



Fraunhofer Institut
System- und
Innovationsforschung

Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern

**Gutachten im Rahmen von Beratungsleistungen für das
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit**

Wolfram Krewitt

DLR, Institut für Technische Thermodynamik,
Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung,
Stuttgart

Barbara Schlomann

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI),
Abteilung Energiepolitik und Energiesysteme,
Karlsruhe

6. April 2006

Kontakt:

Dr. Wolfram Krewitt (Projektleitung)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Technische Thermodynamik
Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Tel.: 0711-6862-766
Wolfram.krewitt@dlr.de

Dipl.-Vw. Barbara Schlomann
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
Abteilung Energiepolitik und Energiesysteme
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Tel.: 0721/6809-136
barbara.schlomann@isi.fraunhofer.de

Das Gutachten wurde im Auftrag des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) erstellt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Problemstellung und Ziele	4
1.1 Externe Kosten – theoretischer Hintergrund	4
2 Auswertung der vorliegenden Studien zu externen Kosten der Stromerzeugung	8
2.1 Überblick über vorliegende Studien	8
2.2 Treibhauseffekt	10
2.2.1 Auswirkungen des globalen Klimawandels	10
2.2.2 Wichtige Einflussgrößen zur Ermittlung der Social Cost of Carbon	14
2.2.3 Schadenskosten des Klimawandels in der Literatur	16
2.2.4 CO ₂ -Vermeidungskosten	19
2.2.5 Ableitung eines Schattenpreises für CO ₂ -Emissionen	21
2.3 Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe	23
2.3.1 Quantifizierung von Gesundheitsschäden	23
2.3.2 Monetäre Bewertung von Gesundheitsschäden	27
2.3.3 Spezifische Schadenskosten – Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe	29
2.4 Wirkung von Luftschadstoffen auf Agrarprodukte	30
2.5 Materialschäden durch Luftschadstoffe	30
2.6 Wirkung von Luftschadstoffen auf naturnahe Ökosysteme und Biodiversität	31
2.7 Große nicht-nukleare Unfälle	32
2.8 Versorgungssicherheit	32
2.9 Sonstige externe Effekte	33
2.10 Zusammenstellung spezifischer externer Kosten für verschiedene Luftschadstoffe	34
3 Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern	35
4 Externe Kosten im energiepolitischen Kontext -Charakterisierung weiterer möglicher Anwendungsfelder	41
4.1 Anwendungsfelder für externe Kosten in der Energie-, Umwelt- und Klimapolitik	41
4.2 Anwendungsfeld Emissionshandel	43
4.3 Anwendungsfeld Emissions- und Energiesteuern	44
4.4 Anwendungsfeld Kraft-Wärme-Kopplung	45
5 Literatur	49

Zusammenfassung

Externe Effekte sind unmittelbare Auswirkungen der ökonomischen Aktivitäten eines Wirtschaftssubjektes (Unternehmen, private und öffentliche Haushalte) auf die Produktions- oder Konsummöglichkeiten anderer Wirtschaftssubjekte, ohne dass eine adäquate Kompensation erfolgt. Je nach Wirkungsrichtung lassen sich positive externe Effekte (externe Nutzen) und negative externe Effekte (externe Kosten) unterscheiden. Diese Definition geht historisch auf die wohlfahrtstheoretischen Überlegungen von Pigou (1912) zurück.

Verschiedene energie- und umweltpolitische Instrumente zielen auf eine Internalisierung externer Effekte im Energiebereich. Trotz erheblicher Forschungsanstrengungen in den letzten 15 Jahren ist die Quantifizierung externer Kosten aber noch mit Unsicherheiten verbunden, außerdem haben neue Erkenntnisse in den letzten Jahren teilweise zu einer Neueinschätzung der durch die Stromerzeugung verursachten externen Kosten geführt. Im Rahmen von Beratungsleistungen für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit haben das DLR (Stuttgart) und das FhG-ISI (Karlsruhe) im vorliegenden Gutachten den aktuellen Stand des Wissens zu den externen Kosten der Stromerzeugung zusammengefasst und Handlungsempfehlungen zur Verwendung der vorliegenden Daten im energiepolitischen Kontext erarbeitet.

Quantifizierung externer Effekte

Die mit der Strombereitstellung verbundenen Aktivitäten führen zu verschiedenen potenziellen externen Effekten. Für die Quantifizierung externer Kosten sind vor allem die Wirkungen von Treibhausgasemissionen und die Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe von Bedeutung:

Klimawandel: Die Auswirkungen eines globalen Klimawandels sind vielfältig und möglicherweise sehr groß. Die Wechselwirkungen zwischen dem globalen Klimasystem, dem Ökosystem und dem sozio-ökonomischen System sind sehr komplex. Durch intensive Forschung ist in den letzten Jahren das Verständnis für die verschiedenen Teilbereiche gewachsen und hat zu einer kontinuierlichen Verbesserung der entsprechenden Modelle geführt. Eine neue Studie des englischen Umweltministeriums (UK Department for Environment, Food and Rural Affairs - Defra) kommt zu dem Schluss, dass die Schadenskosten des Klimawandels mit großer Wahrscheinlichkeit über einem unteren Grenzwert von 15 €/t_{CO2} liegen. Modellrechnungen mit dem Integrated Assessment Model FUND in dieser Studie zeigen, dass unter plausiblen Annahmen Schadenskosten von bis zu 300 €/t_{CO2} berechnet werden. **Nach Auswertung der vorliegenden Literatur und unter besonderer Berücksichtigung der Ergebnisse der Defra-Studie wird empfohlen, zur Berechnung externer Kosten als „bester Schätzwert“ Schadenskosten durch CO₂-Emissionen in Höhe von 70 €/t_{CO2} zu verwenden** (unterer Grenzwert: 15 €/t_{CO2}; hoher Schätzwert: 280 €/t_{CO2}). Dieser Wert der Schadenskosten liegt in einer sinnvollen Größenordnung im Vergleich zu vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung (WBGU) in verschiedenen Szenarien zur Stabilisierung der globalen CO₂-Konzentration unter 450 ppm berechneten marginalen Vermeidungskosten.

Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe: Die ExternE Studie der Europäischen Kommission zeigt, dass vor allem das erhöhte Sterblichkeitsrisiko durch eine chronische Exposition gegenüber Feinstaub (PM₁₀ bzw. PM_{2,5}) zu erheblichen externen Kosten führt. Zur Quantifizierung externer Kosten durch Gesundheitsschäden werden die aktuellen Ansätze aus der ExternE Studie (ExternE Methodology update 2005) verwendet.

Andere externe Effekte: Externe Effekte durch landwirtschaftliche Ertragsverluste und Materialschäden werden der ExternE-Methode entsprechend quantifiziert, sie sind jedoch vernachlässigbar klein. Die Auswirkungen von SO₂- und NO_x-Emissionen auf Biodiversität und Ökosysteme durch Versauerung und Eutrophierung konnten bisher nicht zufriedenstellend monetarisiert werden. Genauso wenig liegen Ansätze zur Monetarisierung von möglichen nicht-umweltbezogenen externen Effekten wie z.B. Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit oder geo-politische Effekte vor. Die hier quantifizierten Effekte sind also immer nur als eine Teilsumme der tatsächlich zu erwartenden Effekte anzusehen.

Externe Kosten der Stromerzeugung

Abbildung 1 zeigt die mit den in diesem Gutachten abgeleiteten Wertansätzen berechneten externen Kosten der Stromerzeugung für verschiedene Stromerzeugungsoptionen. Es wird deutlich, dass die Schadenskosten der Klimawandels die externen Kosten dominieren. Bei der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern liegen die externen Kosten in der gleichen Größenordnung wie die betriebswirtschaftlichen (internen) Kosten, während für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien die externen Kosten deutlich unter 1 ct/kWh liegen (außer heutige Fotovoltaik-Anlagen, die aber ein großes Potenzial zur weiteren Senkung der externen Kosten haben).

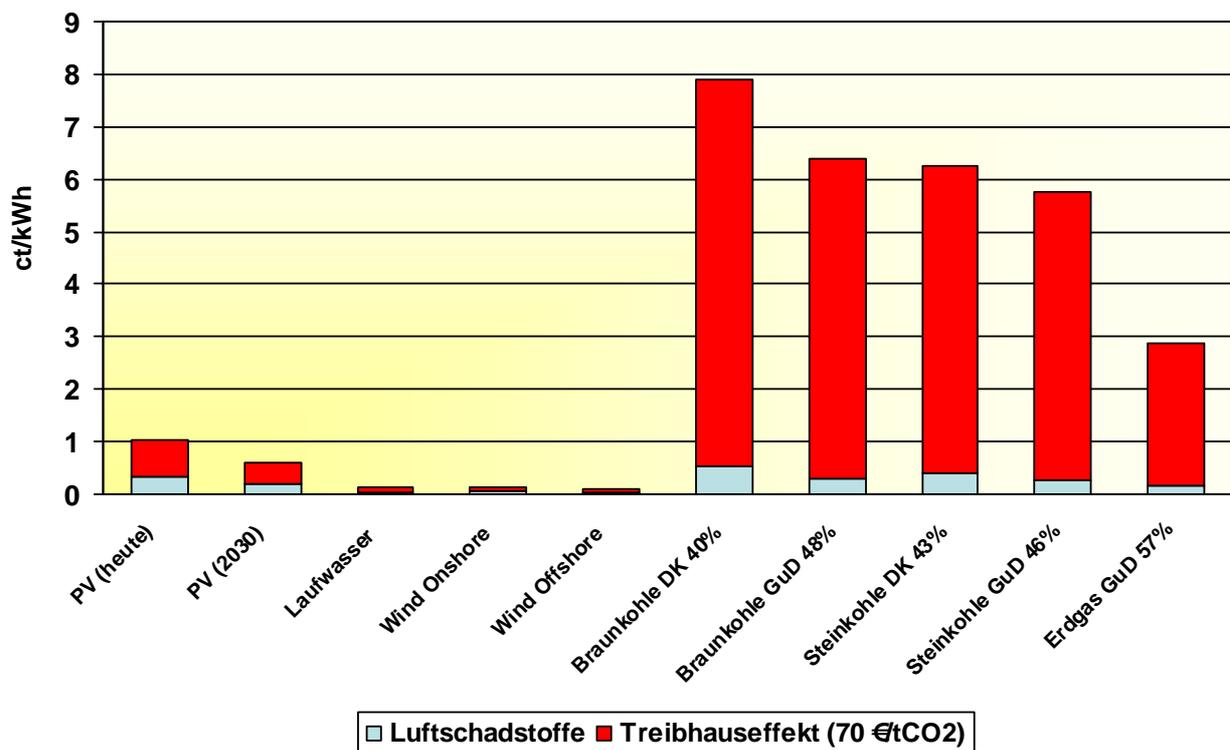


Abbildung 1: Externe Kosten der Stromerzeugung für verschiedene Stromerzeugungsoptionen (DK: Dampfkraftwerk; GuD: Gas- und Dampfkraftwerk)

Vermiedene externe Kosten durch Förderung erneuerbarer Energien

Der durch die Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) angestoßene Ausbau erneuerbarer Energien führt zu einer Substitution von Strom aus konventionellen Kraftwerken durch Strom aus erneuerbaren Energien und damit zu einer Vermeidung von Umweltschäden und den daraus resultierenden externen Kosten. Durch den nach EEG vergüteten Strom konnten in Deutschland im Jahr 2005 die Emissionen von 38 Mill. t CO₂, 13 kt SO₂, 27 kt NO_x und 3 kt Feinstaub vermieden werden. Mit den hier abgeleiteten Ansätzen zur monetären Bewertung entspricht dies vermiedenen externen Kosten in Höhe von ca. 2,8 Mrd. €. Dem steht eine EEG-Vergütung in Höhe von 4,3 Mrd. € gegenüber, bei einem anlegbaren Strompreis von 4,2 ct/kWh entspricht dies einer Förderung durch das EEG in Höhe von 2,4 Mrd. € (Abbildung 2). **Es kann also davon ausgegangen werden, dass die EEG-Aufwendungen zur Förderung erneuerbarer Energien durch vermiedene externe Kosten vollständig kompensiert werden.** Unabhängig von verschiedenen anderen Zielen, die mit dem EEG verfolgt werden, „lohnt“ sich also die Förderung erneuerbarer Energien alleine aufgrund der vermiedenen Umweltschäden und den damit verbundenen volkswirtschaftlichen Nutzen.

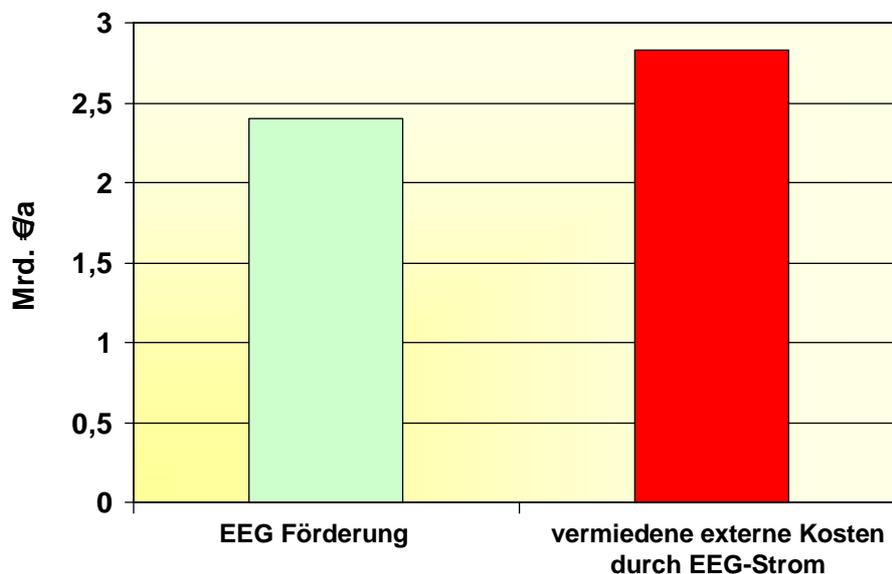


Abbildung 2: Vergleich der Aufwendungen zur Förderung erneuerbarer Energien durch das EEG mit den durch EEG-Strom vermiedenen externen Kosten im Jahr 2005

Weitere mögliche Anwendungsfelder für externe Kosten der Stromerzeugung

Wie beim Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) könnten externe Kosten auch bei der Begründung, Ausgestaltung und Bewertung weiterer energie-, umwelt- und klimapolitischer Maßnahmen Anwendung finden. Im Hinblick auf die externen Kosten der Stromerzeugung sind insbesondere das neue Instrument des europäischen *Emissionshandels*, die *ökologische Steuerreform* sowie die Förderung der *Kraft-Wärme-Kopplung* von Bedeutung. Wenn die externen Kosten im Zusammenhang mit diesen Instrumenten tatsächlich genutzt werden, sind dabei auch mögliche Wechselwirkungen zwischen diesen politischen Instrumenten zu berücksichtigen.

1 Problemstellung und Ziele

Das Konzept der externen Kosten ist in der ökonomischen Theorie fest verankert. Das Vorliegen externer Effekte im Bereich der Energieversorgung wird inzwischen weitgehend akzeptiert, aber in die Anwendung häufig vergessen oder vernachlässigt. Dennoch zielen bereits verschiedene umweltpolitische Maßnahmen u. a. auf die Internalisierung externer Kosten.

Auf europäischer Ebene werden seit über 15 Jahren Methoden zur Berechnung externer Kosten entwickelt und angewendet (ExternE und entsprechende Nachfolgeprojekte). Abschätzungen von externen Kosten wurden von der EU zur Begründung verschiedener umweltpolitischer Maßnahmen verwendet (u. a. Air Quality Directive, Large Combustion Plant Directive, Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien). Die Quantifizierung externer Kosten ist allerdings nach wie vor mit sehr großen Unsicherheiten verbunden, die es erlauben, dass unterschiedliche Akteursgruppen ihre durchaus gegenläufigen Interessen mit unterschiedlichen Angaben zu externen Kosten begründen. Dies steht einer konsistenten Verwendung von Angaben zu externen Kosten in energie- und umweltpolitischen Entscheidungsprozessen im Wege

Ausgehend von einer kritischen Bewertung vorliegender Arbeiten zur Quantifizierung externer Kosten sollen in diesem Projekt Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger zur Verwendung möglichst konkreter Angaben über externe Kosten in der Stromerzeugung von Erneuerbaren im Vergleich zu Fossilen erarbeitet werden. Dies beinhaltet:

- (1) Eine Charakterisierung der Anwendungsfelder, in denen Angaben zu externen Kosten für die Ausgestaltung politischer Instrumente herangezogen werden (z.B. Ökosteuer, EEG, Cost-Benefit Analyse, etc.) können.
- (2) Eine kritische Auswertung der bereits entwickelten Methoden und berechneten Daten im Hinblick auf die verschiedenen Anwendungsfelder. Dabei werden insbesondere die Ergebnisse der europäischen ExternE-Studie, IPCC sowie – soweit veröffentlicht – Ergebnisse aus den entsprechenden Nachfolgestudien (NewExt, ExternE-Pol, NEEDS) herangezogen, wobei der Schwerpunkt bei den externen Kosten von erneuerbarer und konventioneller Stromerzeugung unter besonderer Berücksichtigung von Klimafolgeschäden liegt.
- (3) Abgabe konkreter Handlungsempfehlungen zur Verwendung der vorliegenden Daten zu externen Kosten im energiepolitischen Kontext sowie Aufzeigen des weiteren Forschungsbedarfs.

1.1 Externe Kosten – theoretischer Hintergrund

In der ökonomischen Theorie wird oftmals mit "externen Effekten" argumentiert. Externe Effekte sind unmittelbare Auswirkungen der ökonomischen Aktivitäten eines Wirtschaftssubjektes (Unternehmen, private und öffentliche Haushalte) auf die Produktions- oder Konsummöglichkeiten anderer Wirtschaftssubjekte, ohne dass eine adäquate Kompensation erfolgt. Je nach Wirkungsrichtung lassen sich positive externe Effekte (externe Nutzen) und negative externe Effekte (externe Kosten) unterscheiden. Diese Definition geht historisch auf die wohlfahrtstheoretischen Überlegungen von Pigou (1912) zurück. Nach dieser Interpretation umfassen externe Kosten nur solche negativen Auswirkungen der Produktion oder des Konsums, die nicht über den Markt erfasst werden, für die es also keine Marktpreise gibt ("technologische" externe Effekte). Abweichend hiervon definiert Kapp (1979) die externen Kosten, die er als soziale Kosten bezeichnet, als alle direkten und indirekten Verluste, die Drittpersonen oder die Allgemeinheit als Folge einer uneingeschränkten wirtschaftlichen Tätigkeit zu

tragen haben. In dieser sehr weiten Interpretation des Begriffes sind neben technologiebedingten externen Effekten (wie Schädigungen der natürlichen Umwelt und gesundheitliche Beeinträchtigungen) auch einige Kostenkomponenten enthalten, die sich aus der Interdependenz der Wirtschaftssysteme ergeben (z.B. makroökonomische Veränderungen der Produktion oder Beschäftigung). Sie werden in der ökonomischen Theorie auch als "pekuniäre" externe Effekte bezeichnet.

Das Auftreten externer Effekte hat für die gesellschaftliche Bewertung von Techniken wie der Stromerzeugung zur Konsequenz, dass aus theoretisch-volkswirtschaftlicher Sicht bei der Technikbewertung die gesamten Kosten und Nutzen zu berücksichtigen sind, die der Gesellschaft durch den Einsatz einer Technik entstehen, d.h. sowohl die internen als auch die externen Kosten und Nutzen. Diese theoretischen Überlegungen finden zunehmend Eingang in die praktische Wirtschaftspolitik, sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene. In Deutschland ist der öffentliche Sektor bereits nach der am 1. Januar 1970 in Kraft getretenen Haushaltsreform verpflichtet, für alle Maßnahmen im öffentlichen Bereich, die von größerer finanzieller Bedeutung sind, Nutzen-Kosten-Untersuchungen durchzuführen. Seit Beginn der 90er Jahre wird auch innerhalb der Europäischen Union einer umweltökonomischen Bewertung von Regulierungen ein stärkeres Gewicht beigemessen. Beispielsweise wird in Art. 174 (ex-Art. 130r) Abs. 3 EGV u. a. gefordert, dass: *"In preparing its policy on the environment, the Community shall take account of: ...the potential benefits and costs of action or lack of action;"*. Die Notwendigkeit einer Berücksichtigung von Externalitäten in den Marktpreisen war ein zentraler Bestandteil des Fünften "Environmental Action Programme" der EU-Kommission, "Towards Sustainability". Die Wiege der ökonomischen Bewertungen von politischen Maßnahmen und Projekten im Umweltbereich liegt allerdings in den Vereinigten Staaten. Dort werden bereits seit den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts Analysen zu Kosten und Nutzen von staatlichen Maßnahmen im Umweltbereich, später auch in den Bereichen Transport, Erziehung, Gesundheit und Bildung standardmäßig angewandt (Schulz/Schulz 1991; Hackl/Pruckner 2000).

Externe Kosten in der engeren Definition der technologischen externen Effekte treten vor allem im Zusammenhang mit den durch wirtschaftliche Aktivitäten verursachten Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschäden als Folge von Schadstoff- und Lärmemissionen auf. Dazu gehören:

- Durch Luftverschmutzung bedingte Schädigungen an der Pflanzen- und Tierwelt, an Materialien und Gesundheitsschäden bei Menschen; dabei ist der größte Teil der luftverschmutzungsbedingten Schäden der Energieumwandlung und -nutzung (einschl. Verkehr) anzulasten.
- Die sich abzeichnenden Klimaveränderungen und deren Folgewirkungen durch die zunehmende Anreicherung der Atmosphäre mit CO₂ und weiteren Treibhausgasen, die in Deutschland zu rund 85 % vom Energiebereich verursacht werden.
- Hinzu kommen Schäden durch Gewässerverschmutzung, Bodenbelastung, Abfall sowie Lärmbelästigung, die jedoch in dieser Untersuchung, die sich auf die im Zusammenhang mit der Energieumwandlung entstehenden klassischen Luftschadstoffe und Treibhausgasen konzentriert, nicht weiter betrachtet werden.

Aus theoretischer Sicht lässt sich eine Berücksichtigung dieser externen Kosten bei Produktions- und Konsumententscheidungen erreichen, indem man die externen zu internen Kosten der Verursacher macht, d. h. sie in den Markt- und Preismechanismus einbezieht. Dies ist Aufgabe der Energie-, Umwelt- und Klimapolitik, der dafür einerseits Instrumente des klassischen Ordnungsrechtes und andererseits die in den letzten Jahren in den Vordergrund gerückten ökonomischen Instrumente zur Internalisierung externer Kosten zur Verfügung stehen.

Instrumente des Ordnungsrechtes:

- Verbote oder Gebote bezüglich der externe Kosten hervorrufenden Aktivitäten.
- Festsetzung von "Standards" (z. B. des Schadstoffgehalts der Abluft) und staatliche Kontrolle ihrer Einhaltung.

Ökonomische Instrumente:

- Die Erhebung von Steuern oder nichtsteuerlichen Abgaben (wie Gebühren, Beiträge und Sonderabgaben) auf externe Kosten bewirkende Aktivitäten.
- Zuerkennung von (marktfähigen) Eigentums- oder Verschmutzungsrechten (z. B. CO₂-Emissionszertifikate).
- Finanzielle Anreize für die Verbreitung von Techniken oder Aktivitäten mit geringeren externen Kosten.
- Maßnahmen der Preisgestaltung (z. B. "Grüner" Strom).

Die genannten ökonomischen Instrumente lassen sich unterscheiden in Internalisierungsinstrumente wie die Energie- bzw. Emissionsbesteuerung und den Zertifikatehandel, bei denen die Höhe und Struktur der Belastung zumindest aus theoretischer Sicht direkt an den externen Kosten bemessen werden könnte ("First-best-Instrumente") und Förderinstrumente wie das EEG und KWKG. Während bei Energiebesteuerung und Emissionshandel eine Belastung der umweltschädigende Aktivitäten bzw. Technologien erfolgt, erfolgt bei EEG und KWKG eine Entlastung der umweltverträglicheren Aktivitäten bzw. Technologien. Letztere Instrumente können im Hinblick auf die Internalisierung der externen Kosten als "Second-Best"-Instrumente eingestuft werden, indem die Wettbewerbsnachteile aufgrund der fehlenden oder nicht vollständigen Internalisierung der externen Kosten der fossilen Brennstoffe und der Atomenergie kompensiert werden durch Förderung. In diesem Zusammenhang können die nicht internalisierten Kosten Anhaltspunkte für Struktur und Gesamtumfang der Vergütungen geben. Neben dem Ausgleich der Wettbewerbsnachteile erfolgt indirekt auch ein Beitrag zur Internalisierung, indem durch verstärkten Einsatz von Techniken oder Aktivitäten mit geringen externen Kosten (wie die erneuerbaren Energien oder die Kraft-Wärme-Kopplung) eine Verringerung der Nutzung von Techniken oder Aktivitäten mit hohen externen Kosten erfolgt.

