

Energie und Umwelt (Beitragsreihe)

Hrsg.: Martin Pehnt¹ und Eckard Helmers²

¹ Institut für Energie und Umwelt – Ifeu, Wilckensstr. 3, D-69120 Heidelberg (martin.pehnt@ifeu.de)

² Fachhochschule Trier, Umweltcampus Birkenfeld, Postfach 1380, D-55761 Birkenfeld (e.helmerts@umwelt-campus.de)

Die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur fossilen Stromerzeugung

Wolfram Krewitt

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart (wolfram.krewitt@dlr.de)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2007.06.193>

Bitte zitieren Sie diesen Beitrag wie folgt: Krewitt W (2007): Die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur fossilen Stromerzeugung. UWSF – Z Umweltchem Ökotox 19 (3) 144–151

Zusammenfassung

Ziel und Hintergrund. Die Bereitstellung und Nutzung von Energie führt zu Umweltbelastungen, die erhebliche volkswirtschaftliche Kosten verursachen. Da sich diese Kosten nicht in den Energiepreisen widerspiegeln, haben die Verursacher wegen falscher Preissignale keinen Anreiz, ihr Verhalten zu ändern. Die Umwelt wird über das optimale Maß hinaus in Anspruch genommen.

Die Quantifizierung externer Kosten ist seit vielen Jahren Gegenstand intensiver Forschungsaktivitäten, insbesondere auch durch die von der Europäischen Kommission geförderten ExternE-Projekte. Abschätzungen von externen Kosten wurden auf europäischer Ebene zur Begründung verschiedener umweltpolitischer Maßnahmen verwendet. Allerdings ist die Quantifizierung externer Kosten gerade in den Bereichen, in denen möglicherweise große Umweltschäden zu erwarten sind, noch mit sehr großen Unsicherheiten verbunden. Trotzdem benötigt die Politik einen Richtwert zur Bewertung energie- und umweltpolitischer Maßnahmen.

Schwerpunkte. Auf der Grundlage einer kritischen Diskussion der vorliegenden Ansätze werden Empfehlungen zur Berechnung externer Kosten durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich mit fossilen Energieträgern abgeleitet.

Ergebnisse und Diskussion. Die heutigen Marktpreise spiegeln die volkswirtschaftlichen Kosten der Stromerzeugung nur unzureichend wider. Die Vernachlässigung externer Kosten, die für konventionelle fossile Kraftwerke in der Größenordnung der betriebswirtschaftlichen Stromgestehungskosten liegen können, führt zu Wettbewerbsnachteilen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Um die durch das Vorliegen externer Effekte bestehenden Marktverzerrungen abzubauen, müssen von der Politik angemessene Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine weitgehende Internalisierung externer Effekte unterstützen.

Schlussfolgerungen. Die Kosten der Förderung erneuerbarer Energien in Deutschland durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz werden durch vermiedene externe Kosten vollständig kompensiert.

Ausblick. Fossile und nukleare Energien sind teurer als es die betriebswirtschaftliche Rechnung zeigt. Die Kosten erneuerbarer Energien sagen dagegen heute schon weitgehend die ökologische Wahrheit. Je mehr die externen Kosten in das Preiskalkül einbezogen werden, desto früher wird die Umgestaltung der Energieversorgung auch aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv.

Schlagwörter: Erneuerbare Energie; externe Kosten; fossile Energie; Gesundheitsschäden; Klimawandel; Luftverschmutzung; Erneuerbare-Energien-Gesetz, nachhaltige Energieversorgung

Abstract

Quantification of external costs from renewable electricity generation in comparison to fossil nuclear technologies

Aim and Background. The supply and use of energy is related to environmental impacts, which cause significant economic damage. As these costs are not reflected in the price of energy, there is little incentive for the polluter to reduce the pressure on the environment. From an economic point of view, environmental resources and services are used beyond the optimal level.

The quantification of external costs has been an area of intensive research, in particular within the series of ExternE projects funded by the European Commission. Although external cost estimates have been successfully used to support European environmental legislation, the assessment of external costs is still a matter of significant uncertainties – in particular in areas where potential large environmental impacts are expected. In spite of uncertainty and limited knowledge, policy needs to require guidelines for the evaluation of energy and environmental policy measures.

