Hotelling-Regel (Hotelling 1931) in den Ressourcenpreisen und damit in den Stromerzeugungskosten bereits enthalten ist und somit der Verzehr nicht erneuerbarer Ressourcen als Kriterium nicht extra berücksichtigt werden muss.



Prof. Dr. Rainer Friedrich

\* Prof. Dr. Rainer Friedrich leitet die Abteilung »Technikfolgenabschätzung und Umwelt« am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart.

Oft wird auch die Schaffung von Arbeitsplätzen als Kriterium genannt. In der Tat erfordert eine Technik mit hohen Erzeugungskosten einen hohen Arbeitsaufwand. Oft nicht erwähnt, aber dennoch zu berücksichtigen ist dabei jedoch der Budgeteffekt. Höherer Arbeitsaufwand und damit auch höhere Kosten führen zu höheren Strompreisen (und auch höheren Preisen stromintensiv produzierter Güter), das Budget der Stromkunden, das für andere Waren und Dienstleistungen als Strom ausgegeben werden kann, wird daher reduziert, daraus resultiert ein Rückgang der Arbeitsplätze in allen Sektoren. Dieser Budgeteffekt liegt in der gleichen Größenordnung wie der direkte Zugewinn an Arbeitsplätzen, Arbeitplatzeffekte müssen als Kriterium daher nicht berücksichtigt werden.

Somit besteht die Aufgabe im Wesentlichen darin, aus den möglichen Stromerzeugungsoptionen diejenige herauszusuchen, die die genannten drei Kriterien am besten erfüllt. Leider steht jedoch keine Stromerzeugungsoption zur Verfügung, die bei jedem der drei genannten Kriterien die beste Zielerfüllung aufweist. Vorteile bei einem Kriterium müssen daher durch Nachteile bei mindestens einem anderen Kriterium erkauft werden.

Multikriterielle Entscheidungen stellen eine große Herausforderung für Menschen und damit auch die Politik dar. Im Falle der Stromerzeugung tendiert die Politik derzeit dazu, bei Entscheidungen vereinfachend nur ein Kriterium, nämlich den Klimaschutz, in den Vordergrund zu stellen, daraus resultiert die Forderung, die Stromerzeugung langfristig ganz auf erneuerbare Energieträger umzustellen. Allerdings wird bei dieser Vorgehensweise nicht geprüft, inwieweit bei einzelnen erneuerbaren Energieträgern nicht die Nachteile, nämlich höhere Kosten und – bei einigen Formen der Biomassenutzung – höhere Umwelteinwirkungen, schwerer wiegen als die Vorteile beim Klimaschutz. Angebracht wäre vielmehr eine Abwägung der Zielerfüllungsgrade mit dem Ziel, die unter Berücksichtigung aller relevanten Kriterien besten Optionen auszuwählen. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt und angewandt, die eben dies zum Ziel hat.

Ermittelt werden die sogenannten »sozialen Kosten« von Stromerzeugungssystemen. Diese setzen sich zusammen aus den Stromerzeugungskosten ohne Steuern und Subventionen und den »externen« Kosten. Externe Kosten sind in Geldwert ausgedrückte externe Effekte. Externe Effekte sind alle im Zusammenhang mit der Nutzung einer Technik auftretenden negativen Effekte, deren Kosten nicht der Produzent oder Konsument, sondern dritte Personen oder die Allgemeinheit zu tragen haben. Zum Beispiel führt die Emission von Schadstoffen – trotz Einhaltung der Emissionsgrenzwerte – zu Gesundheitsschäden, die nicht vom Stromerzeuger ersetzt werden.

Der Umbau des Stromerzeugungssystems benötigt Zeit, alte Kraftwerke werden nur nach und nach durch neue ersetzt. Gleichzeitig erfolgt eine zum Teil stürmische Weiterentwicklung der Stromerzeugungstechniken. Die Bewertung von Techniken sollte daher nicht nach dem derzeitigen Stand erfolgen, sondern Entwicklungspotenziale mit einbeziehen. Dies trifft nicht nur für erneuerbare Energieträger zu; auch die Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern hat noch erhebliches Entwicklungspotenzial. Im Folgenden wird daher eine Bewertung und Berechnung sozialer Kosten für weiterentwickelte Stromerzeugungssysteme, die 2025 in Betrieb gehen könnten, durchgeführt.

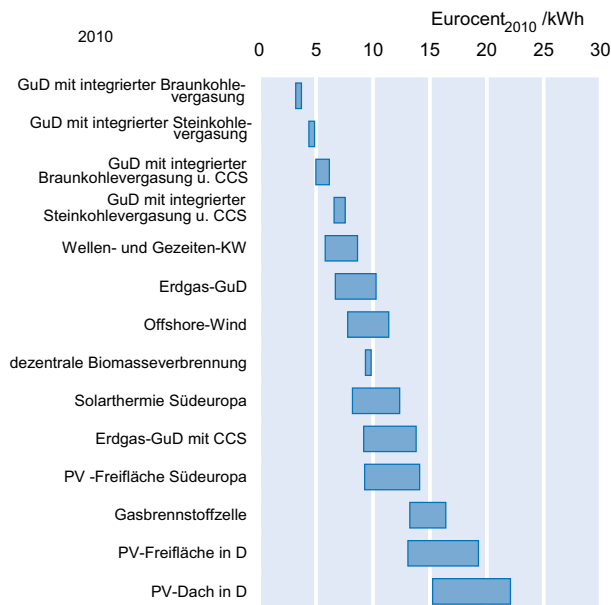
### Stromerzeugungskosten

Stromerzeugungskosten enthalten alle Kosten, die der Stromerzeuger tragen muss; nicht eingeschlossen sind Steuern und Subventionen, da es sich hier aus gesellschaftlicher Sicht nur um einen Transfer von Geld (z.B. vom privaten Unternehmen zum Staat) handelt. Die Kosten für Investition, Betrieb, Wartung, Reparatur, Hilfsgütern, Beratung, Abriss und Abfallbeseitigung bzw. -lagerung sind enthalten. Ebenfalls enthalten sind »Back-up«-Kosten. Insbesondere erneuerbare Energien liefern Strom nicht unbedingt dann, wenn er nachgefragt wird, daher benötigt man Reserve- und Speicherkapazität. Dies wird berücksichtigt, indem zwei Stromerzeugungssysteme mit und ohne die bewertete Technik, die beide die gleiche Versorgungssicherheit (Ausfallwahrscheinlichkeit) aufweisen, verglichen werden. Die Differenzkosten, z.B. zur Bereitstellung von Reservekapazität, werden dann der bewerteten Technik angelastet.

