

## **Externe Kosten in der Energiewirtschaft**

Prof. Dr.-Ing. **A. Voß** VDI und Dr.-Ing. habil. **R. Friedrich**, Stuttgart

### **1. Einleitung**

Jede menschliche Aktivität ist mit dem Verbrauch an materiellen und immateriellen Gütern sowie mit der Inanspruchnahme von Natur und Umwelt in nach Art und Umfang unterschiedlicher Weise verbunden. Daß neben dem intendierten Nutzen damit auch sogenannte externe Effekte verbunden sein können, gehört zum Lehrbuchwissen der Ökonomie.

Als externe Effekte werden dabei unbeteiligte Dritte betreffende Zusatzkosten oder Zusatznutzen verstanden, die sich in den jeweiligen Güterpreisen nicht wiederfinden und denen die Betroffenen nicht indifferent gegenüberstehen.

Die gegenwärtige Energiebereitstellung und -nutzung ist in vielen Bereichen eine wesentliche Quelle der Belastung von Umwelt und Natur. Begriffe und Schlagworte wie Waldsterben, Tankerunglücke, Tschernobyl und Treibhauseffekt seien in diesem Zusammenhang erwähnt.

### **2 Ökonomische Theorie der externen Effekte**

Unter den externen Kosten der Energie- bzw. Stromversorgung werden alle im Zusammenhang mit der Energie - bzw. Stromversorgung - einschließlich der vor- und nachgelagerten Prozeßstufen wie z. B. Bau und Abriß von Anlagen, Energieträgergewinnung und -transport, Entsorgung - auftretenden technologiebedingten Effekte verstanden, deren Kosten nicht der Produzent und Konsument, sondern dritte Personen bzw. die Allgemeinheit - einschließlich zukünftiger Generationen - zu tragen haben.

Der englische Ökonom Arthur Cecil Pigou hat bereits 1920 den Begriff der externen Effekte als die Differenz zwischen privatem und sozialem Nutzen in die ökonomische Theorie eingeführt. Pigou machte sich über den heute exotisch anmutenden Vorgang Gedanken, daß durch den Funkenflug von Lokomotiven an der Bahnlinie angrenzende Felder in Brand gesetzt werden können. Er identifizierte den damit verbundenen Schaden als Kostenfaktor, der in dem Kostenkalkül der Verursacher, der Eisenbahngesellschaft, nicht berücksichtigt wird. Seine Schlußfolgerung lautete: Verursacht eine ökonomische Aktivität solche externen Kosten, bleibt ihr sozialer Nutzen hinter ihrem privaten Nutzen zurück. Um dennoch das Maximum an gesellschaftlicher Wohlfahrt zu erreichen, müssen diese Kosten dem Verursacher angelastet werden, sie sind zu internalisieren.

Ein Verursacher von Schäden, z. B. ein Kraftwerksbetreiber wird, wenn er die Kosten der Schäden zu tragen hat, Schadensvermeidungsmaßnahmen ergreifen, bis die Grenzkosten der Vermeidung, z. B. durch Filteranlagen, gleich den Grenzkosten des Schadens sind. Dieses Gesamtkostenminimum stellt aus volkswirtschaftlicher Sicht ein Pareto-Optimum dar, d. h., man kann durch andere Maßnahmenbündel niemanden besser stellen, ohne daß dadurch andere schlechter gestellt werden.

Im Allokationssystem der Marktwirtschaft kommt nun dem Preis als Knappheitsindikator für die begrenzten Ressourcen zur Deckung der Bedürfnisse eine zentrale Lenkungsfunktion zur Optimierung der Wohlfahrt der Gesamtbevölkerung zu. Diese kann er nur wahrnehmen, wenn funktionierende Märkte existieren und wenn alle Güter bzw. alle knappen Ressourcen in das Marktgeschehen einbezogen sind. Für die sogenannten "öffentlichen Güter" wie z. B. die Luft existieren diese Märkte nicht. Hier muß, so fordert die ökonomische Theorie, der Staat eingreifen, um die Knappheit dieser Güter in die Allokationsmechanismen des Marktes einzubeziehen. Damit würden die externen Kosten dann auch in das einzelwirtschaftliche Entscheidungskalkül einbezogen.

Die Internalisierung kann dabei über ordnungsrechtliche Maßnahmen, also Verbote oder Gebote, wirtschaftliche Anreizsysteme, z. B. Steuern oder Abgaben, Zertifikate, d. h. marktfähige oder handelbare Nutzungsrechte für öffentliche Güter, oder auch

über Haftungsregelungen erfolgen. Auf die Vor- oder Nachteile dieser Internalisierungsmaßnahmen soll hier nicht näher eingegangen werden (siehe hierzu /1/).

