

Energiebeauftragter  
des Landes  
Steiermark



# Externe Kosten im Energiebereich

2. Zwischenbericht - Literaturrecherche

## 2. Zwischenbericht - Literaturrecherche

# Externe Kosten im Energiebereich

AutorInnen

Wolfgang Jilek  
Karin Karner  
Andrea Rass

## Vorwort

„Energie- und Verkehrsleistungen sind um 11 bis 16 Milliarden zu billig. Das Verursacherprinzip versagt: Die Falschen erhalten die Quittung für ein Wirtschaften, das Ressourcen verschwendet statt schont. Externe Kosten in Form von Umweltbelastungen (Gesundheits-, Vegetations- und Gebäudeschäden), Klima-, aber auch Sicherheitsrisiken (Großunfälle, Entsorgung etc.) sind nicht in den Marktpreisen enthalten und werden heute meist von der Allgemeinheit getragen.

Diese Schadenskosten dürfen in Wirtschaftlichkeitsrechnungen nicht länger vernachlässigt werden. Mit der Berücksichtigung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen können Energiesparmaßnahmen mit unterschiedlichen Energieträgern und Energiesystemen volkswirtschaftlich beurteilt werden.“

Ein Auszug aus der sonntäglichen Parteidrede eines Grünpolitikers? Falsch geraten!

Der Text entstammt der Information zu einem AnwenderInnenkurs über die neue Wirtschaftlichkeitsrechnung mit externen Kosten für Investitionen im Bau- und Energiebereich bei öffentlichen Bauten einiger kantonaler Energiefachstellen der Schweiz. In diesen Kantonen und kantonalen Ämtern zieht man schon heute praktische Konsequenzen aus der bereits jetzt spürbaren und in Zukunft noch weitaus prekäreren Umweltsituation und schreibt eine neue Berechnungsmethode für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Projekten für öffentliche Bauten vor, die - vereinfacht dargestellt - Zuschläge für die Umweltbelastung aus der Verwendung von Energie als „Externe Kosten“ einkalkuliert.

In einem „Ersten Zwischenbericht“ haben wir 1996 versucht, einen Überblick über vorhandene Literatur zu diesem Thema zu geben.

Mittlerweile sind sehr umfangreiche Arbeiten darüber fertiggestellt oder intensiv weiter getrieben worden, hier sei die EU-Studie „ExternE“ genannt, sodass es an der Zeit schien, diese damalige erste Übersicht in einem „Zweiten Zwischenbericht“ zu aktualisieren und zu ergänzen. Primäre Aufgabe dieses Berichtes ist es demnach, einen verbesserten Überblick über einschlägige Arbeiten zu geben sowie einen Vergleich zwischen diesen Arbeiten und Bemühungen - zum Beispiel des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie in Form der für eine gesamtheitliche Beurteilung von Energiesystemen letztlich auch notwendigen Darstellung ebendieser Arbeiten im Programm GEMIS (Gesamt - Emissions - Modell Integrierter Systeme) - zu ermöglichen.

Naturgemäß bleiben auch in diesem Bericht einige Fragen offen, vor allem was die oft sehr unterschiedliche Bewertung von Risiken und Schäden und die - insbesondere in ExternE - nicht ausgewogene Behandlung einzelner Themen betrifft: So werden zum Beispiel in der ExternE-Studie erneuerbare Energieträger mit „sekundären Emissionen“ (Produktion der zur Behandlung der erneuerbaren Energieträger verwendeten Anlagen etc.) belastet, fossile Brennstoffzyklen dagegen nicht. Ebenso wird in ExternE bei der Abschätzung der Folgen der Nuklearenergieverwendung lediglich die Zahlungsbereitschaft für die Verringerung von Risiken, einen tödlichen Unfall zu erleiden, bewertet. Der Wert des menschlichen Lebens an sich wird als „nicht monetarisierbar“ eingestuft. Das ist zwar nicht ganz unverständlich, obschon andere Studien monetarisiert haben, führt aber zu einer groben Verschiebung der Bewertung, wenn man davon ausgeht, dass menschliches Leben doch zu den wertvollsten Gütern zählt. Die - eigentlich unzulässige - Wertverschiebung geht teilweise insofern noch weiter, als es zum Beispiel in Frankreich bis

dato keine Angaben zur Zahlungsbereitschaft gibt. Zur Bewertung eines schwerwiegenden Reaktorunfalles besteht derzeit überhaupt noch kein konsensfähiges Modell.

Dieser Bericht umfasst demnach die bisher aus einschlägigen literarischen Quellen machbare Bewertung und Monetarisierung, so gut es zum jetzigen Zeitpunkt möglich ist. An dieser Stelle möchte ich ganz besonders den beiden Autorinnen Frau Karin Karner und Frau Andrea Rass danken, die mit ganz besonderem Engagement und mit großer Sorgfalt diesen Bericht zusammengestellt und größtenteils auch redaktionell bearbeitet haben. Sie sind - wie ich selbst auch - der Faszination des Themas „Externe Kosten“ erlegen und werden - so hoffe ich - auch für einen nächsten „Zwischenbericht“ zur Verfügung stehen, denn einen solchen wird es geben müssen.

Bezug nehmend auf das Schweizer Modell ist anzunehmen, dass die Faszination dieses Modells ganz einfach darin liegt, dass es bereits umgesetzt wird. Dort hat man offenbar geschafft, was Teile der Österreichischen Bundesregierung gerade wieder zu negieren oder zu verdrängen versuchen: die Berücksichtigung des Faktums, dass die Verwendung von Energie Folgen für die Umwelt und die zukünftige Gestaltung unserer Lebensräume hat, die irgendwann zu zahlen sein werden. Die Verantwortlichen in der Schweiz haben sich offenbar dafür entschieden, präventiv zu handeln und - wenn auch noch in bescheidenem Rahmen - die Schadensvermeidung zu finanzieren, während wir ÖsterreicherInnen es offenbar vorziehen, die (weit höheren) Reparaturkosten zu zahlen bzw. die Quittung an unsere Kinder und Enkelkinder weiter zu reichen.

Erfreulicherweise beschreiten nicht alle ÖsterreicherInnen diesen Weg, wie die Gründung der Plattform „Ökosteuern jetzt“ gezeigt hat. Seit Anfang 1999 gehören ihr bereits über 50 Institutionen an; eine Plattform von Engagierten, für die dieser Zwischenbericht natürlich auch gedacht ist: zur Information und zur Anregung.

Wolfgang Jilek

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>  | <b>8</b>  |
| <b>2. Externalitäten und Energie: das ExternE-Projekt der Europäischen Kommission Directorate General XII (Science, Research and Development)</b> | <b>11</b> |
| <b>2.1 Methode</b>  | <b>12</b> |
| 2.1.1 Prinzipien  | 12        |
| 2.1.2 Zusammenfassung   | 16        |
| <b>2.2 Das Konzept der Prozesskettenanalyse bei verschiedenen Brennstoffen</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.3 Zeit- und Raumlimitierungen für die Schadeneinschätzung</b>  | <b>18</b> |
| <b>2.4 Methoden der Schadenbewertung</b>  | <b>18</b> |
| 2.4.1 Unmittelbare Erfassung - Bewertung zu Marktpreisen  | 18        |
| 2.4.2 Ermittlung von Präferenzen - Bewertung durch Zahlungsbereitschaften   | 19        |
| <b>2.5 Diskontierung externer Kosten der Energiebereitstellung</b>  | <b>23</b> |
| <b>2.6 Analyse von Unsicherheiten</b>   | <b>23</b> |
| <b>2.7 Die zu untersuchenden Schadenbereiche</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.8 Analyse der externen Kosten anhand von Referenzenergiesystemen</b>   | <b>24</b> |
| <b>2.9 Externe Kosten durch fossile Brennstoffe</b>   | <b>25</b> |
| 2.9.1 Der Stein- und Braunkohlezyklus   | 25        |
| 2.9.1.1 Referenzstandorte und -technologien   | 25        |
| 2.9.1.2 Umweltwirkungen des Stein- und Braunkohlezyklus   | 26        |
| 2.9.1.3 Bewertungsmethode   | 27        |
| 2.9.1.4 Schadenbereich allgemeine Gesundheit  | 28        |
| 2.9.1.5 Schadenbereich Berufsrisiken (Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten)   | 28        |
| 2.9.1.6 Schadenbereich Landwirtschaft   | 29        |
| 2.9.1.7 Schadenbereich Wald   | 29        |
| 2.9.1.8 Schadenbereich sonstige naturnahe Ökosysteme  | 30        |
| 2.9.1.9 Auswirkungen auf den Wasserhaushalt   | 30        |
| 2.9.1.10 Materialschäden  | 30        |
| 2.9.1.11 Auswirkungen von Lärm  | 30        |
| 2.9.1.12 Auswirkungen auf die globale Erwärmung   | 31        |
| 2.9.1.13 Bewertung von Klimaschäden   | 32        |
| 2.9.1.14 Übersicht über die externen Kosten durch den Stein- und Braunkohlezyklus   | 36        |
| 2.9.2 Der Erdöl- und Erdgaszyklus   | 42        |
| 2.9.2.1 Referenztechnologien und -standorte   | 42        |
| 2.9.2.2 Stationen im Erdgas- und Erdölzyklus  | 43        |
| 2.9.2.3 Schadenbereich allgemeine Gesundheit  | 44        |
| 2.9.2.4 Schadenbereich Berufsrisiken (Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten)   | 44        |
| 2.9.2.5 Schadenbereich Landwirtschaft   | 44        |
| 2.9.2.6 Schadenbereich Wald und andere terrestrische Ökosysteme   | 45        |
| 2.9.2.7 Saurer Niederschlag auf Fischgründe/Süßwassersysteme  | 45        |

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| 2.9.2.8     | Materialschäden   | 45        |
| 2.9.2.9     | Wirkungen auf Meeresumgebungen  | 46        |
| 2.9.2.10    | Schadenbereich Treibhauseffekt  | 47        |
| 2.9.2.11    | Schadenbereich sonstige Effekte   | 47        |
| 2.9.2.12    | Übersicht über die externen Kosten im Erdöl- und Erdgaszyklus   | 47        |
| 2.9.2.13    | Übersicht über die externen Kosten durch fossile Brennstoffe<br>in der ExternE-Studie (Zusammenfassung der Schätzwerte) | 53        |
| <b>2.10</b> | <b>Externe Kosten erneuerbarer Energieträger: Wind und Wasserkraft</b>  | <b>54</b> |
| 2.10.1      | Bewertungsmethode   | 54        |
| 2.10.2      | Referenztechnologien und -standorte   | 54        |
| 2.10.3      | Stationen im Wind- und Wasserkraftzyklus  | 55        |
| 2.10.4      | Zusammenfassung der Auswirkungen durch Windenergieanlagen   | 55        |
| 2.10.5      | Zusammenfassung der Auswirkungen durch Wasserkraftwerke   | 55        |
| 2.10.6      | Die externen Kosten bei Windenergieanlagen  | 56        |
| 2.10.6.1    | Geräuschbelästigung   | 56        |
| 2.10.6.2    | Optische Beeinträchtigung des Landschaftsbildes   | 56        |
| 2.10.6.3    | Atmosphärische Emissionen   | 56        |
| 2.10.6.4    | Berufliche und allgemeine Gesundheitsrisiken – Unfälle  | 56        |
| 2.10.7      | Die externen Kosten bei Wasserkraftwerken   | 58        |
| 2.10.7.1    | Unfälle   | 58        |
| 2.10.7.2    | Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft und Wasserversorgung   | 58        |
| 2.10.7.3    | Auswirkungen auf Erholungsgebiete und Kultureinrichtungen   | 58        |
| 2.10.7.4    | Bewertung des Beschäftigungseffektes  | 59        |
| 2.10.7.5    | Bewertung von lokalen Einkommenseffekten  | 59        |
| <b>2.11</b> | <b>Die Kernenergie</b>  | <b>61</b> |
| 2.11.1      | Bewertungsmethode   | 61        |
| 2.11.2      | Einschätzung der Auswirkungen auf die Gesundheit  | 62        |
| 2.11.3      | Einschätzung der Auswirkungen auf die Umwelt  | 62        |
| 2.11.4      | Monetäre Bewertungsmethode  | 63        |
| 2.11.4.1    | Die Bewertung von Gesundheitsschäden durch nicht radioaktive Strahlung  | 63        |
| 2.11.4.2    | Die Bewertung von Gesundheitsschäden aufgrund radioaktiver Strahlung  | 63        |
| 2.11.5      | Referenztechnologien und -standorte   | 64        |
| 2.11.6      | Prozesskette in der Stromerzeugung durch Kernkraft  | 65        |
| 2.11.7      | Schadenbereiche im Normalbetrieb  | 65        |
| 2.11.8      | Die Bewertung eines schwerwiegenden Reaktorunfalles bzw. Transportunfalles<br>mit dem Computer-Modell „COSYMA“          | 67        |
| 2.11.9      | Übersicht über weitere Studien zur Quantifizierung der<br>externen Kosten im Kernenergiebereich                         | 75        |
| 2.11.10     | Forschungsbedarf im Bereich der Kernenergie des ExternE-Projektes   | 77        |
| <b>2.12</b> | <b>Übersicht über weitere Studien zur Quantifizierung der<br/>externen Kosten im Energiebereich</b>                     | <b>79</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>3. Die externen Kosten der Energieversorgung:<br/>Zusammenfassung der Ergebnisse der ExterneE-Studie</b>                       | <b>80</b>  |
| <b>3.1 Kernenergie</b>  | <b>80</b>  |
| <b>3.2 Wasserkraft</b>  | <b>81</b>  |
| <b>3.3 Windkraft</b>  | <b>82</b>  |
| <b>3.4 Fossile Energieträger: Braun-, Steinkohle, Erdöl, Erdgas</b>   | <b>83</b>  |
| 3.4.1 Menschliche Gesundheit (allgemein)  | 83         |
| 3.4.2 Gesundheit am Arbeitsplatz  | 84         |
| 3.4.3 Landwirtschaft  | 85         |
| 3.4.4 Waldschäden   | 86         |
| 3.4.5 Treibhauseffekt (Klimaschäden)  | 87         |
| 3.4.6 Materialschäden an Gebäuden   | 88         |
| <b>4. Die externen Kosten der Energieversorgung: Zusammenfassung der<br/>Ergebnisse der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Studie (1996)</b> | <b>89</b>  |
| <b>4.1 Waldschäden</b>  | <b>89</b>  |
| <b>4.2 Landwirtschaft</b>   | <b>90</b>  |
| <b>4.3 Gesundheit</b>   | <b>91</b>  |
| <b>4.4 Gebäudeschäden</b>   | <b>92</b>  |
| <b>4.5 Transport, Lagerung, Raffination von Erdöl</b>   | <b>92</b>  |
| <b>4.6 Transport und Lagerung von Erdgas</b>  | <b>93</b>  |
| <b>4.7 Treibhauseffekt</b>  | <b>93</b>  |
| <b>4.8 Kernenergie</b>  | <b>94</b>  |
| <b>4.9 Wasserkraft</b>  | <b>94</b>  |
| <b>4.10 Übertragung und Verteilung von Elektrizität</b>   | <b>95</b>  |
| <b>5. Vergleich INFRAS/PROGNOS-Studie mit ExterneE-Studie</b>   | <b>96</b>  |
| <b>6. Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS)</b>  | <b>100</b> |
| <b>6.1 Energie-Prozessketten in GEMIS 2.1</b>   | <b>101</b> |
| 6.1.1 Methodisches Vorgehen   | 101        |
| 6.1.2 Zuordnung von Hilfsenergien und Neben- sowie Kuppelprodukten in GEMIS   | 102        |
| <b>6.2 Einbeziehung von klimarelevanten Schadstoffen</b>  | <b>102</b> |
| <b>6.3 Nutzungsmöglichkeiten von GEMIS</b>  | <b>102</b> |
| 6.3.1 Prozesskette für Steinkohle   | 103        |
| 6.3.2 Prozesskette für Braunkohle   | 105        |
| 6.3.3 Prozesskette für Erdölprodukte  | 106        |
| 6.3.4 Prozesskette für Erdgas   | 107        |
| 6.3.5 Prozesskette für Uran   | 108        |
| 6.3.6 Prozesskette für Wasserstoff  | 108        |
| 6.3.7 Prozessketten für Biomasse  | 109        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 6.3.7.1    | Prozessketten für Stückholz, Holz-Hackschnitzel und Holzgas aus Restholz  | 109        |
| 6.3.7.2    | Prozessketten für Stroh und Strohcoobs aus Reststroh  | 110        |
| 6.3.7.3    | Prozessketten für Biogas  | 111        |
| 6.3.7.4    | Prozessketten für Holz  | 112        |
| 6.3.7.5    | Prozessketten für Chinagrass oder -schilf ( <i>Miscanthus sinensis</i> )  | 112        |
| 6.3.7.6    | Prozesskette für Raps und Rapsmethylester   | 113        |
| 6.3.7.7    | Prozesskette für Bioäthanol aus Zuckerhirse   | 114        |
| 6.3.8      | Prozessketten für Strom   | 115        |
| <b>6.4</b> | <b>Verkehrsprozesse</b>   | <b>116</b> |
| <b>6.5</b> | <b>Materialprozessketten</b>  | <b>116</b> |
| 6.5.1      | Materialdaten für Prozesse  | 119        |
| 6.5.2      | Materialdaten für Verkehrssysteme   | 123        |
| <b>6.6</b> | <b>Kostendaten in GEMIS 2.1</b>   | <b>124</b> |
| <b>6.7</b> | <b>Neuerungen in GEMIS 3.0</b>  | <b>124</b> |
| <b>6.8</b> | <b>Stand der GEMIS-Anpassung für Österreich (Ende 1998)</b>   | <b>126</b> |
| <b>7.</b>  | <b>Ermittlung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen für erweiterte Wirtschaftlichkeitsberechnungen (AFB Schweiz)</b> | <b>127</b> |
| 7.1        | Modellbeschreibung  | 127        |
| 7.2        | Emissionszuschläge (EMZ)  | 129        |
| 7.3        | Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ)  | 130        |
| 7.4        | Empfehlung für energetische Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit Einbezug der externen Kosten  | 135        |
| 7.5        | Zusammenfassung der Programmbeschreibung Excel-Arbeitsmappen zu Wirtschaftlichkeitsberechnungen   | 135        |
| 7.5.1      | Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen  | 135        |
| 7.5.2      | Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen   | 135        |
| 7.5.3      | Wichtige Eingabegrößen  | 136        |
| <b>8.</b>  | <b>Schlussbemerkung</b>   | <b>137</b> |
| <b>9.</b>  | <b>Anhang</b>   | <b>138</b> |
| 9.1        | Literaturverzeichnis  | 138        |
| 9.2        | Tabellen- und Abbildungsverzeichnis   | 141        |
| 9.3        | Quellenverzeichnis  | 144        |
| 9.4        | Abkürzungen, chemische Symbole und Einheiten  | 146        |

## 1. Einleitung

Durch die Energieumwandlung und Energienutzung werden vielfältige Umwelt- und Gesundheitsrisiken bzw. -kosten hervorgerufen, die in den aktuellen Preisen der Energieträger nicht vollständig erfasst sind. Die Folge ist, dass diese Kosten bei den wirtschaftlichen Entscheidungen der Energieproduzenten und Energiekonsumenten nicht berücksichtigt werden. Diese Effekte werden in der ökonomischen Theorie als externe Kosten oder auch als soziale Kosten bezeichnet.

Die Diskussion über die externen Kosten der Energieversorgung wurde durch eine Studie von Olav **Hohmeyer** mit dem Titel „Soziale Kosten des Energieverbrauchs“ (1989) angeregt. In dieser Studie werden neben der Präsentation einer kurzen Übersicht über Umweltschäden durch verschiedene Energiesysteme primär externe makroökonomische Effekte von Energiesystemen (Auswirkungen auf die Produktion, Beschäftigung und Handelsbilanz, induzierte öffentliche Ausgaben sowie die Problematik des Ressourcenverzehr) sowie ihre Auswirkungen auf die Marktdiffusion von Windenergiekonvertern und Photovoltaikanlagen untersucht. Hohmeyer schätzte die externen Kosten der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern und Kernenergie in derselben Größenordnung wie die Stromerzeugungskosten selbst. Durch diese Vermutung wurde darauf geschlossen, dass sich bei Berücksichtigung der externen Kosten die Kostenrelationen zwischen verschiedenen untersuchten Stromerzeugungstechniken erheblich ändern könnten.

In einer Studie „Externe Kosten der Stromerzeugung“ (1990) von Rainer **Friedrich** et al. wurden die bei Hohmeyer verwendeten Methoden und getroffenen Annahmen überprüft. Im Wesentlichen wurde durch diese Studie dargelegt, dass plausiblere Annahmen und verbesserte methodische Ansätze zu merklich niedrigeren

externen Kosten in den untersuchten fossilen und nuklearen Energiesystemen führen können.

In den USA wurde von **Ottinger**, Pace University Center for Environmental Legal Studies in New York, eine Studie über die externen Kosten der Stromerzeugung, „Environmental Costs of Electricity“ (1990), ausgearbeitet, die sich in einigen Schadensbereichen an der Methodik der Arbeit von Hohmeyer orientiert. Behandelt werden darin vorwiegend externe Kosten durch Emission (Treibhauseffekt, Schwefeldioxyde, Stickoxide und Ozon, saurer Regen, Landverbrauch und Wasserverschmutzung) sowie externe Kosten durch Ressourcenverbrauch (Kohle-, Erdöl-, Erdgas-, Kernkraftwerke, Kraftwerke für regenerative Energie und zur Müllverbrennung, Energiesparmaßnahmen). Spätere Studien wurden im Auftrag des Department of Energy der USA vom Oak Ridge National Laboratory und von Resources of the Future verfasst.

In Großbritannien wurden Studien über die externen Kosten der Energieumwandlung und -nutzung unter dem Titel „The Social Costs of Fuel Cycles“ (1992) sowie „The Development of Externality Adders in the United Kingdom“ (1995) von **Pearce** veröffentlicht.

In Deutschland wurde vom BM für Wirtschaft eine Studie bei der Schweizer **Prognos AG**, Europäisches Zentrum für angewandte Wirtschaftsforschung (Basel), in Auftrag gegeben. Die Studie „Identifizierung, Monetarisierung und Internalisierung der Energieversorgung“ (1992) sollte den Wissensstand zu Beginn der neunziger Jahre aufzeigen, ohne dass jedoch eigene Berechnungen für externe Kosten durchgeführt wurden (von zwei Ausnahmen abgesehen). Die Schriftenreihe enthält Untersuchungen externer Effekte zu den Bereichen

Bodenbelastung, Waldschäden, Gefährdung der Artenvielfalt, Bau- und Materialschäden durch Luftverschmutzung, Gesundheitsschäden, Schäden durch Unfälle in Kernkraftwerken, Schäden durch Kohlendioxid und Methan, Schäden aus der vorzeitigen Erschöpfung nicht erneuerbarer Ressourcen sowie externer Effekte regenerativer Energiesysteme. Die übrigen Bände befassen sich mit Internalisierungsbedingungen, -strategien und -maßnahmen.

In der Schweiz wurde die Studie „Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich“ (1994) im Auftrag von Schweizer Bundesbehörden (Bundesamt für Energiewirtschaft, Amt für Bundesbauten, Bundesamt für Konjunkturfragen) von der Arbeitsgemeinschaft **INFRAS/PROGNOS** erarbeitet. Eine Fortsetzung der INFRAS/PROGNOS-Studie erfolgte in der Publikation „Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“ (1996), die von den Büros **INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS** veröffentlicht wurde.

Die wohl umfangreichste Untersuchung der externen Kosten der Energieversorgung stellt die von der **Europäischen Kommission der EU** in Auftrag gegebene Studie „Externalities of Energy - ExternE“ dar. Seit 1995 werden die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes, das wesentliche Fortschritte für die Monetarisierung externer Effekte unterschiedlicher Stromerzeugungssysteme gebracht hat, publiziert. Zu den methodisch noch ungelösten Problemen gehören u.a. die Bewertung der Verringerung der Artenvielfalt, die Behandlung von Risikoaversionen (v.a. bei Unfällen in Kernkraftwerken) und die Bewertung von Schäden, die erst mit einer größeren zeitlichen Verzögerung auftreten.

Im Rahmen der hier vorliegenden Literaturstudie, die unter dem Titel „Externe Kosten im Energiebereich - 2. Zwischenbericht“ die Fortsetzung und Aktualisierung der Ergebnisse aus den Literaturrecherchen von Andreas **Simetzberger**, „Externe Kosten der Energieversorgung - 1. Zwischenbericht“ (1995) zum Inhalt hat, soll eine Übersicht über die Bandbreite der bestehenden Bewertung externer Kosten im Energiesektor gegeben werden. Das Hauptaugenmerk wird auf die Untersuchung der ExternE-Studie der Europäischen Kommission zu dieser Thematik gerichtet. Im zweiten Abschnitt werden zunächst die Untersuchungsmethode der EU dargestellt und die Bewertungskonzepte erläutert. Dann werden die externen Kosten fossiler Brennstoffe (Braun- und Steinkohle, Erdöl und Erdgas), der Kernenergie sowie der Wind- und Wasserkraft ausgewiesen. Darüber hinaus erfolgt eine vergleichende Gegenüberstellung der Untersuchungsgegenstände und -ziele sowie der Bewertungsmethoden in der ExternE-Studie mit den Ergebnissen der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Studie, „Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“ (1996). Die wichtigsten Ergebnisse beider Studien werden tabellarisch zusammengefasst.

In Abschnitt 6 wird das Computerprogramm **GEMIS** (Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme) präsentiert, das vom Öko-Institut Darmstadt für umweltbezogene Analysen und Vergleiche von Energiesystemen zur Bereitstellung von Wärme und Elektrizität entwickelt wurde. GEMIS ist ein Computer-Instrument zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen.

Der Abschnitt 7 beinhaltet die Zusammenfassung des „**Modells AFB**“ (Amt für Bundesbauten, Schweiz), das bei der Ermittlung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen für

erweiterte Wirtschaftlichkeitsberechnungen zugrunde liegt. Ziel dieses Modells ist es zu untersuchen, inwieweit durch eine Mitberücksichtigung externer Kosten in Wirtschaftlichkeitsrechnungen die Konkurrenzfähigkeit neuer Energietechnologien und Energiesparmaßnahmen gesteigert werden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in der hier vorliegenden Literaturstudie enthalten. Eine ausführliche Beschreibung und detaillierte Auflistung der zugrunde liegenden Datensätze erfolgt in der INFRAS/PROGNOS-Studie „Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich“ (1994).

Das Wasser- und Energiewirtschaftsamt (WEA) des Kantons Bern hat in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Amt für Bundesbauten ein Programm für „Wirtschaftlichkeitsrechnungen mit externen Kosten“ entwickelt, das für diese Publikation freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde und in Kapitel 7.5 kurz beschrieben wird. Die Berechnungsmethode ermöglicht nach Ansicht der Schweizer Institutionen „eine umfassende Beurteilung künftiger Investitionsvorhaben“ und versetzt so „die entscheidenden Stellen in die Lage, einen korrekten Überblick über die Auswirkungen sämtlicher Varianten zu gewinnen und eine effizienzorientierte Prioritätenordnung festzulegen“. Das Rechnen mit externen Kosten sei „daher ganz im Sinne eines optimalen Einsatzes der finanziellen Mittel der öffentlichen Hand (Bund, Kanton und Gemeinden)“. Die Verwendung der Berechnungsmethode wurde in mehreren Schweizer Bundes- und Kantondienststellen in Form einer Weisung verpflichtend eingeführt (zum Beispiel im Kanton Bern im September 1996).

Bei sämtlichen quantifizierten und monetarisierten Schätzwerten über externe Effekte in der Energieversorgung muss berücksichtigt werden, dass die Identifizierung und Internalisierung externer Effekte ein ständiger Prozess ist und die ver-

schiedenen Projekte und Studien daher auch keine „abschließenden“ Ergebnisse enthalten.

## 2. Externalitäten und Energie: das ExternE-Projekt der Europäischen Kommission Directorate-General XII (Science, Research and Development)

In den vergangenen Jahren konnte ein ständig steigendes Problembewusstsein in der Einschätzung von Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung und die daraus resultierenden externen Kosten registriert werden. Die Gründe für eine umfassende Auseinandersetzung mit dieser Problematik sind vielfältig und werden u.a. durch folgende Faktoren bestimmt:

- die Unerlässlichkeit, umweltrelevante Sachverhalte in die Entscheidungsfindung bezüglich der Auswahl unterschiedlicher Brennstoffe und Energietechnologien mit einzubeziehen
- die Notwendigkeit, Kosten und Nutzen von strengeren Umweltstandards abzuschätzen
- eine verstärkte Berücksichtigung ökonomischer Instrumente in der Umweltpolitik
- die Erfordernis, allgemein gültige Kenndaten für umweltgerechte Leistungswerte von Energietechnologien zu definieren
- erhebliche Veränderungen im Energiesektor aufgrund der durchgeführten Privatisierung und Liberalisierung des Strommarktes sowie verringerter Subventionsbeiträge

Eine einheitliche Methode zur Analyse externer Kosten in der Energieversorgung wurde bis jetzt nicht etabliert. Das ExternE-Projekt ist der erste komplette Versuch, eine gleichbleibende „**bottom-up**“-Methodenlehre zu verwenden, um die externen Kosten verschiedenster Energietechnologien zu untersuchen. Die Europäische Kommission startete 1991 im Rahmen des Joule II Programms das Projekt in Zusammenarbeit mit dem United States Department of Energy. Die EC- und US-Teams entwickelten gemeinsam die Methodenlehre und deren Anwendung für verschiedene Brennstoffzyklen. Während dieser ersten Phase konzentrierte sich die EC-Seite auf die Kernkraft- und Braunkohleprozesskette. Im Rahmen des Joule II

Programms wurde in einer zweiten Projektphase die Arbeit der Europäischen Kommission in Form der praktischen Anwendung der Methodenlehre auf weitere Brennstoffprozessketten (Öl, Erdgas, Wind- und Wasserkraft) fortgesetzt. Mit Jahresanfang 1996 begann die Phase III des ExternE-Projektes. Die ExternE-Studie hat sowohl methodisch als auch in empirischer Hinsicht wesentliche Fortschritte für die Monetarisierung externer Effekte verschiedener Stromerzeugungssysteme gebracht.