Um die Kosten zukünftiger Techniken abzuschätzen, wird zum einen eine Trendanalyse durchgeführt, d.h. Kostenminderungen der Vergangenheit werden in die Zukunft fortgeschrieben. Außerdem wird mit einer technischen Analyse untersucht, ob es neue technologische Entwicklungen gibt (zum Beispiel die CO<sub>2</sub>-Speicherung oder die IGCC-Technik bei Kohlekraftwerken), die die Kosten beeinflussen. Da die Abschätzung der zukünftigen Kosten je nach Technik relativ unsicher ist, wird eine mehr oder weniger große Unsicherheitsbandbreite angegeben.

Abbildung 1 zeigt ein Ergebnis der Berechnungen für Techniken, die im Jahr 2025 in Betrieb genommen werden. Braunkohle mit dem modernen IGCC-Prozess, bei dem die Kohle zu einem Brenngas vergast wird, das anschließend verbrannt wird, weist die niedrigsten Stromerzeugungskosten auf. Strom wird dabei in einem Kombiprozess mit Gas- und Dampfturbinen erzeugt. Nach Braunkohle folgt Steinkohle als nächstgünstigste Option. Setzt man CCS (carbon capture and storage) ein, speichert man also das bei der Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub> größtenteils in Aquiferen oder ausgebeuteten Erdgaslagerstätten,

**Abb. 1  
Stromerzeugungskosten verschiedener zukünftiger  
Stromerzeugungstechniken, einschließlich Back-up-  
Kosten**



Inbetriebnahme 2025, Standorte in Deutschland, außer bei ‚Solarthermie Südeuropa‘, ‚PV-Freifläche Südeuropa‘ mit Standorten in Mittelmeerranrainerländern.  
CCS = Carbon Capture and Storage (CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung).

Quelle: Preiss, Friedrich et al. (2010).

so steigen die Stromerzeugungskosten der Kohlekraftwerke, bleiben aber immer noch unter den Kosten der meisten anderen Alternativen. Es folgt die Wellenenergie, der bisher wenig Beachtung geschenkt wird, die sich aber unter Umständen zu einer kostengünstigen Möglichkeit zur Stromgewinnung entwickeln könnte. Erst jetzt folgen Erdgaskraftwerk mit kombinierter Gas- und Dampfturbine sowie Off-shore-Wind und Biomasse. Die Kosten für On-shore-Wind hängen stark von der mittleren Windgeschwindigkeit des Standorts ab; an günstigen Standorten sind sie etwas niedriger wie die von Off-shore-Wind. In Deutschland produzierter Photovoltaikstrom ist auch 2025 noch die teuerste Option, um Strom zu produzieren.

**Umwelt- und Gesundheitsschäden durch Schadstoffemissionen**

Die Emissionen von Schadstoffen lassen sich zwar relativ leicht ermitteln, sind aber schwer zu bewerten, weil sie nichts über die verursachten Schäden aussagen (wie

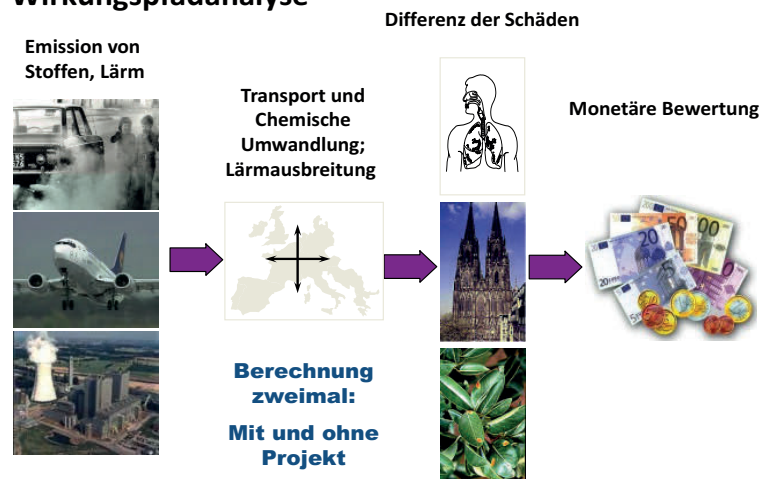
schädlich ist die Emission von 300 kg NO<sub>x</sub>?). Bewertet werden können nur Nutzenverluste, also z.B. Materialschäden, Gesundheitsrisiken usw., nicht aber Umwelteinwirkungen. Daher muss zunächst abgeschätzt werden, welche Schäden und Risiken denn durch die Emissionen von Stoffen verursacht werden. Hierzu wurde der Wirkungspfadansatz entwickelt (vgl. Abb. 2). Dabei wird ausgehend von den Emissionen die Ausbreitung und chemische Umwandlung der emittierten Stoffe in den Umweltmedien modelliert. Es resultierenden Konzentrationen und Deposition der Stoffe. Unter Verwendung von Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen und Expositions-Wirkungs-Beziehungen werden anschließend Schäden und Risiken berechnet.