Zu berücksichtigen ist, dass Förderinstrumente wie das EEG und das KWKG in der Regel nicht nur als Kompensation für die fehlende bzw. unvollständige Internalisierung externer Kosten begründet werden, sondern dass mit ihnen weitere industrie-, gesellschafts- oder umweltpolitische Ziele verfolgt werden. Analog wird auch mit der Energiebesteuerung nicht nur der Internalisierungszweck verfolgt, sondern beispielsweise auch verteilungs- bzw. allgemeine steuerpolitische Zwecke.

Jede dieser Internalisierungsmöglichkeiten ist mit spezifischen Vor- und Nachteilen behaftet, die auch abhängig vom jeweiligen Anwendungsfeld sind. Voraussetzung für eine Internalisierung mit jeder dieser Maßnahmen ist jedoch zunächst die konkrete Ermittlung der externen Kosten, die wiederum eine wichtige Grundlage für die Durchführung einer gesamtwirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Analyse (Cost-Benefit-Analyse) umweltverbessernder Maßnahmen und Programme bildet.

Aus theoretischer Sicht sollte die Maßnahme so gewählt werden, dass sie zu einer weitgehenden Internalisierung der externen Kosten führt, ohne Marktverzerrungen zu verursachen. Dabei können folgende Auswahlkriterien zu Grunde gelegt werden (Markandya/Longo 2005):

- Effizienz und Flexibilität der Maßnahmen
- Minimierung der Transaktionskosten (inkl. administrative Kosten)
- Gerechtigkeit (Wer trägt externe Kosten?)
- Geringe Unsicherheit über Zielerreichung, d.h. Erreichung eines möglichst hohen Internalisierungsgrades
- Praktikabilität der Durchführung
- Förderung technologischer Innovationen
- Positive Arbeitsplatzeffekte
- Beitrag zur Versorgungssicherheit
- Bei Maßnahmen zur Internalisierung der externen Kosten der Stromerzeugung auch Berücksichtigung der Standort-Abhängigkeit der Stromerzeugung

Diese Kriterien sind für die in Kapitel 4 dargestellten möglichen Anwendungsfelder für externe Kosten in der Energie-, Umwelt- und Klimapolitik jeweils neu zu prüfen.

2 Auswertung der vorliegenden Studien zu externen Kosten der Stromerzeugung

2.1 Überblick über vorliegende Studien

Obwohl das Konzept der externen Kosten seit langem in der ökonomischen Theorie etabliert ist, haben erst die wegweisenden Arbeiten von Homeyer in den 80er-Jahren zu den „Social Costs of Energy Consumption“ (Hohmeyer, 1988) die Problematik der externen Kosten der Energieversorgung zunächst in der Forschung und dann auch im energiepolitischen Bewusstsein verankert. Die Arbeiten von Hohmeyer lösten eine lebhaft wissenschaftliche Debatte über die Höhe der externen Kosten der Energieversorgung aus (siehe z.B. Ottinger et al. 1990; Friedrich et al. 1990). Wegen der energiepolitischen Bedeutung der Thematik wurden daraufhin in Europa und in den USA große Studien zur Quantifizierung der externen Kosten der Stromerzeugung ins Leben gerufen.

Während in den ersten Studien von Homeyer und anderen Autoren noch ein Top-down Ansatz verfolgt wurde, in dem ausgehend von der gesamten Umweltbelastung in einer Region die resultierenden Umweltschäden anteilmäßig der Stromerzeugung zugeordnet wurden, wurde in den neu angestoßenen Studien der ökonomischen Theorie entsprechend versucht, die marginalen externen Kosten durch eine zusätzliche Einheit Stromerzeugung in einem Bottom-up Ansatz abzuschätzen. Als methodisches Kernelement dieses Ansatzes hat sich der so genannte „Wirkungspfad“ oder „Impact Pathway“ etabliert, der die Kette kausaler Zusammenhänge von der Emission eines Schadstoffs über die Ausbreitung und chemische Umwandlung in den Umweltkompartimenten (zunächst vor allem in der Luft) bis hin zur Wirkung auf verschiedene „Rezeptoren“ (Menschen, Ökosysteme, Landwirtschaft, Materialien, etc.) beschreibt und – wenn möglich – zu einer monetären Bewertung der Umweltschäden führt. Es liegt auf der Hand, dass die Modellierung eines solchen Wirkungspfades sehr komplex ist und das Zusammenwirken verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen erfordert.

Die Europäische Kommission und das US Department of Energy starteten 1991 ein gemeinsames Forschungsprojekt, die so genannte „US – EC Fuel Cycle Externality“ Studie, in der eine große Anzahl von Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen – Ingenieure, Naturwissenschaftler, Mediziner, Epidemiologen, Ökologen, und natürlich Wirtschaftswissenschaftler – den Versuch unternommen haben, das vorhandene Wissen in einem konsistenten Ansatz zur Quantifizierung externer Kosten zusammenzustellen. Nach vier Jahren wurde vom Projektteam unter dem Label „ExternE“ ein methodischer Rahmen zur Berechnung externer Kosten der Stromerzeugung vorgelegt. Sowohl in den USA als auch in Europa wurden die Grundlagen der Methodik sowie die Anwendungen auf einzelne Stromerzeugungstechnologien in Buchserien veröffentlicht (European Commission, 1995 a-f; ORNL, 1994 a, b; ORNL, 1995 a-e). Zu erwähnen ist auch noch die in den USA parallel laufende „New York Environmental Externalities Cost Study“, die in enger Zusammenarbeit mit dem US-EC Projekt durchgeführt wurde.

Während nach dieser Phase die amerikanischen Aktivitäten weitgehend eingefroren wurden, wurde in Europa das ExternE Programm weiter ausgebaut. Der methodische Ansatz wurde weiterentwickelt und in einem ExternE National Implementation Projekt wurde die ExternE Methode in 15 europäischen Ländern zur Berechnung der durch die Stromerzeugung verursachten externen Kosten angewendet. Die Ergebnisse dieser Projektphase wurden 1999 veröffentlicht (European Commission, 1999 a-d). Darauf aufbauend wurde die ExternE Methodik für die Bereiche Verkehr (Friedrich und Bickel, 2001) und als Ergänzung für eine Umweltökonomische Gesamtrechnung (Markandya, Tamborra, 2002) erweitert und ange-

wendet. In den sich anschließenden Projekten NewExt (NewExt 2004) und ExternE-Pol (Rabl et al., 2005) wurde versucht, bestehende methodische Defizite bei der Berechnung externer Kosten weiter aufzuarbeiten.

Im September 2004 startete das Folgeprojekt „New Energy Externalities Developments for Sustainability“ (NEEDS), ein „integriertes Projekt“ der Europäischen Kommission mit insgesamt 66 Partnern (für aktuelle Informationen zu NEEDS siehe <http://www.needs-project.org>). Das übergeordnete Ziel von NEEDS ist es, die gesamten – also die internen und die externen – Kosten und Nutzen zukünftiger europäischer Energieversorgungsstrategien aufzuzeigen. Neu an NEEDS ist die Verknüpfung der Weiterentwicklung von Methoden zur Berechnung externer Kosten mit detaillierten Ökobilanzen zukünftiger Stromerzeugungstechnologien und mit optimierenden Energiesystemmodellen im Rahmen von Szenarioanalysen. Außerdem wird in NEEDS versucht, Ansätze der multi-kriteriellen Nutzwertanalyse ergänzend zur Quantifizierung externer Kosten zur Bewertung verschiedener Technologieoptionen heranzuziehen.

Trotz der von verschiedenen Seiten vorgebrachte Kritik an der ExternE Methode und den ExternE Ergebnissen, die sich oft vor allem an den theoretischen wohlfahrtökonomischen Ansatz richtet, wird ExternE als der weltweit am weitesten entwickelte Ansatz zur Abschätzung externer Kosten angesehen. Der relativ enge Fokus auf ExternE ist bei der hier durchzuführenden Methodendiskussion daher gerechtfertigt, allerdings werden zusätzlich vor allem auch die methodischen Entwicklungen in Deutschland und möglicherweise von ExternE deutlich abweichende Ansätze berücksichtigt.

Die Methode zur Berechnung externer Kosten ist im Laufe der letzten 15 Jahre kontinuierlich weiterentwickelt worden, durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Einsichten konnte die Methode verbessert werden. Neues Wissen und veränderte Wertansätze führten jedoch im Laufe der Zeit auch immer wieder zu einer mitunter deutlichen Änderung der Ergebnisse. In den folgenden Abschnitten werden daher für die wichtigsten Schadenskategorien die methodischen Entwicklungen zusammengefasst und kritisch diskutiert.

Den aktuellen Ergebnissen aus den NewExt und ExternE-Pol Studien entsprechend tragen Gesundheitseffekte und der Treibhauseffekt bei allen Stromerzeugungstechnologien zu mehr als 95% der quantifizierten externen Kosten bei. Dies unterstreicht die besondere Bedeutung dieser beiden Schadenskategorien, die dementsprechend im Folgenden besonders ausführlich diskutiert werden. Besondere Aufmerksamkeit verdienen aber auch die Schadenskategorien, die bisher nicht wissenschaftlich befriedigend quantifiziert werden können, möglicherweise aber mit nicht vernachlässigbaren externen Effekten verbunden sind.

2.2 Treibhauseffekt

Die Auswirkungen eines globalen Klimawandels sind vielfältig und möglicherweise sehr groß. Die Wechselwirkungen zwischen dem globalen Klimasystem, dem Ökosystem und dem sozio-ökonomischen System sind äußerst komplex und werden bis heute nur unvollständig verstanden. Durch intensive Forschung ist in den letzten Jahren allerdings das Verständnis für die Prozesse in verschiedenen Teilbereichen schnell gewachsen und hat zu einer kontinuierlichen Verbesserung der entsprechenden Modelle geführt.

Im Zusammenhang mit der ökonomischen Bewertung des Treibhauseffekts spielen in der Literatur neben den durch den Treibhauseffekt verursachten Schadenskosten auch die Kosten zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen eine wichtige Rolle. Wegen der mit der Abschätzung der Schadenskosten verbundenen großen Unsicherheiten werden Vermeidungskosten manchmal als Indikator für die gesellschaftliche Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von – zum Teil unbekanntem – Schäden durch den Treibhauseffekt aufgefasst. Liegt ein politisch festgelegtes CO₂-Minderungsziel vor, so sind die marginalen Vermeidungskosten unter Umständen eine sinnvollere Größe zur Bewertung verschiedener Handlungsstrategien als die Schadenskosten. In Kapitel 2.2.4 wird daher auf die Bedeutung der Vermeidungskosten eingegangen.

Als Schadenskosten des Klimawandels – in der englischsprachigen Literatur Social Costs of Carbon (SCC) genannt – werden in der Regel die durch eine Klimaänderung verursachten marginalen Kosten verstanden. Die Schadenskosten werden normalerweise als Netto-Gegenwartswert der Kosten angegeben, die durch die Emission einer Tonne Kohlenstoff innerhalb der nächsten hundert Jahre (manchmal auch darüber hinaus) verursacht werden. Die Schadenskosten hängen vom Zeitpunkt der Emission und der Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen ab, sie sind nicht zu verwechseln mit den gesamten Kosten des Treibhauseffekts oder den durchschnittlichen Kosten der Treibhausgasemissionen. Während in der Literatur die Social Cost of Carbon häufig auf eine Tonne Kohlenstoff bezogen sind, werden hier die Schadenskosten je Tonne CO₂ angegeben (1 t C = 3,664 t CO₂), um sie leichter in den energiewirtschaftlichen Zusammenhang einordnen zu können.

2.2.1 Auswirkungen des globalen Klimawandels

Der dritte Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2001a) ordnet mögliche Folgen des Klimawandels drei verschiedenen Kategorien zu, die auf Grund des heutigen Wissens in einer jeweils unterschiedlichen Qualität beschrieben werden können:

- *Projections*: relativ gut beschreibbare Trends, wie z.B. der Anstieg des Meeresspiegels oder die Änderung der globalen Durchschnittstemperatur.
- *„Bounded Risks“*: Ereignisse, die nur mit Unsicherheiten beschrieben werden können, für die sich aber zumindest die Größenordnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit abschätzen lässt (z.B. die Änderung der Wahrscheinlichkeit sommerlicher Dürreperioden).
- *„System Change and Surprise“*: Vorgänge mit möglicherweise großer Dynamik und regionalen Rückkopplungen, die bis heute nur unvollständig verstanden werden, wie z.B. Änderungen der nordatlantischen Strömung, das Zusammenbrechen des antarktischen Eisschildes oder der Freisetzung von Methanhydraten).

Ausgehend vom Basisjahr 1990 werden im dritten Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2001) die folgenden durch globalen Klimawandel bis zum Jahr 2100 zu erwartenden Auswirkungen beschrieben:

- Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 1,4 bis 5,8 °C (der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert betrug + 0,6 °C).
- Anstieg der globalen durchschnittlichen Niederschlagsmenge. Die jährlichen regionalen Niederschläge können um 5 bis 20% zu- oder abnehmen.
- Anstieg des Meeresspiegels um 0,03 bis 0,88 m.
- Zunahme der Häufigkeit extremer Wetterereignisse wie Dürren oder schwere Stürme.
- Nach 2100 sind schwerwiegende Änderungen des globalen Klimasystems wie z.B. Änderungen der Meeresströmungen oder das Abschmelzen des antarktischen Eisschildes möglich, wenn bis dahin keine Stabilisierung der Klimaänderung erreicht wird.

Neuere Erkenntnisse weisen darauf hin, dass die Klimasensitivität im dritten Sachstandsbericht des IPCC eher unterschätzt wurde und dass für verschiedene Effekte das Risiko inzwischen als eher größer eingeschätzt wird (Met Office, 2005). Der vierte Sachstandsbericht des IPCC wird zurzeit vorbereitet und befindet sich in einer internen Review Phase.

Durch die genannten Effekte kommt es zu teilweise schwerwiegenden Auswirkungen auf die Funktion von Ökosystemen, auf Biodiversität, auf wirtschaftliche Aktivitäten und auf menschliche Gesundheit und gesellschaftliche Wohlfahrt. Zur Abschätzung der daraus resultierenden Schadenskosten werden so genannte „Integrated Assessment“ Modelle verwendet, in denen versucht wird, sowohl das Klimasystem als auch die entsprechenden Wechselwirkungen mit dem sozio-ökonomischen System vereinfachend abzubilden. Die vorliegenden Integrated Assessment Modelle unterscheiden sich im Hinblick auf ihre räumliche Auflösung, in der Komplexität ihrer Klima- und Wirtschaftsmodule und im Hinblick auf die Berücksichtigung von Auswirkungen auf Güter, die nicht auf einem Markt gehandelt werden („non-market impacts“). Im Folgenden werden die wichtigsten durch den Klimawandel verursachten Schadenskategorien zusammenfassend dargestellt:

Der **Anstieg des Meeresspiegels** führt zu zusätzlichen Kosten für den Küstenschutz oder zum Verlust von Land. Die Kosten von Schutzmaßnahmen sind relativ gut bekannt und werden in fast allen Modellen berücksichtigt. Dagegen sind andere Kosten, die z.B. mit der durch den Anstieg des Meeresspiegels verursachten höheren Wahrscheinlichkeit von Sturmfluten oder durch den Verlust küstennaher Ökosysteme verbunden sind, sehr viel schwieriger zu quantifizieren und werden in den Modellen oft nicht erfasst. Die Bevölkerung kleiner Inseln und tiefliegender Küstengebiete ist einem besonderen sozio-ökonomischen Risiko ausgesetzt, dass z. B. zu verstärkten Migrationsbewegungen führen kann. Die damit verbundenen Kosten sind von verschiedenen sozialen und politischen Faktoren abhängig, sie werden in den heutigen Modellen in der Regel nicht berücksichtigt.

Der globale Temperaturanstieg ist mit einer Änderung des **Energiebedarfs** verbunden. Der durch steigende Temperaturen im Winter zurückgehende Heizwärmebedarf wird teilweise durch einen in Folge erhöhter Sommertemperaturen steigenden Bedarf an Kühlung kompensiert. Die regional unterschiedlichen Effekte werden in den heutigen Modellen weitgehend abgebildet.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die **Nahrungsmittelproduktion und Landwirtschaft** hängen von einer Reihe von Faktoren ab, u. a. der Empfindlichkeit der regionalen landwirtschaftlichen Systeme, der Bevölkerung und ihrer jeweiligen Anpassungsfähigkeit. Die Reaktion landwirtschaftlicher Systeme auf Klimaveränderungen wird bestimmt durch Temperatur, Niederschlag, CO₂-Düngeeffekt und sozio-ökonomische Rahmenbedingungen wie Marktzugang oder die Verfügbarkeit von Ressourcen, die für eine Anpassung notwendig sind. In den mittleren Breiten kann eine moderate Temperaturzunahme die Nahrungsmittelproduktion steigern, während davon auszugehen ist, dass in den Tropen eine weitere Erwär-

mung zu Produktionseinbußen führt. Extreme Wetterereignisse werden wahrscheinlich die Nahrungsmittelproduktion erheblich mindern, entweder direkt oder über die Zunahme von Schädlingen bzw. Krankheiten. Die meisten Studien ziehen aber diese Interaktionen der Nahrungsmittelproduktion mit Dürren, heftigen Niederschlägen oder Schädlingsbefall nicht in Betracht, so dass die zu erwartenden Schäden eher unterschätzt werden (WBGU, 2003a; IPCC 2001b). Auch mögliche Änderungen im Bedarf und den Handelstrukturen und den damit verbundenen sozio-ökonomischen Implikationen werden bisher nur unzureichend erfasst.

Zwar nimmt bei mittlerer globaler Erwärmung die gesamte Niederschlagsmenge zu, aber dies führt nicht direkt zu einer verbesserten **Wasserverfügbarkeit**, da für diese nicht alleine die Regenmenge, sondern die Bodenfeuchte und die Neubildung von Grundwasser entscheidend ist. Nach Klimamodellanalysen erhöht sich bei steigender Temperatur in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts die Anzahl der von Wasserknappheit bedrohten Menschen deutlich, wobei die Wirkungen in ariden und semi-ariden Gebieten erheblich größer sein werden als die globalen Durchschnittsrechnungen vermuten lassen (WBGU 2003a). In Regionen, die heute bereits unter Wasserstress leiden, werden sich die Probleme durch den Klimawandel weiter verschärfen. Ein Temperaturanstieg im Bereich von 1,5 – 2 °C scheint eine systematische Schwelle darzustellen. Wird diese überschritten, kommt es zu einem drastischen Anstieg der von Wasserknappheit betroffenen Menschen, weil dann die Megastädte in asiatischen Entwicklungsländern erheblich in Mitleidenschaft gezogen werden. Eine so starke Zunahme an Menschen unter Wasserstress in einer relativ kurzen Zeitspanne wird voraussichtlich die verfügbaren Anpassungsmechanismen (Meerwasserentsalzung, Langstreckentransport) überfordern.

Die durch den Klimawandel verursachten **Gesundheitsschäden** lassen sich in direkte und indirekte Effekte einteilen. Zu den direkten Auswirkungen zählen z. B. die Folgen von extremen Wetterereignissen (z. B. Herz-Kreislaufkrankungen, Asthma) oder wetterbedingten Katastrophen (z. B. Überschwemmungen, Erdbeben). Letztere führen nicht nur direkt zu Unfällen, sondern schädigen die Infrastruktur der Gesundheitsversorgung und schwächen damit ein wichtiges Element der Anpassungsfähigkeit. Die größten Gesundheitsschäden entstehen jedoch durch indirekte Auswirkungen, wie im Fall der durch Vektoren (z. B. Mücken, Zecken, Fliegen) übertragenen Infektionskrankheiten. Der IPCC geht davon aus, dass bis zum Jahr 2080 260 – 320 Mio. Menschen zusätzlich der Malaria ausgesetzt sein werden. Auch Dengue-Fieber oder die durch Zecken übertragene Hirnhautentzündung sind vektorübertragene Infektionskrankheiten, die vom Klimawandel beeinflusst werden. Es muss damit gerechnet werden, dass Gesundheitseffekte durch Nahrungsmangel, Trinkwasserknappheit, Malariaausbreitung und Flutkatastrophen synergistisch wirken (WHO, 2000). Eine Quantifizierung dieser Wechselwirkungen ist bis heute kaum möglich.

Ökosysteme und ihre biologische Vielfalt können durch Klimaveränderungen irreversible Schäden erleiden, weil der Anpassungsfähigkeit der Arten Grenzen gesetzt sind. Durch Artenverlust kann es zu Ökosystemdegradation kommen. Durch den Verlust biologischer Vielfalt gehen Erholungs-, Kultur- und Eigenwert von Ökosystemen verloren. Die menschliche Gesellschaft hängt direkt und indirekt von den Gütern und Dienstleistungen der Biosphäre und ihrer Ökosysteme ab. Ein globaler Temperaturanstieg führt dazu, dass weltweite Ökosystemflächen sich in ihrer Ausdehnung verändern. Die Verbreitungsgebiete von Arten werden sich verschieben, es kann zu schwerwiegenden Verlusten an Flächen und Arten kommen. Schwere Störungen und Artenverluste an Korallenriffen sind möglich. Die steigende CO₂-Konzentration der Atmosphäre führt auch zu einer zunehmenden Versauerung der Ozeane, mit möglicherweise großen Auswirkungen auf marine Ökosysteme. Die Quantifizierung von Schäden an Ökosystemen und insbesondere die ökonomische Bewertung der Beeinträchtigung von Funktionen des Ökosystems ist bis heute nur in Ansätzen möglich.

Die Häufigkeit **extremer Wetterereignisse** wie Hitzewellen, Dürren und Stürmen wird voraussichtlich steigen. Die Häufigkeit und Stärke solcher Ereignisse ist allerdings nicht alleine von der Änderung der Temperatur, sondern vor allem auch von der Variabilität des Klimas abhängig. Die resultierenden Schäden hängen von lokalen Gegebenheiten und den jeweiligen Anpassungsmechanismen ab. So steigen z. B. die materiellen Schäden eines Wirbelsturms bei steigendem Wohlstand, während die Anzahl der Todesfälle in der betroffenen Bevölkerung zurückgehen dürfte. In den meisten der vorliegenden Studien werden die Auswirkungen extremer Wetterereignisse bei der wirtschaftlichen Bewertung nicht berücksichtigt.

Durch den Klimawandel angestoßene **singuläre nicht lineare Ereignisse** stellen verheerende Risiken für den Menschen dar (WBGU 2003a). Modellrechnungen ergeben, dass Systemumschwünge bei Temperaturänderungen eintreten können, wie sie für die kommenden Jahrhunderte bei weiter wachsenden Treibhausgaskonzentrationen erwartet werden. Das Überschreiten von Schwellenwerten kann zu unvorhersehbaren, auch irreversiblen Veränderungen führen. Beginn, zeitlicher Verlauf und Größenordnung dieser Einzelereignisse zu berechnen ist heute nicht möglich (WBGU 2003a). Selbst wenn einige der möglichen Effekte erst in sehr ferner Zukunft eintreten sollten, könnten die Auswirkungen so plötzlich und verheerend sein, dass der Schaden sehr groß wird und eine Anpassung fast unmöglich ist. Zu den großen Einzelereignissen, die nach (WBGU 2003a) auf jeden Fall verhindert werden müssen, gehören der Zusammenbruch der thermohalinen Zirkulation, die Freisetzung großer Mengen an Methanhydraten, die Veränderung der kontinentalen Monsune, der Zerfall des westantarktischen Eisschildes und das Schmelzen des Grönlandeises.

In einer Auswertung der vorliegenden Literatur zu den Schäden des Klimawandels haben Hitz und Smith (2004) versucht, den Zusammenhang zwischen der steigenden globalen Durchschnittstemperatur und den resultierenden Schadenskosten für die verschiedenen Schadenskategorien zu beschreiben. Bei einem relativ niedrigen Temperaturanstieg kann es in einigen Bereichen zu durchaus positiven Effekten kommen, so dass die Kostenkurve parabelförmig verläuft, in anderen Bereichen weisen die vorliegenden Studien übereinstimmend darauf hin, dass eine steigende Durchschnittstemperatur mit steigenden Schäden verbunden ist. Für einige Effekte und insbesondere für aggregierte Schadenskosten zeigen die vorliegenden Studien allerdings kein konsistentes Bild (Abbildung 2.1). Alle vorliegenden Studien gehen aber davon aus, dass es bei einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um mehr als 3 bis 4 °C zu negativen Effekten in allen Schadenskategorien kommt.