Wichtig aber ist, daß alle Internalisierungskonzepte, wenn sie zum Ziel der Wohlfahrtsoptimierung beitragen sollen, eine Quantifizierung der Schadenskosten, d. h. eine Monetarisierung der externen Effekte, zwingend notwendig machen.

In diesem Kontext ist es zunächst einmal notwendig, die externen Effekte zu identifizieren und zu quantifizieren und sie dann anschließend in einen gemeinsamen Wertmaßstab, und nichts anderes bedeutet die Monetarisierung, umzurechnen. Und genau auf diesen Gebieten liegen die eigentlichen Probleme, die die gegenwärtige Diskussion über externe Kosten und Internalisierung betreffen.

Die Wohlfahrts- und Ressourcenökonomie gibt uns zwar sowohl eine in sich konsistente Theorie zur Internalisierung der externen Effekte über die Allokationsmechanismen des Marktes, die, wenn man so will, der oft eingeforderten Versöhnung von Ökologie und Ökonomie entspricht, als auch Konzepte zur Monetarisierung von Schäden. Es fehlen jedoch sowohl Dosis-Wirkungs-Beziehungen, mit denen die Schäden quantifiziert werden können, als auch empirische Studien, die Aussagen über den monetären Wert der Schäden machen.

Gegen die aus der Wohlfahrts- und Ressourcenökonomie abgeleiteten Vorstellungen zur Einbeziehung externer Effekte wird gelegentlich eingewendet, daß sie den heterogenen und pluralistischen Wert- und Bedürfnisstrukturen der Gesellschaft nicht gerecht werden und daß sie die soziokulturellen und gesellschaftlichen Dimensionen der externen negativen Effekte nicht erfassen. Darüberhinaus sei es ja gerade das ökonomische Denken, die Effizienz des Marktes gewesen, die für die wichtigsten externen Effekte, wie z. B. die zunehmende Umweltbelastung verantwortlich zeichnen. Der letztere Einwand verkennt, daß die knappen Güter wie Umwelt und Natur bisher ja nicht in das Marktgeschehen eingebunden waren. Erst wenn dies durch entsprechende Rahmenbedingungen erreicht wird, kann der Markt seine Effizienz in Hinblick auf die Nutzung dieser knappen Güter nachweisen.

Der Einwand, daß den sozialen und gesellschaftlichen Auswirkungen externer Effekte über den ökonomischen Ansatz nicht Rechnung getragen wird, übersieht, daß bei den Konzepten zur Monetarisierung gerade auch die nicht mit Marktpreisen versehenen Schäden, also etwa menschliches Leid bei Krankheit und Tod, Verlust von Erholungsnutzen durch Waldschäden, Erhaltung der Artenvielfalt usw. berücksichtigt werden, zumal eine Bewertung externe Kosten über Geldeinheiten nichts anderes darstellt als eine Vergleichbarmachung unterschiedlicher Nutzen- und Präferenzvorstellungen. Desweiteren ist die Feststellung wichtig, daß natürlich auch alle anderen Konzepte zur Berücksichtigung von Vor- und Nachteilen, die in den Preisen von Gütern wie Dienstleistungen nicht enthalten sind, mit den grundsätzlichen Problemen der Quantifizierung und Bewertung externer Effekte konfrontiert sind.

### 3 Externe Kosten - ein Quantifizierungsproblem

Wenden wir uns nun den zentralen Problemen der Quantifizierung und Bewertung externer Effekte zu, die im Zentrum der gegenwärtigen Diskussion stehen.

Das Spektrum negativer externer Effekte, die von der Energieversorgung ausgehen können, reicht von der Beeinträchtigung von Leib und Leben, über Schäden an Flora und Fauna, Veränderungen des Klimas, die Minderung von Eigentums- und Verfügungsrechten heutiger und zukünftiger Generationen bis hin zu negativen Auswirkungen auf immaterielle Werte und ästhetische Aspekte. Im Zusammenhang mit der Quantifizierung und Bewertung externer Effekte ergeben sich eine Reihe von Problemen.

Die Kenntnisse über Ursache-Wirkungszusammenhänge sind oft nur rudimentär und wissenschaftlich noch nicht abgesichert. Dies gilt z. B. für den Einfluß von Luftschadstoffen auf die Morbidität und Mortalität oder auf den Wald. Synergieeffekte entziehen sich heute noch weitgehend einer Quantifizierung. Ebenso ist das Wissen über kumulative oder zeitverzögerte Effekte noch äußerst lückenhaft.