Der Zusammenhang zwischen Umwelteinwirkungen (Emissionen) und Schäden ist keineswegs linear, sondern hängt von Ort, Zeit und Höhe der Emission ab. So führt die Emission von Feinstaub in einem dicht besiedelten Gebiet wie etwa dem Ruhrgebiet bei geringer Windgeschwindigkeit zu weitaus höheren Gesundheitsrisiken als die Emission in einem dünn besiedelten Gebiet bei hoher Windgeschwindigkeit. Bodennahes Ozon in größeren Mengen entsteht nur, wenn die Sonne scheint. Die Entstehung von sekundärem Feinstaub (Ammoniumnitrat) aus NO<sub>x</sub>-Emissionen erfordert das Vorhandensein von Ammoniak, das durch landwirtschaftliche Aktivitäten (Düngung, Viehhaltung) entsteht, usw.

Daher müssen komplexe Ausbreitungsmodelle eingesetzt werden, um aus Aktivitätsszenarien die Emissionen aller Sektoren und aus den Emissionen dann die Schadstoffkonzentrationen und Depositionen zu bestimmen. Diese wiederum sind Ausgangspunkt für die Berechnung von Schä-

**Abb. 2  
Wirkungspfadanalyse zur Ermittlung von externen Kosten  
durch Umwelteinwirkungen**

**Wirkungspfadanalyse**



Quelle: Bickel und Friedrich (2005).

**Tab. 1**  
**Beispiele für Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen**

Endpunkt	CRF (95% CI)	Einheiten
Chronische Mortalität PM2.5		
Reduktion der Lebenserwartung (Altersgruppe über 30 Jahre alt)	651 (127; 1 194)	YOLL per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per 100 000 Menschen
Morbidität PM10		
Neue Fälle chronischer Bronchitis (Altersgruppe über 18 Jahre alt)	86 (8; 150)	Jährlich, per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , per 100 000 Erwachsene über 18
Krankenhausaufnahmen wegen Erkrankungen der Atemwege	5,6 (4,3; 6,2)	Jährlich, per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , per 100 000 Menschen
Krankenhausaufnahmen wegen Herzkrankungen	4,3 (2,2; 6,5)	Jährlich, per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , per 100 000 Menschen

Quelle: Hurley et al. (2011).

abgeleitet werden. In Tabelle 1 sind beispielhaft einige dieser Beziehungen aufgeführt, darunter auch die, die die höchsten Gesundheitsschäden verursacht, nämlich die Reduzierung der Lebenserwartung durch die Langzeitexposition mit durchaus kleinen Konzentrationen an Feinstaub.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die als relevant ermittelten, betrachteten Wirkungspfade, für die entsprechende Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen vorhanden sind. Um die verschiedenen Krankheiten miteinander vergleichen zu können, können sie in DALYs (disability adjusted life years, umgerechnet. Dazu wird die Zahl der Krankheiten mit der Dauer (Bruchteil eines Jahres) und einem Faktor multipliziert, der den Schweregrad der Krankheit angibt.

den und Risiken. Zur Berechnung von Gesundheitsrisiken werden Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen herangezogen, die aus den Ergebnissen epidemiologischer Studien

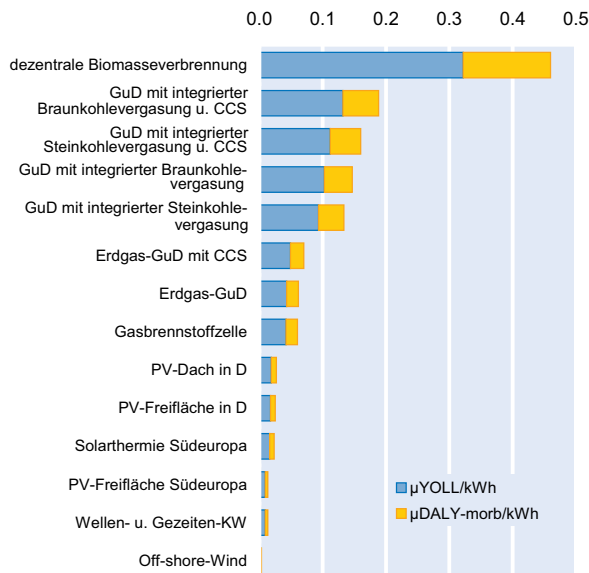
Berechnet man nun für die verschiedenen Stromerzeugungsoptionen die entstehenden Gesundheitsschäden, so ergeben sich die in Abbildung 3 gezeigten Ergebnisse.

**Tab. 2**  
**Mit der Wirkungspfadanalyse betrachtete Wirkungspfade**

	Schadstoff (primär und sekundär)	Schaden
Gesundheit: Mortalität	PM10, PM2.5; SO <sub>2</sub> , Benzol, Benzo-a-Pyren, 1,3- Butadien, Dieselpart., Schwermetalle, radioaktive Substanzen, andere kanzerogene Subst., Lärm Unfallrisiken	Verminderte Lebenserwartung durch Kurz- und Langzeitexposition  Mortalitätsrisiken durch Unfälle
Gesundheit: Morbidität	PM2.5, PM10, Ozon, SO <sub>2</sub> , CO  Benzol, Benzo-a-Pyren, 1,3- Butadien, Dieselpartikel, Schwermetalle, radioaktive Substanzen, andere kanzerogene Subst.,  Lärm  Blei, Quecksilber	Krankenhausaufenthalte wegen Atemwegserkrankungen, Tage mit eingeschränkter Aktivität; Krankenhausaufnahmen wg. Herzkrankungen, Krankenhausaufnahmen wegen cerebrovasculärer Erkrankungen, chronische Bronchitis, chronischer Husten bei Kindern, Hustentage bei Asthmatikern, u.a.  Krebs  Herzinfarkt, Angina pectoris, Bluthochdruck, Schlafstörungen IQ-Verlust bei Kleinkindern
Änderung der Biodiversität	Saure Deposition, Stickstoffdeposition	PDF (potentially disappeared fraction of species) durch Versauerung und Eutrophierung
Landw. Ertragsverluste	SO <sub>2</sub> , Ozon Saure Deposition Deposition von N, S	Ertragsänderungen Zusätzliche Kalkung von Böden Düngeeffekte
Materialschäden	SO <sub>2</sub> , Saure Deposition  Ruß, Verbrennungspartikel	Korrosion von Stahl, Kalkstein, Mörtel, Sandstein, Lack, Putz, Zink. Verschmutzung von Gebäuden
Belästigung	Lärm	Belästigungswirkung

Quelle: Bickel und Friedrich (2005).