Bei der Ableitung aggregierter Schadenskosten ist nicht nur die Aggregation über verschiedene Schadenskategorien problematisch, sondern insbesondere die Berücksichtigung der Verteilung der Schäden und die Auswirkungen des Klimawandels auf soziale Gerechtigkeit und wirtschaftliche Entwicklung in den verschiedenen Regionen. Es ist davon auszugehen, dass innerhalb des nächsten Jahrhunderts vor allem die armen Länder von den negativen Auswirkungen des Klimawandels besonders stark betroffen sind.

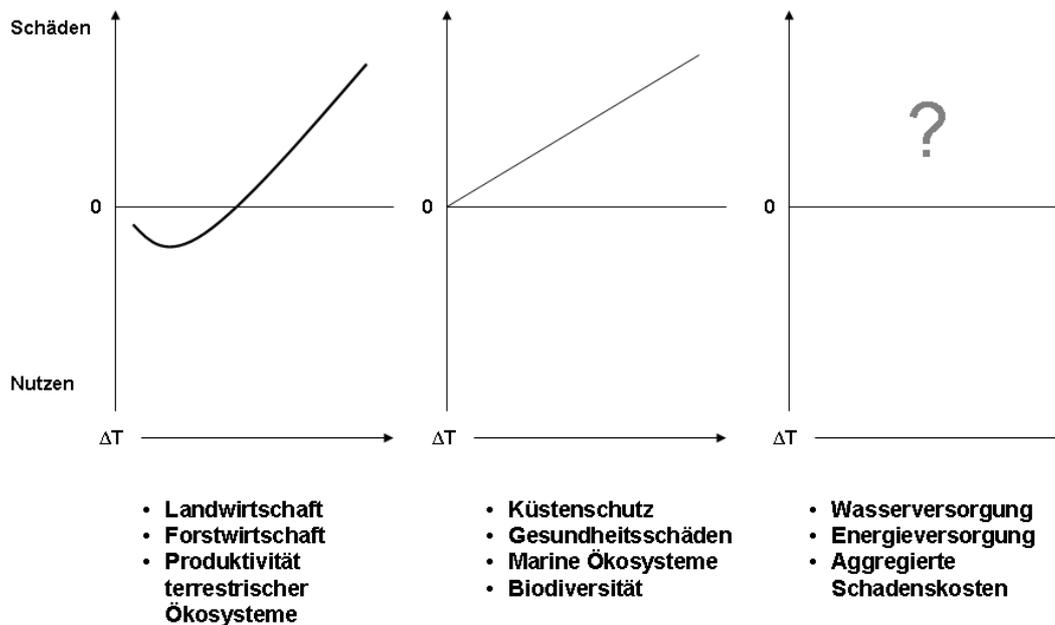


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Schäden und Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur für verschiedene Schadenskategorien (Hitz und Smith, 2004)

2.2.2 Wichtige Einflussgrößen zur Ermittlung der Social Cost of Carbon

Bei der Ableitung der durch den Klimawandel verursachten Kosten gibt es einige Schlüsselparameter mit entscheidendem Einfluss auf die Ergebnisse, die weitgehend von ökonomischen Annahmen und Werturteilen abhängen: Ansätze zur unterschiedlichen Wichtung von Schäden in verschiedenen Regionen („equity weighting“), die Wahl der Diskontrate, und den betrachteten Zeithorizont. Die große Bandbreite der in der Literatur vorliegenden Kostenschätzungen lässt sich zu einem großen Teil auf unterschiedliche Annahmen im Hinblick auf diese Parameter erklären. Im Folgenden wird die Bedeutung dieser Setzungen für die Abschätzung aggregierter Schadenskosten zusammenfassend dargestellt.

Equity Weighting

Vorliegende Modellergebnisse zeigen, dass die heute ärmeren Länder (Afrika, Südamerika, Indien) die größten Nachteile eines zunächst noch moderaten Klimawandels zu tragen haben, während die reicheren Länder in den mittleren und nördlichen Breiten zumindest kurzfristig mit niedrigeren Schäden oder sogar einem Nettonutzen rechnen können. Die Art und Weise, wie Schäden und Nutzen in verschiedenen Regionen mit unterschiedlichem Wohlstand zu einem einzigen Nettowert aggregiert werden, hat einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Schadenskosten. Weitgehend durchgesetzt hat sich inzwischen die Ansicht, dass bei der ökonomischen Bewertung der durch den globalen Klimawandel verursachten Schäden die Unterschiede im Wohlstand zwischen den betroffenen Regionen durch ein so genanntes „Equity Weighting“ berücksichtigt werden. Theoretisch wird das Equity Weighting durch den abnehmenden Grenznutzen bei steigendem Einkommen begründet. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass ein zusätzlicher Euro für eine arme Person einen größeren Wert besitzt als für eine reiche Person.

Der Unterschied zwischen gewichteten und ungewichteten Schadenskosten hängt von verschiedenen Modellannahmen ab. Er wird zunächst vor allem von der unterstellten Elastizität des marginalen Nutzens des Einkommens ab, die in der entsprechenden Literatur zwischen $\eta = 0,5$ bis 4 variiert. Der Unterschied hängt außerdem von der Verteilung der Schäden zwischen den reichen und armen Ländern ab, aber auch von der zeitlichen Verteilung der Schäden,

wodurch wiederum die Wahl der Diskontrate (siehe unten) einen Einfluss auf das Equity Weighting bekommt. Watkiss et al. (2005) zeigen an Hand von Sensitivitätsrechnungen mit dem Integrated Impact Assessment Modell FUND, dass die Schadenskosten des Klimawandels mit Equity Weighting um einen Faktor von bis zu 10 größer sein können als ohne Wichtung.

Wahl der Diskontrate

Da die meisten Schäden des Klimawandels erst in der Zukunft auftreten werden, spielt die Wahl der Diskontrate eine große Rolle bei der Berechnung der Schadenskosten. Durch Diskontierung werden zu verschiedenen Zeitpunkten anfallende Kosten und Nutzen in einen Gegenwartswert umgerechnet und damit vergleichbar gemacht. Die meisten Integrated Assessment Modelle verwenden entweder eine konstante Diskontrate oder eine konstante reine individuelle Zeitpräferenzrate (pure rate of time preference). In neueren Arbeiten wird auch vorgeschlagen, zur Bewertung von über einen sehr langen Zeitraum wirkenden Effekten eine mit der Zeit abnehmende Diskontrate anzuwenden. Die Verwendung einer niedrigen oder abnehmenden Diskontrate führt tendenziell zu höheren Schadenskosten, da den in der Zukunft auftretenden Schäden ein höheres Gewicht zugemessen wird. Wegen des großen Einflusses der Diskontrate werden die Schadenskosten des Klimawandels oft für verschiedene Diskont-raten angegeben.

Während für eine ausführliche Diskussion der Problematik des Diskontierens im Zusammenhang mit der Bewertung des Klimawandels auf die umfangreiche Literatur verwiesen wird, sei hier erwähnt, dass sich die soziale Zeitpräferenzrate, die zur Diskontierung zukünftiger Kosten verwendet wird, aus der Summe der reinen individuellen Zeitpräferenzrate und dem Produkt aus der Wachstumsrate des realen Konsums pro Kopf und der Elastizität des marginalen Nutzens des Konsums ergibt. Verschiedene Studien zur Bewertung des Klimawandels geben Ergebnisse für verschiedene reine individuelle Zeitpräferenzraten an. Wird diese zu Null gesetzt, so werden zukünftige Schadenskosten immer noch der unterstellten Wachstumsrate des Konsums entsprechend abdiskontiert.

Nach Watkiss et al. (2005) zeigen Sensitivitätsrechnungen mit dem Modell FUND, dass die in FUND berücksichtigten Schadenskosten bei einer reinen Zeitpräferenzrate von 0% um einen Faktor 5 höher liegen als bei einer Zeitpräferenzrate von 1%. Bei einer höheren Zeitpräferenzrate und ohne Equity Weighting können die kurzfristigen positiven Effekte ein größeres Gewicht bekommen, so dass der aggregierte Nettowert der Schadenskosten negativ werden kann und somit einen Nutzen des Klimawandels ausweist.

Willingness-to-Pay versus Willingness-to-Accept

Die monetäre Bewertung von Schäden durch den Klimawandel an nicht auf Märkten gehandelten Gütern basiert überwiegend auf dem Willingness-to-Pay (WTP)¹ Ansatz, obwohl prinzipiell auch der Willingness-to-Accept (WTA)² Ansatz herangezogen werden könnte. Horowitz und McConnell (2002) haben gezeigt, dass für verschiedene Schadenskategorien der WTA-Ansatz zu Bewertungen führt, die um bis zu einem Faktor 20 über denen des korrespondierenden WTP-Ansatzes liegen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Schadenskosten des Klimawandels tendenziell steigen, wenn Willingness-to-Accept Ansätze zur Bewertung von Schäden an nicht marktfähigen Gütern herangezogen würden. Der Willingness-to-Accept Ansatz deckt sich eher mit der Vorstellung einer Zuteilung von Besitz-

¹ Willingness-to-pay: Wieviel ist ein Individuum bereit, für eine Verbesserung der Umweltqualität zu zahlen?

² Willingness-to-accept: Wie viel Geld muss an ein Individuum gezahlt werden, damit es eine Verschlechterung der Umweltqualität akzeptiert?

rechten, mit denen Individuen das Recht haben, nicht an Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels leiden zu müssen.

Berücksichtigter Zeithorizont

Die Schadenskosten des Klimawandels hängen von dem jeweils betrachteten Zeithorizont ab. In den vorliegenden Studien zur Bewertung des Klimawandels wird oft der Zeitraum bis zum Jahr 2100 betrachtet. Trotz zunehmender Unsicherheiten kann davon ausgegangen werden, dass bei der Betrachtung eines längeren Zeitraums die zu erwartenden Schadenskosten tendenziell deutlich zunehmen, vor allem wenn eine niedrige Diskontrate und Equity Weighting angenommen werden.

2.2.3 Schadenskosten des Klimawandels in der Literatur

Es gibt eine umfangreiche Literatur zu den Kosten des Klimawandels, die wiederum in verschiedenen Meta-Studien ausgewertet wurde. Wegen unterschiedlicher Annahmen der Autoren im Hinblick auf den betrachteten Zeithorizont, die Art der berücksichtigten Schäden, die Wahl der Diskontrate und die Art des Equity Weighting ist es nicht überraschend, dass die Ergebnisse der Studien zum Teil drastisch voneinander abweichen und eine sehr große Bandbreite möglicher Schadenskosten aufzeigen. Dabei kann beobachtet werden, dass die in den „Mainstream“ Studien, die auf etablierte Integrated Impact Assessment Modell zurückgreifen, die ausgewiesenen Schadenskosten im Laufe der letzten zehn Jahre tendenziell kleiner wurden. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass in den zu Grunde liegenden Modellen zunehmend auch die positiven Auswirkungen des Klimawandels und die Möglichkeiten zur Anpassung berücksichtigt wurden. Von den Autoren der Studien wird aber auch immer betont, dass die Auswirkungen des Klimawandels nur unvollständig quantifiziert und bewertet werden können.

In einer Auswertung der damals vorliegenden Studien für den zweiten Sachstandsbericht des IPCC haben Pearce et al. (1996) die Bandbreite der Schadenskosten auf 5 bis 125 \$₁₉₉₀ je Tonne Kohlenstoff (1,5 - 40 €₂₀₀₀/t_{CO2}) für Emissionen im Zeitraum 1991-2000 geschätzt. Für Emissionen im Zeitraum 2001-2010 wurde von einem Anstieg der Schadenskosten auf 2 bis 50 €₂₀₀₀/t_{CO2} ausgegangen.

In den 1995er Veröffentlichungen der ExternE-Studie (European Commission, 1995a) wurde zunächst der aus den CO₂-Emissionen der verschiedenen Stromerzeugungstechnologien resultierende Temperaturanstieg als physische Größe quantifiziert. Wegen der großen Unsicherheiten und des partiellen Charakters der vorliegenden Analysen wurden ausdrücklich keine Empfehlung zur Verwendung von Schadenskosten des Treibhauseffekts abgegeben. In den folgenden Jahren wurden innerhalb von ExternE eigene Arbeiten zur Bewertung des Klimawandels durchgeführt. Auf der Grundlage der Modelle Open Framework und FUND wurden in (European Commission, 1999b) marginale Schadenskosten zwischen 21 €₂₀₀₀/t_{CO2} (3% Diskontrate) und 51 €₂₀₀₀/t_{CO2} (1% Diskontrate) ausgewiesen. In den Arbeiten zu ExternE Transport wurden die früheren Abschätzungen überarbeitet und aktualisiert. Auf der Basis einer neuen Version von FUND (2.0), die unter anderem bei der Bewertung von Todesfällen den neuen Ansatz des Value of Life Year Lost berücksichtigte, wurde für Schadenskosten für Emissionen in der Periode 2000-2009 eine Bandbreite von 0,1 bis 16,4 €/t_{CO2} empfohlen, mit einem „central estimate“ von 2,4 €/t_{CO2}. Den Abschätzungen lag eine reine Zeitpräferenzrate von 1% zu Grunde, der betrachtete Zeithorizont reichte weiterhin bis zum Jahr 2100 (Tol u. Downing, 2000).

Im Rahmen der ExternE-Folgeprojekte NewExt und ExternE-Pol wurden die Arbeiten zu den Schadenskosten des Klimawandels nicht weiter fortgeführt. In NewExt wurden stattdessen ergänzend zu den vorliegenden Abschätzungen der Schadenskosten die mit dem Kioto-Ziel verbundenen Kosten zur CO₂-Reduktion bestimmt (siehe Kapitel 2.2.4).

Der englische Government Economic Service hat 2002 eine Auswertung der bis dahin vorliegenden wesentlichen Studien zu den Kosten des Klimawandels veröffentlicht und Empfehlungen für die Verwendung marginaler Schadenskosten zur Bewertung politischer Entscheidungen abgegeben (Clarkson u. Deyes, 2002). Der empfohlene „illustrativer“ Schätzwert für die marginalen Schadenskosten liegt bei 70 £/tC (27 €/tCO₂), die mögliche Bandbreite wird mit 35 bis 140 £/tC (14 bis 55 €/tCO₂) angegeben. Da davon auszugehen ist, dass die Kosten des Klimawandels mit der Zeit steigen, wird außerdem empfohlen, die Schadenskosten um ca. 0,4 €/tCO₂ pro Jahr anzuheben. Um neue Erkenntnisse angemessen berücksichtigen zu können, wird eine regelmäßige Überprüfung der getroffenen Annahmen und die Auswertung der einschlägigen Literatur angeregt. Obwohl verschiedene Länder Steuern und andere Instrumente zur Minderung von CO₂-Emissionen einsetzen, ist England mit diesen Empfehlungen des UK Government Economic Service das bisher einzige europäische Land, das den Versuch unternimmt, einen auf wissenschaftlicher Grundlage abgestimmten Wert für die Schadenskosten des Klimawandels zu bestimmen und eine Empfehlung für eine konsistente Bewertung von CO₂-Emissionen in verschiedenen Politikbereichen abzugeben.

Als Teil des vom UK Government Economic Service eingeleiteten Review-Prozesses wurden von Tol (2005) 28 Studien zu den Kosten des Klimawandels ausgewertet und die darin enthaltenen 103 Schätzwerte der Schadenskosten statistisch ausgewertet. Werden alle Studien berücksichtigt, liegt der Median der Schadenskosten bei 5 €/tCO₂, der Mittelwert bei 31 €/tCO₂. Die große Bandbreite der angegebenen Werte wird vor allem durch einige Studien mit sehr hohen Schätzwerten wie zum Beispiel die Studie von Hohmeyer und Gärtner (1992) mit über 1600 \$/tC verursacht. Solche hohen Werte finden sich vor allem in der „grauen“ Literatur. Werden nur Veröffentlichungen in begutachteten wissenschaftlichen Zeitschriften berücksichtigt, so liegt der Mittelwert der angegebenen Schadenskosten bei nur noch 17 €/tCO₂. Tol (2005) weist aber ausdrücklich darauf hin, dass die heutigen Studien die tatsächlichen Kosten des Klimawandels unterschätzen, da extreme Wetterereignisse, singuläre Ereignisse mit möglicherweise großen Konsequenzen, das Zusammenwirken verschiedener Belastungen und auch die Kosten der Anpassung nicht ausreichend berücksichtigt werden können.

Im Auftrag des UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) wurden die Unsicherheiten vorliegender Abschätzungen der Kosten des Klimawandels weiter untersucht, und auf der Basis einer Weiterentwicklung des Modells FUND neue Abschätzungen vorgelegt (Downing et al., 2005), die in Tabelle 2.1 dargestellt sind. Es wird deutlich, dass je nach Wahl der Diskontrate und der Berücksichtigung des Equity Weighting eine Bandbreite der Schadenkosten zwischen ca. 0 bis 300 €/tCO₂ aufgespannt wird. Wegen der bestehenden Unsicherheiten und eines fehlenden Konsens unter den vom Defra beauftragten Wissenschaftlern wird in Downing et al. (2005) letztendlich ausdrücklich keine Empfehlung für einen besten Schätzwert oder eine obere Grenze der Schadenskosten abgegeben. Es wird allerdings festgestellt, dass die Schadenskosten mit großer Wahrscheinlichkeit über einem unteren Grenzwert von 35 £/tC, dies entspricht 14 €/tCO₂, liegen. Es ist davon auszugehen, dass die Schadenskosten mit der Zeit ansteigen. Von den Ergebnissen von Downing et al. (2005) ausgehend empfehlen Watkiss et al. (2005), die Schadenskosten um 1 £/tC (0,4 €/tCO₂) pro Jahr ansteigen zu lassen. In ihren Schlussfolgerungen weisen Downing et al. (2005) darauf hin, dass die heute zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Methoden nicht ausreichen, um die Kosten des Klimawandels vollständig zu erfassen. Downing et al. gehen davon aus, dass trotz der kontinuierlichen Forschungsanstrengungen ein umfassendes Verständnis der Folgen des Klimawandels in den nächsten zehn Jahren nicht zu erwarten ist.

Tabelle 2.1: Marginale Schadenskosten des Klimawandels in €/t_{CO2}. Zusammenfassung der FUND-Ergebnisse nach Downing et al. (2005) für einen „Referenzfall“ mit den von den Autoren als „best guess“ bezeichneten Satz an Eingabeparametern.

Reine ind. Zeitpräferenzrate	Referenzfall	
	Mit Equity Weighting	ohne Equity Weighting
0%	284	22
1%	68	4
3%	-0,4	-1

Um die Aussagekraft vorliegender Studien besser einordnen zu können, haben Downing u. Watkiss (2003) die möglichen Auswirkungen der Klimawandels in einer Risiko-Matrix dargestellt (Tabelle 2.2), wobei sich die zwei Achsen auf die steigenden Unsicherheiten bei der Quantifizierung zukünftiger Auswirkungen der Klimawandels und bei der ökonomischen Bewertung beziehen. Mehr als 95% der heute vorliegenden Studien zu den Kosten des Klimawandels beschäftigen sich mit Effekten, die in der Risiko-Matrix in die beiden linken Felder der ersten Zeile einzuordnen sind, wobei auch in diesen Studien der Schwerpunkt auf den Kosten durch Schäden an marktfähigen Gütern liegt. Die so genannten „socially contingent“ Effekte (durch Umweltbelastungen hervorgerufene schwere soziale, politische und wirtschaftliche Krisen) werden bei der Abschätzung der Kosten des Klimawandels bisher nicht adäquat erfasst. Genauso wenig gibt es bisher ausreichend zuverlässige Abschätzungen über die möglichen Kosten von Systemänderungen durch singuläre Ereignisse, obwohl hier inzwischen verschiedene Autoren erste Versuche einer Abschätzung vorgenommen haben (siehe z. B. Übersicht in Pittini u. Rahman, 2004). Insgesamt macht die Darstellung der Risiko-Matrix anschaulich deutlich, dass bis heute nur ein Teil der möglichen Auswirkungen des Klimawandels in den vorliegenden Abschätzungen der Kosten erfasst wurde. Ereignisse mit möglicherweise sehr großen Schadenskosten, aber kleiner Wahrscheinlichkeit bleiben weitgehend unberücksichtigt.

Tabelle 2.2: Auswirkungen des Klimawandels in einer Risiko-Matrix nach Downing u. Watkiss (2003)

Uncertainty in Valuation →			
	Market	Non Market	Socially Contingent
← Uncertainty in Predicting Climate Change	Projection	Coastal protection Loss of dryland Energy (heating/cooling)	Heat stress Loss of wetland Regional costs Investment
	Bounded Risk	Agriculture Water Variability (drought, flood, storms)	Ecosystem change Biodiversity Loss of life Secondary social effects Comparative advantage and market structures
	System change and surprise	Above, plus Significant loss of land and resources Non-marginal effects	Higher order social effects Regional collapse Irreversible losses

2.2.4 CO₂-Vermeidungskosten

Im Sinne der neoklassischen Wohlfahrtstheorie werden marginale Schadenskosten dazu verwendet, um ein pareto-optimales Emissionsniveau zu bestimmen. Es liegt auf der Hand, dass nach dem derzeitigen Stand des Wissens ökonomische Analysen bei dem Versuch, „optimale“ CO₂-Emissionen zu bestimmen, scheitern. Wegen der großen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Schadenskosten wird oft auch vorgeschlagen, die Kosten der CO₂-Minderung als Indikator der gesellschaftlichen Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung zukünftiger Schäden bei der Berechnung externer Kosten heranzuziehen. Die Ableitung von Vermeidungskosten bezieht sich immer auf ein vorher festgelegtes Minderungsziel, das ohne genaue Kenntnis der Schadenskosten festgelegt wurde. Marginale Vermeidungskosten hängen entscheidend von dem jeweiligen Minderungsziel ab. Ist ein gesellschaftlich legitimes Minderungsziel vorgegeben, so sind in der Tat oft die Vermeidungskosten die geeignete Größe zur Bewertung von Strategien zur CO₂-Vermeidung.

In der europäischen NewExt-Studie wurden als Ergänzung zu den in ExternE bestimmten Schadenskosten die Kosten der CO₂-Minderung in Europa ermittelt (NewExt 2004). Als zu Grunde liegendes Minderungsziel wurde das Kioto Ziel betrachtet, nach dem in den EU-15 Ländern die Treibhausgasemissionen bis 2008/2012 um 8% gegenüber dem Jahr 1990 reduziert werden müssen. Die in NewExt ermittelte Bandbreite der Vermeidungskosten liegt zwischen 5 und 20 €/t_{CO2}. Wird die notwendige Emissionsminderung alleine durch Maßnahmen in den EU-Staaten erreicht, so liegen die Vermeidungskosten eher im oberen Bereich der angegebenen Bandbreite. Wird dagegen ein Emissionshandel mit Ländern außerhalb der EU zugelassen, liegen die Vermeidungskosten eher im unteren Bereich. In den in NewExt durchgeführten Fallstudien wird mit einem Wert von 19 €/t_{CO2} gearbeitet. Dieser Wert liegt deutlich über dem „Central Estimate“ der in ExternE ermittelten Schadenskosten von 2,4 €/t_{CO2}, aber nur unwesentlich über der von Downing et al. (2005) als Untergrenze der möglichen Schadenskosten empfohlenen 14 €/t_{CO2}.

Es wird weitgehend übereinstimmend anerkannt, dass die im Kioto-Protokoll festgelegten Minderungsziele als Einstieg in einen längerfristigen Prozess anzusehen sind und bei weitem nicht ausreichen, um eine Stabilisierung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf einem akzeptablen Niveau zu erreichen. Es liegt also auf der Hand, dass mittelfristig eine Minderung der CO₂-Emissionen notwendig ist, die weit über die im Kioto-Protokoll festgelegten Ziele hinausgeht, um schwere Schäden durch den Klimawandel zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund sind die in NewExt abgeleiteten Vermeidungskosten, die sich nur auf ein kurzfristiges Zwischenziel der CO₂-Minderung beziehen, zur Bewertung langfristiger energie- und umweltpolitischer Strategien als wenig aussagekräftig anzusehen.