In Kenntnis der bestehenden vielfältigen Wissensdefizite über für die Quantifizierung und Monetarisierung externer Effekte wichtige Sachverhalte kann jeder Versuch, die externen Kosten von Energieversorgungssystemen zu quantifizieren, nur eine erste

orientierende Abschätzung sein. Einige der externen Effekte entziehen sich dabei heute einer Quantifizierung. Andere sind nur mit einem größeren Unsicherheitsbereich, der u. U. mehrere Größenordnungen umfassen kann, anzugeben.

Vor diesem Hintergrund sind Zahlenangaben zu externen Kosten zu beurteilen und einzuordnen, was nur möglich ist, wenn die Unsicherheitsbereiche und die subjektiven Bewertungen von empirisch lückenhaftem Datenmaterial offengelegt werden. Insbesondere ergibt sich daraus die Verpflichtung, angesichts des laufenden Erkenntnisfortschrittes die Ergebnisse immer wieder zu überprüfen und in Frage zu stellen.

#### 4 Externe Kosten der Stromversorgung

Obwohl die Forderung nach Internalisierung schon recht alt ist, bekam diese Idee für den Bereich der Stromversorgung erst dadurch Auftrieb, daß Hohmeyer /2/ in einer Kurzstudie den Nachweis zu erbringen versuchte, daß die externen Kosten von Kohle- und Kernkraftwerken sehr hoch, d. h. in derselben Größenordnung wie die internen Stromerzeugungskosten sind. In einer Studie der Autoren des hier vorgelegten Beitrags /3/ wurden die dabei getroffenen Annahmen und Satzungen kritisiert und insbesondere dargelegt, daß andere, aus Sicht der Autoren plausiblere Annahmen zu deutlich niedrigeren Werten der externen Kosten führen.

Die dadurch entstandene Diskussion nahm das Bundeswirtschaftsministerium zum Anlaß, eine Studie an die prognos AG zum Thema 'Externe Kosten der Energieversorgung' /4/ zu vergeben. In dieser Studie wurde der Stand des Wissens aufgezeigt, ohne daß jedoch - von einigen Ausnahmen abgesehen - eigene Berechnungen externer Kosten durchgeführt wurden. Eine dieser Ausnahmen betrifft die Kosten großer Kernkraftwerksunfälle. Hier legten Ewers und Rennings als Unterauftragnehmer Kostenschätzungen von 10,7 Billionen DM für einen Kernkraftwerksunfall mit hoher Freisetzung von Radioaktivität vor und schätzten daraus externe Kosten von 4,3 Pf/kWh ab /5/.

Diese Schätzung sowie weitere Angaben der prognos-Studie zu Waldschäden und den Nutzungskosten des Ressourcenverzehr werden in einer Studie von Friedrich /6/ bewertet und kommentiert.

In einer aufwendigen groß angelegten Studie ist derzeit die EU in Zusammenarbeit mit dem Department of Energy der USA dabei, die externen Kosten verschiedener Stromerzeugungssysteme zu quantifizieren. Dabei wurde Wert darauf gelegt, die derzeit verfügbaren Erkenntnisse bei Dosis-Wirkungs-Beziehungen und der Monetarisierung von Schäden möglichst vollständig zu erfassen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden dann konkret marginale Kosten pro kWh für verschiedene Stromerzeugungssysteme berechnet. Die Autoren sind an der Erstellung dieser Studie maßgeblich beteiligt. Mit ersten Ergebnissen wird bis Ende 1994 gerechnet.

Im folgenden wird zunächst die Vorgehensweise in einigen Kostenbereichen näher erläutert; anschließend werden eigene Abschätzungen der externen Kosten, die den derzeitigen Erkenntnisstand widerspiegeln, dargelegt.

Dabei wird ein Steinkohlekraftwerk mit einer Entstickungs- und Entschwefelungsanlage, wie sie heute Stand der Technik sind, sowie ein Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor und einer Leistung von 1250 MW<sub>e</sub> betrachtet.

Eine Abschätzung der externen Kosten dieser Stromversorgungssysteme muß natürlich nicht nur die negativen Effekte betrachten, die vom Betrieb des Kraftwerks ausgehen. Es müssen auch die Externalitäten erfaßt werden, die von den vor- und nachgelagerten Prozeßstufen, die für die Erzeugung einer Kilowattstunde notwendig sind, ausgehen. Dies betrifft insbesondere die Gewinnung und den Transport von Energieträgern, wie Kohle und Uran, den Bau und den Abriß des Kraftwerkes sowie die Entsorgung von Abfallprodukten.

Als Schäden bzw. externe Effekte zu berücksichtigen sind einmal die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, auf die Morbidität und Mortalität, durch die Emission von Luftschadstoffen und die Freisetzung von Radioaktivität. Im Fall der Kernenergie betrifft dies sowohl die radioaktiven Belastungen aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb des Kraftwerkes und der Anlagen des Brennstoffkreislaufs wie auch die Freisetzung von Radioaktivität durch Kernkraftwerksunfälle.