**Abb. 3**  
**Gesundheitsrisiken pro erzeugter kWh bei verschiedenen 2025 in Betrieb gehenden Stromerzeugungsoptionen**



Ausgedrückt bei Krankheit in DALYs (disability adjusted life years), bei Todesfällen in Yoll (years of life lost), einschließlich der Risiken durch Emissionen vor- und nachgelagerter Prozesse und des Erwartungswertes von Risiken durch Unfälle.  
 CCS = Carbon Capture and Storage (CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung).

Quelle: Preiss, Friedrich et al. (2010).

Die geringsten Gesundheitsschäden pro kWh ergeben sich bei Windenergie gefolgt von der Wellen- und der Solarenergie. Wie erwartet weist Erdgas etwas schlechtere Werte auf, deutlich schlechter sind dann Stein- und Braunkohle. Als noch gesundheitsschädlicher erweist sich aber die Verbrennung von Biomasse in kleineren Feuerungen, hier wären durch Einsatz modernster Abgasreinigungstechniken zwar Verbesserungen möglich, die aber eben nicht gesetzlich vorgeschrieben sind. Um die Größenordnung der Schäden zu verdeutlichen, sei darauf hingewiesen dass die Erzeugung von 100 TWh/a durch Kohle in modernsten Anlagen etwa 13 000 verlorene Lebensjahre verursacht, dies kann man näherungsweise mit ca 1 300 vorzeitigen Todesfällen gleichsetzen.

Somit sind die Gesundheitsschäden ermittelt, es bleibt aber noch die Frage, wie denn die Gesundheitskosten gegen die Stromerzeugungskosten abgewogen werden können. Dabei ist in einem ersten Schritt zu ermitteln, ob die Gesundheitsrisiken nicht so hoch sind, dass sie auf jeden Fall

vermieden werden sollen. Denn es ist klar, dass eine ernste Krankheit oder ein vorzeitiger Todesfall, der mit Sicherheit oder hoher Wahrscheinlichkeit verursacht wird, auf keinen Fall toleriert wird. Dagegen sind wir durchaus bereit, kleine Risiken, zum Beispiel bei der Teilnahme im Verkehr, in Kauf zu nehmen, wenn wir dadurch einen Vorteil haben (im Beispiel also zur Arbeitsstelle oder ins Schwimmbad kommen). Wo aber liegt die Grenze, ab der eine Abwägung stattfinden kann? In Deutschland gibt es nur für berufliche Risiken einen Grenzwert (der Arbeitsausschuss für Gefahrstoffe empfiehlt ein individuelles Risiko von 10<sup>-4</sup>/a nicht zu überschreiten). Für die Bevölkerung existieren nur in den Niederlanden ein Grenzwert und in Großbritannien eine Empfehlung, beides Mal von 10<sup>5</sup>/a für einen Todesfall. Solch hohe Risiken werden aber durch die in Deutschland geltenden Grenzwerte verhindert, alle berechneten individuellen Gesundheitsrisiken sind deutlich geringer. Somit kann eine Abwägung stattfinden. Da es kein Naturgesetz gibt, das Krankheiten mit Kosten gleichsetzt, ist die einzige Möglichkeit, die Präferenzen der betroffenen (vorher informierten) Bevölkerung zu messen und als Maßstab heranzuziehen. Hierfür stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung. So kann man Präferenzen durch Beobachtung der Handlungen von Personen bestimmen (revealed preferences), oder man kann Befragungen durchführen (stated preferences). Zum Beispiel kann nach der Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung eines Risikos gefragt werden, oder man gibt zwei fiktive Entscheidungssituationen vor, die sich in zwei Eigenschaften unterscheiden, und fragt nach der vom Befragten

**Tab. 3**  
**Beispiele für monetäre Werte von Gesundheitsschäden**

Gesundheitsrisiko	unterer	mittlerer	oberer	Wert
Erhöhtes Sterberisiko bei Unfällen	1 121 433	1 121 433	5 607 164	Euro/Fall
Reduzierung der Lebenserwartung	37 500	60 000	215 000	Euro/YOLL
Erhöhtes Sterberisiko bei Kindern	1 120 000	2 475 000	11 200 000	Euro/Fall
Schlafstörung	480	1 240	1 570	Euro/Jahr
Bluthochdruck	880	950	1 110	Euro/Jahr
Akuter Herzinfarkt	4 675	86 200	436 200	Euro/Fall
Lungenkrebs	69 080	719 212	4 187 879	Euro/Fall
Leukämie	2 045 493	3 974 358	7 114 370	Euro/Fall
Störung der Entwicklung des Nervensystems	4 486	14 952	32 895	Euro/Fall

YOLL = Years of Life lost.

Quelle: Hunt et al. (2011).

bevorzugten Variante. Diese Fragen werden dann mit Varianten wiederholt.