Angesichts der großen Unsicherheiten über das Klimasystem empfiehlt der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung (WBGU), im Sinne einer langfristigen Absicherungsstrategie von einem CO₂-Konzentrationsziel unterhalb von 450 ppm auszugehen (WBGU 2003a). Dies wird nur möglich sein, wenn bis 2050 eine Minderung der globalen energiebedingten CO₂-Emissionen um etwa 45-60% gegenüber 1990 erreicht wird. Die Industrieländer müssen ihren Ausstoß von Treibhausgasen bis 2020 um mindestens 20% verringern.

Im Auftrag des WBGU haben Nakicenovic und Riahi (2003) verschiedene Szenarien entwickelt, in denen die vom WBGU empfohlenen Minderungsziele erreicht werden. Die untersuchten Szenarien basieren auf den im IPCC Special Report on Emission Scenarios (IPCC 2000) und (WBGU 2003b) beschriebenen Szenarien. Das A1T*-450 Szenario knüpft an die Entwicklung des exemplarischen Pfades im WBGU-Gutachten „Energiewende zur Nachhaltigkeit“ (WBGU 2003b) an, hier wird eine CO₂-Stabilisierungskonzentration von 450 ppm erreicht. Für die CO₂-stabilisierenden Szenarien im Rahmen der B1- und B2-Familie wurde

eine niedrigere Stabilisierungskonzentration von 400 ppm ausgewählt, um die in Kauf zu nehmenden Unsicherheiten bezüglich der Klimaentwicklung zu verringern. Während die B2-Familie eine Business-as-usual Welt markiert, entspricht die B1-Familie eher einer globalen Nachhaltigkeitswelt. In dem Szenario B2-400 übernimmt die Kernenergie eine dominante Rolle, während sie in A1T*-450 und B1*-400 mittelfristig aus Gründen der Nachhaltigkeit ausläuft. In den Szenarien A1T*-450 und B1*-400 übernimmt die Solarenergie langfristig den größten Teil der Energieversorgung der Strom-Wasserstoff-Wirtschaft, während sie in B2-400 auch langfristig nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Kohlenutzung läuft in A1T*-450 und B1*-400 in der Mitte des Jahrhunderts praktisch aus und vermindert sich in B2-400 zumindest weitgehend. Für eine ausführlichere Beschreibung der verschiedenen Szenarien siehe (WBGU 2003a).

Um den Ansatz der Verringerung und Konvergenz der Pro-Kopf Emissionsrechte ohne untragbare wirtschaftliche Folgen zu realisieren, ist der weltweite Handel mit zugeteilten Emissionsrechten unverzichtbar. Nakicenovic und Riahi (2003) haben in Modellrechnungen die Entwicklung globaler Zertifikatspreise, die sich mit den marginalen Vermeidungskosten gleichsetzen lassen, für die verschiedenen Stabilisierungsszenarien ermittelt (Abbildung 2.2). Bis 2040 entwickelt sich der Zertifikatspreis in allen Szenarien relativ ähnlich. Durch den Ausstieg aus nicht nachhaltigen Technologien bis zur Mitte des Jahrhunderts entstehen in den A1T*-450 und B1*-400 Szenarien dann aber zwischen 2040 und 2060 Spitzen in den Grenzkosten der CO₂-Vermeidung, da emissionsfreie, den WBGU-Leitplanken entsprechende Technologien zu dem Zeitpunkt noch nicht in ausreichendem Umfang zu günstigen Preisen bereitstehen. Wegen der größeren Dynamik in der Entwicklung neuer Technologien gehen dann aber nach 2060 die Vermeidungskosten in den Szenarien A1T*-450 und B1*-400 zurück und die Preise für Emissionsrechte entspannen sich, während sie im Szenario B2-400 weiter ansteigen. Der Preisanstieg im Szenario B1*-400 nach 2090 wird nach (WBGU 2003) durch den in diesem Szenario geforderten Ausstieg aus der Sequestrierung bis 2100 verursacht. Da der Zeitpunkt der Konvergenz der Pro-Kopf Emissionen (2050 bzw. 2100) nach Nakicenovic und Riahi (2003) nur einen untergeordneten Einfluss auf die Vermeidungskosten hat, sind in Abbildung 2.2 nur die Vermeidungskosten für das Konvergenzjahr 2050 dargestellt.

Die Analysen des WBGU machen deutlich, dass Strategien, die auf eine langfristige Stabilisierung der CO₂-Konzentration unter 450 ppm zielen, zu CO₂-Vermeidungskosten weit über den in NewExt genannten 19 €/tCO₂ führen. Die globalen marginalen Vermeidungskosten steigen bis 2030 auf über 50 €/tCO₂ und liegen je nach eingeschlagener Stabilisierungsstrategie 2050 zwischen 100 und 200 €/tCO₂. In den Szenarien A1T*-450 und B1*-400, die frühzeitig auf eine intensive Nutzung der Sonnenenergie setzen, gehen die Vermeidungskosten danach wieder deutlich zurück, während sie im Szenario B2-400 bis zum Ende des Jahrhunderts weiter ansteigen.

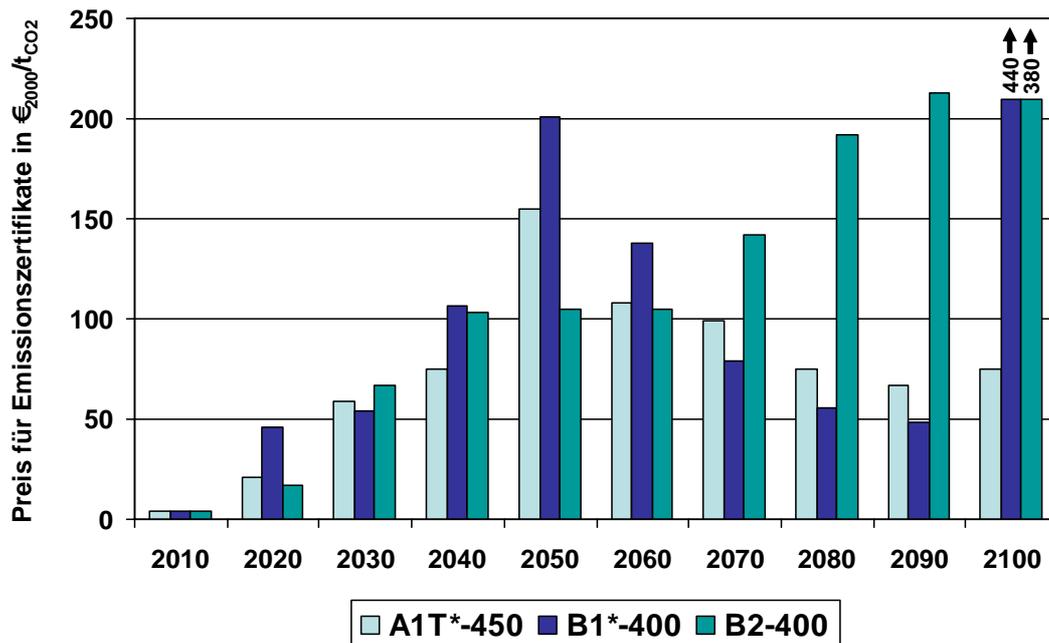


Abbildung 2.2: Entwicklung des Preises für globale Emissionszertifikate für verschiedene Stabilisierungsszenarien (Konvergenzjahr 2050), nach (WBGU 2003a)

2.2.5 Ableitung eines Schattenpreises für CO₂-Emissionen

Die vorhergehenden Kapitel haben gezeigt, dass die Bestimmung der durch den Klimawandel verursachten Schadenskosten mit beträchtlichen Unsicherheiten verbunden ist, dass sich die Schadenskosten über der Zeit ändern, und dass die Schadenskosten zukünftiger CO₂-Emissionen von dem eingeschlagenen Entwicklungspfad abhängen, es also einen rekursiven Zusammenhang zwischen heutigen Minderungsmaßnahmen und zukünftigen Schadenskosten gibt. Eine Auswertung der aktuellen Literatur zeigt, dass die Bandbreite möglicher Schadenskosten mehrere Größenordnungen aufspannt, da in die ökonomische Bewertung Unsicherheiten im Hinblick auf die Entwicklung des Klimas und der Wirkungen des Klimawandels sowie verschiedene Werturteile einfließen. Es liegt außerdem auf der Hand, dass die heutigen Integrated Assessment Modelle nur einen Teil der zu erwartenden Effekte abbilden und damit nur einen Teil der tatsächlichen Kosten des Klimawandels ausweisen können. *Trotzdem benötigt die Politik einen Richtwert zur Bewertung energie- und umweltpolitischer Maßnahmen.*

In einer Situation, die durch unvollständiges Wissen und große Unsicherheiten bei der Beschreibung und Bewertung der Folgen des Klimawandels charakterisiert ist, muss die Politik Handlungsempfehlungen abgeben, die sich nicht alleine auf die Abwägung der Kosten und Nutzen stützen können. Nach dem Vorsorgeprinzips ist es notwendig, im Sinne der vom WBGU (2003a) beschriebenen Strategie zulässige Emissionspfade zu ermitteln, die uns nach dem heutigen Stand des Wissens als Leitplanken vor nicht akzeptablen Folgen des Klimawandels schützen. Werden daraus gesellschaftlich legitimierte Minderungsziele abgeleitet und z. B. als Grenzwerte in einem System mit handelbaren Zertifikaten umgesetzt, so werden dadurch vormals externe Kosten internalisiert und in das betriebswirtschaftliche Kostenkalkül der Akteure einbezogen. Die marginalen Vermeidungskosten sind dann die entscheidende Größe zur Bewertung von Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen.

Der WBGU (2003a) hat für verschiedene Szenarien, die zu einer Stabilisierung der CO₂-Konzentration unter 450 ppm führen, die globalen Zertifikatspreise für CO₂-Emissionsrechte,

die den marginalen Vermeidungskosten entsprechen, quantifiziert. Die Vermeidungskosten können als Schattenpreise zur Bewertung von CO₂-Emissionen herangezogen werden. Für die Bewertung von Maßnahmen in Europa und Deutschland sind allerdings die in (WBGU 2003) ermittelten globalen Zertifikatspreise nur bedingt geeignet, da die spezifischen Randbedingungen und Anforderungen auf nationaler und europäischer Ebene zu abweichenden marginalen Vermeidungskosten führen können. Es wäre also wünschenswert, der WBGU-Strategie entsprechend langfristige Minderungsziele auf nationaler und europäischer Ebene festzulegen und für verschiedene Entwicklungspfade die sich jeweils einstellenden marginalen Vermeidungskosten zu ermitteln. Die in der EU-Studie NewExt auf der Basis der Kioto-Ziele für Europa abgeleiteten Minderungskosten sind für eine Bewertung von CO₂-Emissionen nicht geeignet, da sie sich nur auf ein kurzfristiges Zwischenziel beziehen.

Trotz der bestehenden Unsicherheiten können die vorliegenden Schätzwerte zu den Schadenskosten des Klimawandels Anhaltspunkte für eine Bewertung von CO₂-Emissionen geben. Es wird hier vorgeschlagen, aus den Ergebnissen der vorliegenden Studien eine Bandbreite möglicher Schadenskosten abzuleiten und diese – unter Hinweis auf die bestehenden Unsicherheiten – zur Bewertung langfristiger Strategien im Energiebereich heranzuziehen:

- **„Unterer Schätzwert“:** Wie in Kapitel 2.2.3 dargestellt, gibt es nach einer der neuesten vorliegenden Studien (Downing et al. 2005) einen Konsens darüber, dass die Kosten des Klimawandels mit sehr großer Wahrscheinlichkeit über einem Wert von 14 €/t_{CO2} liegen. Dieser Wert kann also mit hinreichender Sicherheit als Untergrenze der möglichen Schadenskosten angesehen werden.
- **„Zentraler Schätzwert“:** Da die tatsächlichen Schadenskosten mit großer Wahrscheinlichkeit deutlich höher liegen, wird hier vorgeschlagen, den in (Downing et al. 2005) mit FUND berechneten Wert von 68 €/t_{CO2} als mittleren Leitwert heranzuziehen. Diesem Wert liegt ein von den Autoren der Studie als „best guess“ bezeichneter Parametersatz zu Grunde, die reine individuelle Zeitpräferenzrate beträgt 1% und es wird ein Equity Weighting berücksichtigt.
- **„Hoher Schätzwert“:** Da nach der in Tabelle 2.2 dargestellten Risiko-Matrix davon auszugehen ist, dass ein Teil der möglichen Folgen des Klimawandels mit unter Umständen hohen Schadenskosten durch das Modell nicht erfasst wird, wird vorgeschlagen, als zusätzlichen Wert der möglichen Schadenskosten auch noch den in (Downing et al. 2005) mit den gleichen Modellparametern berechneten Wert in Höhe von 284 €/t_{CO2} für die reine individuelle Zeitpräferenzrate von 0% heranzuziehen. Wegen der bisher nicht ausreichend verstandenen Effekte kann dieser Wert kaum als oberer Schätzwert bezeichnet werden, er gibt aber einen Hinweis auf die nach heutigem Wissen durchaus möglichen hohen Schadenskosten.

Werden die genannten Werte gerundet, so ergibt sich die in Tabelle 2.3 dargestellte Bandbreite der Schadenskosten des Klimawandels von 15 bis 280 €/t_{CO2} mit einem zentralen Schätzwert von 70 €/t_{CO2}, die hier zur Berechnung externer Kosten empfohlen wird.

Tabelle 2.3: Empfohlene Schätzwerte für die Schadenskosten des Klimawandels

unterer Schätzwert	zentraler Schätzwert	hoher Schätzwert
15 €/t _{CO2}	70 €/t _{CO2}	280 €/t _{CO2}

2.3 Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe

2.3.1 Quantifizierung von Gesundheitsschäden

In den ersten Studien von Hohmeyer (1988) und anderen wurde die innerhalb eines Gebietes bestehende Schadstoffbelastung anteilmäßig verschiedenen Schadstoffquellen, also auch Kraftwerken, linear zugeordnet. Die resultierenden Gesundheitsschäden wurden mit Hilfe von Toxizitätsfaktoren abgeschätzt, die bei Hohmeyer aus den Werten maximaler Arbeitsplatzkonzentration (MAK Werten) abgeleitet wurden.

Mit dem in ExternE verfolgten Wirkungspfadansatz wird mit Hilfe atmosphärischer Ausbreitungsmodelle die Verteilung und – soweit relevant – die chemische Umwandlung von Schadstoffen in der Luft modelliert, um damit die durch eine Einheit Stromerzeugung verursachte raumbezogene zusätzliche Schadstoffbelastung zu ermitteln. Die aus der Schadstoffbelastung resultierende negative Wirkung auf die menschliche Gesundheit wird mit Hilfe von Dosis-Wirkungsbeziehungen ermittelt, die einen Zusammenhang zwischen der Änderung der Schadstoffbelastung und der Häufigkeit verschiedener Gesundheitseffekte beschreiben. Die Dosis-Wirkungsbeziehungen werden aus epidemiologischen Untersuchungen abgeleitet, in denen ein statistischer Zusammenhang zwischen der Schadstoffbelastung und verschiedenen Effekten hergestellt wird. Die Verwendung eines in einer epidemiologischen Studie beobachteten Zusammenhangs zwischen Belastung und Wirkung setzt voraus, dass der statistische Zusammenhang auch als kausal anerkannt wird. Wegen verschiedener möglicher Störgrößen (z. B. Klimaeinflüsse, Zusammenwirken verschiedener Schadstoffe, Rauchgewohnheiten der exponierten Bevölkerung, etc.), die die Ergebnisse epidemiologischer Studien beeinflussen können, ist die Annahme der Kausalität nicht immer unproblematisch.

Ein wichtiger Aspekt bei der Quantifizierung von Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe, der auch bei der methodischen Entwicklung in ExternE eine große Rolle gespielt hat, ist die Unterscheidung zwischen „akuten“ und „chronischen“ Effekten. So genannte akute Effekte werden bei einer sich kurzfristig ändernden Schadstoffbelastung beobachtet, wie sie zum Beispiel während einer Winter-Smog Episode auftritt. Im Gegensatz dazu kann aber auch eine über einen langen Zeitraum konstant leicht erhöhte Schadstoffbelastung zu negativen Effekten führen, die als chronische Effekte bezeichnet werden. Diese chronischen Effekte sind sehr viel schwieriger in epidemiologischen Studien nachzuweisen, da verschiedene Bevölkerungsgruppen, die einer jeweils unterschiedlichen Schadstoffbelastung ausgesetzt sind, über einen Zeitraum von mehreren Jahren beobachtet werden muss.

Ausgehend von der in ExternE 1995 erarbeiteten Methodik werde in den folgenden Abschnitten die wichtigsten methodischen Entwicklungen für die einzelnen Schadenskategorien zusammengefasst und die jeweiligen Auswirkungen auf die Höhe der quantifizierbaren externen Kosten dargestellt.

ExternE 1995

- *Epidemiologische Grundlagen:* Die in ExternE 1995 verwendeten Dosis-Wirkungsbeziehungen wurden im Rahmen einer umfassenden Literaturlauswertung aus den damals vorliegenden epidemiologischen Studien abgeleitet. Die meisten der zu Grunde liegenden Studien wurden in Nordamerika durchgeführt, sie wurden durch einige wenige europäische Studien ergänzt.
- *Betrachtete Gesundheitseffekte:* Es wurde eine große Bandbreite nicht-tödlicher akuter und chronischer Effekte (Morbidity) betrachtet, die von einer Zunahme von Tagen mit Atemwegssymptomen bis hin zu Effekten wie Fälle von chronischer Bronchitis oder von Krankenhauseinlieferungen wegen Atemwegssymptomen reichen, die durch Dosis-Wirkungsbeziehungen beschrieben werden konnten. Unter den beteiligten Fach-

experten gab es eine intensive Diskussion um die adäquate Berücksichtigung des erhöhten Sterblichkeitsrisikos durch eine zusätzliche Feinstaubbelastung. In verschiedenen epidemiologischen Studien wurde übereinstimmend beobachtet, dass eine kurzzeitig erhöhte Schadstoffbelastung zu einem um einige Tage bis Wochen vorzeitigen Tod (akute Mortalität) führen kann - in der Literatur wird oft etwas zynisch vom „harvesting effect“ gesprochen. Erste Studien wiesen aber darauf hin, dass auch eine über einen langen Zeitraum leicht erhöhte Feinstaubbelastung zu einer erhöhten Sterblichkeit führen könnte (chronische Mortalität). In ExternE 1995 wurden zwar Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Quantifizierung dieser Effekte abgeleitet und die entsprechenden Effekte wurden ausgewiesen, wegen der noch großen mit der zu Grunde liegenden epidemiologischen Studie (Pope et al., 1995) verbundenen Unsicherheiten wurde die chronische Mortalität bei der Berechnung externer Kosten allerdings nicht berücksichtigt.

- *Relevante Schadstoffe:* Die Auswertung der damals zur Verfügung stehenden epidemiologischen Studien führte in ExternE 1995 zu dem Schluss, dass Feinstaub (PM₁₀, also Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 µm) und Ozon als die in einem Modell zur Quantifizierung von Gesundheitseffekten relevanten Schadstoffe anzusehen sind. Obwohl in verschiedenen epidemiologischen Studien auch ein Zusammenhang zwischen der NO_x- und SO₂-Konzentration und Gesundheitseffekten beobachtet wurde, wurde SO₂ und NO_x nicht als kausal wirkender Schadstoff, sondern in den entsprechenden Studien eher als Indikator für ein bestimmtes Schadstoffgemische angesehen. Allerdings wurde explizit darauf hingewiesen, dass diese Annahmen nach der Veröffentlichung von damals laufenden europäischen Studien zu überprüfen seien.

Während SO₂ und NO_x nicht als direkt wirkende Schadstoffe angesehen wurden, wurden aber die sich aus den gasförmigen SO₂- und NO_x-Emissionen durch Reaktion mit Ammoniak in der Luft sich bildenden Sulfat- und Nitrataerosole als sekundäre Partikel im Hinblick auf ihre Wirkung genauso wie direkt emittierter Feinstaub behandelt.

ExternE 1999

- *Epidemiologische Grundlagen:* Ergänzend zu der in ExternE 1995 ausgewertete Literatur konnte jetzt vor allem auf Ergebnisse von im Rahmen des „Air Pollution and Health: a European Approach“ in verschiedenen europäischen Regionen durchgeführten epidemiologischen Studien zurückgegriffen werden. Ein direkter Vergleich von europäischen und amerikanischen Studien zur akuten Mortalität zeigte, dass offensichtlich die relative Änderung der Sterblichkeit je Einheit zusätzlicher Schadstoffbelastung in Europa niedriger war als in Amerika. Eine befriedigende Erklärung für dieses Phänomen konnte nicht gegeben werden, zur Quantifizierung der akuten Sterblichkeit wurden jetzt die europäischen Daten verwendet.
- *Betrachtete Gesundheitseffekte:* Eine Re-Analyse der bereits 1995 vorliegenden Daten zur chronischen Mortalität führte jetzt zu der Einschätzung, dass von einer hinreichend großen Evidenz für einen kausalen Zusammenhang zwischen der langfristigen Feinstaubbelastung und einer erhöhten Sterblichkeitsrate ausgegangen werden kann und dieser Effekt dementsprechend bei der Berechnung externer Kosten zu berücksichtigen ist. Da die chronische Mortalität zu einer deutlich größeren Verringerung der Lebenserwartung als die akute Mortalität führt, wurde zur besseren Charakterisierung des Effekts ein neuer Indikator eingeführt. Während in ExternE 1995 die durch Luftschadstoffe verursachte „Anzahl der Todesfälle“ ermittelt wurde, setzte sich die Erkenntnis durch, dass eine Erhöhung der Schadstoffbelastung nicht zu zusätzlichen Todesfällen (die Wahrscheinlichkeit zu sterben ist für jeden Menschen gleich eins), sondern zu einer Verkür-

zung der Lebenserwartung führt. Dementsprechend wurde der Indikator „Years of Life Lost“ (YOLL) zur Beschreibung des Sterblichkeitsrisikos eingeführt, der auch zu neuen Ansätzen bei der monetären Bewertung von Todesfällen durch Luftschadstoffen führte (*Value of a Statistical Life Year* statt *Value of Statistical Life*).

Aus den Ergebnissen der neuen europäischen Studien konnten weitere Dosis-Wirkungsbeziehungen für zusätzliche nicht tödliche Effekte (Morbidity) abgeleitet werden.

- *Relevante Schadstoffe:* Vor allem auf der Grundlage der neuen epidemiologischen Studien wird in ExternE 1999 auch SO₂ als kausal wirkender Schadstoff angesehen.

Wegen der dominierenden Bedeutung von Feinstaub wird zunehmend eine Diskussion um den geeigneten Indikator für die Feinstaubbelastung geführt. Aus den zur Verfügung stehenden epidemiologischen Studien geht nicht hervor, in wie weit bestimmte Staubinhaltsstoffe, die Anzahl der Partikel oder das Gewicht der Partikel in einem kausalen Zusammenhang zu den beobachteten Effekten stehen. Für die Modellierung von sekundären Partikeln wird ein gegenüber ExternE 1995 differenzierterer Ansatz vorgeschlagen: da Hinweise für eine schädigenden Wirkung von Sulfat-Aerosolen vorliegen, werden diese im Hinblick auf ihre Wirkung dem Feinstaub (PM_{2,5}) gleichgesetzt. Nitrat-aerosole werden nach wie vor wie PM₁₀ behandelt, diese Annahme wird weiterhin als unsicher angesehen.

Zusätzlich zu den „klassischen“ Schadstoffen Staub, SO₂, NO_x und Ozon werden in ExternE 1999 auch Dosis-Wirkungsbeziehungen für CO und einige Schwermetalle abgeleitet und zur Berechnung externer Kosten verwendet.

- *Auswirkungen auf die Quantifizierung externer Kosten:* Die Berücksichtigung der chronischen Mortalität führte in ExternE 1999 zunächst zu einer deutlichen Erhöhung der quantifizierbaren externen Kosten. Durch den neu eingeführten Ansatz der monetären Bewertung auf der Basis der verlorenen Lebenserwartung (Value of Statistical Life Year) wurde diese Erhöhung jedoch weitgehend ausgeglichen. Die externen Kosten durch Gesundheitsschäden werden weitgehend durch chronische Mortalität in Folge erhöhter Feinstaubbelastung dominiert. Die übrigen gegenüber ExternE 1995 neu eingeführten Änderungen (durch weitere Dosis-Wirkungsbeziehungen quantifizierbare nicht tödliche Effekte, die Berücksichtigung von SO₂ als kausal wirkender Schadstoff und die Berücksichtigung von Effekten durch die Emission von Schwermetallen) führten zu keinen nennenswerten Änderung der quantifizierbaren externen Kosten.