Primäres Ziel der ExternE-Studie ist, die Methodenlehre auf sämtliche fossile, nukleare und erneuerbare Prozessketten für Stromerzeugungs- und Energieerhaltungsoptionen und für eine Reihe nationaler Implementierungsprogramme innerhalb der EU-Staaten anzuwenden, um die Methodenlehre für Energiereferenzsysteme zu implementieren. Das Projekt bezieht momentan über 30 Teams von Forschungsinstituten in neun Mitgliedstaaten der Europäischen Union mit ein. Die Hauptaufgaben des ExternE-Forschungsprojektes können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Identifizierung und Erstellung einer einheitlichen Bewertungsmethode zur Quantifizierung der externen (sozialen) Kosten in der Produktion und im Konsum der wichtigsten Stromerzeugungssysteme, um objektive Energiesystemvergleiche durchführen zu können
- Anwendung dieser Methode zur Evaluierung der externen Kosten aufgrund einer verstärkten Nutzung unterschiedlicher Brennstoffe an unterschiedlichen Standorten innerhalb der Europäischen Union
- Identifizierung künftiger Forschungsnotwendigkeiten, um die Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung zu verringern

Die Studien bewerten die erzielten Fortschritte in der Berücksichtigung externer Effekte durch eine umfassende Quantifizierung von Umwelt- und Gesundheitsschäden der vor- und nachgelagerten Prozessstufen innerhalb der untersuchten Energieträger. Wo immer es möglich war, wurde für die Quantifizierung gleichartiger Schäden innerhalb der Brennstoffprozessketten eine einheitliche Bewertungsmethode verwendet.

Bis Mitte 1998 lagen Forschungsergebnisse der ExternE-Studie für folgende Brennstoffzyklen vor:

- Steinkohle in ExternE (1995), Vol. 3
  - Braunkohle in ExternE (1995), Vol. 3
  - Erdöl in ExternE (1995), Vol. 4
  - Erdgas in ExternE (1995), Vol. 4
  - Nuklearenergie in ExternE (1995), Vol. 5
- sowie zwei erneuerbare Energieträger, nämlich
- Wasserkraft in ExternE (1995), Vol. 6
  - Windkraft in ExternE (1995), Vol. 6

Für jeden Energiezyklus wurden Referenztechnologien und -standorte festgelegt, um die erforderlichen Untersuchungen und Analysen durchzuführen.

Darüber hinaus liegt seit Juni 1998 eine Studie über die externen Kosten der energetischen Nutzung von Biomasse vor. In der Studie mit dem Titel „Total Costs and Benefits of Biomass in Selected Regions of the European Union“ (BioCosts) werden auch Aspekte der globalen Klimaänderung diskutiert und im Hinblick auf das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung bewertet. Es werden Fallstudien zur direkten Verbrennung, Kraft-Wärme-Kopplung, verschiedene Formen der Gask Gewinnung sowie der Herstellung flüssiger Brennstoffe durchgeführt. Darüber hinaus werden die lokalen und nationalen Rahmenbedingungen für die Biomassenutzung in den jeweiligen Ländern diskutiert. Die Ergebnisse dieses Projektes der Kommission der Europäischen Union, DG XII

(Laufzeit Jänner 1996 – Juni 1998) sind in diesem „2. Zwischenbericht“ über die externen Kosten der Energieversorgung nicht berücksichtigt. Eine Zusammenfassung dieser Studie erfolgt in einer weiteren Literaturstudie zu einem späteren Zeitpunkt, da die Ergebnisse zur Zeit (Stand September 1998) noch nicht veröffentlicht wurden.

## 2.1 Methode

### 2.1.1 Prinzipien

Um Vergleiche zwischen den einzelnen Prozessketten durchführen zu können, müssen folgende Prinzipien berücksichtigt werden:

- (a) Transparenz**, um die Arbeitsstruktur genau aufzuzeigen sowie etwaige Unsicherheiten in den Ergebnissen und durchgeführten Systemabgrenzungen innerhalb der einzelnen Prozessketten vollständig quantifizieren zu können
- (b) Konsistenz** unter Berücksichtigung der durchgeführten Systemabgrenzungen, um gültige Vergleiche zwischen unterschiedlichen Prozessketten und unterschiedlichen Arten der Auswirkungen innerhalb einer Prozesskette durchführen zu können
- (c) Umfang**, um alle Auswirkungen einer Brennstoffprozesskette betrachten zu können, obwohl viele möglicherweise nicht im Detail nachgeforscht werden können

Die bisher vorliegenden Studien zu den externen Kosten der Energieversorgung differieren in ihren numerischen Resultaten zum Teil erheblich. Ein wesentlicher Teil dieser Unterschiede kann auf die Verwendung unterschiedlicher Definitionen und Erfassungsmethoden zurückgeführt werden. In den meisten der vorliegenden Studien wird ein „**top-down**“-Ansatz gewählt. Dabei werden zunächst Gesamtschäden abgeschätzt, diese werden dann

auf die in Frage kommenden Verursacher (z.B. nach dem Anteil an den Gesamtemissionen) pauschal verteilt. Im Allgemeinen gibt der Verteilungsmechanismus die tatsächliche Ursache-Wirkungs-Beziehung nur annähernd wieder. Darüber hinaus lassen sich mit dem Ansatz nur durchschnittliche, nicht aber die entsprechend den zugrunde liegenden Theorien (für neoklassische Analysen interessant) gewünschten marginalen Kosten ermitteln. Weiters wird in den meisten Fällen die Ortsabhängigkeit und die Abhängigkeit von der (verwendeten) Technologie vernachlässigt.

Die Berücksichtigung von Belastungen und Gefährdungen der Umwelt, Gesundheit und der Natur durch die Elektrizitätserzeugung setzt deren möglichst genaue Kenntnis voraus. Ein wichtiges Ziel im Rahmen der ExternE-Studien ist es, Umweltschäden und -risiken, die durch die wichtigsten Stromerzeugungssysteme entstehen, systematisch und umfassend dem heutigen Wissensstand entsprechend zu erläutern. In den ExternE-Studien wird daher als „**bottom-up**“-Ansatz der „**Wirkungspfadansatz**“ („**impact-pathway**“-Methode) gewählt, der eine sachgerechtere Zuordnung der externen Kosten erlaubt. Bei dieser Methode wird der Weg der Schadstoffe ausgehend von der Emissionsquelle über Ausbreitung und chemische Umwandlung der Schadstoffe in den Umweltmedien Luft, Wasser und Boden untersucht. Die Analysen beginnen mit der Identifizierung der einzelnen Stufen innerhalb der zu untersuchenden Brennstoffprozesskette. Die Braun- und Steinkohleprozesskette umfasst beispielsweise die Phasen der Kohlegewinnung, Abfallbeseitigung, Aufbereitung, Transport usw. bis einschließlich des Stromerzeugungsprozesses.

Dieses Verfahren wird als **Damage Function Approach (Methode der Schadensfunktion)** bezeichnet, bei dem drei aufeinander folgende Analyseebenen unterschieden werden. In einem *Technology Characterisation Level* wird zunächst

eine komplexe, technologische Aktivität (ein Kraftwerk) in eine logische Folge von Einzelschritten zerlegt, die sowohl die einzelnen Anlagenteile als auch deren Lebenszyklus beinhaltet. Jedem Teil wird eine Summe von Wirkungen zugeordnet. Ergebnis dieser ersten Analyseebene ist eine „**Belastungsmatrix**“ („**burden matrix**“). Anschließend werden in einem *Physical Impacts Identification Level* mit Hilfe von **Expositions-Wirkungs-Beziehungen** (auch als **Dosis-Wirkungs-Konzept**<sup>(1)</sup> bezeichnet) sämtliche Wirkungen auf ihren Einfluss auf die betroffenen Rezeptoren (Mensch, Flora, Fauna, Materialien und sonstige Ökosysteme) hin untersucht und die Größe dieses Einflusses bestimmt. Ergebnis der zweiten Analyseebene ist eine „**Einwirkungsmatrix**“ („**impact matrix**“). In einem dritten Schritt, dem *Economic Valuation Level*, erfolgt eine Monetarisierung der einzelnen Wirkungen. Dadurch entsteht ein Bewertungsmodell („*accounting framework*“), das die Grundlage für eine adäquate Berücksichtigung externer Effekte in der Energieplanung darstellen soll.<sup>(2)</sup>

Bei dieser Methode wird nicht versucht, die Präferenzen der Menschen direkt zu messen. Als Grundlage dient die Beziehung zwischen „Dosis“ und „Wirkung“. Ausgehend von wissenschaftlichen Erkenntnissen wird eine Verbindung zwischen der messbaren Umweltbelastung (z.B. den Partikelemissionen) und der beobachteten Wirkung (z.B. höhere Krankheits- oder Sterblichkeitsrate) hergestellt.

Eine monetäre Bewertung der verursachten Schäden wird nur bei den Wirkungen durchgeführt. In einigen Fällen können zur Bewertung der externen Effekte auf Güter und Dienstleistungen die aktuellen Marktpreise herangezogen werden (Krankenhauskosten, Arbeitsproduktivität, Ernteauffälle usw.). Wenn jedoch das beschädigte Gut nicht auf einem Markt gehandelt wird (Menschenleben, Wert einer Landschaft), ist es

erforderlich die Ergebnisse alternativer Methoden zu verwenden (z.B. Versicherungsansatz).

Aufgrund der Komplexität der kausalen Wirkungskette eines Schadstoffes von der Emission bis zur Wirkung muss die Wirkungskette sinnvoll vereinfacht werden, um eine modell-technische Beschreibung anwenden zu können. Zur Strukturierung und transparenten Darstellung von Zwischenergebnissen wird die Wirkungskette in Zwischenstufen gegliedert, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

Symptomatisch in dieser Darstellungsart ist die von Stufe zu Stufe wachsende Unsicherheit bei der Beschreibung der Wirkungskette.

Im Gegensatz dazu können die Umweltwirkungen aufgrund moderner Messtechniken relativ genau angegeben werden. Der entstehende Schaden ist abhängig vom Ort der Emissionen, den zugrunde liegenden Ausbreitungsbedingungen und der Rezeptorenverteilung. Externe Kosten sind somit orts- und technologieabhängig.

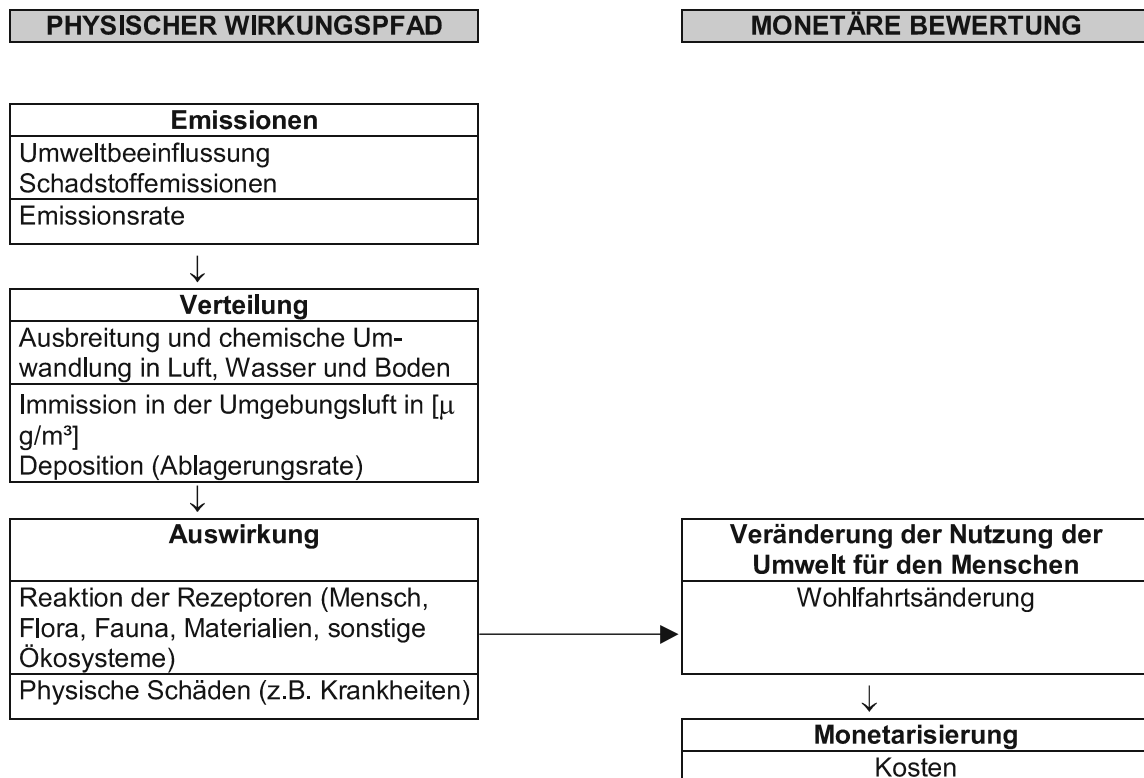


Abb. 1: Der Wirkungspfadansatz („impact-pathway“-Methode) in der ExternE-Studie

Quelle: ExternE (1995), Vol. 4, S. 3

Grundsätzlich können bei der Analyse eines Energiesystems mit allen vor- und nachgelagerten Prozessstufen (Brennstoffförderung, -transport, Bau/Demontage der Anlage, Abfallentsorgung) die Anzahl der betrachteten Wirkungspfade zur Beschreibung einzelner Umweltwirkungen und möglicher Schäden beliebig festgesetzt werden. Aufgrund der komplexen und aufwendigen

Untersuchungen einzelner Umweltwirkungen wird es für die Schadenskostenschätzung ausreichend sein, jene Wirkungspfade umfassend zu untersuchen, die die voraussichtlich größten Umweltschäden beschreiben, wobei die einzelnen Schadenskategorien sich im Hinblick auf die räumliche und zeitliche Verteilung der Effekte zum Teil erheblich voneinander unterscheiden.

| Schadenkategorie                   | Umwelteinwirkung  | Energiesystem   |
|------------------------------------|---|---|
| Gesundheitsschäden                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ primäre und sekundäre Luftschadstoffe</li> <li>▪ ionisierende Strahlung</li> <li>▪ Berufskrankheiten/Arbeitsunfälle</li> </ul> | fossile Energiesysteme, Photovoltaik*, Wind*<br>Kernenergie<br>alle |
| Beeinträchtigung des Wohlbefindens | Lärm  | Wind  |
| Klimaänderung                      | Treibhausgase   | fossile Energiesysteme, Photovoltaik*, Wind*                        |
| Waldschäden                        | saure Deposition  | fossile Energiesysteme, Photovoltaik*, Wind*                        |
| Schäden an Feldpflanzen (Getreide) | primäre und sekundäre Luftschadstoffe   | fossile Energiesysteme, Photovoltaik*, Wind*                        |
| Auswirkungen auf Ökosysteme        | Stickstoffeintrag   | fossile Energiesysteme, Photovoltaik*, Wind*                        |
| Schäden an Sachgütern              | primäre und sekundäre Luftschadstoffe, saure Deposition   | fossile Energiesysteme, Photovoltaik*, Wind*                        |
| Schädigung maritimer Ökosysteme    | Öleinträge ins Meer   | Stromerzeugung aus Öl   |

Tab. 1: Übersicht über die wichtigsten Wirkungspfade der betrachteten Stromerzeugungssysteme

Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung – Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“, S. 27

\* durch vorgelagerte Prozessstufen

## 2.1.2 Zusammenfassung

Inhalt des Forschungsprojektes der Europäischen Kommission ist die Abschätzung der externen Kosten unterschiedlicher Energietechnologien. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten werden alle untersuchten Technologien mit dem gleichen methodischen Instrumentarium („bottom-up“-Methode) erarbeitet. Mittels der zugrunde liegenden „impact-pathway“-Methode wird der Weg der Schadstoffe von deren Entstehung bis hin zu den von Schadstoffen betroffenen Rezeptoren untersucht. In der ExternE-Studie umfasst der jedem Brennstoff zugrunde liegende Wirkungspfad folgende sieben Stufen: (Zusammenfassend werden danach die wichtigsten Stufen im Wirkungspfad-Modell kurz beschrieben)

1. Brennstoffaktivität (z.B. über Emissionen von Schmutzpartikeln)
2. Transport der Schmutzpartikel und chemische Prozesse
3. Ablagerung und Aufnahme bei den betroffenen Rezeptoren
4. Zwischenprozesse innerhalb des betroffenen Ökosystems
5. biologische/physikalische/chemische Ausgangspunkte
6. biologische/physikalische/chemische Endpunkte
7. ökonomische Bewertung

### ■ Emission<sup>(3)</sup>

Charakterisierung der relevanten Technologie und der Umweltwirkungen, die durch die jeweiligen Emissionen entstehen, wie beispielsweise Tonnen von  $\text{NO}_x$ , die pro  $\text{GWh}_e$  von einem bestimmten Kraftwerk emittiert werden

### ■ Verteilung

Auf dieser Stufe des Wirkungspfades eines untersuchten Schadstoffes erfolgt die Berechnung der

Schadstoffkonzentrationen in den davon betroffenen Regionen. So erfolgt hier beispielsweise die Berechnung der (zusätzlichen)  $\text{O}_3$ -Emissionen [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] unter Verwendung von atmosphärischen Verteilungsmodellen sowie Modellen bezüglich der  $\text{O}_3$ -Bildung durch  $\text{NO}_x$ .

### ■ Auswirkung

Charakterisierung der von der zusätzlichen Schadstoffbelastung betroffenen Rezeptoren (Mensch, Fauna, Flora usw.). Identifizierung einer passenden Dosis-Wirkungsfunktion, mit deren Hilfe die dabei verursachten Schäden bzw. Auswirkungen abgeschätzt werden können (z.B. Anzahl der Asthmafälle aufgrund einer gestiegenen  $\text{O}_3$ -Konzentration)

### ■ Kosten

Auf der letzten Stufe des Wirkungspfades erfolgt die ökonomische Bewertung dieser Auswirkungen, wobei z.B. durch Multiplikation der Anzahl der zusätzlichen Asthmafälle mit den Kosten pro Asthmapatient die Schadenkosten ermittelt werden und darauf basierend jener Teil der Schadenkosten geschätzt wird, der (noch) nicht internalisiert ist. Dieser Teil der Kosten wird als externe bzw. soziale Kosten der Elektrizitätserzeugung bezeichnet. Zur Berechnung der externen Kosten nach dem Wirkungspfadansatz wurde das EDV-System **EcoSense**<sup>(4)</sup> erstellt. EcoSense ist ein integriertes Softwareinstrument, das von IER an der Universität Stuttgart im Rahmen der ExternE-Studie entwickelt wurde. EcoSense bewertet die Umweltbelastungen sowie die unterschiedlichen externen Kosten aus den verschiedensten Energieerzeugungssystemen. Es basiert auf der ExternE-Expositions-Wirkungs-Funktion und enthält u.a. Daten und Modelle, mit denen sich die Ausbreitung und chemische Umwandlung von Luftschadstoffen und deren Auswirkung auf die menschliche Gesundheit, Feldpflanzen (Getreide), Materialien, Wälder und sonstige naturnahe Ökosysteme

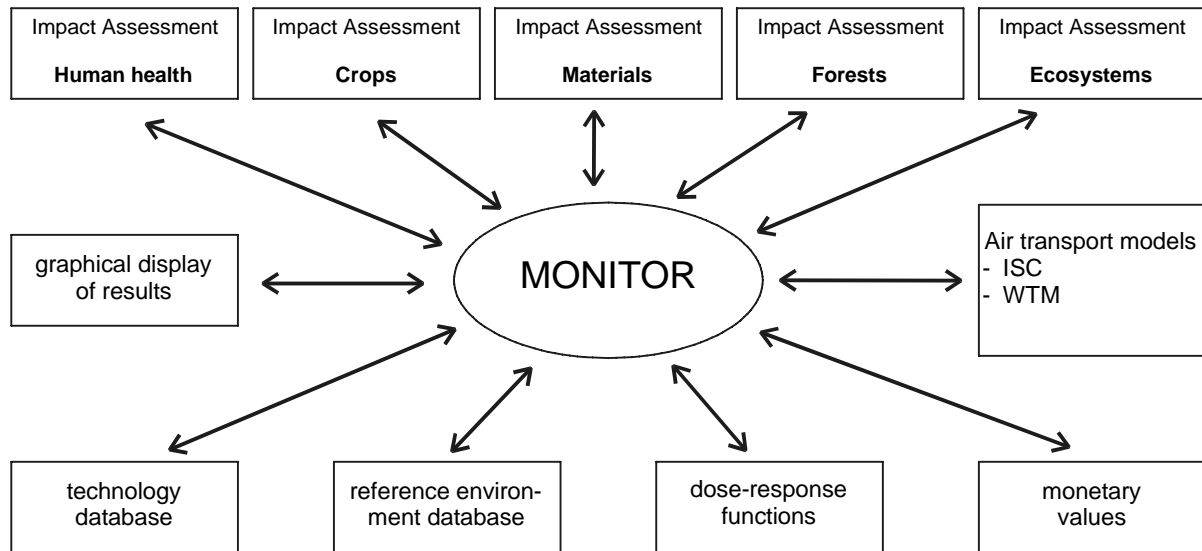


Abb. 2: Struktur des EcoSense-Modells

Quelle: ExternE (1997) – Methodology Annexes, S. 2

berechnen lassen. Aufgrund der vielfältigen und sehr komplexen Auswirkungen einer globalen Erwärmung ist die Schadenkategorie „Treibhauseffekt“ nicht in diesem Computersystem enthalten. Die EcoSense Version 2.0 umfasst 13 Schadstoffe, einschließlich der „klassischen“ Schadstoffe  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Partikel und  $\text{CO}$  (ohne radioaktive Schadstoffe). Das System enthält auch zwei integrierte atmosphärische Modelle, die eine lokale sowie regionale Skalenformung erlauben. Darüber hinaus ist auch eine Datenbank der verschiedenen monetären Bewertungen für unterschiedliche Auswirkungen enthalten.

## 2.2 Das Konzept der Prozesskettenanalyse bei verschiedenen Brennstoffen

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den einzelnen Prozessketten der verschiedensten Stromerzeugungssysteme zu gewährleisten, wurden für die Untersuchungen folgende fünf Stufen von Primärwirkungen (auch als Wirkungen 1. Ordnung bezeichnet) festgelegt:

- Brennstoff- Abbau (Gewinnung)
- Brennstoff- Aufbereitung
- Transport
- Stromerzeugung
- Abfallendlagerung

Hauptverursacher für Umwelt- und Gesundheitsschäden in den Energiesystemen ist die eigentliche Stromerzeugung in den Kraftwerken (Anlagen), wobei Gesundheitsschäden vor allem auf Staubpartikel,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und Ozon-Belastungen zurückzuführen sind. Andere Schadstoffe wie Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe wurden als nicht signifikant eingeschätzt, weil die Emissionsbelastung in den untersuchten Kraftwerken sehr gering ist. Die mit der Stromerzeugung verbundenen Prozessstufen 2. Ordnung (z.B. die Emissionen für die Produktion von Stahl, um ein Kraftwerk errichten zu können) werden in der ExternE-Studie vernachlässigt. Jedoch steigt die Bedeutung dieser 2. Prozessstufen bei der Analyse erneuerbarer Energietechnologien. Diesbezügliche Vernachlässigungen können dadurch zu Inkonsistenzen beim Vergleich der verschiedenen Prozessketten führen.

## 2.3 Zeit- und Raumlimitierungen für die Schadeneinschätzung

Die Quantifizierung der Umwelt- und Gesundheitsschäden der verschiedenen Prozessketten wurde in drei Stufen realisiert:

- Spezifikation der Kraftwerkstechnologie und der Betriebscharakteristiken
- Identifikation der physischen Auswirkungen nach ihrer Priorität
- Evaluierung dieser Schäden mittels monetärer Werte

Die Auswirkungen werden über die gesamte Lebensdauer der Kraftwerke betrachtet (keine Beschränkung der Untersuchungen auf z.B. ein Jahr).

## 2.4 Methoden der Schadenbewertung

Die Berücksichtigung von externen Kosten in den Marktpreisen wird als „Internalisieren“ bezeichnet. Dadurch können heutige und zukünftige Schäden in die Entscheidungen einfließen. In der Ökonomie wurden für die monetäre Bewertung der externen Effekte verschiedene Methoden entwickelt. In Abhängigkeit vom betrachteten Umweltbereich (Luft, Klima, Gesundheit etc.) bzw. je nachdem, welche Daten zur Verfügung stehen, ist die eine oder andere Methode für eine Quantifizierung besser geeignet. Voraussetzung für die Internalisierung externer Effekte im Rahmen ökonomischer Instrumente ist eine Monetarisierung der durch die externen Effekte verursachten **Schäden** und/oder der Kosten ihrer **Vermeidung**.

### Schadenkostenermittlung

- unmittelbare Erfassung über Marktpreise
- Ermittlung von Zahlungsbereitschaften, Präferenzen (direkt, indirekt)

### Vermeidungskostenermittlung

- Ermittlung der Kosten zur Vermeidung externer Effekte

Beim **Schadenkostenansatz** können zwei Kategorien unterschieden werden, wobei entweder die Kosten quantifiziert werden, die durch die entstandenen Schäden anfallen (Bewertung der Ressourcenkosten zu Marktpreisen) oder eine Quantifizierung des entgangenen Nutzens der Betroffenen durchgeführt wird. Die letztgenannte Methode basiert auf der Abfrage von sog. Zahlungsbereitschaften für z.B. sauberes Wasser oder saubere Luft. Beim **Vermeidungskostenansatz** werden die Kosten bewertet, die bei der Vermeidung der externen Effekte entstehen.

Da im ExternE-Projekt der **Schadenkostenansatz** angewendet wird, wird im folgenden Abschnitt ein kurzer Überblick über die Verfahren zur monetären Bewertung von Umweltschäden über den Schadenkostenansatz gegeben<sup>(5,6)</sup>.

### 2.4.1 Unmittelbare Erfassung - Bewertung zu Marktpreisen

Monetäre Werte für Schäden können in einigen wenigen Fällen als Marktpreise ermittelt werden. Es handelt sich hier zum Beispiel um Materialschäden an Bauwerken und Schäden an Nutzpflanzen oder um Gesundheitsschäden, die reversibel sind und durch eine „Reparaturleistung“ beseitigt werden können: Der Schaden besteht in den Kosten der Reparatur, z.B. Kosten einer durch Verschmutzung notwendig gewordenen Fassadenrenovierung, die in einfachen Fällen auch eine Entschädigung zum Beispiel von messbaren Einkommensverlusten in der Land- und Forstwirtschaft mit einschließt.

## 2.4.2 Ermittlung von Präferenzen - Bewertung durch Zahlungsbereitschaften

In den meisten Fällen können jedoch auftretende Externalitäten nicht über Märkte abgewickelt werden und somit ist der größte Teil der externen Effekte aufgrund eines fehlenden Marktpreises einer einfachen Bewertung nicht zugänglich. Zu dieser Gruppe von Externalitäten gehören alle Schäden nicht materieller Art und irreversible Schäden, zum Beispiel der Verlust an Menschenleben, das Verschwinden von Arten in Flora und Fauna, die Zerstörung des Erholungs- und Erlebniswertes unbeeinträchtigter Landschaften. Auch die Interpretation und die Bewertung des Risikos von Kernkraftunfällen (nicht die monetäre Bewertung des potentiellen Schadens selbst) fallen in diese Bewertungskategorie. Hier können Verfahren zur Anwendung kommen, die aus den Präferenzen der Betroffenen monetäre Größen für die Schäden, die von Interesse sind, ableiten.

Allgemein erfolgt eine Differenzierung zwischen „**willingness to pay**“ (**WTP**) für die Realisierung eines bestimmten Ausmaßes einer Schadstoffreduktion bzw. Schadenverringerung und „**willingness to accept**“ (**WTA**) bei einer etwaigen Erhöhung der Schadstoffbelastung.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen **direkten** und **indirekten Verfahren** der Präferenzermittlung. Direkte Verfahren erfassen die WTP für Umweltgüter durch Befragungen, während in-

direkte Methoden diese WTP aus beobachteten Marktdaten ableiten und daraus Rückschlüsse auf die mit diesem Verhalten offenbarte Wertschätzung ziehen.