Die Emission von Luftschadstoffen führt gegebenenfalls zu Schäden an Pflanzen in der Forst- und Landwirtschaft, sowie im Gartenbau und schädigt die Tierwelt.

Korrosions- und Verwitterungsschäden an Gebäuden und Bauwerken sind ein weiterer Bereich externer Effekte der Luftverschmutzung.

Der Verzehr von erschöpfbaren Ressourcen, in unserem Fall von Kohle und Uran, wirft die Frage nach der intertemporalen Verteilungsgerechtigkeit auf, da diese Energieträger zukünftigen Generationen dann nicht mehr zur Verfügung stehen.

Nicht quantifiziert wurden die Effekte einer Veränderung des Klimas durch die Freisetzung von Treibhausgasen. Der gegenwärtige Stand der Klimawirkungsforschung er-

laubt belastbare Aussagen über die Schadenskosten von anthropogenen Klimaveränderungen noch nicht.

Im folgenden seien nur einige dieser Kategorien von externen Effekten näher betrachtet. Begonnen wird mit den durch luftgetragene Schadstoffe verursachten Effekten auf die menschliche Gesundheit und die Pflanzen. Diese Effekte lassen sich in Form von Wirkungspfaden beschreiben und mit ihrer Hilfe quantifizieren (siehe Abb. 1).

**5 Gesundheitseffekte**

Ein Wirkungspfad, wie er hier dargestellt ist, beschreibt zunächst die Entstehung von Schäden. Ausgehend von der Emission des Schadstoffs an der Quelle wird der Weg



Abb. 1: Struktur eines Wirkungspfades

über die Ausbreitung und gegebenenfalls die Umwandlung bis zum Rezeptor, z. B. der menschlichen Lunge oder dem Blatt der Pflanze, beschrieben und die Schäden mittels Dosis-Wirkungsbeziehungen quantifiziert. Danach ist der Schaden, d. h. der Nutzenverlust, monetär zu bewerten, d. h. in Kosten auszudrücken. Die wesentlichen Probleme ergeben sich bei der quantitativen Bestimmung der Schäden und bei ihrer Monetarisierung.

Gesundheitsschäden in der Bevölkerung werden in erster Linie durch Luftschadstoffe wie Staub,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Ozon und organische Stoffe verursacht. Der Betrieb des Kohlekraftwerks ist dabei die wesentliche Quelle dieser Luftschadstoffe innerhalb der gesamten Kette der Kohlestromerzeugung.

$\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Staub und Ozon führen bei entsprechender Exposition vor allem zu Reizungen der Schleimhäute, zu Beeinträchtigungen der Lungenfunktion und zu Atemwegserkrankungen wie Asthma, Krupp und Bronchitis. Organischen Stoffen, wie z. B. Benzol, werden kanzerogene Wirkungen zugeschrieben.

Aussagen über die gesundheitlichen Wirkungen dieser Schadstoffe lassen sich aus epidemiologischen Untersuchungen gewinnen. Ein Problem der Gewinnung von Dosis-Wirkungsbeziehungen aus epidemiologischen Untersuchungen ergibt sich daraus, daß es neben den Luftverunreinigungen noch viele andere Ursachen für Atemwegserkrankungen gibt und daß die verschiedenen Luftschadstoffe in der Regel gemeinsam auftreten, so daß die spezifische Wirkung eines Schadstoffes nur schwer zu isolieren ist. Desweiteren ist zu berücksichtigen, daß die Wirkungen auf unterschiedliche Bevölkerungsgruppen wie z. B. Kinder, alte Menschen oder Asthmatiker durchaus unterschiedlich sind. Die derzeit vorliegenden Dosis-Wirkungsbeziehungen für Luftschadstoffe weisen erhebliche Unterschiede auf und sind umstritten. Ungeklärt ist auch, ob Schwellenwerte bei einzelnen Schadstoffexpositionen existieren.

Legt man die derzeit verfügbaren Dosis-Wirkungsbeziehungen zugrunde, so errechnen sich für die Luftschadstoffemissionen eines Kohlekraftwerkes bis zu 9,6 Krankheitsfälle bzw. 2,6 Todesfälle je Milliarde kWh Stromerzeugung. Die Todesfälle betreffen dabei hauptsächlich ältere, vorerkrankte Menschen.