ExternE Transport (2001)

- *Epidemiologische Grundlagen:* Wegen der dominierenden Bedeutung der chronischen Mortalität für die Berechnung externer Kosten wurde die zu Grunde liegende epidemiologische Studie, aus der die Dosis-Wirkungsbeziehung abgeleitet wurde, weiter analysiert. Kritische Punkte waren die mögliche Überschätzung der Effekte durch die Verwendung von aktuellen Daten zur Schadstoffbelastung statt der eigentlich für die Schäden verantwortliche höhere historische Belastung, und die Übertragbarkeit der Dosis-Wirkungsbeziehung in den europäischen Kontext. Wie bereits oben erwähnt, wiesen die inzwischen vorliegenden europäischen Studien zur Mortalität darauf hin, dass die Effekte je Einheit zusätzliche Schadstoffbelastung in Europa deutlich kleiner (ca. 50%) waren. Obwohl es für diesen Unterschied keine befriedigende Erklärung gab wurde davon ausgegangen, dass analog zur akuten Mortalität auch die chronische Mortalität in Europa durch die Verwendung der aus US-Studien abgeleiteten Dosis-Wirkungsbeziehung überschätzt wird. Studien zur erhöhten Sterblichkeit durch eine Langzeitbelastung mit

Feinstaub liegen in Europa bisher nicht vor. Um beide Aspekte zu berücksichtigen wurde der Schadensfaktor, der die Steigung der Dosis-Wirkungsbeziehung beschreibt, gegenüber ExternE 1999 um den Faktor drei reduziert.

- *Betrachtete Gesundheitseffekte:* Im Wesentlichen wie ExternE 1999. Da der Schwerpunkt auf den externen Kosten des Verkehrs lag, wurden zusätzlich kanzerogene Effekte durch verschiedenen Kohlenwasserstoffe und durch Dieselpartikel berücksichtigt.
- *Relevante Schadstoffe:* Wie ExternE, 1999, zusätzlich verschiedene Kohlenwasserstoffe, Dieselpartikel und Blei, um den Verkehrskontext besser zu berücksichtigen.
- *Auswirkungen auf die Quantifizierung externer Kosten:* Durch die Skalierung der Dosis-Wirkungsbeziehungen für chronische Mortalität, und wegen der dominanten Bedeutung der chronischen Mortalität für die gesamten externen Kosten, gingen die quantifizierten externen Kosten deutlich zurück.

NewExt (2004)

- *Epidemiologische Grundlagen:* Wie ExternE 1999 und ExternE Transport.
- *Betrachtete Gesundheitseffekte:* Während bisher nur die Wirkung der Exposition gegenüber Schwermetallen in der Luft betrachtet wurde, wurden in NewExt weitere Wirkungspfade zur Modellierung der Belastung durch Nahrungsaufnahme berücksichtigt. Die Auswirkungen auf die quantifizierbaren externen Kosten sind sehr klein.
- *Relevante Schadstoffe:* SO₂ wird nicht mehr als direkt wirkender Schadstoff angesehen.
- *Auswirkungen auf die Quantifizierung externer Kosten:* Keine wesentliche Änderung.

ExternE-Pol (2004)

- *Epidemiologische Grundlagen:* Auf der Grundlage neuer Untersuchungen wird die Wirkung sekundärer Partikel (Sulfat- und Nitrataerosole) als weniger schädlich als bisher angenommen eingeschätzt. Die Wirkung von Nitrataerosolen wird jetzt nur noch als halb so stark wie die Wirkung von primärem PM₁₀ eingestuft (wurde bisher als äquivalent behandelt), die Wirkung von Sulfataerosolen wird der von PM₁₀ gleichgesetzt (wurde bisher der stärker wirkenden Partikelfraktion PM_{2,5} gleichgesetzt). Die Wirkung von Primärpartikel-Emissionen aus Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird jetzt äquivalent zur 1,5-fachen Wirkung von PM_{2,5} eingestuft (bisher wie PM_{2,5} behandelt).

Die der Quantifizierung chronischer Mortalität durch Feinstaubbelastung zu Grunde liegende Dosis-Wirkungsbeziehung wurde angepasst. Ausgehend von der Studie von Pope et al. (1995) wurde bisher das relative Risiko der Feinstaubbelastung mit 1,0039 je $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{PM}_{10}}$ angegeben. Den Ergebnissen einer neuen Studie von Pope et al. (2002) entsprechend wird das Risiko durch die Feinstaubbelastung jetzt etwas höher eingeschätzt (relatives Risiko 1,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{PM}_{10}}$). Die Auswirkung auf die Quantifizierung der Effekte ist allerdings vernachlässigbar, da gleichzeitig die Bezugsgruppe, auf die sich die Dosis-Wirkungsbeziehung bezieht, geändert wurde.

- *Betrachtete Gesundheitseffekte:* Wie ExternE 1999 und ExternE Transport.
- *Relevante Schadstoffe:* Wie ExternE 1999 und ExternE Transport.

- *Auswirkungen auf die Quantifizierung externer Kosten:* Durch die Neubewertung der Wirkung sekundärer Partikel kommt es zu einer Reduktion externer Kosten. Insbesondere bei Gaskraftwerken, bei denen die im Vergleich zu anderen Schadstoffen relativ hohen NO_x-Emissionen als Vorläufer für Nitrataerosole einen wichtigen Beitrag zu den externen Kosten leisten, führt die Annahme einer reduzierten Wirkung sekundärer Partikel zu einer Reduktion der externen Kosten.

Tabelle 2.4: Überblick über die wesentlichen methodischen Entwicklungen bei der Abschätzung von Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe, und deren Auswirkungen auf die Quantifizierung externer Kosten

	Methodische Änderung	Auswirkung auf externe Kosten
ExternE 1999	Berücksichtigung von chronischer Mortalität durch Feinstaub	↑
	Berücksichtigung von SO ₂ als kausal wirkender Schadstoff, Berücksichtigung weiterer nicht tödlicher Effekte	→
	Berücksichtigung von Schwermetallen	→
ExternE Transport (2001)	Anpassung der Dosis-Wirkungsbeziehung für chronische Mortalität an europäischen Kontext	↘
NewExt (2004)	Modellierung der Schwermetallbelastung durch Nahrungskette	→
ExternE-Pol (2004)	Neubewertung der Wirksamkeit verschiedener Partikelfractionen	↘

2.3.2 Monetäre Bewertung von Gesundheitsschäden

Bei der Berechnung externer Kosten durch Gesundheitsschäden spielt das durch Luftschadstoffe hervorgerufene erhöhte Sterblichkeitsrisiko eine besonders wichtige Rolle. Grundlage für die monetäre Bewertung eines erhöhten Sterblichkeitsrisikos ist nicht der „Wert“ eines bestimmten Menschenlebens, der sich als solcher nicht beziffern lässt, sondern die Zahlungsbereitschaft für eine Verringerung eines Risikos. In der Umweltökonomie wird aus der Zahlungsbereitschaft für die Verringerung eines kleinen Risikos, durch einen Unfall oder eine Krankheit zu Tode zu kommen, der so genannte „Wert eines statistischen Lebens“ (Value of Statistical Life – VSL) abgeleitet. Zahlungsbereitschaften können direkt durch Befragung (Contingent Valuation Method, CVM) oder indirekt über beobachtetes Marktverhalten gemessen werden.

Im Laufe der ExternE-Arbeiten hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass nicht nur die Änderung des Todesfallrisikos an sich, sondern auch die verlorene Lebenserwartung einen Einfluss auf die Zahlungsbereitschaft zur Risikominderung haben kann. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, wurde zunächst auf der Grundlage theoretischer Überlegungen aus dem *Value of Statistical Life* ein *Value of Life Year Lost* abgeleitet und zur Monetarisierung herangezogen. Im Rahmen des ExternE-Nachfolgeprojekte NEEDS werden zurzeit zum ersten Mal Befragungen durchgeführt, um die getroffenen Annahmen zur Bestimmung des Value of Life Year Lost empirisch abzusichern.

Ebenso wie für tödliche Gesundheitsschäden kann auch die Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung von nicht tödlichen Effekten (Morbidität) durch direkte Befragungen abgeschätzt werden. Zu der Zahlungsbereitschaft werden hier meistens die Kosten der medizinischen Behandlung addiert. Die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft zur Verhinderung von

Krankheiten ist nach empirischen Schätzungen etwa dreimal so hoch wie die reinen Krankheitskosten.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Annahmen zur monetären Bewertung von Gesundheitsschäden und die methodischen Weiterentwicklungen der Bewertungsansätze während der ExternE-Projekte zusammengefasst.

ExternE 1995:

In einer Meta-Analyse wurden vorliegende Studien zur monetären Bewertung von Gesundheitsschäden ausgewertet, dabei wurden sowohl direkte als auch indirekte Methoden zur Ermittlung der Zahlungsbereitschaft berücksichtigt. Ansätze zur Bewertung auf der Basis des Human-Kapital-Ansatzes wurden ausgeschlossen, da die in diesem Ansatz gemessenen Produktionsverluste in keinem theoretischen oder empirischen Zusammenhang mit der Zahlungsbereitschaft zur Verringerung von Gesundheitsrisiken stehen. Als Ergebnis der Meta-Analyse wurde die Verwendung eines Value of Statistical Life in Höhe von 2,6 Mill. ECU₁₉₉₀ zur Berechnung externer Kosten empfohlen. Es wurde darauf hingewiesen, dass in Zukunft die verlorene Lebenserwartung in die Bewertung mit einbezogen werden sollte, bei der Berechnung externer Kosten wurde dieser Aspekt allerdings in ExternE 1995 noch nicht berücksichtigt.

Die höchsten externen Kosten durch nicht tödliche Krankheiten (Morbidität) werden durch „Tage mit eingeschränkter Aktivität“ und durch „Tage mit Atemwegssymptomen“ verursacht. Zur monetären Bewertung werden CVM Studien aus den USA herangezogen.

ExternE 1999:

Der zur Bewertung verwendete VSL betrug nach einer Umrechnung in ECU₁₉₉₅ 3,1 Mill. ECU₁₉₉₅. Als wichtige methodische Weiterentwicklung wurde die Reduktion der Lebenserwartung durch die Schadstoffbelastung in die monetäre Bewertung einbezogen. Aus dem Value of Statistical Life wurde auf der Grundlage theoretischer Überlegungen ein Value of a Life Year Lost abgeleitet, also die Zahlungsbereitschaft für die Verringerung eines kleinen Risikos, das die Lebenserwartung um ein Jahr reduziert. Der Value of Life Year Lost wurde in Abhängigkeit von der Diskontrate angegeben, er betrug 98 000 ECU bei einer Diskontrate von 0 %, 84 000 ECU bei 3 % und 60 000 bei 3 % Diskontrate. Als Standardwert wurde mit dem Wert von 84 000 ECU gerechnet. Durch die Einführung des neuen Ansatzes zur Bewertung der Mortalität durch Luftschadstoffe kam es zu einer deutlichen Verminderung der externen Kosten.

Als zusätzlich relevanter nicht tödlicher Effekt wurden Fälle mit chronischer Bronchitis quantifiziert und mit aus CVM-Studien abgeleiteten Ansätzen bewertet. Insgesamt wuchs dadurch die Bedeutung nicht tödlicher Effekte für die externen Kosten leicht an.

NewExt 2004:

In NewExt wurde zum ersten Mal in der Serie der ExternE-Studien eine eigene empirische Erhebung zur Ermittlung des Value of Statistical Life durchgeführt. Auf der Basis eines standardisierten Interviews, das in den USA entwickelt wurde, wurden in England, Italien und Frankreich Umfragen mit jeweils ca. 300 Personen durchgeführt. Als Ergebnis der Studie wurde der VSL deutlich nach unten korrigiert und ein Wert von 1 Mill. € zur Bewertung erhöhter Mortalität durch Luftschadstoffe empfohlen. Daraus wurde wiederum aus theoretischen

schen Überlegungen ein Value of a Statistical Life Year abgeleitet, der mit 50 000 € entsprechend unter dem Wert der Vorgängerstudien liegt.

ExternE-Pol 2004:

Der Ansatz zur Bewertung chronischer Bronchitis, durch die neben dem Mortalitätsrisiko der zweithöchste Beitrag zu den externen Kosten durch Gesundheitsschäden verursacht wird, wurde durch eine neue Auswertung vorliegender Studien überprüft. Es wurde die Verwendung eines etwas höheren Wertes (0,2 Mill. € statt bisher 0,17 Mill. €) empfohlen, der aber letztendlich kaum Auswirkungen auf die Höhe der externen Kosten hat.

Tabelle 2.5: Überblick über die wesentlichen methodischen Entwicklungen bei der monetären Bewertung von Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe, und deren Auswirkungen auf die Quantifizierung externer Kosten

	Methodische Änderung	Auswirkung auf externe Kosten
ExternE 1999	Bewertung des erhöhten Todesfallrisikos durch Luftschadstoffe mit dem „Value of Life Year Lost“-Ansatz.	↓
NewExt (2004)	Neue Ergebnisse zum VSL (1 Mill. €) aus europäischer CVM-Studie.	↘
ExternE-Pol (2004)	Neuer Ansatz zur Bewertung chronischer Bronchitis.	→

2.3.3 Spezifische Schadenskosten – Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe

Auf der Basis der in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen methodischen Entwicklungen werden in ExternE die in Tabelle 2.6 gezeigten spezifischen Schadenskosten zur Bewertung von Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe verwendet. Diese dem Stand des Wissens entsprechenden Bewertungsansätze werden im vorliegenden Gutachten zur Berechnung externer Kosten herangezogen.

Wegen des Einflusses verschiedener standortspezifischer Parameter können die spezifischen Schadenskosten einzelner Schadstoffe an verschiedenen Standorten deutlich voneinander abweichen. Da die hier durchgeführte Analyse letztendlich die Gestaltung einer langfristig harmonisierten europäischen Energiepolitik unterstützen soll, werden hier die durchschnittlichen spezifischen Schadenskosten für den europäischen Kraftwerkssektor verwendet (EU-25, Emissionen „außerorts“; Quelle: EcoSenseLE 2006). Die für Deutschland ermittelten spezifischen Schadenskosten liegen bis zu 60 % (SO₂) über den hier verwendeten europäischen Durchschnittskosten, so dass die hier verwendeten Wertansätze als konservativ angesehen werden können.

Tabelle 2.6: Spezifische Schadenskosten durch Gesundheitseffekte für verschiedene Luftschadstoffe in € je Tonne Schadstoff (Quelle: ExternE, EcoSenseLE, 2006)

	SO ₂ ¹⁾	NO _x ²⁾	PM ₁₀	NMVOC ³⁾
Mortalität	2020	2120	8000	60
Morbidität	1040	1000	4000	170
Summe Gesundheitsschäden	3060	3120	12000	130

¹⁾ durch die Bildung von Sulfataerosolen; ²⁾ durch die Bildung von Nitrataerosolen; ³⁾ durch die Bildung von Ozon

2.4 Wirkung von Luftschadstoffen auf Agrarprodukte

Immissionen von Luftverunreinigungen wie SO₂, NO₂, O₃, HF und PAN, die auf Pflanzen toxisch wirken, lösen eine Folge von biochemischen und physiologischen Wirkungsprozessen aus, die zu einer Schädigung von Pflanzen führen können. Vor allem die im Zusammenhang mit der Stromerzeugung relevanten Schadstoffe SO₂ und Ozon üben einen großen Einfluss auf die Entwicklung von Feldpflanzen aus. Aus den Ergebnissen von Experimenten mit Feldpflanzen in sogenannten „open-top chambers“ oder im Freiland konnten Dosis-Wirkungsbeziehungen abgeleitet werden, die die Abhängigkeit des Ertrags von Feldpflanzen von der Schadstoffbelastung beschreiben. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass bei niedrigen SO₂-Konzentrationen (unterhalb von ca. 15 µg/m³) in der Umgebungsluft eine Erhöhung der SO₂-Konzentration wegen Düngeeffekten eine positive Auswirkung auf den Ertrag von Feldpflanzen hat, in Gebieten mit niedriger SO₂-Konzentration kann es also durch zusätzliche SO₂-Emissionen durchaus zu Ertragssteigerungen kommen (negative externe Kosten). Zur ökonomischen Bewertung von Ertragsverlusten werden Marktpreise verwendet.

Wegen des relativ kleinen Beitrags der durch Luftschadstoffe verursachten Ernteverluste zu den gesamten externen Kosten wird hier auf eine detaillierte Beschreibung der Entwicklung der methodischen Ansätze zur Quantifizierung und Bewertung im Laufe der ExternE Projekte verzichtet. Da die Dosis-Wirkungsbeziehungen aus Experimenten abgeleitet werden können und zur Monetarisierung Marktpreise verwendet werden, sind die Unsicherheiten in diesem Bereich vergleichsweise klein. In verschiedenen Meta-Analysen wurde der Stand des Wissens im Hinblick auf Dosis-Wirkungsbeziehungen kontinuierlich aktualisiert.

Tabelle 2.7: Spezifische Schadenskosten durch die Wirkung von Luftschadstoffen auf Agrarprodukte für verschiedene Luftschadstoffe in € je Tonne Schadstoff (Quelle: ExternE, EcoSenseLE, 2006)

	SO ₂ ¹⁾	NO _x ²⁾	NMVOC ³⁾
Ernteverluste	-10	130	640

¹⁾ durch die Deposition von Schwefel und Schwefelsäure und durch die direkte Wirkung von SO₂; ²⁾ durch die Deposition von Stickstoff und durch die Wirkung von Ozon; ³⁾ durch die Wirkung von Ozon

2.5 Materialschäden durch Luftschadstoffe

Alle Materialien, die der Atmosphäre ausgesetzt sind, werden durch natürliche Verwitterungsprozesse und durch Luftverunreinigungen geschädigt. Zur natürlichen Verwitterung tragen Regen, Frost, Meeressalze, aber auch Bakterien bei. Heutzutage überwiegt jedoch die Schädigung durch Luftverunreinigungen die natürliche Verwitterung um einen Faktor zwischen 10 und 100.

Metallische und anorganische Materialien werden vor allem von SO₂ und von sauren Niederschlägen angegriffen (Korrosion). Ozon ist vor allem für die Gefährdung organischer Materialien bekannt. Staubemissionen führen zusätzlich zu einer Verschmutzung der Oberflächen. Sowohl die Korrosion wie auch die Verschmutzung führen zu erhöhten Instandsetzungs- und Instandhaltungskosten. Für die Korrosion, insbesondere durch saure Deposition, gibt es eine ganze Reihe von gut abgesicherten Expositions-Wirkungsbeziehungen, jedoch nicht für die Verschmutzung. Die Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Bestimmung des Materialabtrags durch Korrosion wurden im Wesentlichen aus Messungen abgeleitet, die im Rahmen des UN-ECE International Cooperative Programme in verschiedenen Ländern durchgeführt wurden (Kuceira et al., 1995). Aus dem Verhältnis zwischen dem durch Luftschadstoffe verursachten Materialabtrag und dem so genannten kritischen Materialabtrag (dies ist der Materialabtrag, bei dem eine Instandsetzung erforderlich wird) lässt sich der Anteil der Materialoberfläche

bestimmen, der jährlich aufgrund der Schadstoffbelastung vorzeitig instand gesetzt werden muss. Mit Hilfe von flächenspezifischen Instandhaltungskosten, die je nach Material und Land sehr unterschiedlich sein können, lassen sich die resultierenden Schadenskosten berechnen.

Ähnlich wie bei den Agrarschäden sind die Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Quantifizierung der Materialschäden durch Luftschadstoffe experimentell abgesichert, zur Bewertung können Marktpreise herangezogen werden. Die Unsicherheiten sind also auch hier relativ klein, der Beitrag zu den gesamten externen Kosten ist allerdings auch sehr klein. Im Laufe der ExternE-Studien wurden Dosis-Wirkungsbeziehungen an den Stand des Wissens angepasst, wobei es zu keinen grundsätzlichen Änderungen in der methodischen Vorgehensweise kam. Die fehlende Bewertung von Schäden an Kulturgütern und Bauten mit besonderem historischem Wert wurde wiederholt thematisiert, es konnte aber kein zufrieden stellender Ansatz zur monetären Bewertung entwickelt werden.

Tabelle 2.8: Spezifische Schadenskosten durch Materialschäden für verschiedene Luftschadstoffe in € je Tonne Schadstoff (Quelle: ExternE, EcoSenseLE, 2006)

	SO ₂ ¹⁾	NO _x ²⁾
Materialschäden	230	70

¹⁾ durch die Deposition von Schwefel und Schwefelsäure; ²⁾ durch die Wirkung von Ozon

2.6 Wirkung von Luftschadstoffen auf naturnahe Ökosysteme und Biodiversität

Pflanzen und Ökosysteme können auf direktem oder indirektem Weg durch Luftverunreinigungen und den Eintrag von Schadstoffen geschädigt werden. Indirekt können Schadstoffeinträge die Ökosysteme durch Bodenversauerung oder Eutrophierung beeinträchtigen. Die Bodenversauerung führt zu einer Veränderung der Bodenchemie, die das Wurzelwachstum und die Nährstoffaufnahme von Pflanzen hemmen, was sich unter anderem auf die Photosyntheseleistung auswirken kann. Zu hohe Stickstoffeinträge führen zu Nährstoffungleichgewichten, außerdem werden Arten, die an eine stickstoffarme Umwelt angepasst sind, von Arten, die weniger stickstoffeffizient sind, verdrängt. Dies führt zu einer Gefährdung der Artenvielfalt insbesondere in naturnahen Ökosystemen. Überschüssiger Stickstoff wird ins Grundwasser ausgewaschen oder als N₂O emittiert, das wiederum zum Treibhauseffekt beiträgt.

In den verschiedenen ExternE-Studien ist es bisher nicht gelungen, die komplexen Wirkungsmechanismen, wie sie bei der Bodenversauerung oder der Eutrophierung in Ökosystemen ablaufen, durch statistisch ermittelte Wirkungsbeziehungen oder andere einfache, quantitative Modelle zu beschreiben und damit eine Schadensabschätzung zu ermöglichen. Als alternativer Ansatz wurde versucht, mögliche Schäden auf der Basis ökosystemaren Belastungsgrenzen abzuschätzen. Eine solche Abschätzung bezieht sich dabei auf die aus der Forderung nach dauerhaft-nachhaltiger Entwicklung ableitbare Regel, wonach die Aufnahmekapazität der natürlichen Ökosysteme für Schadstoffe nicht überschritten werden darf. Das Konzept der Critical Levels/Loads der UN-ECE ist für ein solches Vorgehen besonders geeignet (siehe z.B. UN-ECE 1999). Critical Levels (kritische Konzentrationen) und Critical Loads (kritische Eintragsraten), die im Rahmen der Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution der UN-ECE für Ökosysteme ermittelt wurden, stellen die Konzentrationen bzw. Eintragsraten dar, bei deren Unterschreitung nach heutigen Erkenntnissen keine Schädigungen auftreten. Als Indikator für Umweltschäden kann die durch Kraftwerksemissionen

verursachte Zunahme ungeschützter Ökosysteme, also der Fläche, in der Critical Loads für Ökosysteme überschritten werden, berechnet werden. Mit dem heutigen Wissen ist es nicht möglich, den aus einer Überschreitung von Critical Loads resultierenden tatsächlichen Schäden an den jeweiligen Ökosystemen abzuschätzen.

Zum Schutz der Ökosysteme in Europa wurden im Protocol of Gothenburg on the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UN-ECE 1999) und in der National Emission Ceilings Directive der Europäischen Kommission (European Commission 2001) verschiedene Ziele für die Reduktion von Ökosystemflächen, in denen die kritischen Belastungsgrenzen überschritten werden, festgelegt. In (NewExt 2004) wurde aus diesen Zielen und den notwendigen Kosten zur Emissionsminderung eine gesellschaftliche Zahlungsbereitschaft für den Schutz von Ökosystemen abgeleitet (100 € je Hektar je Jahr zusätzlich geschützte Ökosystemfläche). Eine auf diesem Ansatz basierende Quantifizierung und Monetarisierung konnte allerdings in NewExt noch nicht umgesetzt werden. Es ist außerdem anzumerken, dass dieser Ansatz zur Abschätzung externer Kosten von der UN-ECE, die für die Berechnung und Kartierung kritischer Belastungsgrenzen verantwortlich ist, aus methodischen Gründen ausdrücklich nicht unterstützt wird. Im laufenden ExternE-Folgeprojekt NEEDS wird versucht, neue Ansätze zur Quantifizierung und Bewertung von Schäden an Ökosystemen zu entwickeln. Bis heute steht leider kein akzeptiertes Verfahren zur Abschätzung externer Kosten in diesem Bereich zur Verfügung.