Bei der **indirekten Monetarisierung** mittels einer **hedonistischen Preisanalyse** („**hedonic pricing**“) werden Güter betrachtet, in deren Preis auch die Umweltqualität einfließt. Bei diesem Ansatz wird ein Markt betrachtet, auf dem Güter der Produktionsfaktoren gehandelt werden, und beobachtet, wie Umwelteigenschaften die Marktpreise beeinflussen (z.B. Ersatzmärkte). Beispiele sind Mieten oder Wohnungspreise in Gebieten mit unterschiedlichem Lärmpegel, Lohndifferenzen bei Arbeitsplätzen mit unterschiedlichen Gesundheitsrisiken. Die hedonistische Preismethode kann natürlich nur die Kosten von Auswirkungen deutlich machen, deren sich die Menschen bewusst sind. Ferner wird davon ausgegangen, dass alle Merkmale vergleichsweise einfach ausgetauscht werden können.

Diese und andere Gründe lassen darauf schließen, dass mit hedonistischen Preisgestaltungsmethoden das Ausmaß der fraglichen externen Kosten eher unterschätzt wird. Im **Reisekostenansatz** („**travel-costs**“) wird neben den zu tätigen monetären Aufwendungen auch der Faktor Zeit berücksichtigt, der aufgewendet werden muss, um in den Genuss eines öffentlichen Gutes zu gelangen (z.B. der Zeit- und Geldaufwand zur Erreichung eines Naherholungsgebietes).

| direkte Methoden  | indirekte Methoden   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Contingent Valuation Method (CVM)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ hedonistische Preisanalyse (HPA)</li> <li>■ Reisekostenansatz („travel-costs“)</li> </ul> |

Tabelle 2: Methoden zur monetären Bewertung von Umweltgütern

Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren besteht darin, die anderen Ursachen für einen Preisunterschied zu identifizieren und angemessen zu berücksichtigen. Die Methode ist nur begrenzt einsetzbar, weil nicht für alle Schadenkategorien solche indirekten Beziehungen zwischen Marktgütern und Schäden bestehen.

Immer anwendbar ist dagegen die „**Contingent Valuation Methode**“, bei der in persönlichen Interviews oder mit Fragebogen ein repräsentativer Anteil der Bevölkerung nach der Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung eines Schadens bzw. nach der Höhe von Kompensationszahlungen für die Hinnahme eines Nachteils befragt wird. Diese Bewertungsmethode besitzt allerdings auch ihre Probleme - die Haupteinwände sind die folgenden:

- Die in Befragungen hypothetisch geäußerten Zahlungsbereitschaften entsprechen nicht den tatsächlichen Wertschätzungen der Individuen, da die Befragten keine finanziellen Konsequenzen ihrer Aussagen befürchten müssen.
- Ein weiterer Nachteil der direkten Methoden kann deren Anfälligkeit für strategisches Verhalten - das so genannte „Trittbrettfahrerproblem“ („free-rider-problem“) - sein. Die Befragten besitzen Anreize, ihre „wahre“ Zahlungsbereitschaft für ein Gut bewusst zu verschleiern, um eigene Ziele zu verfolgen. So würden beispielsweise für Landschaften hohe Zahlungsbereitschaften für die Förderung der Erhaltung geäußert werden. Hätten die Befragten tatsächlich mit Kosten zu rechnen, würden sie in ihren Äußerungen ihre Zahlungsbereitschaft geringer ansetzen.

Bei allen Verfahren können systematische Über- und Unterschätzungen auftreten. Bei indirekten Methoden kommen mögliche Überschätzungen dann vor, wenn der aus den Marktdaten gewählte Wert nur einen Teil des betreffenden Umweltgutes

abbildet, wenn durch Expositions-Wirkungs-Beziehungen eine Unterschätzung der tatsächlichen Schäden erfolgt oder wenn systematische Lücken in der Messung entstehen.

Im Rahmen von umfangreichen europäischen und amerikanischen Studien zur Bewertung externer Kosten der Energieversorgung wurde eine Meta-Analyse von CVM (Contingent Valuation Method)- und HPA (hedonistischen Preisanalyse)-Studien vorgenommen. Auf diese Weise wurde ein **VSL (Value of Statistical Life)** von 2,6 MEURO errechnet (dieser Wert wurde mittlerweile auf 3,1 MEURO - Preisbasis 1995 - erhöht). Keine Berücksichtigung finden hier Studien zur Bewertung von Menschenleben auf der Basis des Human-Kapital-Ansatzes, weil dieser Ansatz in der einschlägigen Literatur als irrelevant angesehen wird. Dies wird v.a. damit begründet, dass die gemessenen Produktionsverluste in keinem theoretischen oder empirischen Zusammenhang mit den gesuchten Zahlungsbereitschaften zur Verringerung von Gesundheitsrisiken stehen<sup>7</sup>.

Für Vergleichszwecke werden in der nachfolgenden Übersicht die gängigen Bewertungsansätze und ihre Anwendungsmöglichkeiten pro Schadenbereich für die Bewertung externer Effekte im Rahmen der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Studie (1996) angegeben. Diese Tabelle wurde der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS Publikation „Die vergessenen Milliarden – Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“, S. 34 entnommen.

| Methoden                      | Studien GB in MEURO<br>(Preisbasis 1990) | Studien USA in MEURO<br>(Preisbasis 1990) |
|-------------------------------|--|---|
| HPA (Arbeitsmärkte)           | 2,8 - 3,5                                | 3,5 - 5,5                                 |
| HPA (außerhalb Arbeitsmärkte) | 0,7 - 3,4                                | 1,0 - 1,1                                 |
| CVM-Studien                   | 4,1 - 6,3                                | 1,4 - 2,5                                 |
| <b>Durchschnittswerte</b>     | <b>2,5 - 4,4</b>                         | <b>2,0 - 3,0</b>                          |

Tabelle 3: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse für Großbritannien und die USA zur Berechnung des „Value of Statistical Life“ nach Pearce et al. (1992) Quelle: Externe E (1995), Vol. 1, S. 49

| Bewertungsobjekt                                 | Reisekosten-<br>ansatz | Vermeidungs-<br>kostenansatz | hedonistischer<br>Preisansatz | CVM        |
|--|------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|
| Luftqualität Stadt                               | nein                   | sehr bedingt                 | ja                            | ja         |
| Luftqualität Erholungsgebiet                     | bedingt                | nein                         | nein                          | ja         |
| Lärmniveau                                       | nein                   | bedingt                      | ja                            | ja         |
| Erholungswert von Seen und<br>Flüssen            | ja                     | nein                         | kaum                          | ja         |
| Wasserqualität des<br>Grundwassers               | nein                   | kaum                         | kaum                          | ja         |
| arbeitsplatzbezogene Risiken                     | nein                   | bedingt                      | ja                            | ja         |
| öffentliche Risiken                              | nein                   | sehr bedingt                 | bedingt                       | bedingt/ja |
| öffentliche Infrastrukturgüter<br>(Straßen etc.) | kaum                   | nein                         | bedingt/ja                    | bedingt/ja |
| (öffentl.) Bildungsangebot,<br>Kulturangebot     | bedingt/ja             | nein                         | bedingt/ja                    | bedingt/ja |

Tabelle 4: Eignung der Verfahren zur Präferenz Erfassung bei verschiedenen Umweltgütern

Quelle: Pommerehne W., Römer A. (1992), „Ansätze zur Erfassung der Präferenzen für öffentliche Güter“. In: Jahrbuch für Sozialwissenschaft, Jg. 43, S. 171 - 210

| Bereich                     | mögliche Bewertungsansätze   | Anwendungsmöglichkeiten, Probleme   |
|-----------------------------|--|---|
| <b>Luftverschmutzung</b>    | <p><b>Schadenskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kosten (Ressourcenausfälle durch Gesundheits-, Gebäude- und Waldschäden, Ernteauffälle)</li> <li>▪ Zahlungsbereitschaft für bessere Luftqualität</li> </ul> <p><b>Vermeidungskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kosten der Maßnahmen zur Erreichung der Luftreinhalteziele</li> </ul> | <p><i>Gut</i> (Kausalität schwierig, z.B. Waldschäden)</p> <p><i>Mittel</i> (Problem der Über- oder Unterschätzung)</p> <p><i>Mittel</i> (verhaltensorientierte Maßnahme schwierig quantifizierbar)</p> |
| <b>Klima</b>                | <p><b>Vermeidungskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kosten der Maßnahme zur Erreichung vorgegebener Klimaziele</li> </ul> <p><b>Schadenskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grobschätzung globaler Schäden durch Klimaveränderungen</li> <li>▪ Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung von Klimakatastrophen</li> </ul>                 | <p><i>Mittel</i> (Festlegung der Ziele/Kausalität schwierig)</p> <p><i>Schlecht</i> (Kausalität und Schadenssummen unklar)</p> <p><i>Mittel</i> (Informationsproblem)</p>                               |
| <b>Natur und Landschaft</b> | <p><b>Schadenskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zahlungsbereitschaft für intakte Landschaften</li> </ul>   | <p><i>Schlecht</i> (konkreter Bezug schwierig, Abgrenzungsproblem)</p>  |
| <b>Großrisiken</b>          | <p><b>Schadenskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wahrscheinlichkeit Schaden</li> <li>▪ Zahlungsbereitschaft zur Verhinderung Großschaden (Einbezug Risikopräferenz)</li> </ul>  | <p><i>Mittel</i> (bei Großrisiken schlecht, weil sehr kleine Wahrscheinlichkeit und sehr großer Schaden)</p> <p><i>Mittel</i> (Informationsproblem)</p>   |
| <b>Infrastruktur</b>        | <p><b>Schadenskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewertung der Kosten (Ressourcenbeanspruchung)</li> </ul>  | <p><i>Gut</i> (Beträge ergeben sich direkt aus der Kostenrechnung)</p>  |
| <b>Unfälle</b>              | <p><b>Schadenskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ressourcenausfälle/Einkommensverluste</li> <li>▪ Zahlungsbereitschaft zur Verminderung des Unfallrisikos</li> </ul>  | <p><i>Gut</i> (Bewertung der Menschenleben allerdings „unethisch“)</p> <p><i>Gut</i> (konkrete Übertragung manchmal schwierig)</p>  |
| <b>Lärm</b>                 | <p><b>Schadenskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mietverluste (Lärm am Wohnort)</li> <li>▪ Zahlungsbereitschaft für mehr Ruhe</li> </ul> <p><b>Vermeidungskosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kosten für Maßnahmen zur Einhaltung der Lärmgrenzwerte</li> </ul>   | <p><i>Gut</i> (v.a. für Wohnraum)</p> <p><i>Gut</i> (v.a. für Wohnraum)</p> <p><i>Gut</i> (Probleme bei Bewertung verhaltensorientierter Maßnahmen)</p>   |

Tabelle 5: Übersicht über Bewertungsansätze und ihre Anwendungsmöglichkeit pro Schadenbereich

## 2.5 Diskontierung externer Kosten der Energiebereitstellung

Wichtig für die Behandlung von Schäden, die erst weit in der Zukunft liegen, ist die Frage, ob die Kosten solcher Schäden abgezinst werden sollen und wenn ja, welcher Zinssatz dafür gewählt werden soll. Künftig anfallende Kosten und Nutzen werden durch die Verwendung von Diskontraten mit gegenwärtigen Werten vergleichbar gemacht. Bei der Bewertung von externen Kosten entsteht dabei das Problem, dass durch die Diskontierung künftige Generationen benachteiligt werden können. In der Tat sind die Ergebnisse einer monetären Bewertung maßgeblich durch die Wahl der Diskontrate bestimmt. Je höher die Diskontrate ist, desto geringer ist der gegenwärtige Wert von künftigen Schäden. Die Art der Abzinsung ist vor allem bei Schäden durch langlebige radioaktive Stoffe und durch Treibhausgase entscheidend.

In der ExternE-Studie werden Diskontraten in der Höhe von 0 %, 3 % und 10 % berücksichtigt<sup>8</sup>.

- 0 % als Diskontrate für bestimmte langfristige Schäden
- 3 % als Diskontrate für die soziale Zeitpräferenz (für kurzfristige Effekte < 30 - 40 Jahre)
- 10 % als Diskontrate für die sozialen Opportunitätskosten

## 2.6 Analyse von Unsicherheiten

Unsicherheiten in den Ergebnissen der ExternE-Studie - vor allem mögliche Fehler in der Einschätzung von Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Schadstoffen - sind bei der Analyse verschiedener Brennstoffprozessketten auf jeder zu durchlaufenden Stufe des zugrunde liegenden Wirkungspfad-Modells existent. Diese Unsicherheiten entstehen in Verbindung mit der Prozesskette selbst, den daraus resultierenden

Emissionen oder Schäden, aus den Transmissionsmechanismen der Luftemissionen bzw. -konzentrationen und Schadstoffablagerungen, aus den Dosis-Aufnahme-Beziehungen (den sog. physischen Endpunkten) bis hin zur ökonomischen Bewertung und den ihr zugrunde liegenden Annahmen.

Aus diesem Grund werden die durchgeführten Schadensbewertungen auf der Basis möglichst genauer wissenschaftlich fundierter Schätzungen durchgeführt. In der Phase II der ExternE-Studie (1995) wurden folgende drei Konfidenzintervalle für auftretende Unsicherheiten in der Schadens einschätzung festgelegt:

- High H (hoch)  
Schätzungen deutlich innerhalb einer Größenordnung richtig
- Medium M (mittel)  
Schätzungen bis zu etwa einer Größenordnung richtig
- Low L (gering)  
der Schätzwertfehler könnte größer als eine Größenordnung sein

In der aktuellen Phase III der ExternE-Studie (1998) werden Unsicherheiten analog zu den H, M und L Konfidenzintervallen in der Phase II mit Hilfe von Großbuchstaben gekennzeichnet, die jedoch auf der Basis geometrischer Standardabweichungen  $\sigma$  und Konfidenzintervallen logarithmischer Normalverteilungen in Zahlengrößen dargestellt werden. Folgende Labels werden dabei unterschieden:

- **A** = high confidence, mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 2,5$
- **B** = medium confidence, mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 4$  bis  $6$
- **C** = low confidence, mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 6$  bis  $12$

Die Kennzeichnung „!““, die in der ersten ExternE-Edition (1995) für „*extrem unsichere Abschätzungen - Schätzung der Größenordnung nicht möglich*“ verwendet wurde, wird in der aktuellen Phase III der ExternE-Studie nicht mehr verwendet. In jenen Fällen, in denen mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass die in den ExternE-Studien durchgeführten Schätzungen tatsächlich geringer sind, wird in Ergänzung zum Label ein Fragezeichen „?“ hinzugefügt. Ein Fragezeichen wird beispielsweise auch bei der Untersuchung der Auswirkungen von Kohlenmonoxid auf die Mortalität bzw. von Asthmaanfällen aufgrund einer Ozonbelastung wegen zur Zeit noch fehlender wissenschaftlicher Dosis-Wirkungs-Beziehungen beigelegt.

## 2.7 Die zu untersuchenden Schadenbereiche

### „Impact“-Bereich

- atmosphärische Emissionen
- Emissionen in Flüssen und Seen
- Ablagerungen im Boden

### „Damage“-Bereich

- Auswirkungen auf die Gesundheit (Gesundheitsrisiken, Unfallrisiken, Todesfallrisiken, Krankheitsrisiken)
- Auswirkungen auf landwirtschaftliche Erträge
- Auswirkungen auf Wälder
- Auswirkungen auf die Artenvielfalt
- Lärmbelästigung
- Auswirkungen auf Wasser und Erholungsmöglichkeiten
- Auswirkungen auf Materialien
- Auswirkungen auf den Treibhauseffekt

## 2.8 Analyse der externen Kosten anhand von Referenzenergiesystemen

Im Rahmen der ExternE-Studie wurde eine ganze Reihe von Kraftwerkstechniken an verschiedenen Standorten innerhalb der EU untersucht. Stromerzeugungssysteme setzen sich jeweils aus mehreren Prozessstufen zusammen. Die einzelnen Prozessstufen in der Stromerzeugung können die Umwelt auf sehr unterschiedliche Art und Weise beeinträchtigen. Die Formen und Intensitäten der Umweltbelastung sind sehr unterschiedlich und von vielen Faktoren - z.B. räumliche Verteilung der Rezeptoren, frühere Umweltbelastungen, klimatische Verhältnisse - abhängig und somit sind auch die Schäden und in weiterer Folge die externen Kosten standortspezifisch. Das bedeutet, dass nicht die externen Kosten generell, z.B. der Stromerzeugung aus Steinkohle, sondern nur von ganz bestimmten Technologie- und Standortkombinationen der einzelnen Prozessstufen identifiziert werden können. Die Gesamtheit der eingesetzten Technologien und Standorte wird im ExternE-Forschungsprojekt als **Referenzenergiesystem bzw. -technologie** bezeichnet. Hierbei wird für jeden untersuchten Energieträger ein Referenzenergiesystem definiert, das dem heutigen Stand der Technik entspricht und für welches die externen Kosten quantifiziert werden. In der folgenden Zusammenfassung der ExternE-Studie werden zunächst die Referenzenergiesysteme zur Stromerzeugung definiert. In einem nächsten Schritt werden die Wirkungsprozesse, die Quantifizierungsverfahren und die Ergebnisse der einzelnen Effekte dargestellt.

## 2.9 Externe Kosten durch fossile Brennstoffe

### 2.9.1 Der Stein- und Braunkohlezyklus

#### 2.9.1.1 Referenzstandorte und -technologien

- (fiktives) Steinkohlekraftwerk in West Burton (UK) mit einer jährlichen Brutto-Nennleistung von 1800 MW
- (fiktives) Steinkohlekraftwerk in Lauffen (D) am Neckar, ca. 35 km nördlich von Stuttgart, mit einer jährlichen Brutto-Nennleistung von 690 MW
- Braunkohlekraftwerk in der Nähe von Grevenbroich (D) in Nordrhein-Westfalen, ca. 40 km nordwestlich von Köln, mit einer jährlichen Brutto-Nennleistung von 625 MW

Bei der Analyse der Umweltauswirkungen der Stromerzeugung aus Steinkohle bzw. aus Braunkohle werden folgende Stadien unterschieden:

- Konstruktion neuer Anlagen
- Kohleförderung
- Kalksteinförderung
- Energiegewinnung
- Elektrizitätsübertragung
- Beseitigung von Abfallstoffen in den einzelnen Stadien des Zyklus
- Transport von Kohle und Kalkstein und Personal in den verschiedenen Stadien<sup>9</sup>

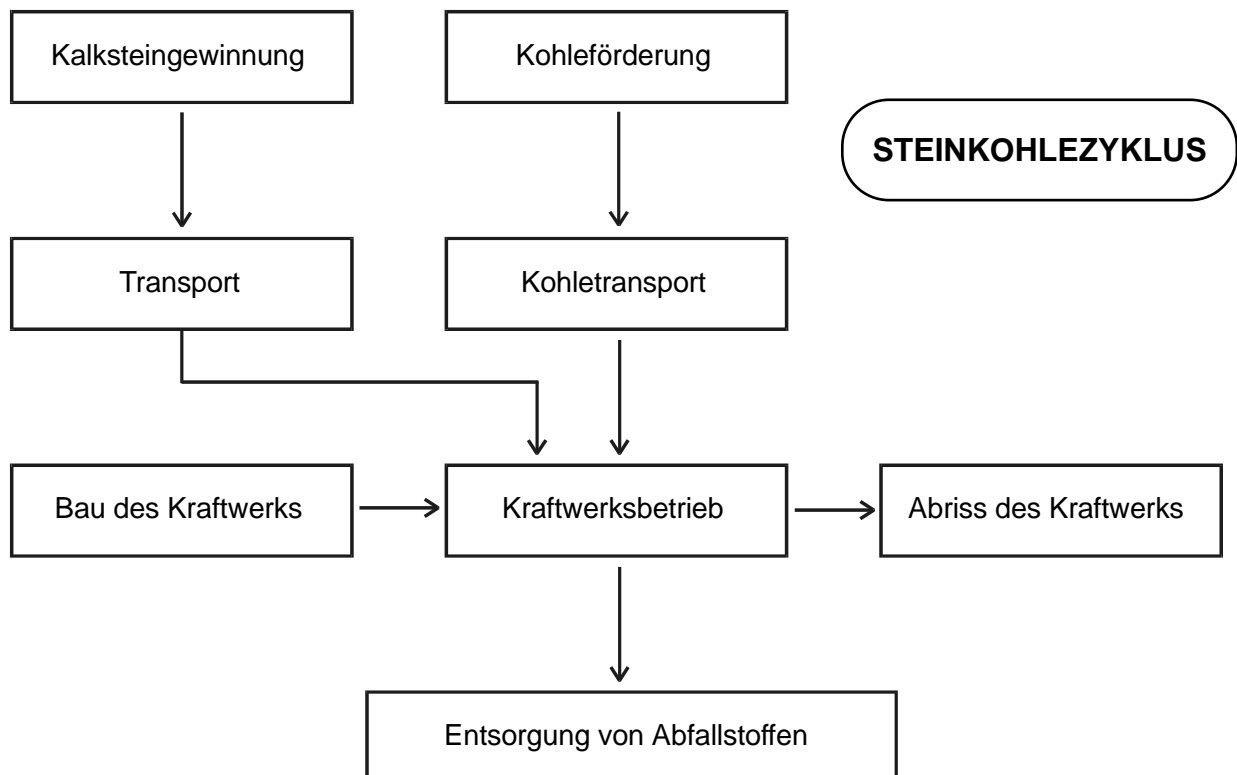


Abbildung 3: Prozessstufen der Stromerzeugung aus Steinkohle

Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung – Externe Kosten der Stromerzeugung“, S. 74

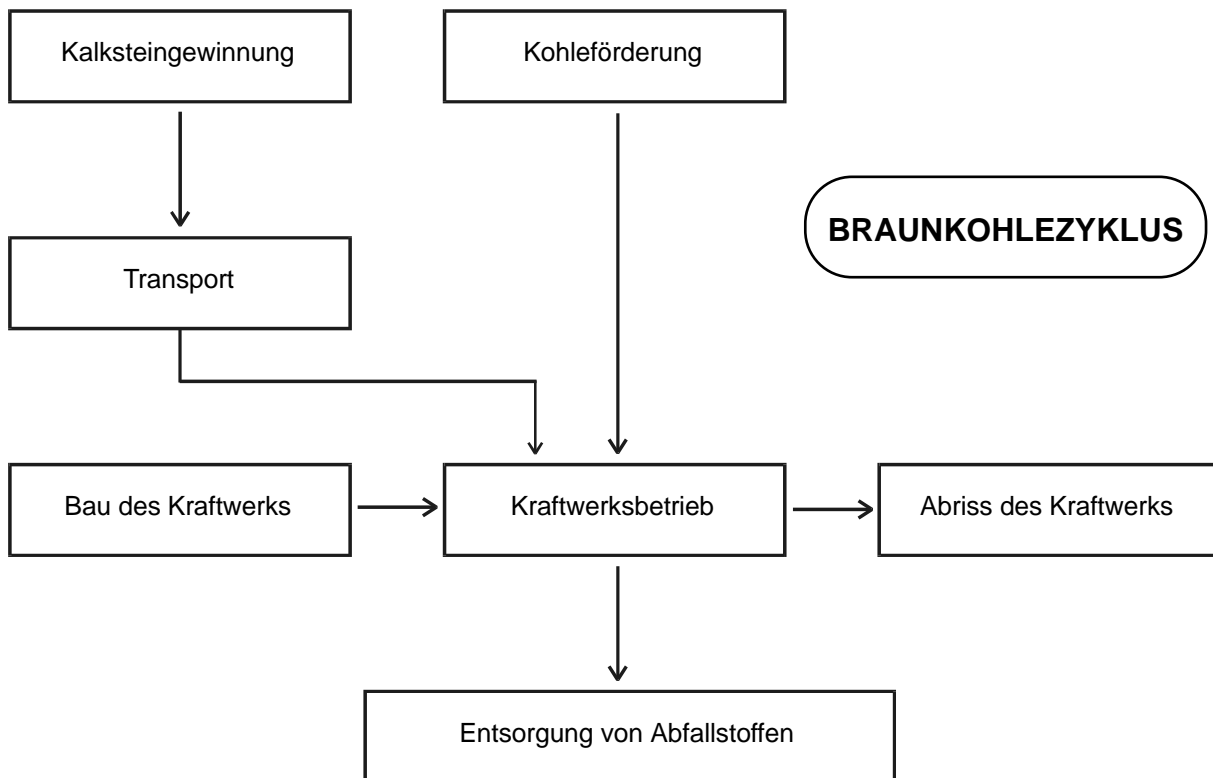


Abbildung 4: Prozessstufen der Stromerzeugung aus Braunkohle

Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung – Externe Kosten der Stromerzeugung“, S. 74

Für die Quantifizierung der Emissionen der vor- und nachgelagerten Prozessstufen der Referenzenergiesysteme werden generische, d.h. nicht standortspezifische Emissionsfaktoren verwendet. Hier wird im Wesentlichen auf den Datensatz für das Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS) zurückgegriffen.

#### 2.9.1.2 Umweltwirkungen des Stein- und Braunkohlezyklus

Im Rahmen der Analyse des Steinkohle-Brennstoffzyklus wurden mehr als 200 verschiedene Externalitäten erfasst. Detailuntersuchungen beschränken sich im ExternE-Bericht auf jene Externalitäten, die unter allgemeinen Gesichtspunkten für den Steinkohle-Brennstoffzyklus als

wesentlich und wichtig eingeschätzt werden und sich nicht auf gewählte Standorte und Technologien beschränken.

Die wichtigsten durch fossile Energieträger ausgelösten Effekte umfassen:

- die Wirkungen der Luftverschmutzung auf
  - die menschliche Gesundheit
  - Feldpflanzen (Getreide)
  - naturnahe Ökosysteme (z.B. Waldschäden, Schäden an Süßwasserfischgründen)
  - Sachgüter (Materialien)
- die durch Treibhausgase hervorgerufene Klimaänderung und ihre Auswirkungen
- die beruflichen Gesundheitsrisiken durch Arbeitsunfälle oder Berufskrankheiten
- Lärmwirkungen

Zusätzlich sind für den Steinkohlezyklus relevant:

- Wirkungen des Kohleabbaus auf den Grund/Boden sowie die Qualität der Wasseroberfläche
- Wirkungen des Kohleabbaus auf Gebäude/Bauwerke

Zusätzlich noch relevant für den Braunkohleabbau sind:

- Wiederansiedelung bzw. Rekultivierung von geschlossenen Tagbauhalden
- Wirkungen durch Senkung des Grundwasserspiegels infolge des Braunkohleabbaus
- Wirkungen von Braunkohle-Schlackeablagerungen auf die Grundwasserqualität

### 2.9.1.3 Bewertungsmethode

Bei der Identifizierung, Quantifizierung und Monetarisierung der Externalitäten von fossil befeuerten Kraftwerkstechnologien wird der „Wirkungspfadansatz“ („impact-pathway“-Methode bzw. „damage-function“) verwendet. Hierbei erfolgt zunächst die Berechnung der Ausbreitung und chemischen Umwandlung der emittierten Schadstoffe mit Hilfe der im Softwareinstrument EcoSense integrierten atmosphärischen Modelle. Ermittelt werden u.a. Konzentrationen und Depositionen von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , die daraus entstehenden Säuren, Staub, Ozon, Ammoniumnitrat und -sulfat. Um auch nicht lineare Expositions-Wirkungsbeziehungen und Grenzwerte betrachten zu können, werden durchschnittliche Schadstoffkonzentrationen ermittelt.