Die so quantifizierten Gesundheitseffekte sind dann in einem nächsten Schritt zu monetarisieren. Hierbei ergeben sich nicht weniger schwierige Probleme. So sind z.B. die anzusetzenden Kosten für eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, etwa einen tödlichen Unfall zu erleiden, mit anderen Worten: der Wert eines 'statistischen' Menschenlebens, abzuschätzen.

Hierfür kann man eine Orientierung dadurch gewinnen, daß man untersucht, was wir in anderen Lebensbereichen bereit sind für risikomindernde oder lebenssichernde Maßnahmen aufzuwenden. Beispiele lassen sich finden im Bereich der Verkehrs- und Arbeitssicherheit sowie in der Medizin.

Andere Monetarisierungsansätze für Risiken mit Todesfolge versuchen über sogenannte Zahlungsbereitschaftsansätze, die auf der Auswertung von Befragungen über die Bereitschaft von Individuen, durch Geldzahlungen Lebensrisiken zu vermindern, basieren, diese Risiken kostenmäßig zu quantifizieren. Ein anderer Weg besteht darin, Lohnunterschiede bei Tätigkeiten mit unterschiedlichen Gesundheits- und Todesrisiken als Grundlage für die Monetarisierung von Gesundheitsrisiken zu verwenden.

Die mit diesen unterschiedlichen Bewertungssätzen in den vorliegenden Studien ermittelten Werte für tödliche Gesundheitsrisiken liegen in einer Bandbreite von 0,54 Mio bis 20 Mio DM je statistischem Todesfall.

Neben den Gesundheitsrisiken durch die Emission von Luftschadstoffen sind auch die gesundheitlichen Effekte, die direkt und indirekt mit der Gewinnung der Kohle, ihrem Transport sowie mit dem Bau des Kraftwerkes verbunden sind, zu erfassen.

Für die externen Gesundheitseffekte einer Stromerzeugung auf Kohlebasis ergibt sich in unseren Abschätzungen eine Bandbreite 0,2 bis 2,3 Pf/kWh Kohlestrom.

## 6 Waldschäden

Die zuvor angesprochenen Probleme der Quantifizierung und Monetarisierung sind auch kennzeichnend für die Ermittlung der durch Luftschadstoffe verursachten Waldschäden. Trotz einer zu Beginn der achtziger Jahre intensivierten Waldschadensforschung sind die Ursachen der neuartigen Waldschäden, insbesondere der Einfluß einzelner Luftschadstoffe noch keineswegs ausreichend geklärt.

Der Forschungsbeirat Waldschäden und Luftverunreinigungen stellt zum Kenntnisstand hinsichtlich der Waldschäden fest:

"Neuartige Waldschäden gehen auf einen Ursachenkomplex aus abiotischen und biotischen Faktoren zurück. Anthropogene Luftverunreinigungen aus Industrieanlagen, Kraftwerken, Verkehr, Haushalt und Landwirtschaft spielen dabei eine Schlüsselrolle:"

Das weitgehende Fehlen abgesicherter Dosis-Wirkungsbeziehungen erschwert naturgemäß eine verursachungsgerechte Zuordnung der Waldschäden zu den Emissionen aus fossilen Kraftwerken. Ein Versuch, die Nutzeneinbußen durch Waldschäden kostenmäßig zu quantifizieren, ist von Ewers durchgeführt worden. Die Schäden durch Minderung der forstwirtschaftlichen Erträge, Minderung des Freizeit- und Erholungswertes sowie durch andere Folgewirkungen werden auf 9 Mrd/a geschätzt, wobei mehr als 60 % dieser Kosten auf den verminderten Erholungs- und Freizeitwert entfallen.

Rechnet man mangels besserer Kenntnisse diese Waldschäden vollständig der Luftverschmutzung zu, so ergeben sich die externen Kosten der Waldschäden durch in Kohlekraftwerken erzeugten Strom zu 0,1 - 0,2 Pf/kWh.

Auch dieser Wert kann nur eine erste orientierende Größe sein.

## 7 Externe Kosten schwerer Reaktorunfälle

Die Ermittlung und Beurteilung der externen Effekte von schweren Reaktorunfällen sind ein kontrovers diskutiertes Thema, was angesichts der Polarisierung der Kernenergie Diskussion in unserer Gesellschaft wohl auch nicht besonders verwundern kann.

Wie bei der Abschätzung externer Kosten durch Umweltbelastung gibt es auch hier in den vorliegenden Untersuchungen eine große Bandbreite bei den ermittelten externen Kosten schwerer Reaktorunfälle. Darüberhinaus wird gerade an diesem Beispiel die grundsätzliche Frage diskutiert, wie denn Risiken mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit, aber einem hohen Schadenspotential überhaupt zu bewerten sind. Es ist notwendig, zwischen diesen beiden Problemkomplexen stärker zu differenzieren, wenn Fortschritte in der Diskussion erzielt werden sollen.