2.7 Große nicht-nukleare Unfälle

Während auch schon in den früheren ExternE-Studien mögliche große Unfälle (z.B. Dammbruch, Gasexplosionen, Grubenunfälle etc.) bei der Analyse einzelner Brennstoffkreisläufe berücksichtigt worden sind, wurde in NewExt (2004) dieser Aspekt noch einmal systematisch aufgearbeitet. Für diese Arbeiten wurden Daten aus einer „Energy-related Severe Accident Database“ (Burgherr et al. 2004) ausgewertet. Die Analyse hat gezeigt, dass wegen der kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten die auf eine Einheit Stromerzeugung normierten externen Kosten durch große nicht-nuklearen Unfälle in der Regel vernachlässigbar klein sind.

2.8 Versorgungssicherheit

Der Aspekt der Versorgungssicherheit gewinnt nach den drastischen Ölpreissteigerungen der letzten zwei Jahre, dem kurzzeitigen Lieferstopp Russlands für Gas an die Ukraine und den Stromausfällen in verschiedenen europäischen Ländern und den USA zunehmend an Bedeutung. Im jüngsten Grünbuch der Europäischen Kommission (European Commission 2006) wird der Versorgungssicherheit eine Schlüsselrolle bei der Gestaltung einer zukünftigen europäischen Energiepolitik eingeräumt. Es bestehen bis heute erhebliche Unsicherheiten darüber, in wieweit Kosten, die mit der Absicherung der Energieversorgung zusammenhängen, als externe Kosten anzusehen sind. Der Zusammenhang zwischen dem negativen Einfluss eines steigenden Ölpreises auf das Wachstum des Bruttosozialprodukts ist in vielen Studien empirisch nachgewiesen. Auch eine erhöhte Volatilität des Ölpreises hat negative Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum. In einer Phase hoher Volatilität beinhaltet die Höhe des Ölpreises wenig Information über eine zukünftige Preisentwicklung und ist auch dadurch eine Ursache für mögliche externe Effekte. Auch Militärausgaben zur strategischen Sicherung von Energieressourcen werden oft als externe Kosten angesehen.

In den ersten Phasen der ExternE Studien wurden relativ einfache Ansätze zur Abschätzung externer Kosten bzw. Nutzen durch eine Änderung der Versorgungssicherheit entwickelt.

Diese Ansätze führten zu vernachlässigbar kleinen externen Kosten und blieben methodisch weitgehend unbefriedigend. In ExternE-Pol (2004) wurde das Thema Versorgungssicherheit wegen der erneut wachsenden politischen Bedeutung noch einmal aufgegriffen, die Analyse beschränkt sich allerdings auf den Zusammenhang zwischen Ölpreissteigerungen und den Auswirkungen auf das Bruttosozialprodukt und führen wiederum zu vernachlässigbar kleinen externen Kosten. Der Einfluss der Preisvolatilität wurde genauso wie der mögliche Beitrag von Militärausgaben zu den externen Kosten nicht untersucht. In einer Literaturlauswertung wurden Kosten eines kurzfristigen Stromausfalls zusammengestellt. Anhand verschiedener Beispiele konnte gezeigt werden, dass diese je nach Länge des Stromausfalls in der Größenordnung zwischen 2 und 5 €/kWh liegen.

Im Gegensatz zu ExternE-Pol haben Awerbuch und Sauter (2006) versucht, aus dem Zusammenhang zwischen Ölpreis und Bruttosozialproduktentwicklung vermiedene externe Kosten durch eine zusätzliche Einheit installierter Leistung nicht-fossiler Kraftwerke abzuschätzen. Nach Awerbuch und Sauter (2006) liegt der zusätzliche Wert eines Wind- oder Solarkraftwerks bei 200 \$/kW (bei einem Kapazitätsfaktor von 23%), während er für ein Geothermie- oder Biomassekraftwerk – aber auch für ein Kernkraftwerk – bei 800 \$/kW liegt. Mit typischen Anlagenlebensdauern und Volllaststunden ergeben sich daraus vermiedene externe Kosten in der Größenordnung von ca. 1 ct/kWh.

Im Zusammenhang mit dem Aspekt der Versorgungssicherheit werden auch immer wieder Militärausgaben, die unter Umständen dazu dienen, den Zugang zu Energieressourcen zu sichern, als mögliche Quelle externer Kosten genannt. Belastbare Abschätzungen externer Kosten liegen in der Literatur allerdings nicht vor. Auch wenn die Sicherung der Energieversorgung ein ausdrückliches Ziel der Außen- und Sicherheitspolitik einzelner Länder ist (z. B.: „The National Energy Policy Development Group recommends that the President make energy security a priority of our trade and foreign policy“; US-NEPD 2001), so bleibt eine kausale Zuordnung der Ausgaben für einen militärischen Konflikt zu einer Erhöhung der Versorgungssicherheit letztendlich äußerst schwierig. Auch die Normierung solcher Ausgaben auf eine bestimmte Fördermenge ist problematisch, da die durch militärische Eingriffe ausgelösten gesellschaftspolitischen Änderungen über einen sehr langen Zeitraum wirken können.

Obwohl somit eine belastbare Quantifizierung externer Kosten als kaum möglich erscheint, ist durchaus von einem Vorliegen externer Effekte auszugehen. Auf der Grundlage von Militärausgaben der USA und Westeuropas für den Nahen und Mittleren Osten und den Ausgaben für zwei Golfkriege schätzen Plesch et al. (2005), dass inzwischen für jedes Barrel Öl rund 20 \$ alleine für bewaffnete Einsätze aufgebracht werden müssen. Die Ausgaben für den Irakkrieg, der offensichtlich nicht völlig losgelöst von der strategischen Bedeutung des Zugangs zu Energiequellen gesehen werden kann, betragen inzwischen knapp 250 Milliarden Dollar (National Priorities Project 2006), dies entspricht ungefähr dem sechsfachen der weltweiten Investitionen in erneuerbare Energien im Jahr 2004.

Wegen der großen Unsicherheiten werden mögliche externe Kosten durch Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit hier nicht weiter berücksichtigt. Durch die Nutzung heimischer erneuerbarer Energien kann die Importabhängigkeit reduziert und die Versorgungssicherheit erhöht werden, dies spiegelt sich in den heutigen Marktpreisen nicht wieder.

2.9 Sonstige externe Effekte

Neben den bisher beschriebenen Schadenskategorien gibt es weitere Effekte, die externe Kosten verursachen können. Dazu gehören zum Beispiel die Auswirkungen von Lärmemissionen, visuelle Beeinträchtigungen, oder Bergschäden durch den Kohleabbau. Externe Kosten

können durch Subventionen verursacht werden, auch Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt werden teilweise als externe Effekte angesehen. Die aus solchen Effekten resultierenden externe Kosten werden in verschiedenen Studien übereinstimmend als generell klein im Vergleich zu den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Schadenskategorien eingeschätzt, so dass sie nicht weiter berücksichtigt werden. Prinzipiell gilt aber auch hier, dass die in Kapitel 3 dargestellten quantifizierbaren externen Kosten verschiedener Stromerzeugungstechnologien nur eine Teilmenge der gesamten externen Kosten darstellen.

Externe Kosten der Kernenergienutzung sind nicht Gegenstand der vorliegenden Studie. Zusätzlich zu den bisher dargestellten Schadenskategorien werden im Zusammenhang mit der Kernenergie vor allem externe Kosten durch auslegungsüberschreitende Unfälle, durch das Proliferationsrisiko und durch radioaktive Abfälle teilweise sehr kontrovers diskutiert. Die methodischen Arbeiten der letzten zehn Jahre in ExternE und anderen Studien haben zwar zu einem besseren Verständnis der zu Grunde liegenden Sachverhalte beigetragen, aber nicht zu einer weniger kontroversen Einschätzung der Kernenergienutzung geführt. Dies mag auch daran liegen, dass bei der Bewertung der relevanten Effekte (Unfälle mit sehr kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit, aber katastrophalen Auswirkungen; Bewertung von Schäden in zehntausenden von Jahren; Auswirkungen des Proliferationsrisikos auf gesellschaftliche Strukturen) der Ansatz der externen Kosten an methodische Grenzen stößt.

2.10 Zusammenstellung spezifischer externer Kosten für verschiedene Luftschadstoffe

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die dem Stand des Wissens entsprechenden Ansätze zur Quantifizierung und Bewertung verschiedener Umweltschäden dargestellt. In Tabelle 2.9 sind die daraus abgeleiteten spezifischen Schadenskosten für die verschiedenen Luftschadstoffe und Schadenskategorien zusammengefasst. Diese spezifischen Schadenskosten bilden das Mengengerüst, mit dem im folgenden Kapitel 3 die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern berechnet werden.

Tabelle 2.9: Quantifizierbare spezifische Schadenskosten verschiedener Luftschadstoffe in € je Tonne Schadstoff

	CO ₂	SO ₂ ¹⁾	NO _x ¹⁾	PM ₁₀ ¹⁾	NMVOC ¹⁾
Klimawandel	70				
Gesundheitsschäden		3060	3120	12000	230
Ernteverluste		-10	130		640
Materialschäden		230	70		
Summe	70	3280	3320	12000	870

¹⁾ Quelle: ExternE, EcoSenseLE, 2006

3 Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern

Zur Berechnung der quantifizierbaren externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern werden die in Kapitel 2 für verschiedene Luftschadstoffe abgeleiteten spezifischen Schadenskosten mit den bei der Stromerzeugung verursachten Emissionen multipliziert. Dabei werden nicht nur die bei der Energieumwandlung entstehenden direkten Emissionen, sondern auch die Emissionen aus vor- und nachgelagerten Prozessen wie Brennstoffbereitstellung, Kraftwerksbau und Entsorgung berücksichtigt. Die hier verwendeten Emissionsdaten für Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stammen aus der Studie „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ (Nitsch et al., 2004), die Daten für fossile Kraftwerke aus (Marheineke 2002). Die der Abschätzung externer Kosten zu Grunde liegenden spezifischen Emissionen sind in Tabelle 3.1 für die hier betrachteten Technologien zusammengefasst. Für die Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien wurden in (Nitsch et al. 2004) nur die Gesamtstaubemissionen und nicht der Anteil der Feinstaubemissionen angegeben. Die Gesamtstaubemissionen werden hier mit den Schadenskosten des Feinstaubes (PM₁₀) bewertet, dadurch kommt es zu einer Überschätzung der externen Kosten durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

Tabelle 3.1: Lebenswegemissionen für Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern (Nitsch et al. 2004; Marheineke 2002)

	CO ₂ g/kWh	SO ₂ mg/kWh	NO _x mg/kWh	PM ₁₀ mg/kWh	NMVOC mg/kWh
Erneuerbare Energien					
PV, polykristallin (2000)	99	288	340	119 ¹⁾	20
PV (2030)	54	182	214	65 ¹⁾	13
Laufwasser 300 kW	13	28	49	31 ¹⁾	11
Wind 1,5 MW Onshore	10	40	31	42 ¹⁾	26
Wind 2,5 MW Offshore	9	35	21	11 ¹⁾	2
Geothermie	38	62	189	35 ¹⁾	n.v.
Konzentrierendes solarthermisches Kraftwerk, 80 MW	13	47	73	40 ¹⁾	2
Fossile Energieträger					
Braunkohle Dampfkraftwerk, η=40%	1054	402	830	94	n.v.
Braunkohle GuD, η=48%	873	235	354	79	n.v.
Steinkohle Dampfkraftwerk, η=43%	838	351	696	40	n.v.
Steinkohle GuD, η=46%	780	287	435	34	n.v.
Erdgas GuD, η=58%	386	125	351	21	n.v.

n.v. = nicht verfügbar; ¹⁾ gesamte Partikelemissionen

In den ExternE-Studien wurde der Einfluss standortspezifischer Parameter auf die Höhe der externen Kosten einzelner Kraftwerke an bestimmten Standorten sehr genau untersucht. Während die in ExternE durchgeführte Berechnung standortspezifischer externer Kosten im Sinne der von der ökonomischen Theorie geforderten Quantifizierung marginaler externer Kosten zu verstehen ist, ist eine anlagenscharfe Betrachtung bei der Umsetzung politischer Handlungsempfehlungen auf nationaler oder europäischer Ebene nicht sinnvoll. Aus diesem Grund werden hier die in ExternE für die EU-25 Länder ermittelten durchschnittlichen spezifischen Schadenskosten für die relevanten Luftschadstoffe verwendet, um generische externe Kosten für Stromerzeugungstechnologien in einem europäischen Versorgungssystem auszuweisen. Wegen des nicht zu vernachlässigenden Einflusses standortabhängiger Einflussgrößen (z.B. Bevölkerungsverteilung, meteorologische Verhältnisse) können die so ermittelten externen Kosten im Einzelfall deutlich von den in ExternE und anderen Studien für einzelne Kraftwerke an bestimmten Standorten berechneten externen Kosten unterscheiden. Wie bereits oben erwähnt, liegen die in ExternE für Deutschland ermittelten spezifischen Schadenskosten über den europäischen Durchschnittswerten. Die hier ausgewiesenen externen Kosten unterschätzen also eher die durch die Stromerzeugung in Deutschland verursachten externen Kosten.

In Tabelle 3.2 sind die externen Kosten, die sich aus der Multiplikation der Emissionen je Einheit Stromerzeugung (Tabelle 3.1) mit den spezifischen Schadenskosten je Einheit Schadstoffemission (Tabelle 2.9) ergeben, für die hier betrachteten Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und fossilen Energieträgern dargestellt.

Um deutlich zu machen, dass eine Quantifizierung und/oder Monetarisierung von einigen Effekten zumindest mit heutigem Wissen nicht möglich ist, wird eine semi-quantitative Darstellung gewählt. Die mögliche Bedeutung der Bereiche, die nicht quantifiziert werden können, wird durch ein Ampel-Schema symbolisiert. Ein „grünes Licht“ bedeutet, dass bei einem Betrieb der jeweiligen Anlage nach guter geltender Praxis nicht mit nennenswerten Auswirkungen auf das jeweilige Schutzgut und damit auch nicht mit externen Kosten zu rechnen ist. Eine gelbe Ampel deutet darauf hin, dass nicht zu vernachlässigende Auswirkungen möglich sind, die zu zusätzlichen externen Kosten führen können. Bei einer roten Ampel sind schwerwiegende Auswirkungen zu erwarten, die möglicherweise in einem Konflikt zu Nachhaltigkeitszielen stehen. Eine gelbe oder gar rote Ampel deutet darauf hin, dass die durch die Stromerzeugung verursachten externen Kosten auf jeden Fall größer als die quantifizierbaren externen Kosten sind.

Obwohl in dieser Studie externe Effekte der Kernenergienutzung explizit ausgeklammert wurden, sind in Tabelle 3.2 auch Schadenskategorien wie Proliferation oder das Risiko großer Unfälle genannt, die vor allem im Zusammenhang mit der Kernenergienutzung relevant sind. Dadurch soll darauf hingewirkt werden, dass diese Aspekte bei der vergleichenden Bewertung der verschiedenen Stromerzeugungsoptionen nicht wegen der fehlenden Möglichkeit zur Quantifizierung und Monetarisierung externer Effekte vernachlässigt werden. In diesen Bereichen ist bei der Bewertung der Kernenergienutzung mit roten Ampeln zu rechnen.

Tabelle 3.2 zeigt, dass die quantifizierbaren externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für fast alle Technologien deutlich unter 1 ct/kWh liegen. Die einzige Ausnahme ist die Fotovoltaik, deren externe Kosten heute noch – vor allem wegen des großen aus fossilen Energieträgern bereitgestellten Energiebedarfs während der Fertigung – relativ groß sind. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass wegen des großen technischen Entwicklungspotenzials die externen Kosten noch deutlich zurückgehen werden (siehe PV 2030).

Tabelle 3.2: Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern, in ct/kWh (Bewertung von Treibhausgasemissionen mit 70 €/t_{CO2})

	PV (2000)	PV (2030)	Laufwasser 300 kW	Wind 1,5MW Onshore	Wind 2,5 MW Offshore	Geothermie	Solarthermi- sche Kraftwerke	Braunkohle Dampf- kraftwerk, η=40%	Braunkohle GuD, η=48%	Steinkohle Dampf- kraftwerk, η=43%	Steinkohle GuD, η=46%	Erdgas GuD, η=58%
Klimawandel	0,69	0,38	0,09	0,07	0,06	0,26	0,09	7,4	6,4	5,9	5,5	2,7
Gesundheit	0,34	0,20	0,06	0,07	0,03	0,12	0,085	0,50	0,28	0,37	0,26	0,17
Ökosysteme	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Materialschäden	0,009	0,006	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,015	0,008	0,013	0,01	0,005
Ernteverluste	0,005	0,003	0,001	0,002	0,0004	0,002	0,001	0,010	0,004	0,009	0,005	0,004
Große Unfälle	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Proliferation	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Versorgungssicherheit	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Geo-politische Effekte	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	~ 1,0	~ 0,59	~ 0,15	~ 0,15	~ 0,09	~ 0,39	~ 0,18	> 7,9	> 6,4	> 6,3	> 5,7	> 2,9

● „grünes Licht“: keine nennenswerten Effekte

● „gelb“: es sind nicht zu vernachlässigende Auswirkungen zu erwarten, die zu externen Effekten führen

● „rotes Licht“: es sind schwerwiegende Auswirkungen zu erwarten, die im Konflikt zu Nachhaltigkeitszielen stehen

Die externen Kosten der Stromerzeugung aus Stein- und Braunkohle liegen – auch unter Berücksichtigung moderner Kraftwerkskonfigurationen – in der Größenordnung von 6 bis 8 ct/kWh. Die nicht quantifizierbaren Auswirkungen von SO₂- und NO_x-Emissionen auf Ökosysteme (durch Versauerung und Eutrophierung) sind darin nicht enthalten. Die quantifizierbaren externen Kosten der Stromerzeugung in einem modernen gasgefeuerten GuD-Kraftwerk liegen bei ca. 3 ct/kWh. Neben den relativ niedrigen Schadstoffemissionen sind allerdings bei dieser Option die erhöhte Importabhängigkeit und die damit verbundenen möglichen geopolitischen Implikationen zu berücksichtigen, die sich jedoch nicht monetarisieren lassen.

In Abbildung 3.1 sind die quantifizierbaren externen Kosten für die verschiedenen Stromerzeugungstechnologien zusammenfassend dargestellt. Besonders deutlich ist der dominierende Beitrag der Kosten des Klimawandels zu den gesamten externen Kosten. Als Ergebnis einer Sensitivitätsrechnung zeigt Abbildung 3.1 auch die externen Kosten unter der Annahme, dass CO₂-Emissionen mit dem in Kapitel 2.2 abgeleiteten unteren Schätzwert für die Kosten des Klimawandels in Höhe von 15 €/tCO₂ bewertet werden. Die externen Kosten der Stromerzeugung aus Kohle liegen dann zwischen 1,5 und 2 ct/kWh, für ein modernes Gas-GuD Kraftwerk bei 0,75 ct/kWh, und für die Stromerzeugung aus Wind und Wasserkraft zwischen 0,05 und 0,1 ct/kWh.

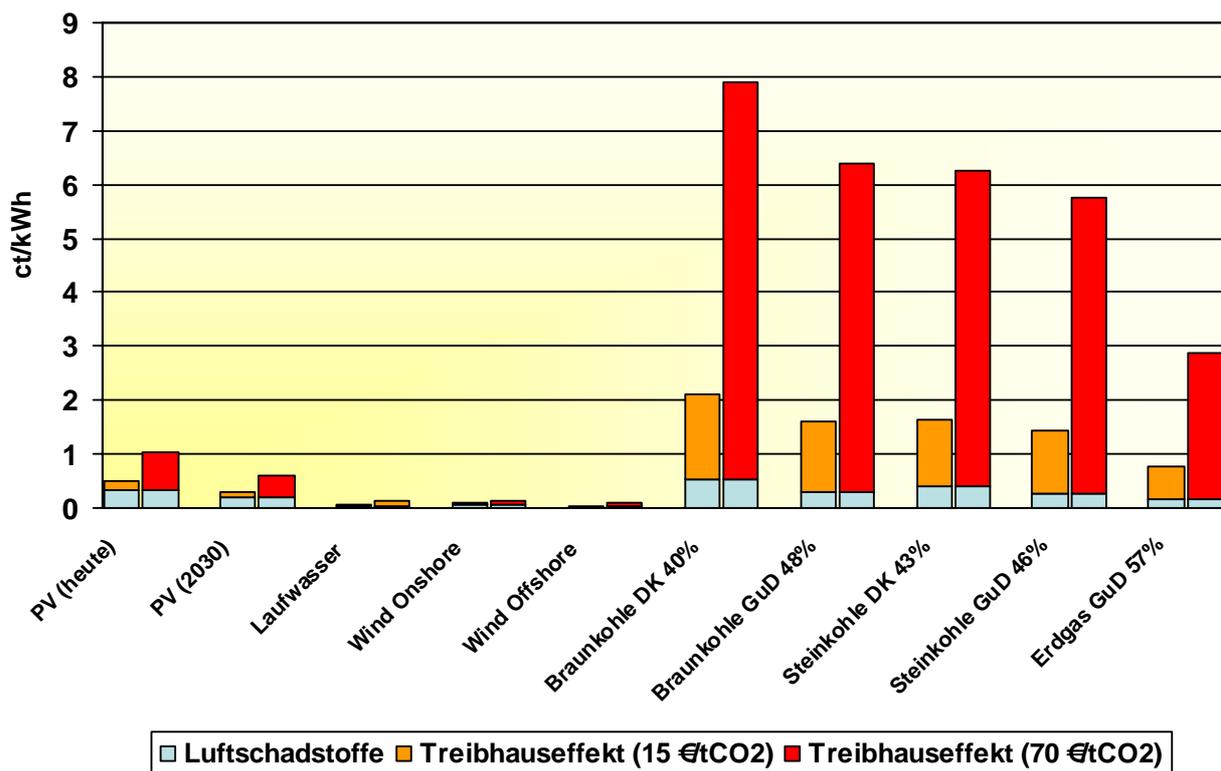


Abbildung 3.1: Quantifizierbare externe Kosten für verschiedene Stromerzeugungstechnologien. (DK: Dampfkraftwerk; GuD: Gas- und Dampfkraftwerk)

Die Ergebnisse zeigen, dass die heutigen Marktpreise die „wahren“ volkswirtschaftlichen Kosten der Stromerzeugung nur unzureichend widerspiegeln. Die Vernachlässigung externer Kosten, die für konventionelle fossile Kraftwerke in der Größenordnung der betriebswirtschaftlichen Stromgestehungskosten liegen können, führt zu eindeutigen Wettbewerbsnachteilen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Um die durch das Vorliegen externer Effekte bestehenden Marktverzerrungen abzubauen, sind von der Politik angemessene Rahmenbedingungen zu schaffen, die eine weitgehende Internalisierung externer Effekte unterstützen. So ist es laut §1 des EEG unter anderem auch Zweck des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes, „...die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, ...“. Um die Wirkung des EEG im Hinblick auf die Internalisierung externer Kosten aufzuzeigen, sind in Abbildung 3.2 die durch EEG-Strom vermiedenen externen Kosten der EEG-Förderung im Jahr 2005 gegenübergestellt.

Der durch die EEG-Förderung angestoßene Ausbau erneuerbarer Energien führt zu einer Substitution von Strom aus konventionellen Kraftwerken durch Strom aus erneuerbaren Energien und damit zu einer Vermeidung von Umweltschäden und den daraus resultierenden externen Kosten. Bei der Berechnung der durch Strom aus erneuerbaren Energien vermiedenen Emissionen spielen die Annahmen zum substituierten konventionellen Strom eine wichtige Rolle, hier wurden die Annahmen aus dem ISI-Gutachten zur CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien (Klobasa u. Ragwitz, 2005) aufgegriffen. Da die Stromerzeugung aus Biomasse zu nicht vernachlässigbaren Emissionen führen kann, wird der Stromerzeugung aus Biomasse vereinfachend nur eine Gutschrift vermiedener CO₂-Emissionen zugeschrieben.