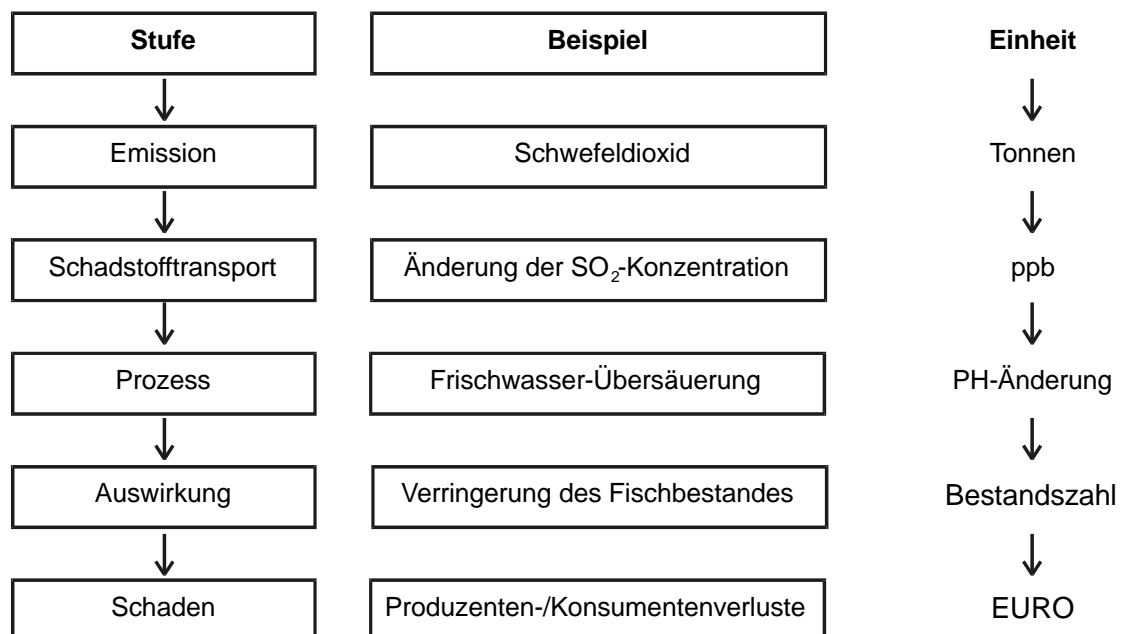


Abbildung 5: Schadenfunktion zur Bewertung der Externalitäten

#### 2.9.1.4 Schadenbereich allgemeine Gesundheit

Die bedeutendsten Wirkungen auf die allgemeine Gesundheit sind auf (Staub-)Partikel (inkl. Aerosole) sowie Ozon zurückzuführen. Eine Analyse der verfügbaren Erkenntnisse über Expositions-Wirkungsbeziehungen ergab, dass insbesondere ein statistischer Zusammenhang zwischen der Partikelkonzentration < 10 µm Durchmesser (PM 10) und Gesundheitsschäden besteht. Hierbei handelt es sich allerdings um bereits stark vorgeschädigte Personen (z.B. mit akuten Atemwegserkrankungen).

Den größten Teil der Luftverschmutzung verursacht die Energiegewinnung selbst, aber auch sämtliche vor- und nachgelagerte Prozessstufen haben einen Anteil an der Luftverschmutzung.

Die ermittelten Schäden entstehen in erster Linie nicht in unmittelbarer Kraftwerksumgebung, sondern sind vielmehr auf eine Akkumulation sehr kleiner Belastungen, die über ganz Europa verteilt sind, zurückzuführen.

Die jährlichen externen Gesundheitskosten durch (Staub-)Partikel, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>-Emissionen betragen für das Steinkohlereferenzkraftwerk in West Burton **2,3 - 5,3 mEURO/kWh** (ohne chronische Effekte auf die Mortalität) und für Lauffen **7,5 - 17,8 mEURO/kWh** (europaweite Betrachtungsebene).

Die ermittelten Gesamtschätzwerte für Schäden an der allgemeinen Gesundheit<sup>10</sup> betragen zwischen **3,7 mEURO/kWh** für das Referenzkraftwerk West Burton (wobei dieser Wert, der hier mit 3,15 mEURO/kWh auf Basis des VSL<sup>11</sup> geschätzt wird, v.a. auf akute Mortalität zurückzuführen ist), **9,7 mEURO/kWh** für das Braunkohlekraftwerk in Grevenbroich und **12,5 mEURO/kWh** für Lauffen (davon 10,2 mEURO/kWh für akute Mortalität, wobei durch die Verwendung des gesamten VSL-

Wertes die Werte höher liegen als der tatsächliche Schaden ausmacht).

Die großen Schwankungen sind auf die unterschiedlichen „Erfassungsweiten“ (Radius der betroffenen Umwelt in km) zurückzuführen. Während beim Kraftwerk West Burton die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf Großbritannien untersucht wurden, erfolgte beim Kraftwerk in Lauffen die Ermittlung der Auswirkungen auf ganz Europa.

Die wichtigsten quantifizierten Gesundheitswirkungen betreffen die Mortalität und Atemwegserkrankungen und sind in der Tabelle 7 am Ende dieses Abschnittes detailliert aufgelistet.

#### 2.9.1.5 Schadenbereich Berufsrisiken (Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten)

Berufliche Gesundheitsschäden umfassen die durch Berufskrankheiten und Arbeitsunfälle hervorgerufenen negativen Auswirkungen auf die Gesundheit derjenigen Personen, die beruflich an den Aktivitäten der verschiedenen Prozesse eines Energiesystems beteiligt sind. Gesundheitliche Berufsrisiken resultieren primär aus Luftverschmutzung und Arbeitsunfällen. Vor allem die im Untertagebau der Steinkohle auftretende hoch konzentrierte Luftverschmutzung aufgrund von Radon- und Kohlestaub verursacht negative Gesundheitseffekte bei den Minenarbeitern. So ergeben sich aus der Radon-Belastung als Auslöser von Lungenkrebs Todesraten von 0,018 Toten/TWh je Energiegehalt für die britische Steinkohlemine und 0,058 Toten/TWh für die deutsche Referenzanlage mit Schadenskosten von **0,05 mEURO/kWh** für West Burton und **0,15 mEURO/kWh** für Lauffen. Wesentlich höhere Sterblichkeitsraten sind auf Belastungen der Minenarbeiter durch Kohlestaub zurückzuführen. Hier liegt die Todesrate durch chronisch fortschrei-

tende Fibrose des Lungengewebes (PMF Progressive Massive Fibrosis) bei 0,1 Toten/TWh in der britischen Anlage sowie 0,3 Toten/TWh in der deutschen Steinkohleanlage<sup>12</sup>. Die geschätzten Schadenswerte betragen für Arbeitsunfälle in den Referenzkraftwerken **0,057 mEURO/kWh** in West Burton sowie **0,16 mEURO/kWh** für Lauffen.

Unfälle ereignen sich auf allen Stufen des Brennstoffzyklus und daher ist es wichtig, dass Analysen über Arbeitsunfälle für die Mine, den Transport, die Energiegewinnung, den Bau/Abbau von Anlagen und für die Kalksteingewinnung durchgeführt werden. Die meisten Unfälle sind Minenunfälle (Deutschland: 0,5 Tote/je Tonne abgebautes Material bzw. UK: 0,2 Tote/je Tonne abgebautes Material). Die gesamten Schadenskosten für Arbeitsunfälle werden für UK mit **0,83 mEURO/kWh** sowie mit **2,0 mEURO/kWh** für Deutschland quantifiziert.

Beschwerden aus der Belastung des Bewegungsapparates werden in der Kategorie der Berufskrankheiten nicht berücksichtigt. Aufgrund des Tagabbaues der Braunkohle sind hier die Sterblichkeitsraten sowie gesundheitlichen Effekte geringer.

#### 2.9.1.6 Schadenbereich Landwirtschaft

Entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft werden geeignete Expositions-Wirkungs-Beziehungen verwendet, die den Zusammenhang zwischen den Hauptwirkungen, nämlich SO<sub>2</sub> sowie Ozon, auf Ernteerträge von Getreide (insbesondere Weizen) beschreiben. Die Auswirkungen von O<sub>3</sub> auf Getreide sind derzeit nicht über ein geeignetes Modell schätzbar. Die Ozon-Wirkung auf Weizen wird in Lauffen mit **0,00037 mEURO/kWh** quantifiziert. Der Schadenswert für Ozon ist deshalb so gering, weil hierfür das Referenzgebiet viel kleiner war als für die SO<sub>2</sub>-Analyse.

Die Expositions-Wirkungs-Beziehungen bzw. Dosis-Wirkungs-Beziehungen für SO<sub>2</sub> weisen einen nicht linearen Verlauf auf. Die Berechnungen ergeben insgesamt Ertragsänderungen von weniger als 1 % - auch in der unmittelbaren Kraftwerksumgebung. Da jedoch die von der Schadstoffbelastung betroffene Umgebung sehr weitläufig ist, muss mit einem gesamten Ernteverlust von mindestens 2.000 Tonnen Getreide je Kraftwerk gerechnet werden. Unter Verwendung internationaler Getreidepreise beläuft sich der Schaden von Ernteaussfällen in der Landwirtschaft in Großbritannien auf **0,022 mEURO/kWh** bei einer zugrunde liegenden Bewertungsbandbreite von 0,005 – 0,031 mEURO/kWh und **0,035 mEURO/kWh** in Deutschland<sup>13</sup>.

Eine wichtige Bedeutung für zukünftige Forschungsarbeiten kommt jedoch Synergieeffekten infolge der Einwirkung mehrerer Schadstoffe sowie indirekten Effekten (Verschmutzungsarten in Zusammenhang mit klimatischen Einflüssen) und Effekten bei niedrigen Schadstoffkonzentrationen zu. Diese Effekte sind aktuell noch nicht in verlässlichen Größenordnungen nachvollziehbar.

#### 2.9.1.7 Schadenbereich Wald

Waldschäden sind v.a. auf SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> und O<sub>3</sub> zurückzuführen. Ein quantitativer Zusammenhang zwischen Waldschäden und Luftschadstoffkonzentrationen im Steinkohle- und Braunkohlezyklus ist trotz hoher Forschungsaufwendungen noch nicht bekannt. Auch die Frage, ob durch die Waldschäden überhaupt eine verringerte Holzproduktion verursacht wird und ob der Erholungswert der Wälder dadurch gesunken ist, ist umstritten. In der ExternE-Studie werden die Schäden durch Holzverlust aufgrund Verschmutzung, klimatischer Effekte, Schädlinge und chemischer Düngemittel mit **0,004 bis 0,013 mEURO/kWh** auf eher bescheidenem Niveau (im Vergleich zu anderen externen Effekten) quantifiziert<sup>14</sup>.

#### 2.9.1.8 Schadenbereich sonstige naturnahe Ökosysteme

Eine Reihe von Schadstoffen, die durch die Nutzung fossiler Energieträger entstehen, verursachen negative Auswirkungen auf naturnahe Ökosysteme, u.a. durch saure Niederschläge und Nitrateinträge. Der quantitative Zusammenhang zwischen Einwirkungen und Schäden ist jedoch weitgehend unbekannt. Aufgrund der komplexen und z.T. unbekanntem Zusammenhänge ist die Ermittlung der externen Kosten derzeit nicht möglich. Stattdessen kann mit Hilfe des „critical level“- (**kritische Konzentrationen**) bzw. „critical load“- (**kritische Eintragswerte**) Ansatzes<sup>15</sup> jener Grenzwert der Schadstoffkonzentration und -deposition ermittelt werden, bei dem nach dem derzeitigen Wissensstand keine Schädigung bzw. Veränderung von naturnahen Ökosystemen erfolgt und bei dem die eingetragene Schadstoffmenge die Abbaurate der Schadstoffkonzentration nicht überschreitet.

Eine ausführliche Beschreibung des „critical level und load“-Konzepts ist in der Publikation „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“ von Friedrich/Krewitt (1997) auf den Seiten 110ff. zu finden.

#### 2.9.1.9 Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

Insbesondere bei den Untertagebauanlagen erfolgt eine Beeinträchtigung sowohl der Grund- als auch der Oberflächengewässer. Diese Effekte konnten jedoch - mit Ausnahme der Effekte der Kalkverwendung in Skandinavien - noch nicht quantifiziert werden.

#### 2.9.1.10 Materialschäden

Für Materialschäden, die v.a. auf Säureeinwirkungen zurückzuführen sind, gibt es eine ganze Reihe von gut abgesicherten Expositions-Wirkungs-Beziehungen. Mit Hilfe von Expositions-Wirkungs-Beziehungen und der Ergebnisse von Ausbreitungsrechnungen werden die zusätzlich durch die Emissionen des betrachteten Referenzkraftwerkes verursachten Korrosionsschäden ermittelt, die sich - bewertet mit den Reparaturkosten zu Marktpreisen - auf **0,06 bis 0,08 mEURO/kWh** belaufen<sup>16</sup>. Die Erhaltungskosten für die Beseitigung der Säureeinwirkungen auf Oberflächen (Stein, Mörtel, Beton, Stahl, Farbe und Zink) von Bauwerken wurden auf **0,77 mEURO/kWh** für West Burton (methodische Unterschiede) geschätzt. Für die beiden deutschen Referenzkraftwerke in Lauffen und Grevenbroich wurden die Effekte von SO<sub>2</sub> und von einer sauren Deposition auf ganz Europa übertragen. Die zusätzlichen Erhaltungskosten wurden dabei auf **0,2 mEURO/kWh** für Lauffen und **0,14 mEURO/kWh** für das Braunkohlekraftwerk in Grevenbroich geschätzt<sup>17</sup>. Forschungsbedarf besteht in der Ermittlung von Expositions-Wirkungs-Beziehungen für Anstriche, Mörtel und Zement.

#### 2.9.1.11 Auswirkungen von Lärm

Die externen Kosten aufgrund möglicher Gesundheitsschäden (Gehörschädigung) und einer Verringerung der menschlichen Lebensqualität infolge von Lärmbeeinträchtigungen wurden für das Referenzkraftwerk West Burton auf **0,15 mEURO/kWh** geschätzt<sup>18</sup>. Die Bewertung dieser Effekte erfolgt mittels hedonistischer Preisanalyse von Straßen- und Fluglärm sowohl für die Kraftwerke als auch für den Straßen- und Bahnverkehr. Die größte Unsicherheit in der vorliegenden Untersuchung besteht in der Berücksichtigung von Straßen- und Fluglärmstudien.

2.9.1.12 Auswirkungen auf die globale Erwärmung

Das wichtigste Treibhausgas, das von fossilen Kraftwerken und ihren vorgelagerten Prozessstufen emittiert wird, ist das Kohlendioxid. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen bei Braunkohle rund 1.166 g/kWh<sup>19</sup>. Aufgrund der Komplexität einer allgemeinen Klimaerwärmung erweisen sich Schadensschätzungen als sehr komplex, unsicher und abhängig vom unterstellten Szenario und dem Zeithorizont. Im Rahmen des ExternE-Forschungsprojektes wurden für den Stein- und Braunkohlezyklus entsprechende Vergleiche durchge-

führt. Zum einen Bezug nehmend auf unterschiedliche Interpretationen und Annahmen bezüglich der globalen Erwärmung, zum anderen unter der Voraussetzung gleicher Annahmen.

| Quelle                  | Energie-träger | Schätzwert (mEURO/kWh)<br>mit Diskontrate von |      |       |      | Reich-<br>weite | Zeit-<br>spanne | Konfi-<br>denz |
|-------------------------|----------------|---|------|-------|------|-----------------|-----------------|----------------|
|                         |                | 0 %   | 1 %  | 3 %   | 10 % |                 |                 |                |
| Cline (1992)            | Steinkohle     | 14,9  |      | 2,2   | 0,6  | G               | L               | !              |
|                         | Braunkohle     | 14,4  |      | 2,2   | 0,7  |                 |                 |                |
| Frankhauser (1993)      | Steinkohle     | 10,4  |      | 1,5   | 0,4  |                 |                 |                |
|                         | Braunkohle     | 10,8  |      | 1,7   | 0,5  |                 |                 |                |
| Tol (1995)              | Steinkohle     |   | 18,3 | 11,7  | 2,6  | G               | L               | !              |
|                         | Braunkohle     | 15,2  |      | 2,3   | 0,7  |                 |                 |                |
| Hohmeyer/Gärtner (1992) | Steinkohle     | 5.030   |      | 770   | 190  | G               | L               | !              |
|                         | Braunkohle     | 808,9   |      | 124,4 | 37,3 |                 |                 |                |

Tabelle 6: Schäden durch den Treibhauseffekt bei Stein- und Braunkohlezyklen - Effekte bei unterschiedlichen Annahmen  
H = hoch, M = mittel, N = gering, „!“ = Das Konfidenzniveau ist signifikant geringer als für jeden anderen Schätzwert;  
L = lokal (0-100 km), R = regional (100-1000 km), G = global (> 1000 km); S = kurzfristig (unmittelbar), M = mittelfristig (1-100 Jahre), L = langfristig (100-100.000 Jahre). Die unterschiedlichen Resultate sind v.a. auf unterschiedliche Interpretationen der Schätzwerte zurückzuführen.

Quelle: ExternE (1995), Vol. 3, S. 27

| Quelle                  | Schätzwert mEURO/kWh |            |
|-------------------------|----------------------|------------|
|                         | Steinkohle           | Braunkohle |
| Cline (1992)            | 15                   | 19         |
| Frankhauser (1993)      | 10                   | 12         |
| Tol (1995)              | 18                   | 22         |
| Hohmeyer/Gärtner (1992) | 5.030                | 6.200      |

Tabelle 7: Schäden durch den Treibhauseffekt bei Stein- und Braunkohlezyklen - Effekte bei gleichen Annahmen; mit Ausnahme von Tol (1995) wird eine Diskontrate von 0 % verwendet (Tol = 1 %)

Quelle: ExternE (1995), Vol. 3, S. 27

#### 2.9.1.13 Bewertung von Klimaschäden

Zu Beginn der 90er-Jahre konzentrierte sich die Klimamodellierung auf den so genannten „**Benchmark Case**“ (jährliche Schäden um das Jahr 2060, für das eine (realisierte) globale Temperaturerhöhung von 2,5 K angenommen wird). Dementsprechend beschränken sich auch die zahlreichen Studien auf diesen Fall. In der ExternE-Studie wird auf die Ergebnisse der Wirkungsstudien von Cline (1992), Hohmeyer/Gärtner (1992), Frankhauser (1993) und Tol (1995) zurückgegriffen.

**Cline** führte im Auftrag der OECD eine umfangreiche Literaturrecherche durch und ermittelte in seiner Studie mit dem Titel „*The Economics of Global Warming*“, *Institute for International Economics, Washington, D.C. (1992)* eine umfassende Schadensschätzung von Klimaschäden für die USA. Aufbauend auf Cline führte **Frankhauser** 1992 die erste regional differenzierte weltweite Abschätzung der Klimaschäden durch: „*Global Warming Damage Costs: Some Monetary Estimates*“, *CSERGE GEC Working Paper 92-29, CSERGE, University College London and University of East Anglia* und veröffentlichte im Jahr 1995 eine überarbeitete Studienversion: „*Valuing Climate Change*

- *The Economics of the Greenhouse*“, *Earthscan, London*.

Auch **Tol** führte, aufbauend auf den Ergebnissen von Cline und Frankhauser, eine regional differenzierte weltweite Schadensschätzung durch: „*The Climate FUND - Survey of Literature on Costs and Benefits. IVM Working Paper W-93/01, Instituut voor Milieuvraagstukken Amsterdam*. Auf dieses sog. „FUND“-Modell (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) wird in der Europäischen Union zur Abschätzung der Klimaschäden durch den Verkehr zurückgegriffen.

**Hohmeyer** und **Gärtner** schätzten im Auftrag der Europäischen Kommission die Folgekosten der Klimaänderung über einen Zeitraum von 40 Jahren (1990 - 2030) ab. Diese Studie wurde 1992 unter dem Titel „*Die Kosten der Klimaänderung - Eine grobe Abschätzung der Größenordnungen*“, Bericht an die Kommission der Europäischen Gemeinschaft - DGXII, Greenpeace Österreich, in Wien publiziert.

Friedrich/Krewitt (1997) bezeichnen in der Publikation „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“ die Studien von

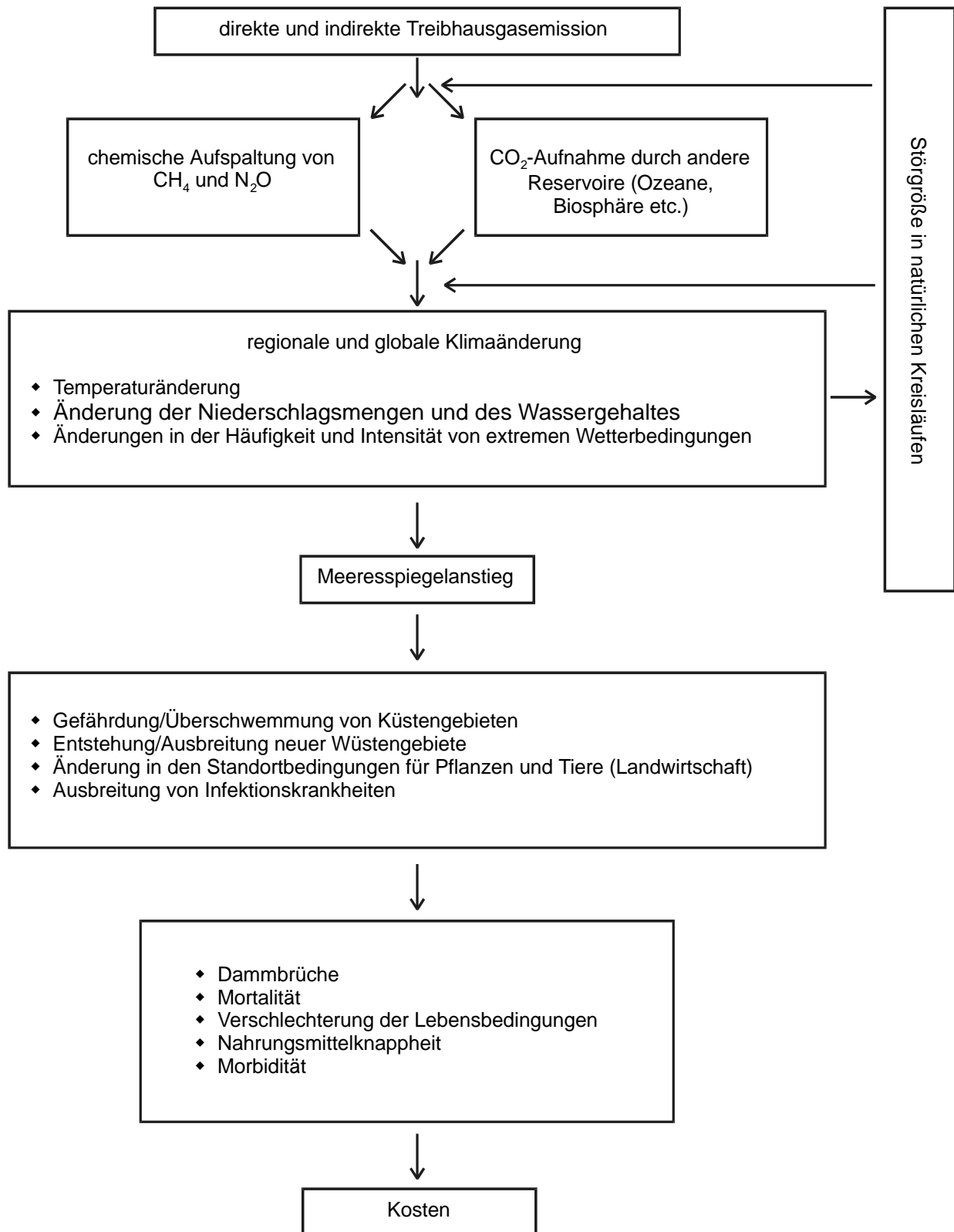


Abbildung 6: „impact-pathway“ für Treibhausgasemissionen  
Quelle: ExternE (1995), Vol. 3, S. 538 (Abbildung 13.1)

Frankhauser und Tol als die differenziertesten und vollständigsten zusammenfassenden Klimafolgestudien für den „Benchmark Case“. Tabelle 8 zeigt die Schadenskosten beider Studien für einzelne Regionen der Welt. Während für die OECD-Länder die Schäden im Bereich von 1-3 % des BSP liegen, werden für Nicht-OECD-Länder die Schadens-

kosten infolge einer Klimaänderung auf rund 2-9 % des BSP geschätzt. In der Tabelle 9 sind die bei Frankhauser für die einzelnen Schadenskategorien differenzierten Kosten ausgewiesen. Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Erkenntnisse bezüglich regional und saisonal differenzierter quantitativer Aussagen zur Klimaänderung (Temperatur,

|                            | Studie FRANKHAUSER                     |                                      | Studie TOL    |              |
|----------------------------|--|--------------------------------------|---------------|--------------|
|                            | US-\$                                  | in % vom BSP                         | US-\$         | in % vom BSP |
| EU                         | 63,6                                   | 1,4                                  |               |              |
| USA                        | 61,0                                   | 1,3                                  |               |              |
| Rest OECD                  | 55,9                                   | 1,2                                  |               |              |
| OECD Amerika               |  |                                      | 74,2 (74,5)   | 1,5          |
| OECD Europa                |  |                                      | 56,5 (57,4)   | 1,3 (1,6)    |
| OECD Pazifik               |  |                                      | 59,0 (60,7)   | 2,8 (3,8)    |
| OECD gesamt                | 180,5                                  | 1,3                                  | 189,5 (192,7) | 1,6 (1,9)    |
| Osteuropa/GUS              | 18,2 <sup>a</sup> (29,8 <sup>a</sup> ) | 0,7 <sup>a</sup> (0,4 <sup>a</sup> ) | -7,9 (-14,8)  | -0,3 (-0,4)  |
| planwirtschaftliches Asien | 16,7 <sup>b</sup> (50,7 <sup>b</sup> ) | 4,7 <sup>b</sup> (2,9 <sup>b</sup> ) | 18,0 (-4,0)   | 5,2 (-0,1)   |
| Süd-/Südost-asien          |  |                                      | 53,5 (92,2)   | 8,6 (5,3)    |
| Afrika                     |  |                                      | 30,3 (46,4)   | 8,7 (6,9)    |
| Lateinamerika              |  |                                      | 31,0 (40,3)   | 4,3 (3,1)    |
| Mittlerer Osten            |  |                                      | 1,3 (11,5)    | 4,1 (5,5)    |
| Nicht-OECD gesamt          | 89,1 (141,6)                           | 1,6 (0,9)                            | 126,2 (171,7) | 2,7 (1,7)    |
| Welt                       | 269,6 (322,0)                          | 1,4 (1,1)                            | 315,7 (364,4) | 1,9 (1,8)    |

Tabelle 8: Quantifizierte jährliche Schadenskosten in US-Dollar [US-\$] und in Prozent [%] des BSP für eine globale Temperaturerhöhung von 2,5 K nach Regionen (kursive Angaben sind kaufkraftbezogene Ergebnisse, die nur bei Abweichung angegeben werden). <sup>a</sup> Nur GUS <sup>b</sup> Nur China

Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“, S. 140

Niederschläge etc.), sind diese Ergebnisse als erste Schadensannäherungen zu sehen. Ein Forschungsbedarf besteht v.a. in der Ermittlung der Schäden an nicht marktfähigen Gütern (v.a. Schäden an Ökosystemen und Artenverluste), die bisher nur unzureichend berücksichtigt wurden. Die Quantifizierung von direkten ökonomischen Schäden erfolgt ausschließlich über Marktpreise, die sich jedoch bei größeren physischen Änderungen erheblich ändern würden. Für einige Schadenskategorien (potentielle Nahrungsmittelknappheit, ansteckende Krankheiten, psychische und soziale Folgen der Migration) liegen keine

Ergebnisse vor. Während die Schäden für die USA oft relativ detailliert quantifiziert und monetarisiert wurden, liegen für die weltweiten Schadensschätzungen oft nur ungenaue und angenäherte Ergebnisse vor.

Die Schätzwerte für die Folgekosten der Klimaänderung sind in der Studie von Hohmeyer und Gärtner wesentlich höher als jene von Frankhauser und Tol, wobei der größte Teil der quantifizierten Kosten (> 99 %) auf die sehr unpräzise Quantifizierung der Schadenskategorie „Todesfälle durch Unterernährung“ zurückzuführen ist.

| Schadenskategorie                           | Klimamodell Frankhauser (1995) |
|---|--------------------------------|
| Landwirtschaft                              | 39.100                         |
| Nahrungsversorgung (inkl. Mortalität)       | NQ                             |
| tropische Wirbelstürme                      | 2.700                          |
| Auswirkungen des Meeresspiegelanstieges:    |                                |
| + Küstenschutz                              | 900                            |
| + Verlust von Trockengebieten               | 14.000                         |
| + Verlust von Feuchtgebieten                | 31.600                         |
| Migration (auch durch Meeresspiegelanstieg) | 4.300                          |
| hitzebedingte Mortalität                    | 49.200                         |
| ansteckende Krankheiten                     | NQ                             |
| Wasserversorgung                            | 46.700                         |
| Waldwirtschaft                              | 2.000                          |
| Verluste von Arten und Ökosystemen          | 40.500                         |
| Veränderung des Energiebedarfs              | 23.100                         |
| Luftverschmutzung                           | 15.400                         |
| <b>SUMME in Mio. US-\$</b>                  | <b>269.500</b>                 |
| <b>in % vom BSP</b>                         | <b>1,4</b>                     |

Tabelle 9: Quantifizierte jährliche Schadenskosten in Mio. US-\$ (1990) für den „Benchmark Case“ (negative Werte sind positive Effekte (Gewinne)); (NQ = nicht quantifiziert)

Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“, S. 141

Aufgrund einer inzwischen abgeschlossenen differenzierten Studie zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die weltweite Nahrungsvorsorgung können die Schätzwerte von Hohmeyer und Gärtner als obere Bewertungsgrenze betrachtet werden. Auch das **IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)** betrachtet die sozio-ökonomischen Abschätzungen, denen zahlreiche Vereinfachungen und Annahmen zugrunde liegen, als undifferenziert, wobei die Landwirtschaft, Küstenregionen, naturnahe Ökosysteme und die menschliche Gesundheit als besonders gefährdet angesehen werden.