Die Unterschiede in den Kostenschätzungen von Reaktorunfällen haben wesentlich damit zu tun, daß eine umfassende, wissenschaftlich fundierte Risikostudie für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland, die nicht nur die Häufigkeit der von den Sicherheitseinrichtungen nicht beherrschten Anlagenzustände, sondern auch die damit verbundenen Freisetzungen von Radioaktivität sowie die Konsequenzen für die Umgebung und die gesundheitlichen Folgen quantifiziert, bisher nicht vorliegt.

Daher wurden z. T. sehr grobe Abschätzungen durchgeführt. Dies soll am Beispiel der bereits erwähnten Studie von Ewers und Rennings erläutert werden:

Ausgangspunkt der Berechnung ist in dieser Studie eine Kollektivdosis von 240 Mio Personenrem - nach Angabe von Ewers und Rennings die Dosis des Reaktorunfalls von Tschernobyl. Diese Zahl wird mit dem Faktor 2 multipliziert, um der höheren Freisetzung von Spaltprodukten bei der höchsten Freisetzungskategorie F1-SBV der Deutschen Risikostudie Phase B (DRS B) /7/ Rechnung zu tragen. Das Ergebnis wird anschliessend mit dem Faktor 7 multipliziert, weil die Bevölkerungsdichte in einem 50 km-Radius um die deutschen Kernkraftwerke etwa siebenmal höher als in von der Tschernobyl-Katastrophe besonders betroffenen Gebieten in Belorußland ist.

Um die Personenschäden zu ermitteln, wird die so modifizierte Kollektivdosis mit von der Internationalen Strahlenschutzkommission festgelegten Risikoeffizienten (500 tödliche Strahlenkrebschäden, 100 nicht-tödliche Krebsfälle und 130 schwere Erbschäden pro Million Personen-rem) multipliziert.

Für jeden Todesfall werden - in Anlehnung an Ottinger /8/, der amerikanischen Studien zur Ermittlung des Wertes eines statistischen Menschenlebens ausgewertet - 6 Mio DM pro Todesfall und 0,5 Mio DM pro nicht-tödlichem Krebsfall bzw. Erbschaden angesetzt. Die Multiplikation dieser Zahlen ergibt - wie man leicht nachvollziehen kann -, Schäden von 10,08 Billionen DM aufgrund von Todesfällen und 386,4 Mrd. DM auf Grund von Morbidität.

Für die Berechnung der Sachschäden werden ähnlich überschlägige Rechnungen vorgenommen. Insgesamt wird ein Betrag von 10,697 Billionen DM für Personen- und Sachschäden ausgewiesen.

Dieser Betrag wird, um externe Kosten pro erzeugter kWh zu ermitteln, mit der Wahrscheinlichkeit von  $3 \cdot 10^{-6}$ /a (Häufigkeit von Kernschmelzunfällen ohne accident management-Maßnahmen nach DRS B) und anschließend mit dem Faktor 20 (da 1989 20 Reaktoren in Betrieb waren) multipliziert und durch die 1989 erzeugte Arbeit (149,4 TWh) geteilt. Es ergeben sich 4,3 Pf/kWh.

Ein Hauptkritikpunkt zu dieser Vorgehensweise ist, daß die Wahrscheinlichkeit von Kernschmelzunfällen (ohne accident-management Maßnahmen) der Wahrscheinlichkeit des Auftretens höchster Freisetzungen von Radioaktivität gleichgesetzt wird. Tatsächlich führt keinesfalls jeder Kernschmelzunfall zu sehr hohen Freisetzungen von Radioaktivität (siehe z. B. den TMI-Unfall), darüberhinaus ist nicht einzusehen, warum accident management Maßnahmen nicht wenigstens teilweise erfolgreich hohe Freisetzungen verhindern können.

Zudem ist die angenommene Kollektivdosis von Tschernobyl zu hoch, z. B. wird in /8/ ein Betrag von 60 Mio Pers.-rem geschätzt. Da ein großer Unfall europaweit Auswirkungen entstehen läßt, ist zudem die Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte im

50 km-Umkreis um Kernkraftwerke nicht sinnvoll. Eine genauere Diskussion dieser Aspekte ist in /6/ enthalten.