Im Allgemeinen ist es aber nicht erforderlich, bei jeder neuen Entscheidung die Präferenzen neu zu bestimmen. Vielmehr greift man auf die Ergebnisse der bereits existierenden Tausenden von Studien zu, die Präferenzen ermittelt haben, und rechnet mit Hilfe eines »benefit transfers« die Ergebnisse der Studien in Werte um, die für die eigene Analyse verwendet werden kann. Tabelle 3 zeigt einige der so mit einer Metastudie ermittelten monetären Werte. Der Wert 60 000 Euro pro verlorenem Lebensjahr bedeutet dabei nicht, dass ein Lebensjahr 60 000 Euro »wert« ist, vielmehr ist die Bevölkerung bereit, im Durchschnitt  $10^{-6} \cdot 60\,000$  Euro = 6 Cent auszugeben, um ein Risiko von  $10^{-6}$ , ein Lebensjahr zu verlieren, zu vermeiden.

Schäden an Ökosystemen werden ebenfalls mit dem Wirkungspfadansatz ermittelt und dann durch Umrechnung in sogenannte »pdfs« aggregiert. Pdf heißt potentially disappeared fraction of species und gibt an, welcher Anteil der Arten, die auf einer natürlich belassenen Fläche vorhanden wäre, durch den menschlichen Einfluss, insbesondere durch Versiegelung, Versauerung und Eutrophierung, verschwunden ist. Auch hier dienen Zahlungsbereitschaftsanalysen dazu, die pdfs in monetäre Werte umzurechnen.

### Bewertung von Treibhausgasemissionen

Auch für die Bewertung von Treibhausgasen kann der im vorhergehenden Kapitel beschriebene Wirkungspfadansatz gewählt werden, das heißt, dass zunächst die Änderung der Strahlungsbilanz und die daraus folgenden Klimaänderungen abgeschätzt werden müssen. Anschließend müssen die Schäden abgeschätzt werden, die sich aus der Klimaänderung ergeben. Aufgrund des globalen Temperaturanstiegs kommt es zu einem Anstieg des Meeresspiegels, der zu Landverlusten oder zusätzlichen Kosten beim Küstenschutz führt. Weitere Folgen können der Verlust küstennaher Ökosysteme oder verstärkte Migrationsbewegungen der Bevölkerung kleiner Inseln und tiefliegender Küstengebiete. Extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Dürren und Stürmen werden vermutlich zunehmen. Die Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion und die Landwirtschaft sind regional sehr unterschiedlich und werden durch Änderung der Temperatur und des Niederschlags beeinflusst. Durch Hitzewellen kann es verstärkt zu Herz-Kreislauferkrankungen oder Asthma kommen, andererseits reduzieren vermindernde Kälteperioden Todesfälle. Infektionskrank-

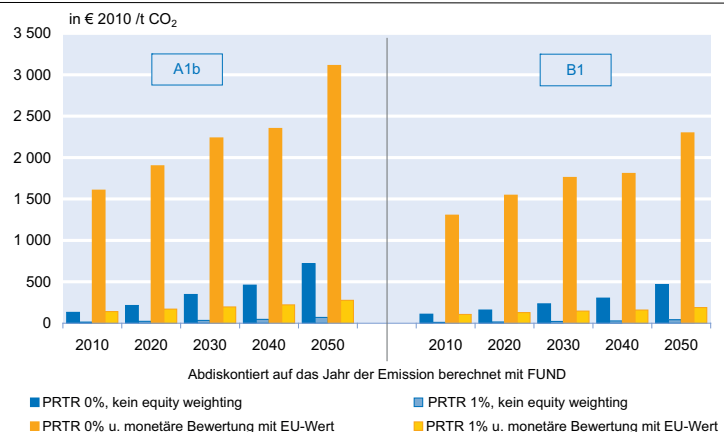
heiten, die durch Vektoren (z.B. Mücken, Zecken, Fliegen) übertragen werden, z.B. Malaria, Dengue-Fieber oder Hirnhautentzündung, könnten zunehmen. Durch die Änderung des Klimas könnte die Biodiversität reduziert werden, weil die Klimaänderung für einige Arten möglicherweise zu schnell erfolgt.

Diskutiert wird zudem, dass singuläre, nicht vorhergesehene Ereignisse, wie z.B. der Zusammenbruch oder die Abschwächung der thermohalinen Zirkulation, unvorhersehbare Auswirkungen haben könnten.

Es gibt einige wenige Modelle, die Schäden und Schadenskosten des Treibhauseffekts systematisch abschätzen, insbesondere FUND (www.fund-model.org), DICE (Nordhaus 2007) und PAGE (Hope 2006). Im Folgenden werden Ergebnisse, die mit FUND berechnet wurden, verwendet. In Abbildung 4 dargestellt sind die marginalen Schadenskosten pro t emittiertem CO<sub>2</sub> für zwei Emissionsszenarien, zum einen das A1B-Szenario des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), ein Szenario mit hohem Zuwachs an CO<sub>2</sub>-Emissionen, zum anderen das Szenario B1, bei dem die CO<sub>2</sub>-Emissionen nur moderat zunehmen und nach 2050 wieder abnehmen.

Deutlich wird, dass vor allem die gewählte Diskontrate und die Frage, ob equity weighting gewählt wird oder nicht, das Ergebnis entscheidend beeinflusst. Ohne equity weighting wird die Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung eines Schadens in dem Land, in dem der Schaden auftritt, für die monetäre Bewertung des Schadens gewählt. Im Falle des Treibhauseffekts treten die meisten und gravierendsten Schäden aber in den weniger entwickelten Ländern (z.B. in Afrika) auf, obwohl die meisten Treibhausgasemissionen in OECD-Ländern und China

Abb. 4  
Marginale Schadenskosten pro Tonne emittiertem CO<sub>2</sub> für zwei IPCC-Emissionsszenarien (A1b und B1)



Quelle: Preiss, Friedrich et al. (2010).