Die Bewertungsschwierigkeiten sind dabei auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- die Unsicherheit über den Verlauf der Klimaänderung
- begrenzte Kenntnisse über lokale und regionale Auswirkungen
- Schwierigkeiten bei der ökonomischen Bewertung von physischen Effekten, selbst wenn eine Quantifizierung möglich ist (v.a. bei Schäden an nicht marktfähigen Gütern und Schäden in Entwicklungsländern)
- Schwierigkeiten bei der Vorhersage der zukünftigen technologischen und sozio-ökonomischen Entwicklung
- das Potential für Katastrophenereignisse oder unerwartete Effekte

#### 2.9.1.14 Übersicht über die externen Kosten durch den Stein- und Braunkohlezyklus

Tabelle 10 (Seite 35 bis 39): Externe Kosten durch den Stein- und Braunkohlezyklus

Anmerkungen: Aus Vereinfachungsgründen wurden nur die „besten“ Schätzwerte angegeben. Die Bandbreite dieser Werte kann zum Teil sehr groß sein. NQ = nicht quantifiziert im Rahmen dieses Projektes; IQ = Schätzwerte nicht gesichert; H = hoch; M = mittel; N = gering; „!“ = Das Konfidenzniveau ist signifikant geringer als für jeden anderen Schätzwert; L = lokal (0-100 km); R = regional (100-1000 km); G = global (> 1000 km); S = kurzfristig (unmittelbar); M = mittelfristig (1-100 Jahre); L = langfristig (100-100.000 Jahre)

<sup>1</sup> Obwohl beide Resultate als regional eingestuft werden, erstreckt sich die „britische“ Untersuchung nur auf den Raum des Vereinigten Königreiches, während die „deutsche“ Untersuchung eine europaweite Reichweite umfasst.

<sup>2</sup> Die Analyse wurde vornehmlich für beschränktere als regionale Umwelteffekte vorgenommen, sodass eine Unterschätzung der tatsächlichen Effekte möglich ist.

<sup>3</sup> COPD (Chronic Obstructive Pulmonary Disease)

Quelle: ExternE (1995), Vol. 3, S. 22ff.

| Schadenskategorie                   | Schätzwerte (mECU/kWh)    |                       |                            |         |                         |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|---------|-------------------------|
|                                     | West Burton<br>Steinkohle | Lauffen<br>Steinkohle | Grevenbroich<br>Braunkohle | Bereich | Konfidenz<br>-intervall |
| <b>ALLGEMEINE GESUNDHEIT</b>        |                           |                       |                            |         |                         |
| <b>Sterblichkeit</b>                |                           |                       |                            |         |                         |
| akute Effekte                       |                           |                       |                            |         |                         |
| 1° PM10                             | 0,49 <sup>1</sup>         | 2,1 <sup>1</sup>      | 2,45                       | R       | L                       |
| 2° PM10                             | 2,7                       | 7,8 <sup>1</sup>      | 5,39                       | R       | L                       |
| chronische Effekte                  | IQ                        | IQ                    | IQ                         | R       | L                       |
| <b>akute Krankheitseffekte</b>      |                           |                       |                            |         |                         |
| Atemwegsbehandlung im Spital        |                           |                       |                            |         |                         |
| 1° PM10                             | 0,00019 <sup>1</sup>      | 0,001 <sup>1</sup>    | 0,0011                     | R       | M                       |
| 2° PM10                             | 0,0010 <sup>1</sup>       | 0,0036 <sup>1</sup>   | 0,0025                     | R       | M                       |
| COPD <sup>3</sup> Spitalsbehandlung |                           |                       |                            |         |                         |
| 1° PM10                             | 0,00023 <sup>1</sup>      | 0,0012 <sup>1</sup>   | 0,0014                     | R       | M                       |
| 2° PM10                             | 0,0012 <sup>1</sup>       | 0,0044 <sup>1</sup>   | 0,0031                     | R       | M                       |
| COPD Notaufnahme                    |                           |                       |                            |         |                         |
| Asthma Notaufnahme                  |                           |                       |                            |         |                         |
| 1° PM10                             | 0,000018 <sup>1</sup>     | 0,000095 <sup>1</sup> | 0,00011                    | R       | M                       |
| 2° PM10                             | 0,000099 <sup>1</sup>     | 0,00035 <sup>1</sup>  | 0,00024                    | R       | M                       |
| Gruppe Spitalsbehandlung            |                           |                       |                            |         |                         |
| 1° PM10                             | 0,00008 <sup>1</sup>      | 0,00043 <sup>1</sup>  | 0,00050                    | R       | M                       |
| 2° PM10                             | 0,00045 <sup>1</sup>      | 0,0016 <sup>1</sup>   | 0,0011                     | R       | M                       |
| beschränkte Arbeitsfähigkeit        |                           |                       |                            |         |                         |
| 1° PM10                             | 0,037 <sup>1</sup>        | 0,20 <sup>1</sup>     | 0,23                       | R       | L                       |
| 2° PM10                             | 0,20 <sup>1</sup>         | 0,74 <sup>1</sup>     | 0,52                       | R       | L                       |
| asthmatische Anfälle                |                           |                       |                            |         |                         |
| 1° PM10                             | 0,0034 <sup>1</sup>       | 0,012 <sup>1</sup>    | 0,014                      | R       | M                       |
| 2° PM10                             | 0,018 <sup>1</sup>        | 0,045 <sup>1</sup>    | 0,031                      | R       | M                       |

|  |                      |                     |        |   |   |
|--|----------------------|---------------------|--------|---|---|
| „Symptom Day“                                  |                      |                     |        |   |   |
| 1° PM10  | 0,045 <sup>1</sup>   | 0,23 <sup>1</sup>   | 0,27   | R | M |
| 2° PM10  | 0,24 <sup>1</sup>    | 0,86 <sup>1</sup>   | 0,60   | R | M |
| <b>chronische Krankheit</b>                    |                      |                     |        |   |   |
| Bronchitis bei Kindern                         |                      |                     |        |   |   |
| 1° PM10  | 0,00077 <sup>1</sup> | 0,0034 <sup>1</sup> | 0,0039 | R | M |
| 2° PM10  | 0,0042 <sup>1</sup>  | 0,012 <sup>1</sup>  | 0,0088 | R | M |
| Bronchitis bei Erwachsenen                     |                      |                     |        |   |   |
| 1° PM10  | 0,0012 <sup>1</sup>  | 0,0062 <sup>1</sup> | 0,0071 | R | L |
| 2° PM10  | 0,0062 <sup>1</sup>  | 0,023 <sup>1</sup>  | 0,016  | R | L |
| chronischer Husten bei Kindern                 |                      |                     |        |   |   |
| 1° PM10  | 0,0010 <sup>1</sup>  | 0,0044 <sup>1</sup> | 0,0050 | R | M |
| 2° PM10  | 0,0062 <sup>1</sup>  | 0,023 <sup>1</sup>  | 0,011  | R | M |
| Atemwegserkrankungen bei Erwachsenen           |                      |                     |        |   |   |
| 1° PM10  | 0,0016 <sup>1</sup>  | 0,0084 <sup>1</sup> | 0,0097 | R | L |
| 2° PM10  | 0,0085 <sup>1</sup>  | 0,031 <sup>1</sup>  | 0,022  | R | L |
| <b>Gesundheitswirkungen d. Ozon</b>            |                      |                     |        |   |   |
| akute Effekte (Todesfälle)                     | NQ                   | 0,24                | NQ     | L | L |
| Atemwegserkrankungen                           | NQ                   | 0,0034              | NQ     | L | L |
| COPD Spitalsbehandlung                         | NQ                   | 0,0025              | NQ     | L | L |
| Asthma Atemwegserkrankungen                    | NQ                   | 0,0023              | NQ     | L | L |
| Asthma Notaufnahme                             | NQ                   | 0,0003              | NQ     | L | L |
| geringfügig eingeschränkte<br>Arbeitsfähigkeit | NQ                   | 0,05                | NQ     | L | L |
| Asthmaanfälle                                  | NQ                   | 0,039               | NQ     | L | L |
| „Symptom Day“                                  | NQ                   | 0,016               | NQ     | L | L |
| Gesundheitseffekte/regional                    | NQ                   | NQ                  | NQ     | L | L |
| <b>Transportunfälle</b>                        |                      |                     |        |   |   |
| Tote   | 0,042                | NQ                  | NQ     | L | H |

|  |         |        |        |   |   |
|--|---------|--------|--------|---|---|
| Schwerverletzte                            | 0,019   | NQ     | NQ     | L | M |
| Leichtverletzte                            | 0,0014  | NQ     | NQ     | L | L |
| <b>ARBEITSPLATZGESUNDHEIT</b>              |         |        |        |   |   |
| <b>Krankheiten d. Minenarbeiter</b>        |         |        |        |   |   |
| Krebs durch Radon                          | 0,05    | 0,15   | -      | L | M |
| Atemwegserkrankung/Mortalität              | 0,057   | 0,17   | -      | L | M |
| Atemwegserkrankung/Morbidität              | IQ      | IQ     | -      | L |   |
| <b>Minenunfälle</b>                        |         |        |        |   |   |
| Tote                                       | 0,20    | 0,47   | 0,020  | L | H |
| Schwerverletzte                            | 0,38    | 1,13   | 0,030  | L | H |
| Leichtverletzte                            | 0,052   | 0,135  | 0,008  | L | L |
| <b>Transport</b>                           |         |        |        |   |   |
| Tote                                       | 0,11    | 0,099  | 0,0096 | L | H |
| Schwerverletzte                            | 0,021   | 0,039  | 0,0057 | L | M |
| Leichtverletzte                            | 0,0044  | 0,019  | 0,0028 | L | L |
| <b>Energiegewinnung</b>                    |         |        |        |   |   |
| Tote                                       | 0,0018  | 0,0018 | 0,0018 | L | H |
| Schwerverletzte                            | 0,0020  | 0,0020 | 0,0020 | L | M |
| Leichtverletzte                            | 0,0015  | 0,0015 | 0,0015 | L | L |
| <b>Bau/Demontage v. Anlagen</b>            |         |        |        |   |   |
| Tote                                       | 0,018   | 0,018  | 0,013  | L | M |
| Schwerverletzte                            | 0,024   | 0,026  | 0,028  | L | M |
| Leichtverletzte                            | 0,0018  | 0,016  | 0,011  | L | L |
| <b>Kalksteingewinnung</b>                  |         |        |        |   |   |
| Tote                                       | 0,0082  | 0,010  | 0,0073 | L | H |
| Schwerverletzte                            | 0,0042  | 0,010  | 0,0074 | L | M |
| Leichtverletzte                            | 0,00067 | 0,0042 | 0,0029 | L | L |
| <b>LANDWIRTSCHAFT</b>                      |         |        |        |   |   |
| SO <sub>2</sub> - Weizen (direkte Effekte) | 0,014   | 0,012  | 0,009  | R | M |

|  |                    |                     |                    |     |   |
|--|--------------------|---------------------|--------------------|-----|---|
| SO <sub>2</sub> - Gerste (direkte Effekte)           | 0,008              | 0,006               | 0,005              | R   | M |
| SO <sub>2</sub> - Roggen (direkte Effekte)           | NQ                 | 0,004               | 0,003              | R   | M |
| SO <sub>2</sub> - Hafer (direkte Effekte)            | NQ                 | 0,001               | 0,0006             | R   | M |
| SO <sub>2</sub> - andere Getreidesorten              | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Säureablagerung Kalkaufbringung                      | 0,004 <sup>2</sup> | NQ                  | 0,004              | R   | M |
| Ozonwirkung auf Weizen                               | NQ                 | 0,00037             | NQ                 | L   | L |
| Ozonwirkung auf Getreide                             | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Synergieeffekte                                      | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Schadstoffe & Ungeziefer                             | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| <b>FORSTWIRTSCHAFT</b>                               |                    |                     |                    |     |   |
| Schwefel-Holzproduktion                              | 0,004              | NQ                  | NQ                 | R   | L |
| Stickstoff-Holzproduktion                            | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Übersäuerung<br>Abschwächungsmaßnahmen               | NQ                 | 0,009 <sup>2</sup>  | 0,004 <sup>2</sup> | R   | L |
| Ozonschäden<br>Abschwächungsmaßnahmen                | NQ                 | 0,0002 <sup>2</sup> | NQ                 | L   | L |
| Ozonschäden  | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Schäden an anderen<br>Forstprodukten                 | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Eingriffe ins Landschaftsbild                        | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Verlust an Artenvielfalt                             | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Schäden am Kohlenschacht                             | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| <b>WIRKUNGEN AUF ANDERE TERRESTRISCHE ÖKOSYSTEME</b> |                    |                     |                    |     |   |
| Eingriffe ins Landschaftsbild                        | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| Verlust an Artenvielfalt                             | NQ                 | NQ                  | NQ                 | R   |   |
| <b>WIRKUNGEN AUF SÜSSWASSER</b>                      |                    |                     |                    |     |   |
| Bergbau-Grundwasser                                  | NQ                 | NQ                  | NQ                 | L   |   |
| Bergbau-Oberflächenwasser                            | NQ                 | NQ                  | NQ                 | L   |   |
| Kraftwerksemission ins Wasser                        | NQ                 | NQ                  | NQ                 | L/R |   |
| Säureeinwirkung Fischverluste                        | IQ <sup>2</sup>    | NQ                  | NQ                 | R   | M |

|  |        |         |        |    |       |
|--|--------|---------|--------|----|-------|
| Säureeinwirkung Kalkkosten in Skandinavien   | 0,0016 | 0,00072 | NQ     | R  | H     |
| Säureeinwirkung andere Effekte               | NQ     | NQ      | NQ     | R  |       |
| fester Abfall - Grundwasser                  | NQ     | NQ      | NQ     | L  |       |
| <b>MATERIALIEN</b>                           |        |         |        |    |       |
| Steinerneuerung                              | 0,0016 | 0,0031  | 0,0036 | R  | M     |
| Neuauftragung Mörtel                         | 0,034  | 0,0003  | 0,0004 | R  | L     |
| Anstricherneuerung                           | 0,14   | NQ      | NQ     | R  | L     |
| Wiederbemalung galvanisierter Stahl (bemalt) | 0,15   | NQ      | NQ     | R  | L     |
| Erhaltung galvanisierter Stahl (unbemalt)    | 0,44   | 0,19    | 0,13   | R  | L     |
| Neugestaltung                                | NQ     | 0,0049  | 0,0045 | R  | L     |
| Reparatur Beton                              | 0,00   | NQ      | NQ     | R  | M     |
| Aluminium Ersatz                             | 0,00   | 0,00    | 0,00   | R  | H     |
| sonstiges Baumaterial                        | NQ     | NQ      | NQ     | R  |       |
| Einwirkungen auf Kulturgüter                 | NQ     | NQ      | NQ     | R  |       |
| Bauschäden d. Bodensenkung                   | NQ     | NQ      | NQ     | R  |       |
| Reinigungskosten                             | 0,04   | NQ      | NQ     | R  | M     |
| keine Baumaterialien                         | NQ     | NQ      | NQ     | R  |       |
| <b>LÄRM</b>                                  |        |         |        |    |       |
| Kalksteingewinnung                           | 0,0025 | NQ      | NQ     | L  | M     |
| Kraftwerksbetrieb                            | 0,13   | NQ      | NQ     | L  | M     |
| Straßenverkehr                               | 0,002  | NQ      | NQ     | L  | M     |
| Schienenverkehr                              | 0,02   | NQ      | NQ     | L  | M     |
| <b>ANDERE WIRKUNGEN</b>                      |        |         |        |    |       |
| andere Wirkungen                             | NQ     | NQ      | NQ     | NQ | L/R/G |

Tabelle 10 (Seite 35 bis 39): Externe Kosten durch den Stein- und Braunkohlezyklus

Anmerkungen: siehe Seite 35

## 2.9.2 Der Erdöl- und Erdgaszyklus

### 2.9.2.1 Referenztechnologien und -standorte

#### **Erdöl**

- Förderung: in der Nordsee mittels Offshore-Förderung (OsebergC)
- Transport: mittels Tanker und Binnenschiffen
- Stromerzeugung: erfolgt in Lauffen (Baden-Württemberg)
- Abfallentsorgung: die Asche findet in der Baustoffindustrie sowie in der chemischen Industrie in Mannheim und Heidelberg Verwendung

#### **Erdgas**

- Exploration: in UK NothSea Southern Basin
- Extraktion: Caister Gas Field (UK)
- Bearbeitung: Theddlethorpe (Lincolnshire) Gas Reception Plant
- Stromerzeugung: West Burton (Nottinghamshire)

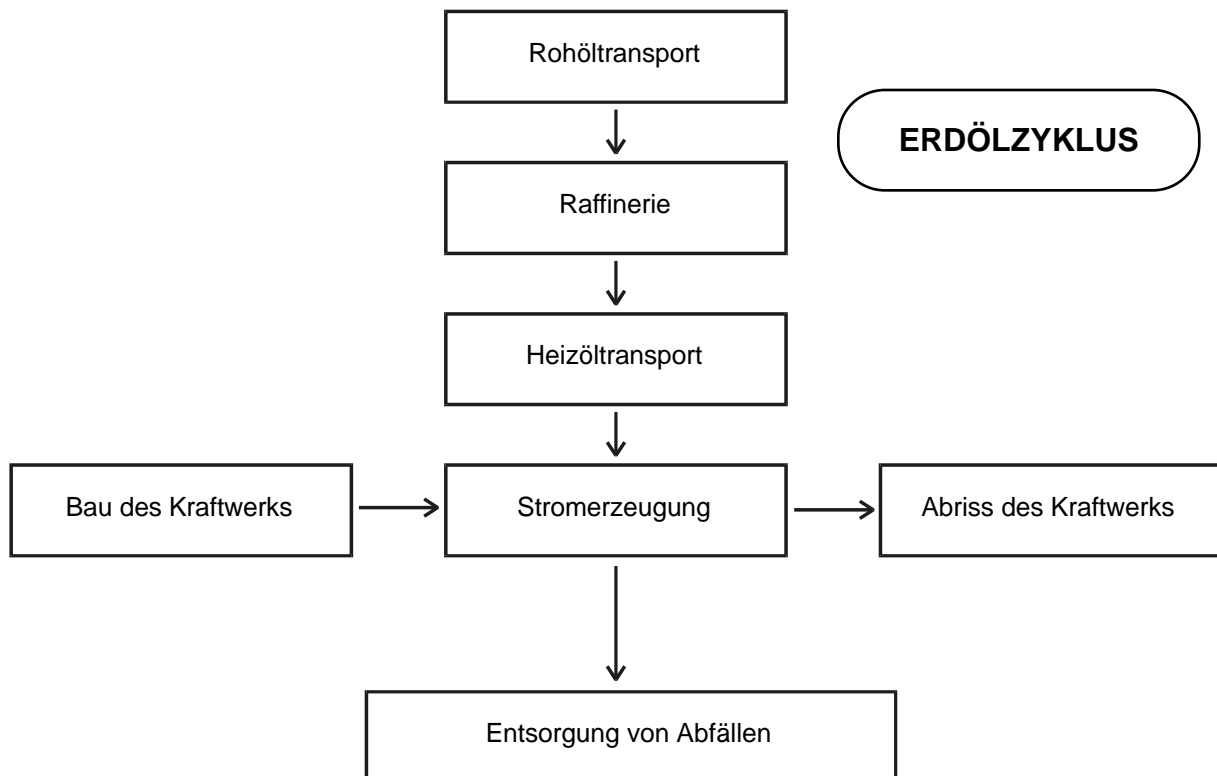


Abbildung 7: Prozessstufen im Erdölzyklus

Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“, S. 75

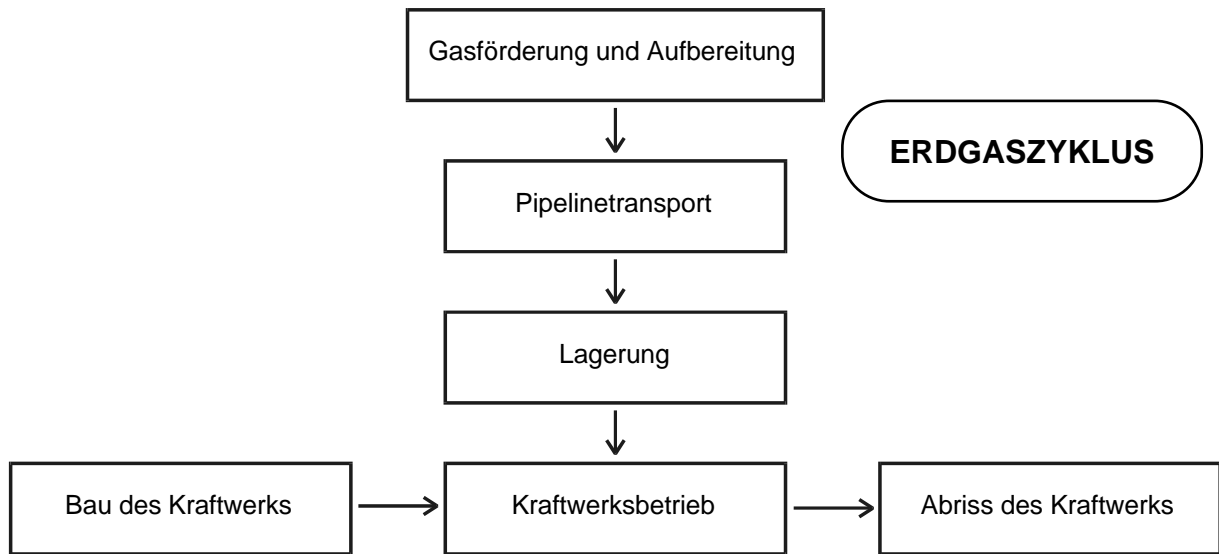


Abbildung 8: Prozessstufen im Erdgaszyklus

Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“, S. 75

#### 2.9.2.2 Stationen im Erdgas- und Erdölzyklus

##### **Erdöl**

- Rohölgewinnung
- Raffination des Rohöls
- Rohöl-Transport
- Pipeline-Betrieb
- Energiegewinnung
- Aufbau und Stilllegung von Anlagen
- Abfallentsorgung
- Transport von Schüttgut

##### **Erdgas**

- Gas-Exploration
- Aufbau und Stilllegung von Anlagen und Pipelines
- Gasgewinnung
- Betrieb von Pipelines (offshore und an Land)
- Bearbeitung von Erdgas
- Energiegewinnung
- Müllentsorgung
- Transport von Material und Betriebspersonal

Auch hier wird wie im Stein- und Braunkohlezyklus die Wirkungspfadanalyse („impact-pathway“) zur Identifizierung, Quantifizierung und Monetarisierung der Externalitäten von fossilen Energieträgern verwendet.

Im ExternE-Projekt wurden folgende Auswirkungen nach ihrer Priorität untersucht:

- Auswirkung der Luftverschmutzung auf die menschliche Gesundheit
- Arbeits- und öffentliche Unfälle
- Auswirkungen der Luftverschmutzung auf Materialien
- Auswirkungen der Luftverschmutzung auf landwirtschaftliche Produkte (Getreide)
- Auswirkungen der Luftverschmutzung auf Wälder
- Auswirkungen der Luftverschmutzung auf Süßwasserfischerei
- Auswirkungen der Luftverschmutzung auf naturnahe Ökosysteme

- Bewertung des Treibhauseffekts durch Schadstoffemissionen
- Auswirkungen durch Lärm

NO<sub>x</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen beim Betrieb der Kraftwerke. Sie zählen zu den Hauptverursachern von externen Effekten. Luftschadstoffe von anderen Stufen im Energiezyklus sind quantitativ geringer und werden als weniger bedeutend eingestuft. Die schwerwiegendsten externen Effekte betreffen die Auswirkungen des Kraftwerksbetriebes auf die menschliche Gesundheit sowie die Auswirkungen auf die Atmosphäre.

#### 2.9.2.3 Schadenbereich allgemeine Gesundheit

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die allgemeine menschliche Gesundheit infolge der Aktivitäten in der Prozesskette von einem erhöhten Niveau an Schadstoffen in der Luft betroffen ist. Jedoch werden die Emissionen aus den Kraftwerken selbst als die schwerwiegendsten eingestuft. In ExternE werden deshalb nur solche Gesundheitsschäden bewertet, die auf den Kraftwerksbetrieb zurückzuführen sind. Akute Gesundheitsschäden ergeben sich aus sauren Aerosolen infolge von SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Ozon-Belastungen. Die wichtigsten Gesundheitsschäden umfassen chronische Mortalität und Morbidität. Der Schaden auf die menschliche Gesundheit durch Ozon wurde nur auf einer lokalen Ebene untersucht, d.h. in einem Umfeld von ca. 200 km Entfernung vom Kraftwerk.

Die durchschnittlichen externen Kosten für diese Schäden belaufen sich auf **0,27 mEURO/kWh** für Öl (GT) und **0,22 mEURO/kWh** für Öl (CC) für Partikel und **11,1 mEURO/kWh** (Öl GT) bzw. **10,0 mEURO/kWh** (Öl CC) für saure Aerosole. Eine erste Einschätzung der Auswirkungen durch Ozon auf lokaler Ebene ergibt externe Kosten in Höhe von **0,22 mEURO/kWh**.

Für den Gaszyklus werden die jährlichen externen Kosten für die Gesundheitsschäden durch NO<sub>x</sub>-Emissionen auf einen Wert von **1,6 bis 3,7 MEURO** für ganz England geschätzt. Nicht mit einberechnet wurden chronische Gesundheitsschäden und Mortalität. Das ergibt Schadenskosten für das Referenzkraftwerk von **0,31 – 0,72 mEURO/kWh**. Die sonstigen Gesundheitsschäden ergeben rund **0,51 mEURO/kWh** an externen Kosten<sup>20</sup>.

#### 2.9.2.4 Schadenbereich Berufsrisiken (Arbeitsunfälle und Berufskrankheiten)

Arbeitsrisiken resultieren hauptsächlich aus Unfällen im Offshore-Bereich beim Pipelinebetrieb. Diese Gesundheitsauswirkungen werden mit Hilfe von statistischen Daten erfasst. Chronische Schäden in diesem Schadenbereich konnten nicht genauer identifiziert werden. Schätzungen für die externen Gesundheitskosten im Arbeitsbereich in allen Phasen des Erdgaszyklus liegen in einem Bereich von **0,078 – 0,13 mEURO/kWh**, mit einer besten Annäherung an einen Wert von **0,11 mEURO/kWh**.

Im Erdölbereich liegen die Schätzungen für die externen Gesundheitskosten in einem Bereich von **0,32 – 0,64 mEURO/kWh** für Öl (GT) und **0,21 – 0,41 mEURO/kWh** für Öl (CC).

Inwieweit diese Kosten bereits in der internen Kostenrechnung berücksichtigt sind - beispielsweise durch Zahlung von Versicherungsprämien oder Lohnprämien - konnte nicht genauer untersucht werden.

#### 2.9.2.5 Schadenbereich Landwirtschaft

Ernten können direkt oder indirekt durch Luftschadstoffe geschädigt werden. Die wichtigsten Schadstoffe für diesen Bereich, die direkt aus dem Kraftwerksbetrieb resultieren, sind SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>. Bei den Sekundärschadstoffen, deren Entstehung auf die zuvor genannten Primärschadstoffe zurück-

zuführen ist, handelt es sich um Ozon,  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{NO}_3^-$ .

Einer möglichen Übersäuerung der landwirtschaftlichen Flächen wird durch die Verwendung von Düngemitteln, insbesondere Kalk, entgegengewirkt. Daher sind die Schäden aus Säure- und Nitrateinwirkungen als gering einzuschätzen. Auch die Ozonbelastung durch Emissionen ist gering. Dem Auftreten von Synergieeffekten und indirekten Effekten (durch klimatische Einwirkungen) kommt immer größere Bedeutung zu. Die genaue Wirkungsweise dieser Schadstoffe wird im Detail in einer anderen Studie der Europäischen Union aus dem Jahr 1995 analysiert. In ExternE werden die Resultate daraus nur zusammengefasst gezeigt. Für das Ölfeldkraftwerk in Lauffen wurden die direkten Effekte von  $\text{SO}_2$  auf die Ernteerträge verschiedener Getreidesorten quantifiziert. Die Schadenskosten auf regionaler Ebene betragen **0,015 - 0,062 mEURO/kWh** (Gasturbine) und **0,009 - 0,0038 mEURO/kWh** (Gas-Dampfturbine). Da die Gasturbine nur im Winter in Betrieb ist werden keine Ozoneffekte berücksichtigt, während für die Gas-Dampfturbine die Schadenskosten durch erhöhte Ozonbelastung mit **0,00013 - 0,00016 mEURO/kWh** bewertet werden. Die Kosten für den zusätzlichen Kalkbedarf belaufen sich bei der Gasturbine auf **0,007 mEURO/kWh** und bei der Gas-Dampfturbine auf **0,005 mEURO/kWh**.

#### 2.9.2.6 Schadenbereich Wald und andere terrestrische Ökosysteme

Die Untersuchungen über das „Waldsterben“ haben bisher keine einheitliche Meinung über die Erfassungsmethode gebracht. In der ExternE-Studie werden deutsche und norwegische Fichtenwälder in Bezug auf Emissionen aus einem ölbefeuerten Kraftwerk genauer untersucht. Die Ergebnisse bilden jedoch nur eine Untergrenze der gesamten ökonomischen Kosten, denn andere

„Waldfunktionen“ wie die Erholungs- oder Bodenstabilisierungsfunktion sowie die Kohlenstoffrückhaltungs- bzw. -umwandlungsfunktion und auch die Artenschutzfunktion wurden nicht berücksichtigt. Die tatsächlichen externen Kosten dürften daher höher liegen.