Eine differenziertere und sachgerechtere Analyse erscheint unabdingbar, um die externen Kosten von Reaktorunfällen abzuschätzen. Derartige Untersuchungen liegen für die Bundesrepublik Deutschland noch nicht vor. (Sie sind im Rahmen des erwähnten EU-Projekts geplant). Geht man von vorliegenden, älteren amerikanischen Untersuchungen über die Schäden von hypothetischen Reaktorunfällen aus und versucht, diese, unter Berücksichtigung der anderen Gegebenheiten in der Bundesrepublik Deutschland, zu modifizieren, so erhält man bei Berücksichtigung von Gesundheitsschäden, den Kosten von unfallbedingten Evakuierungen und Umsiedlungen, dem Verlust an Agrarproduktion, den Kosten von Dekontaminationsmaßnahmen sowie den Schäden an der Anlage selbst, grob abgeschätzte Kosten externe Kosten schwerer Reaktorunfällen in einem Bereich von 0,01 bis 0,07 Pf/kWh /3/. Andere Autoren kommen zu Ergebnissen vergleichbarer Größenordnung, z. B. Pearce /9/ (0,02 - 0,05 pence/kWh). Auch die ersten Ergebnisse der angesprochenen EU-Studie zu den externen Kosten liegen im selben Bereich. Diese Ergebnisse beruhen auf der in der Risikoforschung üblichen Annahme, daß die Schäden von Ereignissen mit kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit und großen Auswirkungen nicht anders bewertet werden, als die Schäden von Ereignissen mit vergleichsweise kleinen Auswirkungen und einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit: das Risiko ist das Produkt aus Schaden und Wahrscheinlichkeit. Da dies trotz hoher Schäden auf Grund der sehr geringen Wahrscheinlichkeiten zu geringen externen Kosten führt, wird teilweise argumentiert, daß bei hohem Schadensausmaß anders bewertet werden müsse. Allerdings fehlen für die Festlegung einer solchen Bewertung bisher empirisch gewonnene Hinweise, jede andere Bewertung wäre daher rein willkürlich.

### **8 Externe Kosten der Verzehr erschöpfbarer Energieressourcen**

Bei den meisten der bisher angesprochenen externen Effekte ging es fast ausschließlich um Wirkungen, die von der Allgemeinheit heute als "Umweltkosten" getragen werden müssen. Dies ist bei den Fragen bezüglich des Verzehr erschöpfbarer Ressourcen anders.

Die Vorräte von Kohle, Öl, Gas und Uran sind begrenzt, Durch Abbau, wie wir ihn heute betreiben, werden sie aufgezehrt und stehen damit zukünftigen Generationen nicht mehr zur Verfügung. Diese müssen dann unter Umständen auf Energiequellen mit höheren Kosten, z. B. Solarenergie zurückgreifen. Ist dies gerecht und fair gegenüber unseren Nachkommen?

Wenn kommende Generationen das gleiche Recht an der Nutzung der begrenzten Energievorräte haben sollen wie wir, dann müssen wir sie dafür entschädigen, wenn sie durch unseren Verbrauch an billigen Energievorräten für die Energiebereitstellung höhere Kosten aufwenden müssen.

Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß wir einen Zuschlag zu den gegenwärtigen Abbaukosten zahlen, der verzinst bis zum Zeitpunkt der Erschöpfung der Energievorräte gerade den höheren Kosten der dann verfügbaren Energiequellen, z. B. Strom aus Photovoltaik, entspricht. Die einen nennen diesen Zuschlag Nutzungskosten, andere sprechen von einer Kompensationsrücklage. Wenn nun diese Nutzungskosten oder die Kompensationsrücklage in den Preisen der heutigen Energieträger nicht enthalten ist, dann entstehen externe Kosten bei unseren Nachkommen, d. h. wir leben auf ihre Kosten.

Bevor man darüber spekuliert, ob diese Nutzungskosten in den heutigen Energieträgerpreisen enthalten sind, ist es nützlich, zunächst einmal die Höhe dieser Nutzungskosten oder Kompensationsrücklage zu bestimmen.

Die nach Angaben der Weltenergiekonferenz gewinnbaren fossilen Energievorräte betragen etwa 197 000 EJ. Dies entspricht einer statischen Reichweite (Quotient aus gewinnbaren Vorräten und derzeitigem Weltenergieverbrauch) von ca. 600 Jahren. Da der Weltenergieverbrauch aber voraussichtlich zunimmt, sei hier vorsichtig mit einer dynamischen Reichweite von 200 Jahren gerechnet. Setzt man als Kosten für die nach Erschöpfung der fossilen Vorräte verfügbare Energiequelle 80 Pf/kWh an, ergeben sich bei einer realen Diskontrate von 4 %/a nach der Hotelling-Regel die heutigen Nutzungskosten zu 0,03 Pf/kWh<sub>t</sub>. Dieser Wert ist so gering, daß nicht ausgeschlossen werden kann, daß er in den heutigen Energieträgerpreisen nicht schon enthalten ist. Zumindest bei Öl aus OPEC-Ländern und Gas sind die Gewinn-

margen wesentlich höher als dieser Betrag. Externe Kosten des Verzehrs fossiler Energieträger wären dann bereits internalisiert.