Main Features. Based on a critical review of the current literature, recommendations for the quantification of external costs from renewable electricity generation in comparison to fossil nuclear technologies are derived.

Results and Discussion. Current electricity market prices do not reflect the total costs of electricity generation. Quantifiable external costs from fossil electricity generation are in the same order as private generation costs. The internalisation of external costs will improve the competitiveness of renewable energy technologies. To avoid market distortion, policy shall implement framing conditions supporting the further internalisation of external costs.

Conclusions. Costs for supporting renewable energy via the German feed-in tariffs are compensated for by external costs avoided.

Perspectives. Fossil and nuclear energies are more expensive than is reflected by economical quantification. In contrast, the costs for renewable energies tell the truth even today. The sooner the external costs are integrated in the pricing, the sooner the relaunch of energy supply will attract interest, also from the economic point of view.

Keywords: Air pollution; climate change; external costs; fossil energy; health impacts; renewable energy; sustainable energy supply

Ziel und Hintergrund

Die Bereitstellung und Nutzung von Energie gehört zu den Grundlagen unseres wirtschaftlichen Handelns, belastet aber durch die Freisetzung von Schadstoffen gleichzeitig auch unsere Umwelt. Inzwischen wissen wir, dass die durch Umweltbelastungen verursachten Schäden zu erheblichen volkswirtschaftlichen Kosten führen. Da diese Kosten in der Regel nicht vom Verursacher getragen werden und sich nicht in den Preisen für Strom und Wärme widerspiegeln, werden sie als externe Kosten bezeichnet. Das Vorliegen externer Effekte führt – in der Sprache der Ökonomen – zu einer nicht-optimalen Allokation knapper Ressourcen: wegen falscher Preissignale haben die Verursacher keinen Anreiz, ihr Verhalten zu ändern und die Umwelt wird über das 'optimale' Maß hinaus in Anspruch genommen.

Im Sinne der ökonomischen Theorie ist die Lösung des Problems einfach: externe Kosten müssen internalisiert werden, d.h. die durch die Umweltbelastung verursachten Kosten müssen dem Verursacher angelastet werden, damit die Marktpreise alle relevanten Kosten widerspiegeln, die mit der Energiebereitstellung verbunden sind. Dies kann durch Umweltsteuern, Abgaben, handelbare Emissionsrechte oder ähnliche Instrumente erreicht werden. 'Getting the prices right' ist eine populäre Forderung in energie- und umweltpolitischen Strategiepapieren. In den von der Europäischen Kommission geförderten ExternE-Projekten wird auf europäischer Ebene seit mehr als fünfzehn Jahren intensiv an Methoden zur Quantifizierung externer Umweltkosten geforscht [1–4]. Abschätzungen von externen Kosten wurden von der Europäischen Kommission 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 großen Unsicherheiten verbunden. Der vorliegende Aufsatz fasst die Ergebnisse eines Gutachtens für das Bundesumweltministerium [5] zusammen, in dem auf der Grundlage einer kritischen Bewertung vorliegender Arbeiten zur Quantifizierung externer Kosten Handlungsempfehlungen für die Verwendung von Angaben zu den externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren und fossilen Energieträgern im energiepolitischen Kontext abgeleitet wurden.

1 Externe Kosten der Stromerzeugung

1.1 Die Kosten des Klimawandels

Auswirkungen des Klimawandels. 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. Der globale Klimawandel wird zu einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur, der globalen durchschnittlichen Niederschlagsmenge und des Meeresspiegels führen. Die Häufigkeit extremer Wetterereignisse wie Dürren oder schwerer Stürme wird zunehmen. Wenn bis zum Ende des Jahrhunderts keine Stabilisierung der Klimaänderung erreicht wird, so sind nach 2100 schwerwiegende Änderungen des globalen Klimasystems wie z.B. Änderungen der Meeresströmungen oder das Abschmelzen des antarktischen Eisschildes möglich [6,7]. Durch diese 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.