Die Auswirkungen auf andere natürliche Ökosysteme konnten nicht quantifiziert werden, da nur sehr wenige Informationen über die Effekte der Schadstoffe auf diese Systeme vorhanden sind. Ökosysteme werden zusätzlich zu den Luftschadstoffen durch die direkte Zerstörung der Standorte und beispielsweise die Wasserverschmutzung belastet.

#### 2.9.2.7 Saurer Niederschlag auf Fischgründe/ Süßwassersysteme

In den europäischen Ländern wurde ein zunehmender Rückgang der Fischbestände beobachtet, der u.a. auch auf saure Niederschläge zurückzuführen ist. Derzeit können solche Effekte noch nicht quantifiziert werden. Die Auswirkungen auf Süßwassersysteme konnten ebenfalls nicht quantifiziert werden, da der in der Nähe des Referenzkraftwerks befindliche Fluss auch durch landwirtschaftliche Einwirkungen (z.B. durch Nitrate) geschädigt wird.

#### 2.9.2.8 Materialschäden

Materialschäden an Bauwerken werden hauptsächlich durch Schwefeldioxid und sauren Regen verursacht. In der Studie wurden erhöhte Kosten für die Beseitigung von Säureschäden an Stein, Zink, galvanisiertem Stahl, Aluminium, Oberflächenbeschichtung (Lacke) und Beton festgestellt. Sie belaufen sich auf ca. **0,16 mEURO/kWh** (für ein Gaskraftwerk) und **0,12 mEURO/kWh** für ein kombiniertes Öl-Gas-Kraftwerk.

In dieser Schadenanalyse gibt es jedoch zahlreiche Unsicherheiten, da in diesem Bereich nur auf wenige zufriedenstellende Studien zurückgegriffen werden kann.

#### 2.9.2.9 Wirkungen auf Meeresumgebungen

Auswirkungen auf das Ökosystem Meer resultieren aus verschiedenen Stufen beider Energieprozessketten (Förderung, Gewinnung, Konstruktion, Betrieb und Entsorgung der Bohrseln und Pipelines). Ihre wirkungs- und kostenmäßige Abgrenzung wird dabei durch folgende Komponenten erschwert:

- Es gibt nur wenige Daten über die Auswirkungen einer ständigen Belastung mit niedrigen Dosen einzelner Schadstoffe oder akut toxischer Effekte.
- Die Nordsee ist bereits durch die vorhandene Verschmutzung und die extensive Fischerei ein stark belastetes Gewässer. Dadurch kann jede

zusätzliche Belastung, möge sie noch so klein sein, weitere erhebliche Schäden verursachen.

- Die Fischerei in der Nordsee ist nur über einen bestimmten Zeitraum im Jahr hinweg erlaubt. Dadurch sind Wirkungen von Umwelteinflüssen nicht vor einem konsistenten Hintergrund zu sehen.
- Die bestehenden Emissionen erfordern eine genaue Charakterisierung.

Für die Erdgasprozesskette wurde errechnet, dass der gesamte Fischbestand in einem Umkreis von 500 m von einer Bohrstelle verloren geht. Dennoch werden derartige Effekte als größtmäßig vernachlässigbar angesehen. Die illegale Entladung von Kohlenwasserstoffen durch Schiffe ins Meer erreicht laut Schätzungen einen Wert von 10.000 Tonnen, wobei eine kostenmäßige Quantifizierung derzeit nicht möglich ist. Demgegenüber sind die Kosten für Tankerunfälle aufgrund vorliegender Marktpreise wesentlich einfacher zu berechnen.

| Quelle                            | Prozesskette | 0 %  | 1 % | 3 %  | 10 % | Bereich | Zeithorizont | Konfidenz |
|-----------------------------------|--------------|------|-----|------|------|---------|--------------|-----------|
| Cline<br>(1992)                   | ÖI GT        | 11,3 |     | 1,7  | 0,5  | G       | L            | !         |
|                                   | ÖI CC        | 10,3 |     | 1,2  | 0,3  | G       | L            | !         |
|                                   | Gas          | 6,4  |     | 1,0  | 0,3  | G       | L            | !         |
| Frankhauser<br>(1993)             | ÖI GT        | 8,5  |     | 1,3  | 0,4  | G       | L            | !         |
|                                   | ÖI CC        | 7,5  |     | 0,9  | 0,3  | G       | L            | !         |
|                                   | Gas          | 4,5  |     | 0,7  | 0,2  | G       | L            | !         |
| Tol<br>(1995)                     | ÖI GT        | 11,9 |     | 1,8  | 0,6  | G       | L            | !         |
|                                   | ÖI CC        | 10,8 |     | 1,2  | 0,4  | G       | L            | !         |
|                                   | Gas          | -    | 7,9 | 5,3  | 1,4  | G       | L            | !         |
| Hohmeyer<br>und Gärtner<br>(1992) | ÖI GT        | 634  |     | 97,7 | 29,9 | G       | L            | !         |
|                                   | ÖI CC        | 576  |     | 66,7 | 19,9 | G       | L            | !         |
|                                   | Gas          | 2160 |     | 350  | 105  | G       | L            | !         |

Tabelle 11: Treibhausgas-Schadenschätzung mit einer Diskontrate von 0 - 10 % in mEURO/kWh für den Öl- und Gaszyklus

| Schadenseinschätzung in mEURO/kWh |       |       |      |
|-----------------------------------|-------|-------|------|
| Quelle                            | Öl GT | Öl CC | Gas  |
| Cline (1992)                      | 14    | 10    | 6    |
| Frankhauser (1993)                | 8     | 6     | 4    |
| Tol (1995)                        | 17    | 12    | 8    |
| Hohmeyer und Gärtner (1992)       | 4500  | 3200  | 2100 |

Tabelle 12: Vergleich der Resultate bei Verwendung einer einheitlichen Berechnungsmethode<sup>23</sup>

#### 2.9.2.10 Schadenbereich Treibhauseffekt

Eine gesamte Einschätzung der Auswirkungen von Treibhausgasemissionen durch die betrachteten Kraftwerke wurde in der ExternE-Studie nicht durchgeführt. Für diesen Schadenbereich wird auf Studien in der vorliegenden Literatur zurückgegriffen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 und 12 aufgelistet<sup>22</sup>.

Die treibhausgasspezifischen Schadenskosten werden mit den Emissionsfaktoren für die einzelnen Energiesysteme multipliziert, um die Schadenskosten für die einzelnen Energiesysteme zu erhalten.

Diese Resultate wurden nach der gleichen Methode berechnet, so dass ein Vergleich möglich wird. Es wurde eine Diskontrate von 0 % verwendet (mit Ausnahme der Einschätzung von Tol, der für Gas eine Diskontrate von 1 % verwendet).

Weitere Informationen zur Berechnung der Schadenskosten der Treibhausgase finden sich in „Umwelt- und Gesundheitsschäden in der Stromerzeugung – Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“ von Friedrich/Krewitt, 1997, S. 138ff.

#### 2.9.2.11 Schadenbereich sonstige Effekte

Neben den bisher behandelten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt liegen im Erdöl- und Erdgaszyklus weitere Umwelteffekte vor, die bisher nicht behandelt wurden, da eine Quantifizierung nicht möglich ist oder sie als nicht bedeutend angesehen werden. Dazu zählen u.a.:

- Effekte aufgrund elektromagnetischer Strahlung
- krankheitserregende Bakterien, die durch Freisetzung in Kühltürmen in die Umwelt gelangen
- verringerte Lebens- bzw. Wohnqualitäten infolge von Lärmemissionen

#### 2.9.2.12 Übersicht über die externen Kosten im Erdöl- und Erdgaszyklus

Die geschätzten Schäden werden in mEURO pro Kilowattstunde für jedes Referenzobjekt ausgedrückt. Schäden für den Treibhauseffekt werden separat ausgewiesen, da hier im Rahmen der ExternE-Studie noch keine eigenen Untersuchungen durchgeführt wurden.

|                                     | Schätzwerte (mECU/kWh) |           |          |         |                   |                      |
|-------------------------------------|------------------------|-----------|----------|---------|-------------------|----------------------|
| Schadenskategorie                   | Öl (GT)                | Öl (CC)   | Gas      | Bereich | Zeit-<br>horizont | Konfidenz-<br>niveau |
| <b>ALLGEMEINE GESUNDHEIT</b>        |                        |           |          |         |                   |                      |
| <b>Sterblichkeit</b>                |                        |           |          |         |                   |                      |
| akute Mortalität                    |                        |           |          |         |                   |                      |
| 1° PM10                             | 0,22                   | 0,18      |          | R       | S                 | L                    |
| 2° PM10                             | 9,10                   | 8,2       | 0,43     | R       | S                 | L                    |
| Ozon                                |                        | 0,15      | NQ       | L       | S                 | L                    |
| <b>chronische Mortalität</b>        | IQ                     | IQ        | IQ       | R       | M                 | L                    |
| <b>akute Morbidität</b>             |                        |           |          |         |                   |                      |
| Atemwegsbehandlung - Spital         |                        |           |          |         |                   |                      |
| 1° PM10                             | 0,0001                 | 0,00008   |          | R       | S                 | M                    |
| 2° PM10                             | 0,0042                 | 0,0038    | 0,00017  | R       | S                 | M                    |
| Ozon                                |                        | 0,0021    | NQ       | L       | S                 | L                    |
| COPD <sup>3</sup> Spitalsbehandlung |                        |           |          |         |                   |                      |
| 1° PM10                             | 0,00011                | 0,000098  |          | R       | S                 | M                    |
| 2° PM10                             | 0,0051                 | 0,0046    | 0,0002   | R       | S                 | M                    |
| Ozon                                |                        | 0,0016    | NQ       | L       | S                 | L                    |
| COPD Notaufnahme                    |                        |           |          |         |                   |                      |
| 1° PM10                             | 0,000011               | 0,0000088 |          | R       | S                 | M                    |
| 2° PM10                             | 0,00046                | 0,00049   | 0,000018 | R       | S                 | M                    |
| Asthma Notaufnahme                  |                        |           |          |         |                   |                      |
| 1° PM10                             | 0,00001                | 0,0000078 |          | R       | S                 | M                    |
| 2° PM10                             | 0,00041                | 0,00036   | 0,000016 | R       | S                 | M                    |
| Ozon                                |                        | 0,0014    | NQ       | L       | S                 | L                    |
| Spitalsbehandlung v. Kindern        |                        |           |          |         |                   |                      |
| 1° PM10                             | 4,55E-05               | 3,54E-05  |          | R       | S                 | M                    |
| 2° PM10                             | 0,0018                 | 0,0016    | 0,000073 | R       | S                 | M                    |

|  |         |         |         |   |   |   |
|--|---------|---------|---------|---|---|---|
| beschränkte Arbeitsfähigkeit                 |         |         |         |   |   |   |
| 1° PM10                                      | 0,021   | 0,016   |         | R | S | L |
| 2° PM10                                      | 0,86    | 0,77    | 0,032   | R | S | L |
| Ozon   |         | 0,03    | NQ      | L | S | L |
| Kurzatmigkeit/Asthma                         |         |         |         |   |   |   |
| 1° PM10                                      | 0,0013  | 0,001   |         | R | S | M |
| 2° PM10                                      | 0,052   | 0,047   | 0,003   | R | S | M |
| „Symptom Day“                                |         |         |         |   |   |   |
| 1° PM10                                      | 0,025   | 0,019   |         | R | S | M |
| 2° PM10                                      | 1       | 0,89    | 0,039   | R | S | M |
| Ozon   |         | 0,01    | NQ      | L | S | L |
| Spitalsbehandlung v. Asthma<br>aufgrund Ozon |         | 0,0014  | NQ      | L | S | L |
| Asthmaanfälle d. Ozon                        |         | 0,0024  | NQ      | L | S | L |
| <b>chronische Morbidität</b>                 |         |         |         |   |   |   |
| Bronchitis bei Erwachsenen                   |         |         |         |   |   |   |
| 1° PM10                                      | 0,00066 | 0,00051 |         | R | M | L |
| 2° PM10                                      | 0,027   | 0,024   | 0,00086 | R | M | L |
| Atemwegserkrankungen bei<br>Erwachsenen      |         |         |         |   |   |   |
| 1° PM10                                      | 0,00089 | 0,00069 |         | R | M | L |
| 2° PM10                                      | 0,036   | 0,032   | 0,0014  | R | M | L |
| Bronchitis bei Kindern                       |         |         |         |   |   |   |
| 1° PM10                                      | 0,00036 | 0,00028 |         | R | M | M |
| 2° PM10                                      | 0,015   | 0,013   | 0,00067 | R | M | M |
| Husten bei Kindern                           |         |         |         |   |   |   |
| 1° PM10                                      | 0,00046 | 0,00036 |         | R | M | M |
| 2° PM10                                      | 0,019   | 0,017   | 0,001   | R | M | M |
| <b>Transportunfälle</b>                      |         |         |         |   |   |   |
| Tote   | NQ      | NQ      | 0,0042  | L | S | H |
| Schwerverletzte                              | NQ      | NQ      | 0,0024  | L | S | M |
| Leichtverletzte                              | NQ      | NQ      | 0,00017 | L | S | L |

| <b>ARBEITSGESUNDHEIT</b>                                   |        |         |         |   |   |   |
|--|--------|---------|---------|---|---|---|
| <b>Offshorearbeiten/Bohrarbeiten/Entwicklung/Förderung</b> |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   | 0,02   | 0,013   | 0,018   | L | S | M |
| Schwerverletzte  | 0,022  | 0,015   | 0,017   | L | S | M |
| Leichtverletzte  | 0,0032 | 0,0021  | 0,0016  | L | S | L |
| <b>schwere Offshore-Unfälle</b>                            |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   | 0,0037 | 0,0024  | 0,042   | L | S | L |
| Schwerverletzte  | NQ     | NQ      | NQ      | L | S | L |
| Leichtverletzte  | NQ     | NQ      | NQ      | L | S |   |
| <b>Rohöl/Heizöltransport</b>                               |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   | 0,24   | 0,15    |         | L | S | M |
| Schwerverletzte  | 0,054  | 0,036   |         | L | S | M |
| Leichtverletzte  | 0,015  | 0,01    |         | L | S | L |
| <b>Rohölverarbeitung</b>                                   |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   | 0,023  | 0,016   |         | L | S | M |
| Schwerverletzte  | 0,014  | 0,01    |         | L | S | M |
| Leichtverletzte  | 0,0067 | 0,0042  |         | L | S | L |
| <b>Erdgasverarbeitung</b>                                  |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   |        |         | 0,00018 | L | S | L |
| Schwerverletzte  |        |         | 0,00031 | L | S | L |
| Leichtverletzte  |        |         | 0,00005 | L | S | L |
| <b>Kalksteingewinnung</b>                                  |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   |        | 0,0052  |         | L | S | M |
| Schwerverletzte  |        | 0,0048  |         | L | S | M |
| Leichtverletzte  |        | 0,0019  |         | L | S | M |
| <b>Stromerzeugung</b>                                      |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   | 0,0029 | 0,00096 | 0,0017  | L | S | M |
| Schwerverletzte  | 0,003  | 0,001   | 0,003   | L | S | M |
| Leichtverletzte  | 0,0023 | 0,00073 | 0,00005 | L | S | L |
| <b>Schüttguttransport</b>                                  |        |         |         |   |   |   |
| Todesfälle   |        | 0,0052  |         | L | S | M |
| Schwerverletzte  |        | 0,0035  |         | L | S | M |
| Leichtverletzte  |        | 0,0017  |         | L | S | L |

|   |                |         |          |     |     |   |
|---|----------------|---------|----------|-----|-----|---|
| <b>Bau/Abbau von Anlagen</b>  |                |         |          |     |     |   |
| Todesfälle  | 0,027          | 0,0073  | 0,0077   | L   | S   | M |
| Schwerverletzte   | 0,036          | 0,01    | 0,011    | L   | S   | M |
| Leichtverletzte   | 0,023          | 0,0062  | 0,0008   | L   | S   | L |
| <b>LANDWIRTSCHAFT</b>   |                |         |          |     |     |   |
| SO <sub>2</sub> - Weizen  | 0,01           | 0,013   |          | L/R | S   | M |
| SO <sub>2</sub> - Gerste  | 0,011          | 0,0065  |          | L/R | S   | M |
| SO <sub>2</sub> - Roggen  | 0,004          | 0,0035  |          | L/R | S   | M |
| SO <sub>2</sub> - Hafer   | 0,002          | 0,0012  |          | L/R | S   | M |
| SO <sub>2</sub> - andere Getreide-<br>pflanzen                                  | NQ             | NQ      |          |     |     |   |
| Säureablagerungen/Kalkbeh.  | 0,007          | 0,005   | NQ       | R   | M   | M |
| Ozon - Weizen   |                | 0,00015 | NQ       | L/R | S   | L |
| Ozon - sonstiges Getreide   |                | NQ      | NQ       |     |     |   |
| Schadstoffe/Ungeziefer  | NQ             | NQ      | NQ       |     |     |   |
| <b>FORSTWIRTSCHAFT</b>  |                |         |          |     |     |   |
| Schäden an westdeutschen &<br>norwegischen Fichtenwäldern<br>durch Übersäuerung | 0,013          | 0,009   | NQ       | R   | S   | L |
| sonstige Schäden  | NQ             | NQ      | NQ       |     |     |   |
| Artenvielfalt   | NQ             | NQ      | NQ       |     |     |   |
| <b>WIRKUNGEN AUF MARITIME ÖKOSYSTEME</b>  |                |         |          |     |     |   |
| Fischereiverluste - Bohrung   | NQ             | NQ      | 0,0085   | L/R | S/M | ! |
| Fischereiverluste - Abwässer  | NQ             | NQ      | 1,00E-09 | L   | S/M | ! |
| Organismen  | NQ             | NQ      | NQ       |     |     |   |
| langfristig chron. Wirkungen  | NQ             | NQ      | NQ       |     |     |   |
| Tankerunfälle   | 0,031-<br>0,33 |         |          | L/R | S/M | L |
| <b>WIRKUNGEN AUF SÜSSGEWÄSSER</b>   |                |         |          |     |     |   |
| lokale Beeinträchtigung<br>Trinkwasser  | NQ             | NQ      | 0        | L   | S   | H |
| lokale Beeinträchtigung<br>Ökosystem  | NQ             | NQ      | NQ       |     |     |   |
| Übersäuerung v. Süßwasser   | NQ             | NQ      | NQ       |     |     |   |

| <b>WIRKUNGEN AUF MATERIALIEN</b>             |         |         |        |       |       |   |
|--|---------|---------|--------|-------|-------|---|
| Steinerneuerung                              | 0,0036  | 0,0024  | 0,0002 | R     | M     | M |
| Neuauftragung Mörtel                         | 0,00025 | 0,00015 | 0,0043 | R     | M     | L |
| Erneuerung Anstrich                          |         |         | 0,011  | R     | M     | L |
| Neugestaltung                                | 0,0055  | 0,004   | NQ     | R     | M     | M |
| Reparatur von Betonschäden                   | NQ      | NQ      | 0      | R     | M     | M |
| Wiederbemalung galvanisierter Stahl (bemalt) | 0,15    | 0,12    | 0,012  | R     | M     | L |
| Erhaltung galvanisierter Stahl (unbemalt)    |         |         | 0,035  | R     | M     | L |
| Zinkersatz                                   | 0,003   | 0,001   | NQ     | R     | M     | M |
| Aluminiumersatz                              | 0       | 0       | 0      | R     | M     | H |
| anderes Baumaterial                          | NQ      | NQ      | NQ     |       |       |   |
| Reinigungskosten                             | NQ      | NQ      | NQ     |       |       |   |
| keine Baumaterialien                         | NQ      | NQ      | NQ     |       |       |   |
| Wirkungen auf Kulturgüter                    | NQ      | NQ      | NQ     |       |       |   |
| <b>LÄRM</b>                                  |         |         |        |       |       |   |
| Kraftwerksbetrieb                            | NQ      | NQ      | 0,027  | L     | S     | M |
| Andere Wirkungen                             | NQ      | NQ      | NQ     | L/R/G | S/M/L |   |

Tabelle 13: Externe Kosten durch den Erdöl- und Erdgaszyklus

Anmerkungen: Aus Vereinfachungsgründen wurden nur die „besten“ Schätzwerte angegeben. Die Bandbreite dieser Werte kann zum Teil sehr groß sein. 1° PM = Primäre PM10; 2° PM10 = Sekundäre PM10

NQ = nicht quantifiziert im Rahmen dieses Projektes; IQ = Schätzwerte nicht gesichert; H = hoch; M = mittel; N = gering; „!“ = Das Konfidenzniveau ist signifikant geringer als für jeden anderen Schätzwert; L = lokal (0-100 km); R = regional (100-1000 km); G = global (> 1000 km); S = kurzfristig (unmittelbar); M = mittelfristig (1-100 Jahre); L = langfristig (100-100.000 Jahre); COPD (Chronic Obstructive Pulmonary Disease)

Quelle: ExternE (1995), Vol. 4, S. xviii-xxii

2.9.2.13 Übersicht über die externen Kosten durch fossile Brennstoffe in der ExternE-Studie  
(Zusammenfassung der Schätzwerte)

| Schadenskategorie           | Schätzwerte (mEURO/kWh) |           |                 |              |           |            |
|-----------------------------|-------------------------|-----------|-----------------|--------------|-----------|------------|
|                             | Steinkohle              |           | Braun-<br>kohle | Erdöl/Erdgas |           | Erdgas     |
|                             | GB                      | D         | D               | D            | D         | UK         |
| allgemeine Gesundheit       | 4                       | 13        | 10              | 11           | 10        | 0,5        |
| Krankheiten am Arbeitsplatz | 0,107                   | 0,32      | NQ              | NQ           | NQ        | NQ         |
| Unfälle am Arbeitsplatz     | 0,8                     | 2,0       | 0,14            | 0,5          | 0,3       | 0,1        |
| Landwirtschaft              | 0,03                    | 0,02      | 0,02            | 0,04         | 0,02      | NQ         |
| Holz                        | 0,004                   | 0,009     | 0,004           | 0,013        | 0,009     | neg.       |
| terrestrisches Ökosystem    | NQ                      | NQ        | NQ              | NQ           | NQ        | NQ         |
| maritimes Ökosystem         | NQ                      | NQ        | NQ              | 0,2          | 0,2       | 0,001      |
| Fischerei                   | IQ                      | NQ        | NQ              | NQ           | NQ        | NQ         |
| Materialien                 | 0,8                     | 0,2       | 0,1             | 0,3          | 0,2       | 0,06       |
| Lärm                        | 0,2                     | NQ        | NQ              | NQ           | NQ        | 0,03       |
| andere Auswirkungen         | NQ                      | NQ        | NQ              | NQ           | NQ        | NQ         |
| <b>Sub-Total</b>            | <b>6</b>                | <b>16</b> | <b>10</b>       | <b>12</b>    | <b>11</b> | <b>0,7</b> |
| TOTAL                       | NQ                      | NQ        | NQ              | NQ           | NQ        | NQ         |

Tabelle 14: Zusammenfassung - externe Kosten durch fossile Brennstoffe (Schätzwerte)

## 2.10 Externe Kosten erneuerbarer Energieträger: Wind und Wasserkraft

Stromerzeugungssysteme, die auf erneuerbaren Energiequellen basieren, werden als umweltverträglicher eingeschätzt, da die wichtigsten Umweltbelastungen der fossilen und nuklearen Prozessketten vermieden werden. Jedoch verursachen auch erneuerbare Energien negative Umweltwirkungen, wobei die verursachten Schäden zumeist nur eine lokale Wirkung aufweisen. In der ExternE-Studie werden zwei Arten erneuerbarer Stromerzeugungssysteme, nämlich Wind und Wasserkraft, genauer betrachtet. Dies war zugleich der erste Versuch eine umfassende Einschätzung der externen Kosten von Umweltschäden durch erneuerbare Energien durchzuführen.

### 2.10.1 Bewertungsmethode

Die Methodik basiert wiederum auf der „impact-pathway“-Analyse (Schadensfunktionsansatz). Die zu untersuchenden Prozessstufen beginnen mit

einer Analyse der durch Windturbinen oder Wasserdämmen verursachten Schäden im gesamten Lebenszyklus. Anschließend erfolgt eine monetäre Bewertung der Schäden. In manchen Fällen war es möglich, Marktpreise für die Bewertung der Güter, wie beispielsweise reduzierte Anbauflächen oder geringere Lebensdauer von Gebäudefassaden, zu verwenden. Zur Bewertung von nicht am Markt gehandelten Gütern, wie beispielsweise der menschlichen Gesundheit oder der Ästhetik einer Landschaft, bedient man sich alternativer Methoden (Verwendung der „contingent pricing“- sowie der „hedonic pricing“-Analyse).

### 2.10.2 Referenztechnologien und -standorte

#### Windenergieanlage

Die untersuchten Windkraftwerke stammen aus zwei Anlagen in Großbritannien, aus dem landwirtschaftlich geprägten Gebiet Delabole im Südwesten von England und aus dem offenen Moorland in Penrhyddlan und Llidiartywaun in Zentralwales. Bei der letztgenannten Anlage handelt es

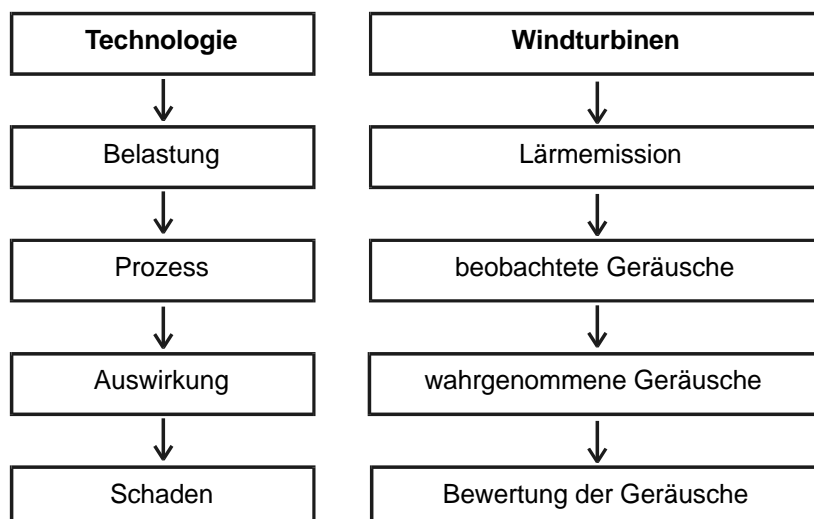


Abbildung 9: Schadensfunktionsansatz für Lärm, der durch den Betrieb von Windturbinen verursacht wird

sich um ein großes Windkraftprojekt mit mehr als 100 Turbinen.

### **Wasserkraft**

Im Rahmen der Analyse des Wasserkraftlebenszyklus wurden zwei sehr unterschiedliche Anlagen untersucht, nämlich eine Anlage in Norwegen (Sauda, mit einem jährlichen Leistungsvermögen von 500 MW) und eine in Frankreich (La Creuse, mit einer Leistung von 20 MW pro Jahr).

Im Gegensatz zu anderen, konventionellen Energieträgern kann der Energiezyklus von Wind und Wasserkraft nur in zwei Stufen eingeteilt werden:

- Elektrizitätsgewinnung
- Elektrizitätsverteilung

Während bei fossilen Energiesystemen die externen Effekte aus den einzelnen Stufen ihrer gesamten zugrunde liegenden Prozesskette verursacht werden, entstehen bei erneuerbaren Energieträgern mögliche Externalitäten v.a. bei der Produktion der Anlagen und der Materialherstellung sowie im Anlagenbetrieb.

### 2.10.3 Stationen im Wind- und Wasserkraftzyklus

#### **Wind**

- Ressourcengewinnung
- Ressourcentransport
- Materialbearbeitung
- Erstellen der Komponenten
- Transport der Komponenten
- Konstruktion der Turbinen
- Betrieb der Turbinen
- Stilllegung/Abbau der Anlage
- Entsorgung der Anlage

#### **Wasser**

- Konstruktion
- Betrieb
- Demontage

### 2.10.4 Zusammenfassung der Auswirkungen durch Windenergieanlagen

- Lärmbelästigung durch den Turbinenbetrieb
- visuelle Beeinträchtigung der Landschaft
- atmosphärische Emissionen aus der Produktion der Materialien
- Unfälle bei der Produktion, Konstruktion und beim Betrieb der Anlage

Geringere Bedeutung haben folgende Effekte auf die betroffenen Rezeptoren:

- Auswirkungen der Turbinen auf Vögel
- Auswirkungen der Konstruktion auf Ökosysteme
- Störung der elektromagnetischen Kommunikation (Radio, Fernsehen, Mobiltelefone)

### 2.10.5 Zusammenfassung der Auswirkungen durch Wasserkraftwerke

- Wirkungen durch Flussumleitungen, -stau sowie Felsablagerungen in landwirtschaftlichen Flächen
- Wirkungen auf Baustraßen, Überlandleitungen, Stau- und Felsablagerungen im Wald
- Wirkungen auf das Wasserangebot
- Wirkungen auf den Fährverkehr durch Einleitung von erwärmtem Wasser in den Fjord (am Referenzstandort)
- Schäden durch den Bau und Betrieb an Erholungsgebieten
- Schäden durch den Bau und Betrieb an kulturell bedeutsamen Stätten
- Schäden durch den Bau und Betrieb an terrestrischen und aquaristischen Ökosystemen
- Schäden durch den Bau und Betrieb an der allgemeinen Gesundheit

- Wirkungen durch den Bau und Betrieb auf die lokale und nationale Beschäftigungssituation und auf das lokale Einkommen
- Wirkungen der Stromleitungen auf Vogelpopulationen

Beide Energieformen verursachen bei der Stromproduktion selbst keine unmittelbaren Umweltmissionen. Mögliche negative Umweltwirkungen ergeben sich beispielsweise bei der Produktion der verwendeten Anlagen. Bei fossilen Brennstoffzyklen wurden diese sekundären Emissionen nicht untersucht. Bei den erneuerbaren Energieträgern sind die sekundären Emissionen jedoch von Bedeutung, da sie keine direkten Emissionswirkungen aufweisen.