PRTR = pure Zeitpräferenzrate.

emittiert werden. Die durch den Treibhaus-effekt entstehenden Schäden werden da-durch geringer bewertet als ähnliche Schä-den, die in Deutschland entstehen. Dies wird teilweise als ungerecht bewertet; und es wird vorgeschlagen, die in Entwick-lungsländern entstehenden, von Deutsch-land verursachten Schäden so zu beweren, als ob sie in Deutschland auftreten würden. Diese Bewertung wird in Abbil-dung 4 mit »monetäre Bewertung mit EU-Wert« bezeichnet.

Die Abschätzung der marginalen Kosten weist somit Wer-te auf, die sich um mehr als den Faktor 200 unterscheiden, und zwar nicht wegen der Unsicherheit der Schadensschät-zungen, sondern vor allem wegen unterschiedlicher Setzungen ökonomischer Parameter. Solange sich die Gesellschaft nicht auf die für die Bewertung heranzuziehenden Parame-terwerte geeinigt hat, sind die Ergebnisse daher wegen der großen Bandbreite wenig brauchbar.

Daher wird hier ein Vermeidungskostenansatz zur Bewer-tung von Treibhausgasemissionen gewählt. Dabei geht man von einem Ziel aus, auf das sich die Gesellschaft geeinigt hat, und berechnet die marginalen Vermeidungskosten zur Erreichung dieses Ziels. Bewertet man die Emissionen bei Entscheidungen mit diesen marginalen Vermeidungskos-ten, so wird offenbar gerade das Ziel effizient erreicht. Das vereinbarte Ziel wird dabei aber nicht überprüft oder in Fra-ge gestellt.

Für die Analyse werden zwei unterschiedlich stringente Klimaschutzziele ausgewählt.

Für das Klimaschutzziel 20%plus wird das Ziel der EU herangezogen, das eine Minderung der Treibhausgase um 20% von 1990 bis 2020 erfordert; für die Zeit nach 2020 werden weitergehende Minderungen eingesetzt, und zwar so, dass die Grenzvermeidungskosten um 3%/a ansteigen.

Das 2°-max.-Ziel beschreibt die – allerdings nicht verbindliche – Vorgabe der Bundesregierung. Danach soll – im Rah-men einer internationalen Klimschutzvereinbarung – verhin-dert werden, dass die durchschnittliche Temperatur der Erd-oberfläche um mehr als 2° ansteigt. Für die EU bedeutet dies nach Modellrechnungen eine Reduzierung der Treibhausgas-emissionen um 75% von 1990 bis 2050, für Deutschland bis zu 85%.

Um die Grenzvermeidungskosten für die beiden Klima-schutzziele zu bestimmen, wird auf ein Metamodell von Kuik et al. (2009) zurückgegriffen; dieser hat zahlreiche Stu-dien über Vermeidungskosten ausgewertet. Das Ergebnis zeigt Tabelle 4.

**Tab. 4**  
Marginale Vermeidungskosten pro t CO<sub>2</sub>-eq zur Erreichung zweier Klimaschutzziele

Euro 2010 pro t CO <sub>2</sub> -eq	2010	2015	2025	2035	2045	2050
Szenario						
20%plus	26	30	36	42	74	87
2° max	36	46	73	119	194	250

Quelle: Kuik et al., eigene Berechnungen (2009).

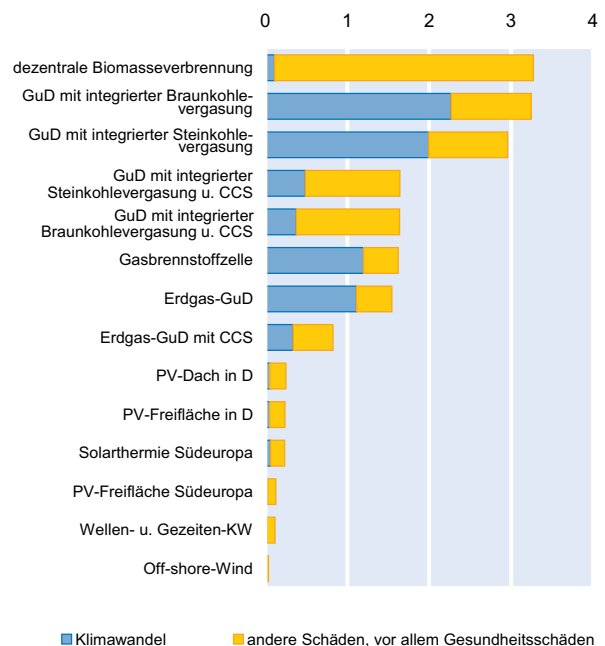
Die marginalen Vermeidungskosten steigen an, bis 2050 auf 87 Euro pro t im moderaten und auf 250 Euro im ambitio-nierten Klimaschuttszenario.

**Externe Kosten von Stromerzeugungstechniken**

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 2 und 3 lassen sich die externen Kosten verschiedener Stromerzeugungssysteme berechnen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 5 für das Jahr 2025 und das moderate Klimaschuttszenario 20%+ (ver-wendet wurden demnach 36 Euro/t CO<sub>2</sub>).

Die Ergebnisse sind zunächst wenig überraschend. Wind-, Wellen- und Solarenergie weisen geringe externe Kosten auf. Erdgas ohne CCS liegt etwa gleichauf mit Kohle mit

**Abb. 5**  
Externe Kosten von Stromerzeugungstechniken nach Schadenskategorien, Bewertung von CO<sub>2</sub>-Emissionen mit 36€/t



Quelle: Preiss, Friedrich et al.(2010).

CCS. Und Kohle ohne CCS weist trotz modernster Technik die höchsten Umweltauswirkungen auf. Überraschenderweise schneidet aber die Biomasseverbrennung in kleinen Anlagen ähnlich schlecht ab wie die Kohle. Zu erwähnen ist auch, dass die externen Kosten von Kohlestrom in der gleichen Größenordnung wie die Stromerzeugungskosten liegen.