Risiko-Matrix. Um die Aussagekraft vorliegender Studien besser einordnen zu können, wurden in [8] die möglichen Auswirkungen des Klimawandels in einer Risiko-Matrix dargestellt (Tab. 1).

Auf den zwei Achsen wird die jeweils steigende Unsicherheit bei der Quantifizierung zukünftiger Auswirkungen der Klimawandels und bei der ökonomischen Bewertung abgebildet. 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'

Tab. 1: Auswirkungen des Klimawandels in einer Risiko-Matrix nach [8]

Unsicherheit über die Folgen des Klimawandels ↓	Unsicherheit bei der ökonomischen Bewertung →		
	marktfähige Güter	nicht-marktfähige Güter	soziale, wirtschaftliche, politische Krisen
Projections ^a	z.B. Küstenschutz, Verlust von Nutzflächen, Energiebedarf (Heizen/ Kühlen)	z.B. Wärme-Stress, Verlust von Feuchtland	regionale Zusatzkosten, Auswirkungen auf Investitionsentscheidungen
Bounded Risk ^b	z.B. Landwirtschaft, Wasserversorgung	z.B. Wirkungen auf Ökosysteme und Biodiversität, Gesundheitsschäden	Änderungen von Marktstrukturen
System change and surprise ^c	z.B. signifikanter Verlust an Land und Ressourcen	z.B. Auswirkungen auf soziale Strukturen, irreversible Verluste	Regionaler Kollaps

^a **Projections:** relative gut beschreibbare Trends, z.B. Änderung der globalen Durchschnittstemperatur oder Anstieg des Meeresspiegels

^b **Bounded Risk:** Ereignisse, die nur mit Unsicherheit beschrieben werden können, für die sich aber die Größenordnung einer Eintrittswahrscheinlichkeit abschätzen lässt, z.B. Änderung der Wahrscheinlichkeit sommerlicher Dürren

^c **System Change and Surprise:** Vorgänge mit möglicherweise großer Dynamik und regionalen Rückkopplungen, z.B. Änderung der nordatlantischen Strömung, Zusammenbrechen des antarktischen Eisschildes

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 (wie z.B. Zusammenbruch der nordatlantischen Strömung, Freisetzung großer Mengen an Methanhydraten, Schmelzen des Grönlandeises), obwohl hier inzwischen verschiedene Autoren erste Versuche einer Abschätzung vorgenommen haben (siehe z.B. Übersicht in [9]). Die Darstellung der Risiko-Matrix macht 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.

'Equity Weighting'. 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. Weitgehend durchgesetzt hat sich inzwischen ein Ansatz, der 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. 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. (Für eine weiterführende Diskussion der Ansätze des Equity Weighting siehe z.B. [2,12]).

Einfluss der Diskontrate. Da die meisten Schäden des Klimawandels erst in der Zukunft auftreten werden, spielt auch 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 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 Diskontraten angegeben. Es 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. Wird die reine individuelle Zeitpräferenzrate zu Null gesetzt, so werden zukünftige Schadenskosten immer noch der unterstellten Wachstumsrate des Konsums entsprechend abdiskontiert.

Unsicherheiten bei der Ermittlung der Schadenskosten. Es gibt eine umfangreiche Literatur zu den Kosten des Klimawandels, die wiederum in verschiedenen Meta-Studien aus-

gewertet 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. Der in ExternE ermittelte 'zentrale Schätzwert' von 2,4 €/t_{CO₂} [10] liegt dabei deutlich am unteren Rand. In einer Ende 2005 vorgelegten Studie [11] des englischen Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) wurden die Unsicherheiten vorliegender Abschätzungen der Kosten des Klimawandels weiter untersucht und mit Hilfe des Modells FUND neue Abschätzungen vorgelegt, die in Tab. 2 zusammengefasst sind.