Nach der Diskussion der Probleme und Schwierigkeiten der Quantifizierung externer Effekte und der Diskussion einzelner Kategorien externer Effekte, die mit heutigen gängigen Stromerzeugungssystemen verbunden sind, sollen die Ergebnisse derzeitiger Abschätzungen der externen Kosten für die Stromerzeugungssysteme erläutert werden.

### 9 Externe Kosten Im Vergleich

Tab. 1 zeigt die heute quantifizierbaren externen Kosten für die hier betrachtete Stromerzeugung mit Steinkohle und Kernenergie. Dabei ist nach den verschiedenen Kategorien externer Effekte differenziert. Einige Schadenskategorien wie etwa Gefährdung der Artenvielfalt, Verschmutzung von Grund- und Oberflächenwasser, Schadstoffanreicherung in Böden und insbesondere der Treibauseffekt fehlen, weil die Quantifizierung beim derzeitigen Kenntnisstand noch nicht möglich erscheint. Die abgeschätzten externen Kosten liegen in einer Bandbreite von 0,06 bis 2,75 Pf/kWh<sub>el</sub>.

Die wesentlichen externen Kosten der Kohlestromerzeugung ergeben sich aus den Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe sowie durch die Materialschäden. Es sei daran erinnert, daß die Auswirkungen von Klimaveränderungen durch energiebedingte Treibhausgasemissionen in der Tabelle nicht enthalten sind, da sie derzeit nicht bezifferbar sind. Neben den trotz Rauchgasreinigung noch möglichen Schäden durch die klassischen Luftschadstoffemissionen sind es aber vor allem die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die u. U. eine Neueinschätzung der Rolle der Kohle in der Energieversorgung erforderlich machen könnten.

Die abgeschätzten quantifizierbaren Kosten der Kernenergie liegen in einem Bereich von 0,06 - 0,3 Pf/kWh. Die Internalisierung dieser Beträge würde die Wettbewerbsposition der Kernenergie nicht wesentlich ändern.

**Tab. 1:** Externe Kosten der Stromerzeugung, soweit quantifizierbar  
- ohne Berücksichtigung des Treibhauseffekts -

Schadenskategorien	Größenordnung der derzeitigen Abschätzungen <sup>1)</sup> (P/kWh)	
	Kohle	Kernenergie
Gesundheitsschäden (öffentlich)	0,2 - 2	0,01 - 0,1
Gesundheitsschäden (beruflich)	0,3	0,01 - 0,03
Schäden an Feldfrüchten	0,02	-
Waldschäden	0,1 - 0,2	-
Materialschäden	0,2	-
Lärm	0,03	0,03
Unfälle in Kernkraftwerken	-	0,01 - 0,1
Ressourcenverzehr	ca. 0	0 - 0,03
Summe der derzeit quantifizierten externen Kosten	0,85 - 2,75	0,06 - 0,29

<sup>1)</sup> externe Kosten hängen von der Technik und vom Standort ab

### Literatur

- /1/ Rainer Friedrich:  
Umweltpolitische Maßnahmen zur Luftreinhaltung.  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1993
- /2/ Olav Hohmeyer:  
Soziale Kosten des Energieverbrauchs,  
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1988
- /3/ Rainer Friedrich, Ulrich Kallenbach, Eberhard Thöne, Alfred Voß, H.-H. Rogner, D. Karl:  
Externe Kosten der Stromversorgung; 2. Auflage VWEV-Verlag, Frankfurt, 1990



- 
- /4/ Klaus, P. Masuhr, Heinfried Wolff, Jan Keppler:  
Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung,  
Endbericht, prognos, Basel, 1992
- /5/ Hans-Jürgen Ewers, Klaus Rennings:  
Abschätzung der Schäden durch einen sogenannten "Super-GAU", in: Pro-  
gnos-Schriftenreihe Identifizierung und Internalisierung extgerne Kosten der  
Energieversorgung, Band 2, prognos, Basel, 1992
- /6/ Rainer Friedrich:  
Externe Kosten der Stromerzeugung - Probleme bei ihrer Quantifizierung;  
VWEV-Verlag, Frankfurt, 1993
- /7/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH:  
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerk Phase B,  
Eine zusammenfassende Darstellung;  
GRS 72, 1989
- /8/ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation:  
Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation; 1988 Report to the General  
Assembly, United Nations, New York, 1988
- /9/ David Pearce et. al.:  
The Social Costs of Fuel Cycles,  
Centre of Social and Economic Research on the Global Environment, 1992