## 2.10.6 Die externen Kosten bei Windenergieanlagen

### 2.10.6.1 Geräuschbelästigung

Die sich in Betrieb befindlichen Windturbinen stellen die Hauptquelle für Lärmbelästigungen in der gesamten Prozesskette dar. Der Lärm resultiert aus einer Kombination von aerodynamischen und mechanischen Geräuschen. Der Lärmpegel ist je nach Lage der Kraftwerksanlagen sehr unterschiedlich zu bewerten. In städtischen Gebieten, wo der Hintergrundlärm größer ist, wird die Lärmbelästigung durch die Anlagen anders bewertet werden, als dies in ländlichen Gebieten mit entsprechend geringeren Hintergrundbelastungen der Fall ist. Mit Hilfe von monetären Umrechnungen - z.B. Zahlungsbereitschaft für Maßnahmen zur Lärmreduktion - können dann obere Grenzen für die externen Kosten der Schallemissionen berechnet werden. An den Referenzstandorten wird die Lärmbelästigung auf einen Wert zwischen **0,07 mEURO/kWh** in Pennrhyddlan und **1,1 mEURO/kWh** in Llidiartywaun geschätzt. Die Ergebnisse sind stark abhängig vom Standort und von der Bevölkerungsdichte.

### 2.10.6.2 Optische Beeinträchtigung des Landschaftsbildes

Im Allgemeinen existieren aber noch keine verbindlichen Bewertungsmaßstäbe, die sich auf typische Windenergieanlagen beziehen. Die existierenden Ansätze zur Quantifizierung optischer Belastungen können derzeit nur als extrem unsicher eingestuft werden. Vorläufig wird die aus Umfragen abgeleitete Zahlungsbereitschaft für den Genuss einer unberührten Landschaft während einer Urlaubsfahrt zur Bewertung der visuellen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes verwendet. Hier wird für die Beurteilung der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes die Contingent Valuation-Methode verwendet. Für die monetäre Bewertung wurden Werte aus veröffentlichten Studien herangezogen, da in Großbritannien keine Bewertungsergebnisse der Schäden vorhanden waren. Anhand dieser Studien werden die Schadenskosten zwischen **1,9 mEURO/kWh** in Cornwall und **0,09 mEURO/kWh** in Powys geschätzt<sup>24</sup>.

### 2.10.6.3 Atmosphärische Emissionen

Atmosphärische Emissionen durch den Windenergiezyklus können nur mittels einer Prozesskettenanalyse bestimmt werden, da es keine direkte Emission beim Betrieb der Kraftwerksanlage gibt. Bei der Produktion von Windkraftanlagen fallen sehr energieintensive Prozesse für die Herstellung von Einzelteilen sowie für die Konstruktion der Anlage an. Die Werte erreichen **0,15 mEURO/kWh** für den Treibhauseffekt durch CO<sub>2</sub>-Emissionen und **0,7 mEURO/kWh** für Säureemissionen.

### 2.10.6.4 Berufliche und allgemeine Gesundheitsrisiken – Unfälle

Unfälle sind die größte Gefahrenquelle für die Gesundheit im Windenergiezyklus. Unfälle entste-

hen am ehesten bei der Produktion, Konstruktion und beim laufenden Betrieb durch die Wartung dieser Anlagen. Die Unfälle werden nach ihrer Schwere differenziert: Tödliche Unfälle werden mit 2,5 MEURO (Value of Statistic Life), schwere Unfälle mit 79.000 EURO und leichtere Unfälle mit 1.200 EURO bewertet. Daraus ergeben sich Schätzwerte für Arbeitsunfälle in der Höhe von **0,26 mEURO/kWh** und für allgemeine („öffentliche“) Unfälle von **0,09 mEURO/kWh**.

Die internen Kosten für Windenergie sind abhängig von der jeweiligen Windgeschwindigkeit. Anlagen in Großbritannien weisen Stromerzeugungskosten von ungefähr **70 mEURO/kWh** auf. Daraus ist ersichtlich, dass die geschätzten externen Kosten der Windenergie relativ gering sind.

| Schadenkategorie                 | Schätzwerte (mEURO/kWh) |                             |                 |               |                |          |
|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------|----------------|----------|
|                                  | Delabole                | Penrhyddlan & Llidiartywaun |                 | Konfidenz (4) | Auswirkung (5) | Zeit (6) |
| <b>Lärm</b>                      | 1,1                     |                             | 0,07            | M             | L              | S        |
| <b>visuelle Beeinträchtigung</b> | NQ <sup>1</sup>         |                             | NQ <sup>1</sup> | L             | L              | S        |
| <b>Treibhauseffekt</b>           |                         | 0,15 <sup>2</sup>           |                 | !             | G              | L        |
| <b>Säurebildung</b>              |                         | 0,7 <sup>3</sup>            |                 | L             | R              | L/M      |
| <b>öffentliche Unfälle</b>       |                         |                             |                 |               |                |          |
| - Betriebsphase                  |                         | neg.                        |                 | M             | L              | S        |
| - Fahrt zur/von der Arbeit       |                         | 0,09                        |                 | M             | L              | S        |
| <b>Arbeitsunfälle</b>            |                         |                             |                 |               |                |          |
| - Anlagenherstellung             |                         | 0,05                        |                 | M             | L              | S        |
| - Anlagenaufbau                  |                         | 0,11                        |                 |               |                |          |
| - Turbinenbetrieb                |                         | 0,1                         |                 |               |                |          |

Tabelle 15: Externe Kosten der Windenergie (Schätzwerte in mEURO/kWh)

Anmerkungen: Aus Vereinfachungsgründen wurden nur die „besten“ Schätzwerte angegeben. Die Bandbreite dieser Werte kann teilweise sehr hoch sein. NQ = nicht quantifiziert im Rahmen dieses Projektes

1) Nicht quantifizierbar, aber im Allgemeinen entstehen außerhalb von wichtigen Erholungsgebieten eher geringe Schäden

2) Basiert auf den Kosten des Treibhauseffektes (Cline 1992)

3) H = hoch, M = mittel, N = gering, „!“ = Das Konfidenzniveau ist signifikant geringer als für jeden anderen Schätzwert

4) L = lokal (0-100 km), R = regional (100-1000 km), G = global (> 1000 km)

5) S = kurzfristig (unmittelbar), M = mittelfristig (1-100 Jahre), L = langfristig (100-100.000 Jahre)

Quelle: ExternE (1995), Vol. 6, S. xiv (Tabelle 19)

### 2.10.7 Die externen Kosten bei Wasserkraftwerken

Es gibt kaum Luftemissionen aus dem Wasserkraftzyklus. Die Hauptauswirkungen entstehen durch Landverbrauch, Schäden an kulturellen Objekten sowie terrestrischen und aquaristischen Ökosystemen. Diese Schäden sind sehr standort- und projektspezifisch. Dies erschwert die Erstellung einer allgemein gültigen Schadensfunktion. Daher wurden hauptsächlich Expertenschätzungen für die Bewertung von den Wirkungen der Wasserkraft auf Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserhaushalt, Fährverkehr, Erholung usw. herangezogen.

#### 2.10.7.1 Unfälle

Unfälle im Bereich von Wasserkraftwerken werden wie bei den Windkraftwerken mit den externen Kosten für tödliche, schwere und leichte Unfälle bewertet. Für die Bewertung der Gesundheitsrisiken im Arbeitsbereich wurden nationale Statistiken herangezogen. Hierfür wurden Daten für den Kraftwerksbetrieb und den Anlagenbau verwendet. Tödliche Unfälle werden mit dem statistischen Wert des Lebens bewertet, während schwere Unfälle mit 79.000 EURO und leichte Unfälle mit 1.200 EURO monetarisiert werden. Die Schätzwerte für Arbeitsunfälle bei Wasserkraft ergeben daher externe Kosten in der Höhe von **0,032 mEURO/kWh**. Die Schäden aus öffentlichen Unfällen wurden noch nicht bewertet, dürften jedoch ziemlich gering sein.

#### 2.10.7.2 Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft und die Wasserversorgung

Die Hauptschäden durch Wasserkraftanlagen wirken auf terrestrische und aquaristische Ökosysteme. Diese Auswirkungen sind meist lokaler Natur und sehr standortbezogen. Allgemeine Ansätze

konnten daher nicht aufgestellt werden. Das Wasserkraftwerk in Sauda (Norwegen) wurde einer umfassenden Umweltanalyse unterzogen, wobei folgende Einzelwirkungen quantifiziert wurden<sup>25</sup>:

- Schäden in der Landwirtschaft werden auf ein Niveau von **0,0098 bis 0,011 mEURO/kWh** geschätzt. (Das ist der Verlust an Weideland, Landverbrauch durch zusätzliche Straßen, durch Ablagerungen von Material und Schutt. Die Schätzung erfolgt über Marktpreise.)
- Schäden in der Forstwirtschaft durch Felsablagerungen; Straßen und Schneisen für die Stromleitungen; der Verlust in der Holzproduktion kann mittels Marktpreisen bewertet werden. Die Werte liegen zwischen **0,0001 und 0,0004 mEURO/kWh**.
- Schäden am Wasserhaushalt beinhalten die Auswirkungen auf das Trinkwasser und für die Bewässerung. Für die Bewertung wird ein Wiedergutmachungs-Ansatz (Replacement Costs Approach) verwendet. Die externen Kosten belaufen sich auf **0,0034 – 0,0135 mEURO/kWh**.
- Kosten für die Freihaltung des Fjordes von Eis im Winter: **0,0046 mEURO/kWh** (sehr standortspezifischer Schätzwert)

Bei Damnbrüchen in Wasserkraftanlagen muss mit dem Verlust von Menschenleben gerechnet werden. Da jedoch die entsprechenden Gebiete in Frankreich und Norwegen dünn besiedelt sind, können diese negativen Effekte aus ökonomischer Perspektive als gering eingeschätzt werden.

#### 2.10.7.3 Auswirkungen auf Erholungsgebiete und Kultureinrichtungen

Für die Bewertung dieser Auswirkungen auf die Referenzgebiete wurde eine Contingent Valuation-Methode verwendet. Das Ergebnis ist eine Gesamtbelastung von **2,26 mEURO/kWh**. Zum

Vergleich wurden auch bereits vorhandene Reisekostenanalysen und CVM-Studien verwendet, um den Nutzentransfer abzubilden. Die Ergebnisse der CV-Analyse sind jedoch 3,6 mal höher als die Ergebnisse des Nutzentransfers basierend auf der Reisekostenanalyse.

#### 2.10.7.4 Bewertung des Beschäftigungseffektes

Investitionen in Wasserkraftwerke verursachen Beschäftigungseffekte, die als externe Nutzen betrachtet werden können. Für deren Quantifizierung und Monetarisierung gibt es keine anerkannte Methode. Hier wurde der Nutzen eines so

genannten lokalen und nationalen Beschäftigungszuwachses ermittelt, der sich auf **0,46 – 2,51 mEURO/kWh** bzw. **0,217 mEURO/kWh** für den Bau und Betrieb der Anlage beläuft.

#### 2.10.7.5 Bewertung von lokalen Einkommenseffekten

Die Bewertung von lokalen Einkommenseffekten durch Wasserkraftwerke ist sehr umstritten. Es gibt daher keine genauen Angaben.

| Schadenskategorie   | Schätzwerte (mEURO/kWh)   |                          |                   |                   |
|---|---------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
|   | Schäden (-)<br>Nutzen (+) | Konfidenz-<br>niveau (1) | Auswirkung<br>(2) | Zeitspanne<br>(3) |
| <b>Landwirtschaft</b>   | -0,0098 - 0,0110          | H                        | L                 | S                 |
| <b>Forstwirtschaft</b>  | -0,0001 - 0,0004          | H                        | L                 | S                 |
| <b>Wasserversorgung</b>   | -0,0034 - 0,0135          | H                        | L                 | S                 |
| <b>Fährenverkehr</b>  | +0,0046                   | H                        | L                 | S                 |
| <b>aggregierter Wert</b><br>neue CV, inkl. Freizeitaktivitäten,<br>Objekte des kulturellen/archäo-<br>logischen Interesses, terrestr. und<br>aquaristisches Ökosystem | -2,2561                   | M                        | L                 | S                 |
| <b>Gesundheit am Arbeitsplatz</b>   |                           |                          |                   |                   |
| <b>Montage</b>  |                           |                          |                   |                   |
| Todesfälle  | -0,00292                  | M                        | L                 | S                 |
| schwere Unfälle   | -0,0098                   | M                        | L                 | S                 |
| leichte Unfälle   | -0,0186                   | L                        | L                 | S                 |
| <b>Kraftwerksbetrieb</b>  |                           |                          |                   |                   |
| Todesfälle  | -0,000120                 | M                        | L                 | S                 |
| schwere Unfälle   | -0,0001757                | M                        | L                 | S                 |
| leichte Unfälle   | -0,0000516                | L                        | L                 | S                 |

|  |            |   |   |     |
|--|------------|---|---|-----|
| <b>Stromverteilung</b>                               |            |   |   |     |
| Todesfälle   | -0,000755  | M | L | S   |
| schwere Unfälle                                      | -0,0000216 | M | L | S   |
| leichte Unfälle                                      | -0,0000014 | L | L | S   |
| <b>ästhetische Beeinträchtigung - Stromleitungen</b> | NQ         |   | L | S   |
| <b>öffentliche Gesundheit</b>                        |            |   |   |     |
| Dammbrüche   | NQ         |   | R | L   |
| elektromagnetische Felder                            | NQ         |   | L | M/L |
| Quecksilberverseuchung - Fische                      | NQ         |   | L | M/L |
| Unfälle durch Stromleitungen                         | NQ         |   | L | S/L |
| Treibhausgasemissionen                               | NQ         |   | G | L   |
| <b>maritime Ökosysteme</b>                           |            |   |   |     |
| warme Abwässer                                       | NQ         |   | R | M/L |
| <b>ökologisches Gleichgewicht Wasser</b>             | NQ         |   | R | M   |

Tabelle 16: Schäden (-) und Nutzen (+) eines Wasserkraftwerkes in Sauda (Norwegen)

Anmerkungen: Aus Vereinfachungsgründen wurden nur die „besten“ Schätzwerte angegeben. Die Bandbreite dieser Werte kann zum Teil sehr groß sein. NQ = nicht quantifiziert im Rahmen dieses Projektes; IQ = Auswirkungen, die bereits quantifiziert, aber nicht monetarisiert wurden

(1)H = hoch, M = mittel, N = gering, „!“ = Konfidenzniveau ist signifikant geringer als für jeden anderen Schätzwert

(2)L = lokal (0-100 km), R = regional (100-1000 km), G = global (>1000 km)

(3)S = kurzfristig (unmittelbar), M = mittelfristig (1-100 Jahre), L = langfristig (100-100.000 Jahre)

Quelle: ExternE (1995), Vol. 6, S. xx-xxi

## 2.11 Die Kernenergie

### 2.11.1 Bewertungsmethode

Die Bewertung der Auswirkungen durch die Stromerzeugung aus Kernkraft erfolgt unter Anwendung des Wirkungspfad-Ansatzes („impact-pathway“-Ansatz). Die Emissionen von Radionukliden innerhalb der einzelnen Prozessstufen können folgendermaßen kategorisiert werden:

- Emissionen in die Atmosphäre
- Emissionen in Gewässer (Fluss, See, Meer)
- Ablagerungen im Boden

Für den normalen Betrieb der einzelnen Prozessstufen wird eine Verteilung von gleich bleibenden Emissionen über das ganze Jahr hinweg angenommen. Die gesamte Populationsdosis errechnet sich durch Aufsummierung der einzelnen Dosen für jedes Radionuklid. Dieser aufsummierte Wert wird für die Schätzung der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit verwendet.

Darüber hinaus werden folgende Schadenbereiche bewertet:

| Schadenskategorie           | Schätzwerte (mEURO/kWh) |           |            |              |           |            |
|-----------------------------|-------------------------|-----------|------------|--------------|-----------|------------|
|                             | Steinkohle              |           | Braunkohle | Erdöl/Erdgas |           | Erdgas     |
|                             | GB                      | D         | D          | D            | D         | UK         |
| allgemeine Gesundheit       | 4                       | 13        | 10         | 11           | 10        | 0,5        |
| Krankheiten am Arbeitsplatz | 0,107                   | 0,32      | NQ         | NQ           | NQ        | NQ         |
| Unfälle am Arbeitsplatz     | 0,8                     | 2,0       | 0,14       | 0,5          | 0,3       | 0,1        |
| Landwirtschaft              | 0,03                    | 0,02      | 0,02       | 0,04         | 0,02      | NQ         |
| Holz                        | 0,004                   | 0,009     | 0,004      | 0,013        | 0,009     | neg.       |
| terrestrisches Ökosystem    | NQ                      | NQ        | NQ         | NQ           | NQ        | NQ         |
| maritimes Ökosystem         | NQ                      | NQ        | NQ         | 0,2          | 0,2       | 0,001      |
| Fischerei                   | IQ                      | NQ        | NQ         | NQ           | NQ        | NQ         |
| Materialien                 | 0,8                     | 0,2       | 0,1        | 0,3          | 0,2       | 0,06       |
| Lärm                        | 0,2                     | NQ        | NQ         | NQ           | NQ        | 0,03       |
| andere Auswirkungen         | NQ                      | NQ        | NQ         | NQ           | NQ        | NQ         |
| <b>Sub-Total</b>            | <b>6</b>                | <b>16</b> | <b>10</b>  | <b>12</b>    | <b>11</b> | <b>0,7</b> |
| TOTAL                       | NQ                      | NQ        | NQ         | NQ           | NQ        | NQ         |

Abbildung 10: Darstellung des Schadensfunktionsansatzes bei Emission der Radionuklide in die Atmosphäre  
Quelle: ExternE (1995), Vol.5, S. 20

### 2.11.2 Einschätzung der Auswirkungen auf die Gesundheit

Im Kernkraftzyklus bilden gesundheitliche Auswirkungen den wichtigsten Endpunkt in der „impact-pathway“-Analyse. Die Gefahrenpotentiale sind durch die Freisetzung von radioaktiver Strahlung und durch nicht radioaktive Effekte (z.B. Unfälle) gegeben. Die Auswirkungen durch die Freisetzung von radioaktiver Strahlung wurden in vielen Studien bereits detailliert erforscht. In der ExternE-Studie wird für diesen Schadenbereich auf international anerkannte Basisdaten zurückgegriffen. Zur Ermittlung der Wirkungen werden die Dosis-Wirkungsbeziehungen der ICRP (International Commission on Radiological Protection) verwendet. Das Auftreten von Gesundheitsschäden infolge der Freisetzung von radioaktiver Strahlung wird durch bestimmte biologische Mechanismen gesteuert. Grundsätzlich unterscheidet man folgende zwei Kategorien von Gesundheitseffekten bei der Freisetzung radioaktiver Strahlung. Die erste Kategorie umfasst sog. „deterministische Effekte“, die bei der Freisetzung eines bestimmten radioaktiven Strahlungsniveaus auftreten, wobei das Ausmaß der negativen Auswirkungen mit wachsendem Expositionsniveau steigt. So genannte „stochastische Effekte“, die zur zweiten Kategorie gehören, kommen ausschließlich unterhalb von definierten Schwellenwerten vor. Ein Beispiel für einen stochastischen Effekt ist das Krankheitsbild einer Krebserkrankung. Hier beeinflusst das Niveau der radioaktiven Dosis die Wahrscheinlichkeit an Krebs zu erkranken<sup>26</sup>.

Nicht auf radioaktive Strahlung zurückzuführende Gesundheitsschäden werden mittels statistisch erfasster Daten über aufgetretene Todesfälle und Verletzungen quantifiziert. Diese Gesundheitsschäden werden auf Basis vorkommender Todesfälle, verlorener Arbeitstage (*Working-Days-Lost*) und dauernder Invalidität (*Permanent*

*Disability*) dokumentiert. Da jedoch für diesen Schadenbereich nicht immer repräsentatives Datenmaterial vorhanden war, wurde zur Erfassung der nicht radioaktiven Gesundheitsschäden auch auf Daten aus der chemischen Industrie zurückgegriffen<sup>27</sup>.

### 2.11.3 Einschätzung der Auswirkungen auf die Umwelt

Generell liegt die Priorität in der Erforschung der Auswirkungen von Kernenergiesystemen in der Untersuchung der Auswirkungen im Gesundheitsbereich. Darüber hinaus wurden in der Studie weitere mögliche Umwelteffekte identifiziert, die jedoch nicht als besonders wichtiger Teilbereich der Gesamtauswirkungen innerhalb der Prozesskette angesehen werden. Bei der menschlichen Bevölkerung werden die einzelnen Individuen als Indikatoren in Betracht gezogen. Als Indikator für Umweltschäden wird die Größe der Population der einzelnen Spezies berücksichtigt. Mögliche negative gesundheitliche Auswirkungen umfassen Todesfälle, entwicklungs- und verhaltensbedingte Veränderungen sowie genetische Veränderungen. Im Rahmen einer Gesamtbetrachtung der Population werden Veränderungen in der Populationsdichte, in der Erhöhung der Fruchtbarkeitsrate, in der Veränderung der Biomasse sowie Veränderungen in der Diversität der Spezies als Indikatoren verwendet.

Bei drastischen negativen Auswirkungen ist es jedoch nicht möglich, direkte Ursachen und Wirkungsbeziehungen infolge einer Kernkraftaktivität zu identifizieren.

Bei der Einschätzung der Auswirkungen auf die Umwelt werden zunehmend auch die Auswirkungen durch die Erhöhung des Strahlungsniveaus und einer Freisetzung von aufgeheiztem Kühlwasser untersucht.

## 2.11.4 Monetäre Bewertungsmethode<sup>28</sup>

Folgende Indikatoren zeigen Gesundheitsschäden an, die auf radioaktive Strahlung bzw. nicht radioaktive Strahlung zurückzuführen sind:

### Gesundheitsschäden bei ArbeitnehmerInnen

- radioaktive Strahlung  
akute Krebserkrankungen, nicht akute Krebserkrankungen, schwerwiegende Erbgutschäden, Erkrankungen und Todesfälle aufgrund von Unfällen
- nicht radioaktive Strahlung  
Todesfälle, Verletzungen bei Transportunfällen, verlorene Arbeitstage, dauernde Invalidität

### allgemeine Gesundheitsschäden

- radioaktive Strahlung  
akute Krebserkrankungen, nicht akute Krebserkrankungen, schwere Erbgutschäden, Erkrankungen und Todesfälle aufgrund Unfälle
- nicht radioaktive Strahlung  
Todesfälle, Verletzungen bei Unfällen

Jene Auswirkungen, die auf keine radioaktive Strahlung zurückzuführen sind, treten in einem Zeitraum von 30 Jahren auf. Die tatsächlich auf radioaktive Strahlung zurückzuführenden Auswirkungen werden mit einem Eintrittszeitraum von 100.000 Jahren geschätzt.

Durch den Einsatz von Diskontraten (0 %, 3 % und 10 %) verändert sich das Ergebnis und es kommt zu einem absteigenden Wert des Lebens aufgrund des mit einbezogenen Zeitfaktors.

### 2.11.4.1 Die Bewertung von Gesundheitsschäden durch nicht radioaktive Strahlung

Diese Bewertung erfolgt anhand der Methode der WTP (Zahlungsbereitschaft). Für die Einschätzung der Mortalität wird der sog. Wert eines statistischen Menschenlebens (VLS = Value of Statistical Life) in der Höhe von 2,6 MEURO angenommen. In der Fassung der ExternE-Studie (1998) wird dieser Wert mit **3,1 MEURO (Preisbasis 1995)** festgesetzt. Bei dieser Kennzahl geht es jedoch keinesfalls um den Wert eines menschlichen Lebens (dieser ist nicht monetarisierbar), sondern um die Zahlungsbereitschaft für die Verringerung des Risikos, einen tödlichen Unfall zu erleiden. Beispielsweise führt eine Zahlungsbereitschaft von 100 EURO, um das Risiko eines Todesfalls um 1/10.000 zu verringern, zu einem VLS von 100 EURO x 1000 = 1 MEURO.

In Frankreich gibt es zur Zeit noch keine genauen Daten über diese Zahlungsbereitschaft. Aus diesem Grund werden, um die WDL (verlorene Arbeitstage) und PD (dauernde Invalidität) infolge von Arbeitsunfällen berechnen zu können, die Kosten der nationalen Krankenversicherungsanstalt herangezogen. Es ist jedoch nicht eindeutig, ob diese Werte als externe Kosten verwendet werden können oder mit Werten einer Zahlungsbereitschaft vergleichbar sind.

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| 1 WDL .....                        | 65 EURO      |
| 1 PD .....                         | 19.000 EURO  |
| Verletzungen durch Verkehrsunfälle | .15.000 EURO |

### 2.11.4.2 Die Bewertung von Gesundheitsschäden aufgrund radioaktiver Strahlung

#### a) akute und nicht akute Krebserkrankungen

Anstelle einer stetigen Kurve wird für die Einschätzung des Auftretens von Krebs-

erkrankungen in der Bevölkerung innerhalb eines Zeitraumes von 30 Jahren nach einer freigesetzten radioaktiven Strahlung eine Treppenfunktion verwendet. Es wird dabei angenommen, dass die Freisetzungsrates in den Zeitblöcken konstant bleibt. Die Anzahl der Gesundheitsschäden innerhalb eines bestimmten Zeitraumes wird basierend auf der durchschnittlichen Dosisrate geschätzt. Es wird die Annahme getroffen, dass sich diese auf die Jahre gleichmäßig verteilt. In einem abschließenden Schritt wird die Gesamtzahl an Gesundheitsschäden für jedes Jahr geschätzt und mit der Diskontrate diskontiert.

- VLS einer akuten Krebserkrankung: 2,6 MEURO
- Vermeidung von nicht akuten Krebserkrankungen: Bewertung mittels WTP (jedoch noch nicht quantifiziert „NQ“)

In einer US-Studie (ORNL, 1993) werden die durchschnittlichen Kosten für jede Krebspatientin / jeden Krebspatienten über die direkten Kosten (Krankenhausaufenthalt, ÄrztInnen, Medikamente usw.) und indirekte Kosten (Einkommensverluste mit 6 % diskontiert) berechnet. In der ExternE-Studie wird hierfür ein adäquater Durchschnitt der Gesamtkosten dieser US-Studie als Wert für nicht akute Krebserkrankungen verwendet.

- Wert nicht akuter Krebserkrankungen: **0,25 MEURO** (\$ 298.000, US-\$ 2,1 für 1 EURO)

#### **b) schwerwiegende Erbgutschädigungen**

Diese Bewertung gestaltet sich sehr schwierig, da etwaige Schädigungen aufgrund radioaktiver Strahlung immer erst in der nächsten Generation auftreten.

- VLS bei Erbgutschäden in Form eines sofortigen Todes oder einer schweren Behinderung: 2,6 MEURO

Bei Mitberücksichtigung der Diskontrate für einen Zeitraum von zwölf Generationen (300 Jahre), in denen Schäden auftreten, ergeben sich folgende Werte:

- Diskontrate  $r = 3\%$  **VLS: 0,296 MEURO**  
(Faktor 0,114)
- Diskontrate  $r = 10\%$  **VLS: 0,039 MEURO**  
(Faktor 0,015)

#### **c) Supergau**

Die monetäre Bewertung der erwarteten Gesundheitsschäden aufgrund eines schwerwiegenden Atomunfalls erfolgt nach der allgemeinen Methodik (siehe oben). Für die Evaluierung von Ausnahmemaßnahmen wurde das ökonomische Computermodell „**COSYMA**“ verwendet.

#### 2.11.5 Referenztechnologien und -standorte

Als Referenzstandort wurde ein Kernkraftwerk in Frankreich gewählt, weil dort alle Stufen der Prozesskette für die Stromerzeugung durch Kernspaltung analytisch erfasst werden konnten. Der Uranabbau und dessen erste Bearbeitung (Herauslösen aus dem Trägergestein) erfolgt in Lodève in Südfrankreich. Der sog. Yellocake ( $U_3O_8$ ) muss dann in Uranhexafluorid umgewandelt werden. Dieser Vorgang erfolgt in Malvesi. Eine anschließende Anreicherung und Brennelementherstellung sowie die eigentliche Stromerzeugung erfolgt in Pierrelatte. Der niedrig- bis mittelgradig radioaktiv verunreinigte Müll wird in Soulanès (östlich von Paris) abgelagert. Die Wiederaufbereitung der abgebrannten Brennelemente erfolgt in La Hague am englischen Kanal. Die (fiktive) Endlagerung des hochgradig radioaktiven Mülls wird in Auriat durchgeführt.