Es wird deutlich, dass je nach Wahl der Diskontrate und der Berücksichtigung des Equity Weighting eine Bandbreite der Schadenskosten zwischen ca. 0 bis 300 €/t_{CO₂} aufgespannt wird. Wegen der bestehenden Unsicherheiten und eines fehlenden Konsens unter den vom Defra beauftragten Wissenschaftlern wird in [11] 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 14 €/t_{CO₂} liegen. Es ist davon auszugehen, dass die Schadenskosten mit der Zeit ansteigen, so dass empfohlen wird, die Schadenskosten um 0,4 €/t_{CO₂} pro Jahr ansteigen zu lassen [12]. In den Schlussfolgerungen der Defra Studie [11] wird darauf hingewiesen, dass die heute zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Methoden nicht ausreichen, um die Kosten des Klimawandels vollständig zu erfassen. Es wird davon ausgegangen, dass trotz der kontinuierlichen Forschungsanstrengungen ein umfassendes Verständnis der Folgen des Klimawandels in den nächsten zehn Jahren nicht zu erwarten ist.

Wegen der großen Unsicherheiten bei der Ermittlung der Schadenskosten wird oft 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. Eine im Auftrag des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) durchgeführte Studie [7] zeigt, dass Strategien, die auf eine

Tab. 2: Marginale Schadenskosten des Klimawandels in €/t_{CO₂}. Zusammenfassung der FUND-Ergebnisse nach [11] für einen Referenzfall mit den von den Autoren als 'best guess' bezeichneten Satz an Eingabeparametern

Reine individuelle Zeitpräferenzrate	Referenzfall	
	Mit Equity Weighting	Ohne Equity Weighting
0%	284	22
1%	68	4
3%	-0,4	-1

Stabilisierung der CO₂-Konzentration bei bis zu 450 ppm zielen, zu globalen marginalen Vermeidungskosten führen, die bis 2030 auf über 50 €/t_{CO₂} steigen. Je nach eingeschlagener Stabilisierungsstrategie liegen die Vermeidungskosten im Jahr 2050 zwischen 100 und 200 €/t_{CO₂}. In Szenarien, die frühzeitig auf eine intensive Nutzung der Sonnenenergie setzen, gehen die Vermeidungskosten danach wieder deutlich zurück.

Fazit. Es liegt 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 Vorsorgeprinzip ist es notwendig, im Sinne der vom WBGU 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.

Es ist bemerkenswert, dass die in [7] abgeleiteten Vermeidungskosten in einer ähnlichen Größenordnung wie die in [11] abgeschätzten Schadenskosten liegen. Ausgehend von den in [11] für eine reine individuelle Zeitpräferenzrate von 1% und unter Berücksichtigung des Equity Weighting berechneten Kosten (s. Tab. 2) erscheinen Schadenskosten in Höhe von 70 €/t_{CO₂} als ein sinnvoller Ansatz zur Bewertung von CO₂-Emissionen. Auch der kürzlich mit großem Medien-echo veröffentlichte Stern-Report [13] geht von Schadenskosten in einer ähnlichen Größenordnung aus (85 \$/t_{CO₂} in einer Business-as-usual Entwicklung). Die vorliegenden Modellrechnungen zeigen, dass Werte von bis zu 300 €/t_{CO₂} innerhalb einer plausiblen Bandbreite liegen.

1.2 Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe

Dosis-Wirkungsbeziehungen. Mit dem in der ExterneE-Studie [1] entwickelten 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 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 Bevölkerung, usw.), die die Ergebnisse epidemiologischer Studien beeinflussen können, ist die Annahme der Kausalität nicht immer unproblematisch.

Einfluss von Luftschadstoffen auf die Mortalität. Bei der Berechnung externer Kosten durch Gesundheitsschäden ist der Einfluss von Luftschadstoffen auf die Mortalität von besonderer Bedeutung. In verschiedenen Studien konnte unter Berücksichtigung saisonaler und witterungsbedingter Einflüsse ein Zusammenhang zwischen der Feinstaubkonzentration und einer erhöhten Sterblichkeitsrate festgestellt werden. Insbesondere kann auch eine Schadstoffbelastung auf niedrigem Niveau über einen langen Zeitraum zu einer Verringerung der Lebenserwartung in der Bevölkerung führen (so genannte 'chronische' Mortalität). Da jedoch die tatsächlichen Wirkungsmechanismen bisher nur unzureichend verstanden werden, sind die Unsicherheiten in diesem Bereich relativ groß. Eine kritische Bewertung neuer epidemiologischer Untersuchungen führte in den ExterneE-Studien zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der zur Quantifizierung von Gesundheitsschäden herangezogenen Dosis-Wirkungsbeziehungen.