Will man das ambitioniertere 2°-Ziel erreichen, so verdoppeln sich die marginalen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten 2025 auf 72 Euro. Dies bedeutet vor allem für fossile Kraftwerke eine deutliche Erhöhung der externen Kosten. Erdgas schneidet jetzt schlechter ab als Kohle mit CCS, Kohle ohne CCS weist die weitaus höchsten Kosten von über 5 Cent pro kWh auf.

In den oben dargestellten externen Kosten sind Risiken bei der Speicherung von CO<sub>2</sub> nicht enthalten, da Untersuchungen hierzu noch kaum vorliegen. Auch könnte es Probleme mit der Akzeptanz geben. Es sei aber erwähnt, dass notfalls auch Speicher in der Nordsee in Frage kämen, die vermutlich nicht auf Akzeptanzprobleme stoßen würden, aber mit etwas höheren Transportkosten verbunden wären.

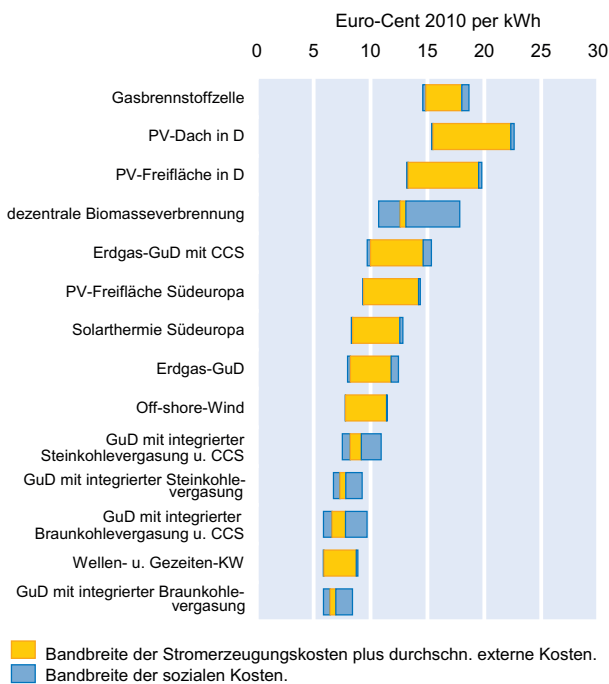
### Soziale Kosten von Stromerzeugungssystemen

Addiert man die Stromerzeugungskosten aus Abschnitt 1 und die externen Kosten aus Abschnitt 2, 3 und 4, so erhält man die sozialen Kosten. Diese sind ein Maß für die Vorteilhaftigkeit einer Technik aus gesellschaftlicher Sicht unter Berücksichtigung der Kriterien Umwelt- und Gesundheitsschutz, Klimaschutz und Kostenminderung.

In den Abbildungen 6 und 7 ist zusätzlich noch eine Unsicherheitsbandbreite angegeben. Bei den Umwelt- und Gesundheitsschäden beruht diese auf einer statistischen Fehleranalyse, die Bandbreite der Stromerzeugungskosten resultiert aus einer Variation wichtiger Eingangsparameter.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis für 2025 und das moderate Klimaschutzziel 20plus. Überraschenderweise weist das IGCC-Braunkohlekraftwerk trotz der hohen externen Kosten die geringsten sozialen Kosten auf. Dies bedeutet, dass, wenn man die unabhängig von der Entscheidungssituation gemessenen Präferenzen der Bevölkerung heranzieht, die relativ hohen Umwelt-, Gesundheits-, und Klimaschäden durch die Vorteile niedriger Stromerzeugungskosten mehr als kompensiert werden. Fast gleichauf liegen die Wellen-

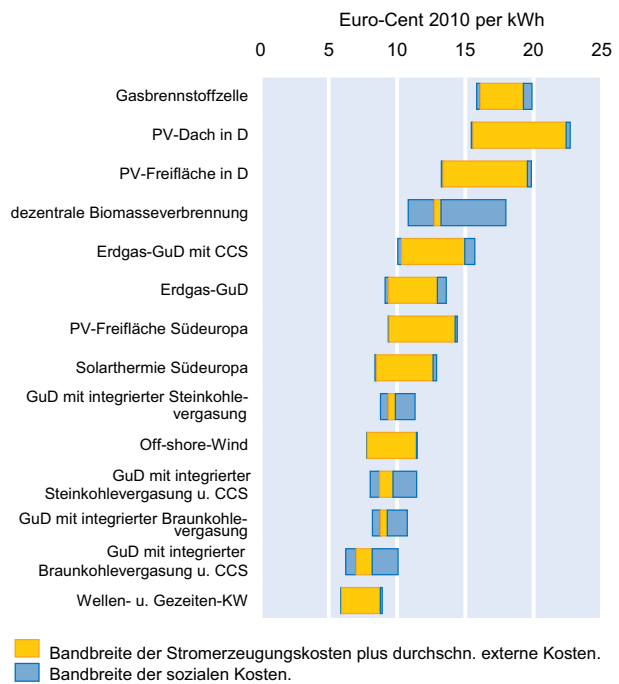
**Abb. 6**  
Soziale Kosten von Stromerzeugungstechniken, Inbetriebnahme 2025, Klimaschutzziel 20plus



Standorte in Deutschland außer bei ‚Solarthermie Südeuropa‘, ‚PV-Freifläche Südeuropa‘ mit Standorten in Mittelmeeranrainerländern.  
CCS = Carbon Capture and Storage (CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung).

Quelle: Preiss, Friedrich et al.(2010).

**Abb. 7**  
Soziale Kosten von Stromerzeugungstechniken, Inbetriebnahme 2025, Klimaschutzziel 2°



Standorte in Deutschland, außer bei ‚Solarthermie Südeuropa‘, ‚PV-Freifläche Südeuropa‘ mit Standorten in Mittelmeeranrainerländern.  
CCS = Carbon Capture and Storage (CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung).