Durch den nach EEG vergüteten Strom konnten in Deutschland im Jahr 2005 die Emissionen von 38 Mill. t CO₂, 13 kt SO₂, 27 kt NO_x und 3 kt Feinstaub vermieden werden. Mit den in Kapitel 2 abgeleiteten Ansätzen zur monetären Bewertung entspricht dies vermiedenen externen Kosten in Höhe von ca. 2,8 Mrd. €. Dem steht eine EEG-Vergütung in Höhe von 4,3 Mrd. € gegenüber, bei einem anlegbaren Strompreis von 4,2 ct/kWh entspricht dies einer Förderung durch das EEG in Höhe von 2,4 Mrd. €³. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die EEG-Aufwendungen zur Förderung erneuerbarer Energien durch vermiedene externe Kosten vollständig kompensiert werden. Unabhängig von verschiedenen anderen Zielen, die mit dem EEG verfolgt werden, „lohnt“ sich also die Förderung erneuerbarer Energien alleine aufgrund der vermiedenen Umweltschäden und den damit verbundenen volkswirtschaftlichen Nutzen.

³ In der hier durchgeführten Analyse wird nicht berücksichtigt, dass einerseits auch Instrumente wie Ökosteuer und Emissionshandel zur Internalisierung externer Kosten beitragen, dass andererseits aber mit dem EEG auch verschiedene andere industrie- und gesellschaftspolitische Ziele verfolgt werden. Es werden hier vereinfachend nur die Aufwendungen der EEG-Förderung den durch EEG-Strom vermiedenen externen Kosten gegenübergestellt.

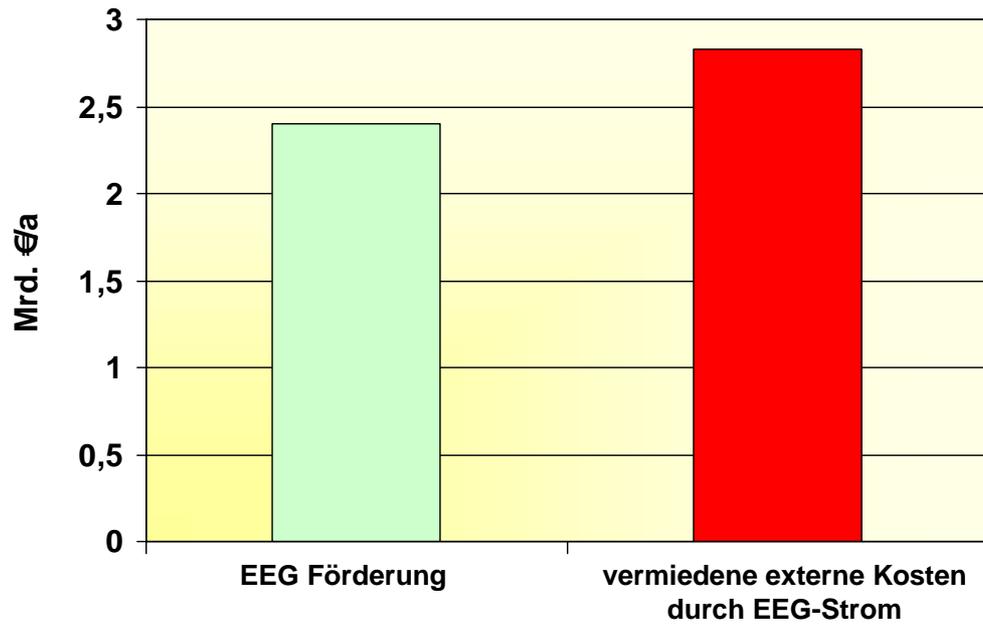


Abbildung 3.2: Vermiedene externe Kosten durch die Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, im Vergleich mit EEG-Förderung im Jahr 2005

4 Externe Kosten im energiepolitischen Kontext - Charakterisierung weiterer möglicher Anwendungsfelder

4.1 Anwendungsfelder für externe Kosten in der Energie-, Umwelt- und Klimapolitik

Grundsätzlich kann jede energie-, umwelt- und klimapolitische Maßnahme, die zu einer Verminderung der klassischen Luftschadstoffe wie SO₂ und NO_x und der Emissionen von CO₂ und weiteren Treibhausgasen beiträgt, als Maßnahme zur Internalisierung der dadurch verursachten externen Kosten angesehen werden. Dennoch gibt es spezielle Anwendungsfelder bzw. Maßnahmenarten, bei denen die externe-Kosten-Argumentation stärker im Vordergrund steht.

Eines der wichtigsten Anwendungsfelder für externe Kosten, nämlich die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern, steht dabei im Mittelpunkt dieser Studie und wurde bereits in Kapitel 3 umfassend analysiert. Als weitere wichtige Anwendungsfelder, für die die Argumentation mit externen Kosten von Stromerzeugungstechnologien eine ähnliche Rolle wie bei den erneuerbaren Energien spielen könnte, werden im Folgenden

- der Emissionshandel,
- Emissions- und Energiesteuern sowie
- die finanzielle Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung.

untersucht.

Dabei handelt es sich nur beim Emissionshandel und bei den Emissions- und Energiesteuern um echte Internalisierungsinstrumente, bei denen die Höhe und Struktur der Belastung zumindest theoretisch an den externen Kosten bemessen werden könnte. Die Förderung der erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung im Rahmen des EEG bzw. des KWK-Gesetzes hingegen erfolgt über finanzielle Anreize, wobei die Vergütungssätze für Strom aus den verschiedenen erneuerbaren Energien bzw. die Zuschlagssätze für die verschiedenen KWK-Anlagen nicht direkt aus den externen Kosten abgeleitet werden. Ein Motiv für die Förderung ist der Ausgleich der Wettbewerbsnachteile durch unvollständige Internalisierung der externen Kosten der fossilen bzw. atomaren Energieversorgung.

Darüber hinaus gibt es weitere mögliche Anwendungsfelder für externe Kosten, die jedoch nicht im Zentrum dieser Untersuchung stehen, die sich auf die externen Kosten von Stromerzeugungstechnologien konzentriert. Dazu gehören insbesondere der Sektor Verkehr und der Gebäudebereich, die im Mittelpunkt einer im Auftrag des Umweltbundesamt durchgeführten Untersuchung von INFRAS, Schweiz und dem FiFo Köln stehen, die sich mit der Berücksichtigung von externen Kosten bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen von öffentlichen Investitionen befasst⁴.

⁴ INFRAS/FiFo (Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln): Praktische Anwendung der Methodenkonvention: Möglichkeiten der Berücksichtigung externer Kosten bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen von öffentlichen Investitionen. Abgeschlossen in 2006

Der Verkehrssektor stellt denjenigen Bereich dar, für den die aus emissionsbedingten externen Kosten neben dem Bereich der Stromerzeugung bisher am umfassendsten untersucht sind (siehe z. B. Maibach et al. 2000 und 2004; Friedrich/Bickel 2001). Im Transportsektor dienen externe Kosten auch verstärkt als Begründung für politische Maßnahmen. Dies kommt auch in den dritten nationalen Kommunikationen im Rahmen der UN-Rahmenkonvention zum Klimawandel⁵ zum Ausdruck. In den Länderberichten, in denen die externen Kosten als Argument auftauchen (neben Deutschland v. a. Österreich, Schweden, Schweiz, Frankreich), geschieht dies überwiegend im Zusammenhang mit dem Transportsektor, teilweise auch mit Bezug auf den Klimawandel. Lediglich im deutschen Länderbericht (Bundesregierung 2001) werden die externen Kosten in breiterem Rahmen als Begründung für politische Maßnahmen herangezogen, und zwar mit Bezug auf Ökosteuern, Erneuerbare Energien und ebenfalls den Transportsektor.

Im Gebäudebereich spielen die externen Kosten zum einen bei öffentlichen Bauten eine Rolle, wenn es um die Berücksichtigung von Umweltkriterien bei öffentlichen Entscheidungen geht. Inwieweit es hier in Deutschland und anderen Ländern bereits Ansätze zur Internalisierung externer Kosten bei öffentlichen Bauaufträgen gibt, wird in der oben erwähnten Untersuchung von Infrac und Fifo umfassend dargestellt. Auch politischen Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs im Gebäudebereich wie die EU-Richtlinie zum Energieverbrauch in Gebäuden von 2002 oder die deutsche Energieeinsparverordnung von 2002 und ihre für 2006 geplante Novellierung oder auch finanzielle Maßnahmen wie die KfW-Förderprogramme zur energetischen Gebäudesanierung, ließen sich mit der Verminderung externen Kosten begründen. Bisher gibt es in diesem Bereich aber keine verstärkte Argumentation mit externen Kosten, zumindest nicht auf quantitativer Ebene. Dies gilt nicht nur für Maßnahmen zur Energieeinsparung in Gebäuden, sondern generell für Maßnahmen der rationellen Energienutzung. Eine rationelle Energienutzung vermindert nicht nur die Nachfrage nach Energie, sondern auch die mit dem Energieverbrauch verbundenen Emissionen, d. h. sie reduziert die externen Kosten des Energieverbrauchs (Ostertag et al. 2000). Bisher wird dieser Aspekt bei der Bewertung des volkswirtschaftlichen Nutzens von Maßnahmen zur Förderung der rationellen Energienutzung höchstens auf qualitativer Ebene herangezogen, nicht jedoch im Sinne einer gesamtwirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Analyse einer Maßnahme.⁶

Ein weiteres mögliches Anwendungsfeld für externe Kosten stellen die zunehmenden Aktivitäten auf EU-Ebene im Hinblick auf eine integrierte Produktpolitik (IPP) dar. Hier dienen die emissionsbedingten externen Kosten als eine Begründung für diese Aktivitäten (vgl. z. B. Biointelligence Service/O2 France 2003). Das betrifft auch die Diskussion um die geplante Öko-Design-Richtlinie der EU.

Dieser kurze Überblick zeigt, dass auch auf EU-Ebene die Argumentation mit den externen Kosten weit überwiegend auf qualitativer Ebene erfolgt, obwohl seit Beginn der 90er Jahre parallel laufende umfassende Forschungsarbeiten zur quantitativen Erfassung der externen Kosten stattgefunden haben. Eine Ausnahme stellt der Gemeinschaftsrahmen für staatliche Umweltschutzbeihilfen (Europäische Kommission 2001) dar. Hier wird die Gewährung von

⁵ http://unfccc.int/national_reports/annex_i_natcom/submitted_natcom/items/1395.php

⁶ So auch in der geplanten EU-Direktive zur Förderung der Endenergieeffizienz und der Energiedienstleistungen: *"Improved end-use energy efficiency will also contribute to the reduction of primary energy consumption, to the mitigation of CO₂ and other greenhouse gas emissions and thereby to the prevention of dangerous climate change."* (Council of the European Union, Document 15228/05, Brussels, 1 December 2005).

Beihilfen für den Einsatz von erneuerbaren Energien in neuen Kraftwerken auf 0,05 €/kWh_{el} beschränkt und dieser Wert explizit mit den vermiedenen externen Kosten aus konventioneller Stromerzeugung begründet.

4.2 Anwendungsfeld Emissionshandel

Bereits im Grünbuch zum Handel mit Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union (EU-Kommission 2000) wird ausgeführt, dass der Emissionshandel zur kostengünstigen Erreichung der Emissionsziele aus dem Kyoto-Protokoll bzw. der EU Lastenvereinbarung (Burden Sharing) eingesetzt werden soll. Damit wird bereits hier ein direkter Bezug zu den schädlichen Umweltwirkungen von THGs hergestellt, d. h. der Emissionsrechtehandel kann als direktes Instrument zur Internalisierung der externen Kosten des Klimawandels angesehen werden. Die Europäische Union hat im Oktober 2003 die so genannte Emissionshandelsrichtlinie (2003/87/EG) verabschiedet, mit der der Treibhausgasemissionshandel zu Beginn des Jahres 2005 eingeführt wurde. Betroffen sind über 10 000 emissionsintensive Anlagen aus Energiewirtschaft und Industrie. Allein in Deutschland fallen rund 1 800 Anlagen unter die Emissionshandelsrichtlinie.

Der Handel mit Emissionsrechten (Zertifikaten) im Rahmen eines Cap-and-Trade-Systems soll bewirken, dass eine vorgegebene Begrenzung der Emissionen mit möglichst geringen Kosten erreicht werden kann. Dazu muss der Staat in einem *ersten Schritt* die vorgesehene Gesamtmenge an Emissionsrechten festlegen. Theoretisch könnte diese Zielfestlegung auf der Grundlage der externen Kosten des Klimawandels erfolgen, d. h. auf Grundlage einer cost-benefit-Analyse. Faktisch wird die zu verminderte Menge an Emissionen jedoch aus ökologischen Überlegungen abgeleitet. In einem *zweiten Schritt* wird dann die festgelegte Gesamtmenge vom Staat in der so genannten Anfangallokation den verpflichteten Emittenten zugeteilt. Die Zuteilung der Emissionsrechte kann entweder kostenlos oder gegen Entgelt z.B. durch Auktionen erfolgen. Im europäischen System für den Handel mit Treibhausgasemissionsrechten müssen die Mitgliedsstaaten gemäß der EU-Richtlinie von 2003 in der laufenden Handelsperiode 2005-2007 mindesten 95 % der Zertifikate gratis zuteilen, in der zweiten Handelsperiode 2008-2012 mindestens 90 %, d. h. die Auktionierung spielt bisher keine oder nur eine untergeordnete Rolle. In einem *dritten Schritt* können die verpflichteten Emittenten dann durch den Verkauf oder Kauf von Emissionsrechten selbst entscheiden, wie viele Schadstoffe sie emittieren. Emittenten dürfen über ihre anfangs zugeteilte Emissionsmenge hinaus emittieren, wenn sie eine entsprechende Anzahl an Emissionsberechtigungen (von Emittenten, die unter ihrem Limit bleiben) erwerben. Da Emittenten mit hohen Vermeidungskosten Emissionsberechtigungen hinzukaufen und Emittenten mit niedrigen Vermeidungskosten Emissionsberechtigungen verkaufen können, lassen sich durch den Handel die Umweltziele kosteneffizient erreichen. Der Emissionshandel bewirkt unter Ausnutzung der Marktmechanismen, dass die zur Erreichung eines bestimmten Umweltziels erforderlichen Emissionsminderungen dort realisiert werden können, wo sie mit den geringsten Kosten verbunden sind (statische Effizienz des Instruments). Am Markt stellt sich ein Preis für die Emissionsberechtigungen ein, der Angebot und Nachfrage zum Ausgleich bringt. Dieser Preis, der beim Verkauf von Emissionsberechtigungen erzielt werden kann, setzt auch Anreize, durch Forschung, Entwicklung und Innovationen weitere Minderungspotenziale zu erschließen, da die frei werdenden Emissionsberechtigungen am Markt verkauft werden können (dynamische Effizienz des Instruments) (Betz et al. 2005). Im Hinblick auf die o. g. Kriterien für die Auswahl von Internalisierungsinstrumenten erfüllt der Emissionshandel damit weitgehend die Kriterien der Effizienz und Flexibilität sowie der Förderung der technologischen Innovationen (statische und dynamische Effizienz des Systems). Einen Anhaltspunkt für den durch den Emissionshandel bewirkten Grad der Internalisierung der externen Kosten des Klimawandels lässt

sich durch einen Vergleich des sich am Markt einstellenden Zertifikatepreises mit den externen Kosten des Klimawandels gewinnen. Stellt man die in dieser Untersuchung vorgeschlagenen Schätzwerte für die Schadenskosten des Klimawandels („bester Schätzwert“: 70 €/tCO₂; unterer Grenzwert: 15 €/tCO₂; hoher Schätzwert: 280 €/tCO₂) dem derzeitigen Marktpreis für CO₂-Zertifikate in Höhe von rund 26-27 €/tCO₂⁷ gegenüber, so wäre beim unteren Schätzwert bereits eine Internalisierung in den Preisen erreicht, während der Internalisierungsgrad beim "besten" Schätzwert bei rund 35 % läge.

Diese Interpretation des Zertifikatepreises als bereits internalisierte Kosten des Klimawandels ist dabei unabhängig davon, ob die Anfangsallokation mittels Gratiszuteilung oder Auktionierung erfolgt. Denn durch Auktionierung von Emissionsberechtigungen ändert sich der Zertifikatepreis nicht systematisch gegenüber einer Gratisvergabe, solange insgesamt dieselben Mengen an Emissionsrechten ausgegeben werden (theoretische Neutralität des Zuteilungsverfahrens). Eine Auktionierung führt allerdings zu anderen Verteilungswirkungen als eine Gratisvergabe, die primär zu einer Begünstigung der direkten Emittenten führt. Bei einer Auktionierung der Emissionsrechte hingegen zahlt zunächst der Verursacher der direkten Emissionen für den Erwerb der benötigten Rechte. Im Hinblick auf das Auswahlkriterium der Gerechtigkeit (wer trägt die externen Kosten?) weist die primär dem Verursacherprinzip folgende Auktionierung Vorteile gegenüber der Gratisvergabe auf. Das tatsächliche Ausmaß der finanziellen Belastung der verursachenden Emittenten hängt allerdings auch bei einer Auktionierung von den Möglichkeiten ab, die Mehrkosten zu überwälzen. Vorteile hat die Auktionierung auch im Hinblick auf das Kriterium der Minimierung der Transaktionskosten, die bei der Gratisvergabe höher ausfallen.

4.3 Anwendungsfeld Emissions- und Energiesteuern

Verglichen mit dem relativ neuen Instrument des Emissionsrechtehandels ist die Besteuerung der Energieerzeugung und –nutzung ein klassisches Instrument zur Internalisierung der durch energiebedingte Emissionen entstehenden externen Kosten. Aus ökonomischer Sicht ist dies ein wesentliches Argument für die Besteuerung des Energieverbrauchs (Newbery 2005). Während beim Emissionshandel die Gesamtmenge an Emissionen vorgegeben und der Zertifikatepreis endogen über den Markt bestimmt wird, geben Emissions- oder Energiesteuern den Preis vor und die Emissionsmenge ergibt sich endogen. Theoretisch könnte auch die Höhe der Besteuerung auf der Grundlage konkreter Zahlenwerte für die externen Kosten bestimmt werden. Auch wenn die Unsicherheiten noch groß sind, könnten Schätzwerte, wie Sie beispielsweise in dieser Untersuchung abgeleitet wurden, zumindest Anhaltspunkte für die Größenordnung der Steuerhöhe geben. In der Praxis geschieht dies jedoch nur in Ausnahmefällen und die Höhe der Besteuerung bleibt häufig kontrovers (ECOTEC 2001; Pearce 2001). Verglichen mit dem Instrument des Emissionshandels ist die Zielerreichung im Sinne einer gewünschten Menge an vermiedenen Emissionen bei der Besteuerung als unsicherer einzustufen. Denn während beim Emissionshandel die vorgegebene Emissionsmengenreduzierung sicher erreicht wird, hängt die ökologische Wirkung der Besteuerung von der gewählten Höhe des Steuersatzes ab. Wurde dieser zu gering angesetzt, wird die gewünschte Emissionsreduzierung nicht erreicht, bei einem zu hohen Steuersatz schießt das Instrument über das gewünschte Ziel hinaus.

⁷ Stand: März 2006 (siehe <http://www.co2-handel.de/>)

Auf europäischer Ebene ist im Zusammenhang mit der Besteuerung als Internalisierungsinstrument vor allem die EU-Richtlinie zur Harmonisierung der Energiebesteuerung (European Union 2003) zu nennen. Auch wenn sie vor allem vor dem Hintergrund der Schaffung eines einheitlichen Marktes für Güter und Dienstleistungen zu sehen sind, so hat diese erstmals zur Festlegung von Mindeststeuersätzen für alle Energieprodukte im gesamten EU-Raum geführt.

Im deutschen Steuerrecht werden seit vielen Jahren umweltpolitische Gesichtspunkte berücksichtigt. Hinzu kommen spezielle Abgaben wie z.B. Straßennutzungsgebühren (einen Überblick gibt Bundesministerium der Finanzen 2003). Im Hinblick auf die externe-Kosten-Argumentation sind für Deutschland insbesondere die Gesetze zur ökologischen Steuerreform⁸ relevant, die ja explizit das Ziel hatten, durch eine schrittweise Verteuerung der Energiepreise die rationelle Energienutzung und den Einsatz erneuerbarer Energien zu fördern. Gleichzeitig sollen positive Effekte auf dem Arbeitsmarkt erzielt werden, indem das Steueraufkommen zum überwiegenden Teil zur Senkung und Stabilisierung der Rentenversicherungsbeiträge verwendet wird (z.B. BMU 2004). Im Rahmen der ökologischen Steuerreform wurden zwischen dem 1.4.1999 und dem 1.1.2003 in fünf Stufen die Steuersätze auf Mineralölprodukte erhöht und eine Steuer auf Strom eingeführt und schrittweise angehoben. Eine Ableitung der Höhe der Steuersätze aus den externen Kosten der Energienutzung erfolgte jedoch nicht.

Die bisher vorliegenden Evaluierungen der Ökologischen Steuerreform (wie Bach et al. 2001, IER/Prognos 2004, Kohlhaas 2004) zeigen, dass dieses Instrument einen substantieller Beitrag zur Verminderung der CO₂-Emissionen in Deutschland leisten kann. Die genaue Höhe dieses Beitrages ist allerdings nur mit Unsicherheiten zu bestimmen, da die Modellergebnisse stark divergieren und sensibel sind bezüglich der getroffenen Annahmen (Schleich 2006). So errechnet das DIW (Kohlhaas 2005) auf der Grundlage eines allgemeinen Gleichgewichtsmodells (LEAN) für das Jahr 2003 eine CO₂-Reduktion um knapp 20 Mio. t p.a., während IER/Prognos (2004) mit einem Elastizitätsansatz nur auf 6,4 Mio. t kommen.

Speziell mit Blick auf die Stromsteuer, deren Aufkommen im Jahr 2004 rund 6,6 Mrd. Euro betrug (Bundesministerium der Finanzen 2006), könnten Schätzwerte zu den externen Kosten der Stromerzeugung, wie sie in dieser Untersuchung abgeleitet wurden, auch verwendet werden, um Anhaltspunkte für den durch die ökologische Steuerreform erreichten Internalisierungsgrad zu erhalten. Analog zum Vorgehen bei den erneuerbaren Energien (vgl. Kapitel 3), könnten die hier für verschiedene Luftschadstoffe abgeleiteten spezifischen Schadenskosten mit den bei der Stromerzeugung verursachten Emissionen verknüpft und dem Aufkommen aus der Stromerzeugung gegenübergestellt werden.

4.4 Anwendungsfeld Kraft-Wärme-Kopplung

Auch Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz wie zum Beispiel die verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung können zur Vermeidung externer Kosten führen. Die Argumentation verläuft hier ähnlich wie bei den erneuerbaren Energien.

⁸ Gesetz zum Einstieg in die ökologische Steuerreform vom 24. März 1999, Gesetz zur Fortführung der ökologischen Steuerreform vom 16. Dezember 1999 und Gesetz zur Fortentwicklung der ökologischen Steuerreform vom 23. Dezember 2002.

Auf EU-Ebene wird der verstärkte Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung auf verschiedenen Ebenen gefördert, wobei die Internalisierung externer Kosten und Umweltnutzen explizit zur Begründung herangezogen wird, allerdings wiederum ohne Quantifizierung (z.B. European Commission 2001). Bereits der EU-Aktionsplan zur Verbesserung der Energieeffizienz (Europäische Kommission 2000) enthält eine Reihe von Maßnahmen zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung. Die 2004 in Kraft getretene Richtlinie 2004/8/EC zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung (Europäische Union 2004) sieht das Potenzial der hoch effizienten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) u. a. als Mittel zur Einsparung von Primärenergie, zur Vermeidung von Netzverlusten und der Verringerung von Emissionen, insbesondere von Treibhausgasemissionen. Die Richtlinie enthält in diesem Zusammenhang einen expliziten Verweis auf die Notwendigkeit der Internalisierung externer Kosten. Als weitere Motivationen für die politische Flankierung der KWK nennt die EU-Richtlinie den Beitrag der KWK zur Stärkung des Wettbewerbs auf den Strommärkten, auch mit Blick auf neue Marktteilnehmer sowie die Bedeutung leistungsfähiger Kraftwerke mit einer hohen Primärenergieausnutzung für die Versorgungssicherheit.