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 ExterneE-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 ExterneE-Nachfolgeprojekts NEEDS [14] 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 spezifischen Scha-

Tab. 3: Quantifizierbare spezifische Schadenskosten verschiedener Luftschadstoffe in € je Tonne Schadstoff

Schadenskosten durch	CO ₂	SO ₂ ^a	NO _x ^a	PM ₁₀ ^a	NM VOC ^a
Klimawandel	70				
Gesundheitsschäden					
– erhöhtes Sterblichkeitsrisiko		2.020	2.120	8.000	60
– nicht-tödliche Gesundheitsschäden		1.040	1000	4.000	170
Ernteverluste		-10	130		640
Materialschäden		230	70		
Summe	70	3.280	3.320	12.000	870

^a Quelle: [15]; mit den folgenden Parameter: high stack; country of emission: EU-15 & New Member States; characterisation of emission source: urban

denkskosten durch die Wirkung von Luftschadstoffen auf die menschliche Gesundheit [15] sind in Tab. 3 zusammengefasst, die diesen Zahlen zu Grunde liegenden Annahmen sind ausführlich in [3] dokumentiert. Es wird deutlich, dass die aus Gesundheitsschäden resultierenden externen Kosten durch das erhöhte Sterblichkeitsrisiko dominiert werden.

1.3 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. Im Vergleich zu den Gesundheitsschäden sind die durch Ernteverluste verursachten externen Kosten klein. Die spezifischen Schadenskosten durch die Wirkung von Luftschadstoffen auf Agrarprodukte [15] sind in Tab. 3 zusammengefasst.

1.4 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). Organischer Materialien werden vor allem durch eine erhöhte Ozonkonzentration geschädigt. Staubemissionen führen zusätzlich zu einer Ver-

schmutzung der Oberflächen. Sowohl die Korrosion wie auch die Verschmutzung führen zu erhöhten Instandhaltungskosten. 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 klein (s. Tab. 3).

1.5 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. 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, so dass bis heute leider kein akzeptiertes Verfahren zur Abschätzung externer Kosten in diesem Bereich zur Verfügung steht.

1.6 Weitere mögliche externe Effekte

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 [3] dieser Aspekt noch einmal systematisch aufgearbeitet. 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.

Versorgungssicherheit. Der Aspekt der Versorgungssicherheit gewinnt nach den drastischen Ölpreisteigerungen der letz-

ten Jahre, dem kurzzeitigen Lieferstopp Russlands für Gas an die Ukraine und den Stromausfällen in verschiedenen europäischen Ländern und den USA zunehmend an Bedeutung. Es bestehen bis heute erhebliche Unsicherheiten darüber, in wie weit 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. In [16] wird aus dem Zusammenhang zwischen Ölpreis und Bruttosozialproduktentwicklung geschätzt, dass vermiedene externe Kosten durch eine zusätzliche Einheit installierter Leistung nicht-fossiler Kraftwerke in der Höhe von ca. 1ct/kWh liegen.

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, so bleibt eine kausale Zuordnung der Ausgaben für einen militärischen Konflikt zu einer Erhöhung der Versorgungssicherheit letztendlich äußerst schwierig.

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. Zum Teil werden auch Subventionen oder Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt als externe Effekte angesehen. Die aus solchen Effekten resultierenden externen Kosten werden in verschiedenen Studien übereinstimmend als generell klein im Vergleich zu den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Schadenskategorien eingeschätzt.