Quelle: Preiss, Friedrich et al.(2010).



energie und die Braunkohle mit CCS. Es folgen die Steinkohle ohne und mit CCS und off-shore-Wind. Solarenergie, ob als Photovoltaikanlage oder als thermisches Solarkraftwerk kann unter günstigen Bedingungen anschließen, allerdings in Mittelmeerländern. In Deutschland landet Photovoltaikstrom auch 2025 noch in der Rangfolge sozialer Kosten ganz hinten.

Will man mehr Klimaschutz betreiben, so ergeben sich die in Abbildung 7 gezeigten sozialen Kosten.

Bei Kohle liegen jetzt die Varianten mit CCS vor denen ohne CCS, bei Gas dagegen ist die Variante ohne CCS besser. Nach wie vor weist die Solarenergie in Deutschland mit die höchsten sozialen Kosten auf.

Nicht alle möglichen Stromerzeugungsoptionen sind in den Abbildungen 6 und 7 aufgeführt. Der Bau neuer Kernkraftwerke ist in Deutschland verboten, allerdings lässt sich der Import kostengünstigen Kernenergiestroms aus dem benachbarten Ausland wohl nicht unterbinden. Größere Laufwasserkraftwerke weisen geringe soziale Kosten auf, allerdings ist das Potenzial für einen weiteren Ausbau sehr begrenzt. On-shore-Wind weist an windreicheren Standorten geringere soziale Kosten aus als off-shore-Wind, allerdings sind die günstigsten Standorte häufig schon genutzt; zudem treten teilweise Akzeptanzprobleme auf. Das Potenzial der Abfallverbrennung ist weitgehend ausgeschöpft, die Stromerzeugung aus Biogas mit höheren sozialen Kosten verbunden. Günstiger ist die Verbrennung von Biomasse in größeren Feuerungen, zum Beispiel auch in Mischfeuerungen.

Beim Neubau von Kraftwerken sind die Restriktionen hinsichtlich Potenzial und Zubaukapazität zu beachten. Außerdem gilt es, ein ausreichendes Maß an Versorgungssicherheit durch Bau von Speichern, Ausbau der Netze und Vorhaltung von Reservekapazität aufrechtzuerhalten. Die Zusammensetzung eines optimalen Stromerzeugungssystems unter Verwendung der hier vorgestellten Ergebnisse kann mit Energiemodellen, zum Beispiel TIMES, berechnet werden.

## Schlussfolgerungen

Laufwasser, gefolgt von Braunkohle, Wind, evtl. Wellenenergie und Steinkohle sind die Optionen mit den niedrigsten sozialen Kosten. Aber: das Potenzial von Wind und Laufwasser ist begrenzt; Wind und Wellenenergie benötigen Reserve- oder Speicherkapazität, On-shore-Wind ist nicht überall akzeptiert.

Vor allem Braunkohle stellt sich daher als günstig heraus. Mit CCS (CO<sub>2</sub>-Speicherung), wenn

- das »2°«-Klimaschutzziel erreicht werden soll und
- Kosten für CO<sub>2</sub>-Transport und Speicherung den Erwartungen entsprechen und die technischen und Umweltrisiken gering sind.

Allerdings sind auch die günstigen CCS-Lagerstätten begrenzt. Soweit On-shore-CCS auf Akzeptanzprobleme stößt, käme u.U. eine Off-shore-Speicherung in Betracht.

Erdgas wird Kohle nur ersetzen, wenn die Erdgaspreise moderat bleiben; dann zunächst auch ohne CCS. Ein gewisses Potenzial für Erdgas besteht bei kleineren Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung.

Biomasse hat relativ hohe externe und soziale Kosten. Am günstigsten ist noch die Verbrennung von Rest- und Abfallstoffen in großen Feuerungen. Allerdings wird die Biomasse eher in anderen Sektoren (z.B. Verkehr) zur CO<sub>2</sub>-Minderung benötigt.

Stromerzeugung mit Sonnenenergie in Deutschland weist mindestens bis 2030 mit die höchsten sozialen Kosten auf. Nach Kohle und Gas könnte die solare Stromerzeugung in Mittelmeerländern eine weitere Option sein; vor allem, wenn große Treibhausgasreduzierungen erreicht werden sollen und CCS nicht günstig oder sicher zur Verfügung steht.

Weitere Informationen zu Methodik und Ergebnissen auf [www.externe.info](http://www.externe.info); [www.needs-project.org](http://www.needs-project.org).

## Literatur

- Bickel, P. und R. Friedrich (Hrsg., 2005), *Externalities of Energy, Methodology 2005 update, Luxembourg*, European Commission, online verfügbar unter: [www.externe.info](http://www.externe.info).
- Hope, C. (2006), »The marginal impact of CO<sub>2</sub> from PAGE2002: an integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern«, *Integrated Assessment* 6, 1.
- Hotelling, H. (1931), »The Economics of Exhaustible Resource«, *Journal of Political Economy* 39,137–175.
- Hunt, A., V. Maca und M. Scasny (2011), »Monetary values for health endpoints«, HEIMTSA project report, [www.heimtsa.eu](http://www.heimtsa.eu).
- Hurley, F. et al. (2011), »Final report on risk functions used in the case studies«, HEIMTSA project report, [www.heimtsa.eu](http://www.heimtsa.eu).
- Kuik, O., L. Brander und R. Tol (2009), »Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis«, *Energy Policy* 37, 1395–1403, doi:10.1016/j.enpol.2008.11.040.
- Nordhaus, W. (2007), *The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy*, Yale University, New Haven.
- Preiss, P., R. Friedrich et al. (2010), Social costs of electricity generation, results from the CASES project, [www.feem-project.net/cases](http://www.feem-project.net/cases).