In Deutschland erfolgt die Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung vor allem durch das am 1. April 2002 in Kraft getretene Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der KWK (KWKG; BGBl. I 2002 S. 1092). Das Gesetz dient der Umsetzung eines Teils der freiwilligen Vereinbarung der Bundesregierung mit der deutschen Wirtschaft zur Förderung der KWK aus dem Jahr 2001⁹. Danach soll bis zum Jahr 2005 – im Vergleich zum Basisjahr 1998 – durch die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung eine Minderung der CO₂-Emissionen in einer Größenordnung von 10 Mio. t und bis zum Jahr 2010 von insgesamt bis zu 23 Mio. t, mindestens aber 20 Mio. t erzielt werden. Mit dem KWKG sollen die genannten Minderungsbeiträge etwa zur Hälfte abgedeckt werden.

Mit dem KWKG ist ein Fördermodell etabliert worden, nach dem die Betreiber von KWK-Anlagen für den in das Netz der allgemeinen Versorgung eingespeisten KWK-Strom eine Zuschlagzahlung erhalten. Die Förderung wird dabei nach verschiedenen Anlagengruppen differenziert:

- Alte Bestandsanlagen, die bis zum 31. Dezember 1989 in Dauerbetrieb genommen worden sind.
- Neue Bestandsanlagen, die ab dem 1. Januar 1990 bis zum Inkrafttreten des Gesetzes in Dauerbetrieb genommen worden sind.
- Modernisierte Anlagen, die modernisiert oder durch eine neue Anlage ersetzt und nach dem Inkrafttreten des Gesetzes, spätestens jedoch bis zum 31. Dezember 2005, wieder in Dauerbetrieb genommen worden sind (wobei nur derjenige KWK-Strom gefördert wird, der *nicht* auf eine Erhöhung des Wärmeanschlusswertes des Fernwärme-Versorgungsnetzes zurückzuführen ist).
- Kleine KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis zu 2 MW, soweit sie nicht eine bereits bestehende Fernwärmeversorgung aus KWK-Anlagen verdrängen.

⁹ Vereinbarung zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der deutschen Wirtschaft zur Minderung der CO₂-Emissionen und der Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung in Ergänzung zur Klimavereinbarung vom 9.11.2000, paraphiert am 25. Juni 2001 und in Kraft getreten am 19. Dezember 2003.

- Brennstoffzellen-Anlagen.

Tabelle 4.1 zeigt die für die genannten Anlagengruppen differenzierten Zuschlagsätze. Die Förderung für die alten Bestandsanlagen läuft bis Ende 2006 und die Förderung für die neuen Bestandsanlagen Ende 2009. Auch für die modernisierten Anlagen sowie die kleinen KWK-Anlagen im Leistungsbereich von 50 kW bis 2 MW wird die Förderung Ende 2010 beendet. Nur für die kleinen KWK-Anlagen im Leistungsbereich bis 50 kW und die Brennstoffzellen reicht die Förderung über das Jahr 2010 hinaus.

Tabelle 4.1: Zuschlagsätze des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes vom 1. April 2002

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
	ct/kWh									
Alte Bestandsanlagen	1,53	1,53	1,38	1,38	0,97					
Neue Bestandsanlagen	1,53	1,53	1,38	1,38	1,23	1,23	0,82	0,56		
Modernisierte Anlagen ^{a,c}	1,74	1,74	1,74	1,69	1,69	1,64	1,64	1,59	1,59	
Kleine KWK-Anlagen ^b 50 kW - 2 MW	2,56	2,56	2,40	2,40	2,25	2,25	2,10	2,10	1,94	
Kleine KWK-Anlagen ^{b,c} bis 50 kW	5,11	für 10 Jahre ab Inbetriebnahme								
Brennstoffzellen	5,11	für 10 Jahre ab Inbetriebnahme								

Anmerkungen: ^a Nur bei Beantragung der Genehmigung bis zum 1. April 2003. - ^b Nur, wenn keine bestehende Fernwärmeversorgung aus KWK-Anlagen verdrängt wird und eine Gesamtförderung von 14 TWh für die kleinen KWK-Anlagen nicht erreicht ist. - ^c Nur bei Inbetriebnahme bis zum 31. Dezember 2005.

Das für die Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung gemäß KWKG aufgebrachte Finanzvolumen lag im Jahr 2005 bei 792 Mio. Euro. Durch die zeitliche Staffelung der Förderung erreicht das Fördervolumen im Jahr 2006 mit knapp 810 Mio. seinen höchstens Stand und wird bis 2011 auf nur noch 17 Mio. Euro absinken (VDN 2005).

Die tatsächlichen Einsparungen an CO₂ und sonstigen Emissionen der Stromerzeugung, die mit der Förderung der KWK bisher erreicht wurden bzw. bis 2010 erreicht sein werden, sind zum heutigen Zeitpunkt noch nicht abschließend zu beurteilen. Die Diskussion im Zusammenhang mit der Zwischenüberprüfung der Selbstverpflichtung sowie der Zuteilung der CO₂-Zertifikate im Rahmen des Emissionshandels zeigt, dass die dabei verwendeten Ansätze teilweise zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen (Roon 2005). Eine bereits vorliegende Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE 2005) im Auftrag einiger großer Stromerzeuger kommt zu dem Ergebnis, dass durch den Zubau, die Modernisierung und den Erhalt von KWK-Anlagen im Jahr 2005 CO₂-Einsparungen in Höhe von rund 12,7 Mio. t gegenüber dem Jahr 1998 erzielt wurden. Davon entfallen rund 9 Mio. t auf die allgemeine Versorgung, auf die das KWKG abzielt, der Rest auf die industrielle KWK. Nach diesen Abschätzungen wäre das in der Selbstverpflichtung zur KWK vereinbarte Zwischenziel von 10 Mio. t CO₂ für 2005 damit erreicht worden. Eine frühere Abschätzung des Öko-Instituts im Rahmen der Politikszenerarien III (2004) kam für den Bereich der allgemeinen Versorgung lediglich auf CO₂-Einsparungen von rund 4 Mio. t, die bis 2010 durch Maßnahmen zur Förderung der KWK erreicht werden.

Wenn endgültige Ergebnisse zu den durch das KWK-Gesetz erzielten Emissionsminderungen vorliegen, könnten die in dieser Untersuchung abgeleiteten Schätzwerte zu den externen Kosten der Stromerzeugung auch dazu genutzt werden, die durch den KWK-Ausbau vermiedenen externen Kosten zu berechnen und diese dem für die KWK-Förderung aufgewendeten Finanzvolumen gegenüberzustellen.

Interaktionen zwischen den Anwendungsfeldern

In dieser Studie wurden diejenigen Anwendungsfelder für externe Kosten vertieft untersucht, die im Zusammenhang mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren und fossilen Energieträgern relevant sind. Neben dem Erneuerbare-Energien-Gesetz sind dies insbesondere der Emis-

onshandel, die Ökologische Steuerreform und das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz. Bei einer möglichen Einbeziehung der externen Kosten in die Begründung, Ausgestaltung und Bewertung dieser umwelt- und klimapolitischen Maßnahmen sind auch mögliche Wechselwirkungen zwischen diesen politischen Instrumenten zu berücksichtigen.

Denn insbesondere durch die Einführung des europäischen Emissionshandels ergibt sich die Notwendigkeit, dieses neue Instrument mit den bisher schon auf nationaler Ebene eingesetzten Instrumenten EEG, Ökologische Steuerreform und KWKG abzustimmen. Dabei ist jeweils von Interesse, ob sich diese Instrumente gegenseitig ersetzen oder ergänzen, wie sie zusammenwirken und wie der kombinierte Instrumenteneinsatz gegebenenfalls besser aufeinander abgestimmt werden kann. Diese Fragen wurden im Zusammenhang mit der Entwicklung eines nationalen Allokationsplans (NAP) im Rahmen des EU-Emissionshandels umfassend untersucht (DIW/Fraunhofer ISI/Öko-Institut 2005).

Wenn die hier beschriebenen Instrumente auch als Anwendungsfelder für externe Kosten in Betracht gezogen werden sollten, sind mögliche Wechselwirkungen zwischen diesen Instrumenten ebenfalls zu berücksichtigen. Dabei kann auf den im Rahmen der Erstellung des NAP begonnenen Überlegungen aufgebaut werden.

5 Literatur

Awerbuch, S., Sauter, R. (2006): Exploiting the oil-GDP effect to support renewable deployment. Energy Policy, article in press.

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6V2W-4GFNGB6-1-B&_cdi=5713&_user=10&_orig=search&_coverDate=06%2F21%2F2005&_sk=999999999&_view=c&_wchp=dGLbVlz-zSkzV&_md5=3bf35ad0518be13ef18f97e46ee4146a&_ie=/sdarticle.pdf

Bach, S. et al. (2001): Die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der ökologischen Steuerreform. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Finanzen. Berlin: DIW, März 2001

Betz, R.; Rogge, K.; Schleich, J.: Flexible Instrumente im Klimaschutz. Emissionsrechtehandel, Clean Development Mechanism, Joint Implementation – Eine Anleitung für Unternehmen. Ausgabe 2005. Hrsg: Umweltministerium Baden-Württemberg. Stuttgart, Juli 2005

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2004): Die ökologische Steuerreform: Einstieg, Fortführung und Fortentwicklung zur Ökologischen Finanzreform. Februar 2004

Bundesministerium der Finanzen (2006). Die Stromsteuer.

http://www.zoll.de/b0_zoll_und_steuern/b0_verbrauchsteuern/d0_strom/index.html (zuletzt aufgesucht am 12.02.2006)

Bundesregierung (2001): Third Report by the Government of the Federal Republic of Germany in accordance with the Framework Convention of the United Nations. Berlin

Burgherr, P., Hirschberg, S., Hunt, A., Ortiz, R (2004): External costs from major accidents in non-nuclear fuel chains. In: ExternE (2004): New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies (NewExt). Publishable Report prepared for the European Commission, DG Research, Contract No. ENG1-CT2000-00129. http://www.ier.uni-tuttgart.de/public/de/organisation/abt/tfu/projekte/newext/newext_final.pdf

Clarkson, R., Deyes, K. (2002): Estimating the Social Cost of Carbon Emissions. Government Economic Service Working Paper 140, London, UK.

DIW/Fraunhofer ISI/Öko-Institut (2005): Entwicklung eines nationalen Allokationsplans im Rahmen des EU-Emissionshandels. Entwurf Endbericht des Forschungsvorhabens Nr. 20241186/03 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Karlsruhe, Dezember 2005 (nicht veröffentlicht)

Downing, T., Anthoff, D., Butterfield, R., Ceronsky, M., Grubb, M., Guo, J., Hepburn, C., Hope, C., Hunt, A., Li, A., Markandya, A., Moss, S., Nyong, A., Tol, R., Watkiss, P. (2005): Social Cost of Carbon: A Closer Look at Uncertainty. Final project report. Stockholm Environment Institute, Oxford, November 2005.

Downing, T., Watkiss, P. (2003): The Marginal Social Cost of Carbon in Policy Making: Applications, Uncertainty and a Possible Risk Based Approach. Paper presented at the DE-FRA International Seminar on the Social Costs of Carbon. July 2003.

EcoSenseLE (2006): EcoSenseLE - a simplified online version of the EcoSense model. http://ecoweb.ier.uni-stuttgart.de/ecosense_web/ecosensele_web/frame.php, März 2006

ECOTEC (2001): Study on the Economic and Environmental Implication of the Use of Environmental Taxes and Charges in the European Union and its Member States. Final Report. Brussels, April 2001

EU-Kommission (2000): Grünbuch zum Handel mit Treibhausgasemissionen in der Europäischen Union. KOM(2000) 87endgültig. Brüssel, 8.3.2000

Europäische Kommission (2000): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Aktionsplan zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Europäischen Gemeinschaft KOM(2000) 47

Europäische Kommission (2001): Mitteilungen der Kommission – Gemeinschaftsrahmen für Staatliche Umweltschutzbeihilfen. Amtsblatt Nr. C 037 vom 03/02/2001. S. 3-15

European Commission (1995 a): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 1 Summary. European Commission, Luxembourg, EUR 16520

European Commission (1995 b): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 2 Methodology. European Commission, Luxembourg, EUR 16521

European Commission (1995 c): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 3 Coal & Lignite. European Commission, Luxembourg, EUR 16522

European Commission (1995 d): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 4 Oil & Gas. European Commission, Luxembourg, EUR 16523

European Commission (1995 e): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 5 Nuclear. European Commission, Luxembourg, EUR 16524

European Commission (1995 f): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 6 Wind & Hydro. European Commission, Luxembourg, EUR 16525

European Commission (1997): Communication from the Commission. Energy for the Future: Renewable Sources of Energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan. COM(97)599final (26/11/1997)

European Commission (1999 a): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 7 Methodology 1998 update. European Commission, Luxembourg, EUR 19083

European Commission (1999 b): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 8 Global Warming. European Commission, Luxembourg, EUR 18836

European Commission (1999 c): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 9 Fuel Cycles for Emerging and End-use Technologies, Transport & Waste. European Commission, Luxembourg, EUR 18887

European Commission (1999 d): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 10 National Implementation. European Commission, Luxembourg, EUR 18528

European Commission (2001): Directive of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. Directive 2001/81/EC, Official Journal of the European Communities of 27/11/2001, pp. L309/22-30.

European Commission (2001): Third Communication from the European Community under the UN Framework Convention on Climate Change. Brussels, 20.12.2001 (SEC (2001) 2053

European Commission (2005): Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe.COM(2005) 447 prov. version. Brussels, 21.9.2005

European Commission (2006): Green Paper – A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy. COM(2006)105 final. Brussels, 8.3.2006

- European Union (2003): Council Directive 2003/96/EC of 27 October 2003 restructuring the Community framework for the taxation of energy products and electricity. Official Journal of the European Union. 31.10.2003
- FfE (Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.) (2005): CO₂-Vermeidung durch KWK in Deutschland (Kurzbericht). Untersuchung im Auftrag von EnBW AG, E.ON Energie AG und RWE Power AG. München, 25.10.2005 (www.ffe.de)
- Friedrich, R., Bickel, P. (2001) Environmental external costs of transport. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York
- Friedrich, R., U. Kallenbach, H.-H. Rogner, E. Thöne, A. Voß, H.-D. Karl (1990): Externe Kosten der Stromversorgung, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H.-VWEW, Frankfurt a.M. , 1990
- Hackl, F, Pruckner, G.J. (2000): Braucht die deutsche Umweltpolitik eine Exxon Valdez Tankerunfall? In: Perspektiven der Wirtschaftspolitik 1 (1), S. 93-114
- Hitz, S., Smith, J. (2004): Estimating global impacts from climate change. In: The Benefits of Climate Change Policies – Analytical and Framework Issues. OECD, Paris.
- Hohmeyer (1988): Social Costs of Energy Consumption. Spinger Verlag, Berlin
- Hohmeyer, O. (2002): Vergleich externer Kosten der Stromerzeugung in Bezug auf das Erneuerbare Energien Gesetz. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA Texte 06/02
- Hohmeyer, O., Gärtner, M. (1992): The costs of climate change – a rough estimate of orders of magnitude. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- Horowitz, J., McConnell, K. (2002): A Review of WTA/WTP Studies. Journal of Environmental Economics and Management, 44 (3), 426-447.
- IER/Prognos (2004): Analyse der Wirksamkeit von CO₂-Minderungsmaßnahmen im Energiebereich und ihre Weiterentwicklung, Endbericht an das Ministerium für Wirtschaft und Arbeit. Basel, Stuttgart
- IPCC (2000): Emission Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC (2001a): Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers. The IPCC Third Assessment Report. Geneva
- IPCC (2001b): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, Cambridge University Press.
- Kapp, W.S. (1979): Soziale Kosten der Marktwirtschaft. Frankfurt: Fischer
- Kemfert, C., Schumacher, K. (2005): Cost of inaction and Costs of Action in Climate Protection. Final Report for the Federal Ministry for the Environment. Berlin, July 2005
- Klobasa, M., Ragwitz, M. (2005): CO₂-Minderung im Stromsektor durch den Einsatz erneuerbarer Energien. Bericht für die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik im Auftrag des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, Januar 2005.
- Kohlhaas, M. (2005): Gesamtwirtschaftliche Effekte der Ökologischen Steuerreform. Band II des Endberichts für das Vorhaben: "Quantifizierung der Effekte der Ökologischen Steuerreform auf Umwelt, Beschäftigung und Innovation". Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes. August 2005

- Krewitt, W., Nitsch, J.(2003): The German Renewable Energy Sources Act – an investment into the future pays off already Today. In: Renewable Energy 28 (2003) S. 533-542
- Kucera, V., Tidblad, J., Henriksen, J. et al. (1995): Statistical analysis of 4 year materials exposure and acceptable deterioration and pollution levels – UN-ECE ICP on Effects on Materials, Including Historic and Cultural Monument. Report No. 18, Swedish Corrosion Institute, Stockholm, 1995.
- Maibach M et al. (2004): External Costs of Transport – Update Study. Final Report to the International Union of Railways (UIC), Paris. Zurich, Karlsruhe, October 2004.
- Maibach, M. et al. (2000): External Costs of Transport. Final Report to the International Union of Railways (UIC), Paris, Zurich, Karlsruhe, April 2000
- Marheineke, T. (2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken. Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 87, Universität Stuttgart.
- Markandya, A., Tamborra, M. (Eds.) (2002): Green accounting in Europe: a comparative study. Vol. 2 FEEM Series - Economics, Energy, Environment. Edward Publisher
- Markandya, A.; Longo, A. (2005): Identification of Options and Policy Instruments for the Internlisation of External Costs of Electricity Generation. FEEM Working Papers 74.05. <http://www.feem.it/Feem/Pub/Publications/WPapers/WP2005-074.htm>
- Met Office (2005): International Symposium on the Stabilisation of Greenhouse Gases. Report of the Steering Committee, Hadley Centre, Met Office, UK, 3—5- Feb 2005-12-31
- Nakicenovic, N., Riahi, K. (2003): Scenario Data for MESSAGE Runs in the Context of the Future Development of the Kyoto-Protocol. Externe Expertise zum WBGU-Sondergutachten “Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert“. http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex03.pdf
- National Priorities Project (2006): <http://nationalpriorities.org/> März 2006
- Newbery, D.M.(2005): Why Tax Energy? Towards a More Rational Policy. In: The Energy Journal, Vol. 26, No. 3, p1-39
- NewExt (2004): Friedrich, R., Rabl, A., Hirschberg, S., Desaignes,B., Markandya, A., de Nocker, L.: New Elements für the Assessment of External Costs from Energy Technologies. Publishable Report prepared for the European Commission, DG Research, Contract No. ENG1-CT2000-00129. http://www.ier.uni-tuttgart.de/public/de/organisation/abt/tfu/projekte/newext/newext_final.pdf
- Nitsch, J., W. Krewitt, M. Pehnt, G. Reinhardt, M. Fishedick u.a. „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.“ Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 901 41 803). DLR, ifeu, WI, Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal, März 2004. <http://www.bmu.de/erneuerbare/energien/doc/5650.php>
- ORNL (1994 a): Estimating Fuel Cycle Externalities: Analytical Methods and Issues. Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Report No. 2, Washington DC, McGraw-Hill/Utility Data Institute
- ORNL (1994 b): Estimating Externalities of Coal Fuel Cycles. Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Report No. 3, Washington DC, McGraw-Hill/Utility Data Institute

- ORNL (1995 a): Estimating Externalities of Natural Gas Fuel Cycles. Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Report No. 4, Washington DC, McGraw-Hill/Utility Data Institute
- ORNL (1995 b): Estimating Externalities of Oil Fuel Cycles. Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Report No. 5, Washington DC, McGraw-Hill/Utility Data Institute
- ORNL (1995 c): Estimating Externalities of Hydro Fuel Cycles. Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Report No. 6, Washington DC, McGraw-Hill/Utility Data Institute
- ORNL (1995 d): Estimating Externalities of Biomass Fuel Cycles. Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Report No. 7, Washington DC, McGraw-Hill/Utility Data Institute
- ORNL (1995 e): Estimating Externalities of Nuclear Fuel Cycles. Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Report No. 8, Washington DC, McGraw-Hill/Utility Data Institute
- Ostertag, K. et al. (2000): *Energiesparen – Klimaschutz, der sich rechnet. Ökonomische Argumente in der Klimapolitik.* Heidelberg: Physica-Verl.
- Ottinger, R., Wooley, D., Robinson, N., Hodas, D., Babb, S., et al. (1990): *Environmental Costs of Electricity.* Pace University Center for Environmental Legal Studies, New York, Oceana Publications
- Pearce, D. (2001): *Energy Policy and Externalities: An Overview.* Paper prepared for OECD Nuclear Energy Agency. Keynote address to Workshop on Energy Policy and Externalities: the Life Cycle Analysis Approach. Paris, 15 -16 November 2001
- Pearce, D., Cline, W., Achanta, A., Fankhauser, S., Pachauri, R., Tol, R., Vellinga, P. (1996): *The social costs of climate change: greenhouse damage and the benefits of control.* In: IPCC, *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change.* Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Pigou, A.C. (1912): *Wealth and Welfare.* London
- Pittini, M., Rahman, M. (2004): *The social cost of carbon: key issues arising from a UK review.* In: *The Benefits of Climate Change Policies – Analytical and Framework Issues.* OECD, Paris.
- Plesch, D., G. Austin, F. Grant (2005): *Britain's Energy Future: Securing the 'Home Front'.* The Foreign Policy Centre, 49 Chalton Street, London NW1 1HY, UK
<http://fpc.org.uk/fsblob/575.pdf>
- Politiksznarien für den Klimaschutz III (Hrsg.: Markewitz, P., Ziesing, H.-J.) (2004): *Langfristszenarien und Handlungsempfehlungen ab 2012. Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment Band 50.* Forschungszentrum Jülich 2004.
- Pope C A, Thun M J, Namboodri M M *et al.* (1995) Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *Am. J. Resp. Critical Care Med.* 151:669–674
- Pope. C., R. Burnett, M. Thun, E. Calle, D. Krewski, K. Ito, G. Thurston (2002): Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long term exposure to fine particulate air pollution. *J. Amer. Med. Assoc.*, vol 287(9), 1132-1141.

- Rabl, A. et al. (Eds.) (2005) Externalities of Energy: Extension of accounting framework and policy applications. Final Technical report prepared for the European Commission, Contract ENG1-CT2002-00609
- Roon, S. v. (2005): Bewertung des Klimaschutzeffektes durch Kraft-Wärme-Kopplung. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 55 (2005) H. 11, S. 774-777
- Rowe, R., C. Lang, L. Chestnut, D. Latimer, D. Rae, S. Bernow, D. White (1995): The New York Electricity Externality Study. Oceana Publications, Dobbs Ferry, New York
- Schleich, J. (2006): Methoden und Ergebnisse zur Evaluierung der Ökosteuern in Deutschland. Präsentation auf dem Workshop zur Umsetzung der Energieeffizienz- und – dienstleistungsrichtlinie (EU EDR) am 30./31. Januar 2006 im BMWi, Berlin
<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Energieeinsparung/energieeffizienz-workshop-national.html>
- Schulz, W., Schulz, E. (1991): Zur umweltpolitischen Relevanz von Nutzen-Kosten-Analysen in der Bundesrepublik Deutschland. In: Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 3/91, S. 299-337
- Tol, R. (2005): The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. Energy Policy 33 (2005) 2064-2074.
- Tol, R., Downing, T. (2000): The marginal costs of climate changing emissions. ExternE working paper. September 2000.
- UN-ECE (1999): Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution – Protocol to the 1979 Convention on long range transboundary air pollution to abate acidification, eutrophication and ground-level ozone. UNECE Environment and Human Settlements Division.
http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.htm
- US-NEPD (2001): National Energy Policy – Reliable, Affordable, and Environmentally Sound Energy for America’s Future. Report of the National Energy Policy Development Group, May 2001. <http://www.whitehouse.gov/energy/>
- VDN (Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW) (2005): Entwicklung bei KWK 2002 – 2011. Aktualisiert nach Datenerhebungen durch VDN. Stand: 23.09.2005
<http://www.vdn-berlin.de/>
- Watkiss, P., Anthoff, D., Downing, T., Hepburn, C., Hope, C., Hunt, A., Tol, R. (2005): The Social Cost of Carbon (SCC) Review – Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment. Final Report. AEA Technology Environment, Harwell, November 2005
- WBGU (2003a): Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin, 2003.
- WBGU (2003b): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Hauptgutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 2003.
- WHO (2000): Climate Change and Human Health: Impact and Adaptation. Genf.

Abkürzungen

EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
IPCC	International Panel on Climate Change
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NMVOG	Non methane volatile organic compounds
PM ₁₀	Particulate Matter; aerodynamischer Durchmesser < 10 µm
SCC	Social Costs of Carbon
WBGU	Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltfragen
WTA	Willingness-to-accept
WTP	Willingness-to-pay