Externe Kosten der Kernenergienutzung sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Zusätzlich zu den bisher dargestellten Schadenskategorien werden im Zusammenhang mit der Kernenergie vor allem externe Kosten durch auslegungüberschreitende Unfälle, durch das Proliferationsrisiko und durch radioaktive Abfälle teilweise sehr kontrovers diskutiert. Die methodischen Arbeiten 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 Berechnung der quantifizierbaren externen 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 oben 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 [17], die Daten für heutige PV-Systeme aus [18], und die Daten für fossile Kraftwerke aus [19]. Die der Abschätzung externer Kosten zu Grunde liegenden spezifischen Emissionen sind in Tab. 4 für die hier beispielhaft betrachteten Technologien zusammengefasst. Die daraus resultierenden quantifizierbaren externen Kosten, die sich aus der Multiplikation der Emissionen je Einheit Stromerzeugung (s. Tab. 4) mit den spezifischen Schadenskosten je Einheit Schadstoffemission (s. Tab. 3) ergeben, sind in Tab. 5 dargestellt.

Tab. 4: Lebenswegemissionen für Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern [17–19]

Energien	CO ₂ g/kWh	SO ₂ mg/kWh	NO _x mg/kWh	PM ₁₀ mg/kWh	NMVOC mg/kWh
Erneuerbare Energien					
PV, kristallin	72	300	180	61	92
PV (2030)	54	182	214	65 ^a	13
Laufwasser 300 kW	13	28	49	31 ^a	11
Wind 1,5 MW Onshore	10	40	31	42 ^a	26
Konzentrierendes solarthermisches Kraftwerk, 80 MW	13	47	73	40 ^a	2
Fossile Energieträger					
Braunkohle Dampfkraftwerk, η=40%	1.054	402	830	94	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

PV = Photovoltaik

^a gesamte Partikelemissionen. 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

Tab. 5: Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und aus fossilen Energieträgern, in ct/kWh (Bewertung von Treibhausgasemissionen mit 70 €/t_{CO2})

Schadenskosten durch	PV (2000)	PV (2030)	Laufwasser 300 kW	Wind 1,5 MW Onshore	Solar- thermische Kraftwerke	Braunkohle Dampfkraft- werk, η=40%	Steinkohle Dampfkraft- werk, η=43%	Steinkohle GuD, η=46%	Erdgas GuD, η=58%
Klimawandel	0,50	0,38	0,09	0,07	0,09	7,4	5,9	5,5	2,7
Gesundheit	0,22	0,20	0,06	0,07	0,085	0,50	0,37	0,26	0,17
Ökosysteme	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Materialschäden	0,008	0,006	0,001	0,001	0,002	0,015	0,013	0,01	0,005
Ernteverluste	0,008	0,003	0,001	0,002	0,001	0,010	0,009	0,005	0,004
Große Unfälle	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Proliferation	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Versorgungssicherheit	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Geo-politische Effekte	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	~ 0,74	~ 0,59	~ 0,15	~ 0,15	~ 0,18	> 7,9	> 6,3	> 5,7	> 2,9

- grüne Ampel (hellgrau): keine nennenswerten Effekte
- gelbe Ampel (dunkelgrau): es sind nicht zu vernachlässigende Auswirkungen zu erwarten, die zu externen Effekten führen
- rote Ampel (schwarz): es sind schwerwiegende Auswirkungen zu erwarten, die im Konflikt zu Nachhaltigkeitszielen stehen

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. Eine 'grüne Ampel' 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 Tab. 5 auch Schadenskategorien wie Proliferation oder das Risiko großer Unfälle aufgeführt, 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.

Tab. 5 zeigt, dass die quantifizierbaren externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für fast alle Technologien deutlich unter 1 ct/kWh liegen. 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 quantifizier-

baren 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 geo-politischen Implikationen zu berücksichtigen, die sich jedoch nicht monetarisieren lassen.

3 Vermiedene externe Kosten durch die Förderung erneuerbarer Energien

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 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 Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) unter anderem auch Zweck des EEG, "...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 Abb. 1 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. Durch den nach EEG vergüteten Strom konnten in Deutschland im Jahr 2006 die Emissionen von 46 Mill. t CO₂, 15 kt SO₂, 32 kt NO_x und 3 kt Feinstaub vermieden werden. Mit den hier abgeleiteten Ansätzen zur monetären Bewertung ent-

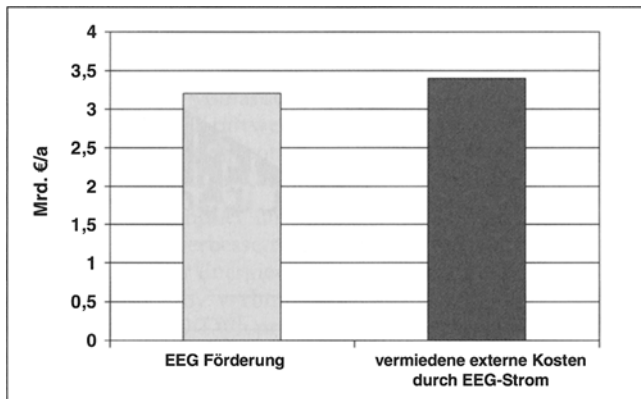


Abb. 1: Vergleich der Aufwendungen zur Förderung erneuerbarer Energien durch das EEG mit den durch EEG-Strom vermiedenen externen Kosten im Jahr 2006

spricht dies vermiedenen externen Kosten in Höhe von ca. 3,4 Mrd. €. Dem steht eine EEG-Vergütung in Höhe von 5,6 Mrd. € gegenüber, bei einem anlegbaren Strompreis von 4,4 ct/kWh entspricht dies einer Förderung durch das EEG in Höhe von 3,2 Mrd. €. 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.

4 Ausblick

Bei der Ermittlung der 'kostengünstigsten' Optionen der Energieversorgung gehen wir heute von unzulänglichen Voraussetzungen aus. Fossile und nukleare Energien sind teurer als es die betriebswirtschaftliche Rechnung zeigt. Die Kosten erneuerbarer Energien sagen dagegen heute schon weitgehend die ökologische Wahrheit. Je mehr die externen Kosten in das Preiskalkül einbezogen werden, desto früher wird die Umgestaltung der Energieversorgung auch aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv. Entsprechende Leitplanken sollten dafür sorgen, dass neben die kurzfristige Sichtweise der Märkte die längerfristigen Perspektiven eines nachhaltigen Wirtschaftens treten.

Literatur

- [1] European Commission (1995): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 1 Summary. European Commission, Luxembourg, EUR 16520
- [2] European Commission (1999a): ExternE – Externalities of Energy. Vol. 7 Methodology 1998 update. European Commission, Luxembourg, EUR 19083
- [3] NewExt (2004): Friedrich R, Rabl A, Hirschberg S, Desai-guesB, 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>
- [4] ExternE-Pol (2005): Rabl A et al. (eds), Externalities of Energy: Extension of accounting framework and policy applica-

tions. Final Technical report prepared for the European Commission, Contract ENG1-CT2002-00609

- [5] Krewitt W, Schlomann B (2006): 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 <<http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/37085/main/>>
- [6] IPCC (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, Cambridge University Press
- [7] WBGU (2003): Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin, 2003
- [8] 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 DEFRA International Seminar on the Social Costs of Carbon, July 2003
- [9] 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
- [10] Tol R, Downing T (2000): The marginal costs of climate changing emissions. ExternE working paper. September 2000
- [11] Downing T, Anthoff D, Butterfield R, Cernovsky 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
- [12] 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
- [13] Stern N (2006): The Economics of Climate Change. UK HM Treasury <http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm>
- [14] <<http://www.isis-it.net/needs/>>
- [15] EcoSenseLE – A simplified online version of the EcoSense model <http://ecoweb.ier.uni-stuttgart.de/ecosense_web/ecosensele_web/frame.php>, März 2006
- [16] Awerbuch S, Sauter R (2006): Exploiting the oil-GDP effect to support renewable deployment. Energy Policy 34 (17) 2805–2819
- [17] Nitsch J, Krewitt W, Pehnt M, Reinhardt G, Fishedick M (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ 901 41 803). <<http://www.bmu.de/erneuerbare/energien/doc/5650.php>>
- [18] Frankl P (2006): LCA results for current Photovoltaic technologies. NEEDS technical working paper. Ambiente Italia, Rome
- [19] Marheineke T (2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken. Forschungsbericht des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Band 87, Universität Stuttgart

Eingegangen: 07. Februar 2007
Akzeptiert: 16. Juni 2007
OnlineFirst: 17. Juni 2007