Die Referenzstandorte werden bezüglich ihrer geographischen Lage sowie der vorherrschenden klimatischen, geographischen und geologischen

Bedingungen genau analysiert. Die daraus gewonnenen Daten dienen dann als Basis für die Quantifizierung und Monetarisierung der externen Effekte im Kernenergiezyklus.

#### 2.11.6 Prozesskette in der Stromerzeugung durch Kernkraft

- Gewinnung des Urans und Auslösen aus dem Trägergestein
- Umwandlung
- Anreicherung
- Erzeugung der Brennelemente
- Stromerzeugung
- Wiederaufbereitung
- Lagerung von niedrig- und mittelgradig radioaktivem Abfall
- Lagerung von hochgradig radioaktivem Abfall
- Transport

#### 2.11.7 Schadenbereiche im Normalbetrieb

Im Gegensatz zu fossilen Energiesystemen, bei denen die Schadstoffemissionen v.a. durch den Kraftwerksbetrieb verursacht werden, wird hier die Höhe der Gesamtemissionen wesentlich durch die Emissionen einiger vor- und nachgelagerter Prozessstufen bestimmt. Die Quantifizierung der externen Effekte und deren Monetarisierung erfolgt separat für jede Prozessstufe.

##### 1. Prozessstufe - Gewinnung des Urans und Auslösen aus dem Trägergestein

Die Schadenbereiche umfassen im öffentlichen Bereich *gasförmige Emissionen von Uran und Radon* (hier wird keine globale Verteilung angenommen, jedoch werden Schäden an lokalen landwirtschaftlichen Produkten berücksichtigt, die auch auf globaler Ebene konsumiert werden), *Inhalation, Freisetzung durch Wolken, Freisetzung in den Boden, Aufnahme von Uran nach der Ablagerung und Emissionen ins Wasser*. Im privaten Bereich

werden jene externen Effekte quantifiziert, die auf *radioaktive Strahlung* sowie auf *nicht radioaktive Strahlung* (Unfälle) zurückzuführen sind. Umweltschäden, die durch die Auflassung der Minen entstehen sind weitgehend internalisiert und belaufen sich auf ungefähr 120 Millionen Francs, rund 20 MEURO.

##### 2. Prozessstufe - Umwandlung

Auch hier beinhalten die öffentlichen Schadenbereiche *gasförmige Emissionen von Uran und Radon, Inhalation, Freisetzung durch Wolken, Freisetzung in den Boden, Aufnahme von Uran nach der Ablagerung und Emissionen ins Wasser*. Im privaten Bereich umfasst die Quantifizierung jene externen Effekte, die auf die radioaktive Strahlung und nicht radioaktive Strahlung (Unfälle) zurückzuführen sind.

##### 3. Prozessstufe - Anreicherung

siehe vorgelagerte Prozessstufen

##### 4. Prozessstufe - Brennelementherstellung

siehe vorgelagerte Prozessstufen

##### 5. Prozessstufe - Stromerzeugung

Die hier untersuchten Schadenbereiche sind mit den Schadenbereichen der vorgelagerten Prozessstufen identisch. Zusätzlich werden hier aber auch jene externen Effekte, die durch den Bau, Betrieb und die Auflassung der Kernkraftwerke entstehen, genauer analysiert und monetarisiert.

##### 6. Prozessstufe - Wiederaufbereitung

Die Einschätzung der physischen Auswirkungen umfasst jene Schadenbereiche, die in der Beschreibung der allgemeinen Bewertungsmethodik in der ExternE-Studie erläutert wurden.

##### 7. Prozessstufe - Lagerung von niedrig-, mittel- und hochgradig radioaktivem Abfall

Die Einschätzung der physischen Auswirkungen

umfasst im öffentlichen Bereich die lokalen, regionalen und globalen Belastungen sowie Gesundheitsschäden. Schädigungen der ArbeitnehmerInnen infolge einer radioaktiven bzw. nicht radioaktiven Strahlung konnten bisher nicht genau quantifiziert werden<sup>29</sup>. Für Schäden aufgrund einer Ablagerung von hochgradig radioaktivem Abfall wird für den öffentlichen Schadenbereich das Bewertungskonzept **PAGIS Granite Option Assessment** eingesetzt.

In der zugrunde liegenden Systematik von **PAGIS** werden zwei verschiedene Ansätze unterschieden, um die „Verhaltensweise“ einer Lagerstätte für hochgradig radioaktiven Atommüll zu analysieren. Für die Einschätzung der durchschnittlich zulässigen Emissionsdosis wird auf weiterentwickelte Modelle und ausgewählte Parameter zurückgegriffen. Grundsätzlich werden zuerst wichtige Parameter identifiziert und die eingesetzten Modelle in Abhängigkeit vom jeweiligen Referenzstandort abgestimmt. Um ein optimales standortspezifisches Ergebnis zu erhalten, wird für die lokal eingesetzten Parameter eine Abweichungsanalyse durchgeführt. Beim stochastischen Ansatz wird versucht den Variationsbereich der zuvor ermittelten Emissionsdosen abzuschätzen. Um etwaige Unsicherheiten in den Ergebnissen zu begrenzen, bedient sich PAGIS vereinfachten Modellen als Hilfsmittel (Dosis-Histogramm oder Dosis-Erwartungswert). In die Berechnungen mit einbezogen werden Parameter für die externe Strahlung, Inhalation von Radionukliden und die Aufnahme von radioaktiv verseuchter Nahrung.

Im PAGIS-Modell werden darüber hinaus zwei verschiedene Betrachtungsszenarien mit einbezogen. Das Normalentwicklungsszenario wird durch das Auftreten von geologischen und biologischen Veränderungen im Zeitablauf bedingt. Beispiele dafür sind die Korrosion der Abfallbehälter, der Transport von Radionukliden durch das ein-

ckernde Grundwasser, etwaige Temperaturveränderungen, die durch das aufgeheizte radioaktive Material verursacht werden. Die Parameter und Annahmen, die bei der Analysierung dieser Effekte verwendet werden, resultieren aus gegenwärtigen und vergangenen klimatischen und geologischen Trendanalysen. Im „*veränderten Entwicklungsszenario*“ werden Bohr- und Minenarbeiten in unmittelbarer Umgebung der Lagerstätten berücksichtigt. Solche Aktivitäten können hydrogeologische Störungen verursachen, die möglicherweise eine radioaktive Strahlung herbeiführen.

### 8. Prozessstufe - Transport

Die Studie umfasst die Einschätzung der externen Effekte durch den Transport von radioaktivem Material zwischen den einzelnen Referenzstandorten mittels Bahn und auf der Straße, ohne dabei Importe und Exporte von radioaktivem Material zu berücksichtigen. Die Sicherheitsmaßnahmen beim Transport von radioaktivem Material konzentrieren sich hauptsächlich auf die Art der Verpackung der zu transportierenden Materialien. Die internationale Atomenergiebehörde hat für diesen Bereich Sicherheitsanforderungen an die Transportdurchführung formuliert. Zur Einschätzung einer möglicherweise freigesetzten Strahlung während eines unfallfreien bzw. unfallbehafteten Transportes wird das so genannte INTERTRAN-Computermodell<sup>30</sup> eingesetzt, das 1983 von der IAEA (International Atomic Energy Agency) entwickelt wurde. Das Modell enthält zwei Module für die Kalkulation der kollektiven Strahlungs-dosis auf ArbeiterInnen und auf die Öffentlichkeit. Die erste Komponente beinhaltet die Bevölkerungsverteilung für drei Modellzonen (ländliches Gebiet, Kleinstadt, Großstadt). Die zweite Modellkomponente besteht aus Verkehrsbeispielen in allen drei Bevölkerungszonen und aus einem Lieferbereich, in dem der Transportmodus und die Verpackungsart bestimmt werden. In diesem Computermodell erfolgt auch die Einschätzung der

Transportindizes, des Transportumfanges je Lieferung sowie die Einschätzung der Anzahl der Lieferungen und der zurückgelegten Strecke.

Die externen Kosten beim Transport von radioaktivem Material sind im Vergleich zu den Kosten in der übrigen Prozesskette relativ gering und betragen **0,000035 mEURO/kWh**. Dieser niedrige Wert wird damit begründet, dass hochgradig verstrahltes Material nur über kurze Strecken transportiert wird, und mögliche externe Effekte somit niedrig gehalten werden.

#### 2.11.8 Die Bewertung eines schwerwiegenden Reaktorunfalles bzw. Transportunfalles mit dem Computer-Modell COSYMA

Sehr schwierig gestaltete sich in der ExternE-Studie die Einschätzung der Konsequenzen eines schweren Reaktorunfalles in der Stromerzeugung bzw. eines schweren Unfalles während des Transportes von radioaktivem Material. Zur Zeit existiert noch kein Konsens über eine einheitliche Methode zur Bewertung der externen Effekte eines Reaktorunfalles. In der ExternE-Studie wird ein **Risikoansatz** verwendet bei dem vier Szenarien unterschieden werden:

- *Szenario 1* beschreibt die Auswirkungen eines totalen Bruchs des Reaktors (Kernschmelzunfall), der die größte Gefahrenquelle für das Freiwerden von radioaktiver Strahlung darstellt.
- *Szenario 2* zeigt die Auswirkungen nach einem Kernschmelzunfall, wobei hier davon ausgegangen wird, dass alle Sicherheitsmaßnahmen planmäßig funktionieren und nur eine kleine Lücke im intakten Schutzmantel des Reaktors entstanden ist.
- *Szenario 3 und 4* beschreiben jene Auswirkungen, die aufgrund ihrer Wirkungen in die der erstgenannten Szenarien eingereiht werden können, um so die Genauigkeit der Ergebnisse

besser illustrieren zu können.

Den Schadenskosten liegt der **Erwartungswert** des Risikos (Eintrittshäufigkeit/-wahrscheinlichkeit x Schaden) zugrunde. Nicht berücksichtigt wird dabei eine mögliche Risikoaversion. Dies bedeutet, dass die Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung sehr hoher Schäden größer ist als zur Vermeidung eines geringeren Schadens, auch wenn das Risiko in beiden Fällen gleich ist.

Um die Folgen durch einen schweren Unfall abschätzen zu können, muss die Eintrittshäufigkeit des Unfalls sowie die Menge der jeweils freigesetzten radioaktiven Stoffe bekannt sein. Mittels probabilistischer Risikoanalysen wird versucht, zu Aussagen über die Eintrittshäufigkeit verschiedener Unfallkategorien und der jeweiligen Freisetzung zu kommen. Die Verwendung probabilistischer Sicherheitsanalysen setzt voraus, dass man einerseits möglichen Ereignissen Eintrittswahrscheinlichkeiten zuordnen kann und andererseits eine Quantifizierung möglicher Schäden durchgeführt werden kann. In der Verfügbarkeit von „verlässlichen“ Wahrscheinlichkeitsaussagen und in den qualitativen Aspekten von Schäden wird die Problematik in der Anwendung dieser Methode aufgezeigt. Die durch einen großen Unfall verursachten Schäden werden mit Hilfe des Programmsystems COSYMA berechnet.

COSYMA ist ein Programm zur Unfallfolgenabschätzung und wurde im Auftrag der Europäischen Kommission vom *National Radiological Protection Board (NRPB)* in England und vom *Kernforschungszentrum Karlsruhe* entwickelt. Aufgrund der Ungewissheit über den Zeitpunkt eines Unfalls und die meteorologischen Bedingungen während eines Unfalls werden Berechnungen für zahlreiche unterschiedliche Wettersequenzen durchgeführt, deren Ergebnisse statistisch ausgewertet werden. Mit Hilfe von COSYMA werden auf Basis der Daten

zur Freisetzung von Radionukliden Ausbreitungsrechnungen durchgeführt. Die resultierende Dosis wird unter Berücksichtigung der Expositionspfade, externen Exposition, Inhalation und Ingestion auf Basis der ermittelten Konzentrationen und Depositionen ermittelt. Mit COSYMA können Gegenmaßnahmen wie Evakuierung oder Umsiedelung der Bevölkerung simuliert werden, durch die die Bewohner nach einem schweren Unfall geschützt werden sollen. Die Vorgehensweise bei der dabei zugrunde liegenden Schadensabschätzung ist in der folgenden Abbildung 11 schematisch dargestellt.

Das COSYMA-Modell umfasst folgende Anwendungsgebiete:

- die Einschätzung der Konsequenzen einer radioaktiven Strahlungsfreisetzung in die Atmosphäre
- die genaue Analyse der verschiedenen Einschätzungen der Auswirkungen eines Reaktorunfalles, um ein besseres Verständnis für die Folgewirkungen zu erreichen

- Optimierung von Gegenmaßnahmen (Strategien)
- Evaluierung von Verbesserungsmaßnahmen in der Technologie von Kernkraftwerken
- Auswahl von geeigneten Standorten für Nukleareinrichtungen
- Durchführung von Unsicherheits- und Sensibilitätsanalysen
- Vergleiche der sog. „ACA“-Kodes (Accident Consequence Assessment) durchführen

Das Programm besteht aus drei Teilsystemen zur Abschätzung der

- kurzfristigen Strahlungsdosen und ersten Auswirkungen in Kraftwerksnähe (NE - Near Early)
- langfristigen Strahlungsdosen und späteren Auswirkungen in Kraftwerksnähe (NL - Near Late)
- langfristigen Strahlungsdosen und Effekten in der weiteren Kraftwerksumgebung (FL - Far Late)

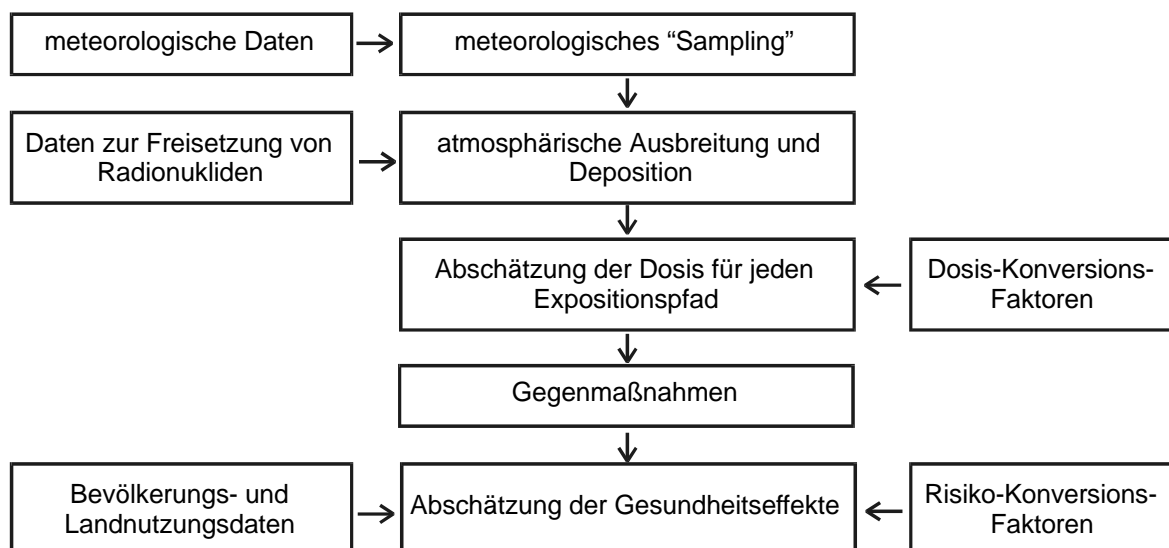


Abbildung 11: Vorgehensweise bei der Unfallfolgenabschätzung (Modell COSYMA)

Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen“, S. 178 (Abbildung 4.3)

| <b>SCHADENSKOSTEN</b>   |            |                      |
|---|------------|----------------------|
| Evakuierung/Umsiedelung: Transportkosten (privat und öffentlich) für                    |            |                      |
| * Evakuierung   | 5          | EURO/cap             |
| * Umsiedelung   | 25         | EURO/cap             |
| Unterkunftskosten für   |            |                      |
| * Evakuierung   | 15         | EURO/cap.da          |
| * Umsiedelung   | 1.150      | y<br>EURO/cap.yr     |
| Einkommensverluste  | 15.150     | EURO/cap.yr          |
| Kosten für Vermögensverluste  |            |                      |
| * keine Wiederansiedelung   | 8.650      | EURO/cap             |
| * Haushalt  | 40.650     | EURO/cap             |
| * Land  | 10.000.000 | EURO/km <sup>2</sup> |
| * langfristiger Konsum  | 17.500     | EURO/cap             |
| Wiederherstellungszeit  | 2          | yr                   |
| Zinszeit  | 5          | %                    |
| Diskontrate   | 7          | %                    |
| Wertminderungsrate  |            |                      |
| * keine Wiederansiedelung   | 16         | %                    |
| * Haushalt  | 2          | %                    |
| * langfristiger Konsum  | 16         | %                    |
| Dekontamination:  |            |                      |
| 1. Kosten für Dekontamination Lebensmittelverzicht                                      | 3.600.000  | EURO/km <sup>2</sup> |
| 2. Kosten und Verluste in der landwirtschaftlichen Produktion<br>(Ernteoutput/GDP-Wert) |            |                      |
| * Getreide  | 0,17/0,09  | EURO/kg.yr           |
| * Viehbestand   | 1,32/0,71  | EURO/kg.yr           |
| * Milch   | 0,33/0,18  | EURO/kg.yr           |
| Kosten (Nichteinwohner/Einwohner) für   |            |                      |
| * Getreide  | 0,16/0,23  | EURO/kg              |
| * Viehbestand   | 1,25/1,81  | EURO/kg              |
| * Milch   | 0,31/0,45  | EURO/kg              |
| Entsorgungskosten   |            |                      |
| * Getreide  | 0          | EURO/kg              |
| * Viehbestand   | 0          | EURO/kg              |
| * Milch   | 0,03       | EURO/kg              |

Tabelle 17 (Seite 67): Die Tabelle beinhaltet die ökonomische Bewertung der Sofortmaßnahmen im Fall eines Reaktorunfalls. Quelle: ExternE (1995), Vol. 5, S. 70

Die Endpunkte bei einer Analyse mittels COSYMA umfassen gesundheitliche Schäden und Umweltschäden, Auswirkungen der Gegenmaßnahmen, die monetäre Bewertung der Sofortmaßnahmen und der Gesundheitsschäden.

Die sofort auftretenden Gesundheitsauswirkungen eines schweren Unfalls im Reaktorbetrieb bzw. beim Transport von radioaktivem Material betreffen Todesfälle durch Verstrahlung des Knochenmarks, der Lunge, des Magen-Darm-Traktes, der Haut sowie den Tod von Ungeborenen. Weiters umfassen die Modell-Endpunkte Krankheiten aufgrund einer Verstrahlung der Lunge, Augen, Schilddrüse und von Ungeborenen.

Die Spätfolgen umfassen akute bzw. nicht akute Krebserkrankungen (Leukämie, Brust-, Schilddrüsen-, Lungen-, Knochen-, Magen- und Darm- sowie Hautkrebs). Die Auswirkungen der Spätfolgen sind bis zu 200 Jahre nach einem Unfall spürbar.

| in<br>mEURO/kWh<br>DR=0 %                | kurzfristig     |          |          | mittelfristig   |                 |                 | langfristig     |                 |                 | Sub-Total       |
|--|-----------------|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | lokal           | regional | global   | lokal           | regional        | global          | lokal           | regional        | global          |                 |
| Abbau +<br>Auslösen aus<br>Trägergestein | 1,48E-02        | 0        | 0        | 3,23E-02        | 1,69E-02        | 1,92E-05        | 3,15E-04        | 1,82E-04        | 0               | <b>6,45E-02</b> |
| Umwandlung                               | 6,25E-04        | 0        | 0        | 3,43E-04        | 3,20E-07        | 1,77E-07        | 4,17E-06        | 1,54E-06        | 0               | <b>9,47E-04</b> |
| Anreicherung                             | 1,18E-03        | 0        | 0        | 1,46E-06        | 1,00E-07        | 7,25E-08        | 3,91E-06        | 6,94E-07        | 0               | <b>1,19E-03</b> |
| Brennele-<br>menterz.                    | 8,19E-04        | 0        | 0        | 1,07E-03        | 1,63E-06        | 9,64E-10        | 6,22E-08        | 1,09E-08        | 0               | <b>1,89E-03</b> |
| Stromer-<br>zeugung                      |                 |          |          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| PWR 900                                  |                 |          |          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| Konstruktion                             | 3,37E-02        | 0        | 0        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>3,37E-02</b> |
| Betrieb                                  | 1,31E-02        | 0        | 0        | 5,28E-02        | 3,19E-03        | 2,77E-02        | 1,23E-08        | 2,25E-09        | 3,19E-01        | <b>4,16E-01</b> |
| Abriss                                   | 0               | 0        | 0        | 1,70E-02        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>1,70E-02</b> |
| Wiederauf-<br>bereitung                  | 2,96E-03        | 0        | 0        | 2,98E-04        | 9,63E-03        | 1,60E-01        | 3,45E-06        | 1,67E-03        | 1,74E+00        | <b>1,92E+00</b> |
| LLW <sup>30</sup><br>Ablagerung          |                 | 0        | 0        | 1,50E-05        | 0               | 1,24E-04        | 2,36E-06        | 0               | 4,66E-03        | <b>4,80E-03</b> |
| HLW <sup>31</sup> Ablagerung             |                 | 0        | 0        | 8,98E-08        | 0               | 0               | 2,54E-02        | 0               | 0               | <b>2,54E-02</b> |
| Transport                                | 3,55E-04        | 0        | 0        | 4,24E-04        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>7,79E-04</b> |
| Sub-Total                                | <b>6,75E-02</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>1,04E-01</b> | <b>2,97E-02</b> | <b>1,88E-01</b> | <b>2,57E-02</b> | <b>1,86E-03</b> | <b>2,06E+00</b> | <b>2,48E+00</b> |

Tabelle 18: Die monetäre Bewertung der physischen Schäden bei Normalbetrieb im Kernkraftwerk in mEURO/kWh bei einer Diskontrate von null Prozent

| in mEURO/kWh<br>DR = 3 %                 | kurzfristig     |          |          | mittelfristig   |                 |                 | langfristig     |                 |                 | Sub-Total       |
|--|-----------------|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | lokal           | regional | global   | lokal           | regional        | global          | lokal           | regional        | global          |                 |
| Abbau +<br>Auslösen aus<br>Trägergestein | 9,94E-03        | 0        | 0        | 5,58E-03        | 2,09E-03        | 3,34E-06        | 7,52E-12        | 4,41E-12        | 0               | <b>1,84E-02</b> |
| Umwandlung                               | 4,18E-04        | 0        | 0        | 5,97E-06        | 5,26E-08        | 2,78E-08        | 1,01E-15        | 3,74E-18        | 0               | <b>4,78E-04</b> |
| Anreicherung                             | 7,90E-04        | 0        | 0        | 2,54E-07        | 1,65E-08        | 1,25E-08        | 9,23E-18        | 1,68E-18        | 0               | <b>7,90E-04</b> |
| Brennelementerz                          | 5,48E-04        | 0        | 0        | 1,86E-04        | 2,81E-07        | 1,51E-10        | 1,50E-19        | 2,65E-20        | 0               | <b>7,35E-04</b> |
| Stromerzeugung                           |                 |          |          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| PWR 900                                  |                 |          |          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| Konstruktion                             | 3,37E-02        | 0        | 0        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>3,37E-02</b> |
| Betrieb                                  | 8,76E-03        | 0        | 0        | 9,20E-03        | 3,70E-04        | 1,84E-03        | 2,28E-10        | 4,18E-11        | 1,02E-04        | <b>2,03E-02</b> |
| Abriss                                   | 0               | 0        | 0        | 5,96E-03        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>5,96E-03</b> |
| Wiederauf-<br>bereitung                  | 1,98E-03        | 0        | 0        | 5,10E-05        | 1,28E-03        | 1,06E-02        | 6,42E-08        | 2,29E-06        | 5,53E-04        | <b>1,45E-02</b> |
| LLW Ablagerung                           |                 | 0        | 0        | 2,61E-06        | 0               | 5,76E-06        | 1,04E-13        | 0               | 1,50E-07        | <b>8,52E-06</b> |
| HLW Ablagerung                           |                 | 0        | 0        | 6,41E-09        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>6,41E-09</b> |
| Transport                                | 2,38E-04        | 0        | 0        | 7,32E-05        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>3,11E-04</b> |
| Sub-Total                                | <b>5,64E-02</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>2,11E-02</b> | <b>4,55E-03</b> | <b>1,25E-02</b> | <b>6,44E-08</b> | <b>2,29E-06</b> | <b>6,55E-04</b> | <b>9,52E-02</b> |

Tabelle 19: Die monetäre Bewertung der physischen Schäden bei Normalbetrieb im Kernkraftwerk in mEURO/kWh bei einer Diskontrate von 3 Prozent

| in mEURO/kWh<br>DR = 10 %                | kurzfristig     |          |          | mittelfristig   |                 |                 | langfristig     |                 |                 | Sub-Total       |
|--|-----------------|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | lokal           | regional | global   | lokal           | regional        | global          | lokal           | regional        | global          |                 |
| Abbau +<br>Auslösen aus<br>Trägergestein | 5,20E-03        | 0        | 0        | 7,00E-04        | 3,63E-04        | 4,19E-07        | 8,48E-13        | 4,97E-13        | 0               | <b>6,26E-03</b> |
| Umwandlung                               | 2,19E-04        | 0        | 0        | 7,48E-06        | 6,28E-09        | 3,14E-09        | 1,13E-16        | 4,21E-19        | 0               | <b>2,26E-04</b> |
| Anreicherung                             | 4,13E-04        | 0        | 0        | 3,18E-08        | 1,97E-09        | 1,56E-09        | 1,04E-18        | 1,89E-19        | 0               | <b>4,13E-04</b> |
| Brennelementerz                          | 2,87E-04        | 0        | 0        | 2,33E-05        | 3,55E-08        | 1,71E-11        | 1,69E-20        | 2,98E-21        | 0               | <b>3,10E-04</b> |
| Stromerzeugung                           |                 |          |          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| PWR 900                                  |                 |          |          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| Konstruktion                             | 3,37E-02        | 0        | 0        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>3,37E-02</b> |
| Betrieb                                  | 4,58E-03        | 0        | 0        | 1,15E-03        | 2,67E-05        | 1,18E-04        | 2,57E-11        | 4,71E-12        | 1,15E-05        | <b>5,89E-03</b> |
| Abriss                                   | 0               | 0        | 0        | 7,94E-04        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>7,93E-04</b> |
| Wiederauf-<br>bereitung                  | 1,04E-03        | 0        | 0        | 6,29E-06        | 1,17E-04        | 6,79E-04        | 7,24E-09        | 2,58E-07        | 6,23E-05        | <b>1,90E-03</b> |
| LLW Ablagerung                           |                 | 0        | 0        | 3,26E-07        | 0               | 8,44E-08        | 1,53E-15        | 0               | 2,19E-09        | <b>4,13E-07</b> |
| HLW Ablagerung                           |                 | 0        | 0        | 1,12E-10        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>1,12E-10</b> |
| Transport                                | 1,31E-04        | 0        | 0        | 9,18E-06        | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | <b>1,40E-04</b> |
| Sub-Total                                | <b>4,56E-02</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>2,69E-03</b> | <b>5,07E-04</b> | <b>7,97E-04</b> | <b>7,26E-09</b> | <b>2,58E-07</b> | <b>7,38E-05</b> | <b>4,97E-02</b> |

Tabelle 20: Die monetäre Bewertung der physischen Schäden bei Normalbetrieb im Kernkraftwerk in mEURO/kWh bei einer Diskontrate von 10 Prozent

Die folgende Tabelle zeigt die ökonomische Bewertung der Sofortmaßnahmen im Fall eines Reaktorunfalls<sup>33</sup>:

| Ursache    | Gesamte Gesundheitskosten [MEURO] | Gesamtkosten durch Konsumverbot von Nahrungsmitteln [MEURO] | Gesamtkosten: Evakuierung und Umsiedelung [MEURO] | Gesamtkosten [MEURO] |
|------------|-----------------------------------|---|---|----------------------|
| ST 2       |                                   |   |   |                      |
| ▪ lokal    | 11.044,1                          | 824,0   | 1.515,2   |                      |
| ▪ regional | 43.059,0                          | 26.809,6  | -   |                      |
| ▪ gesamt   |                                   |   |   | 83.252               |
| ST 21      |                                   |   |   |                      |
| ▪ lokal    | 1.525,2                           | 330,7   | 98,1  |                      |
| ▪ regional | 9.318,6                           | 5.820,0   | -   |                      |
| ▪ gesamt   |                                   |   |   | 17.093               |
| ST 22      |                                   |   |   |                      |
| ▪ lokal    | 237,5                             | 86,0  | 13,5  |                      |
| ▪ regional | 2.023,7                           | 978,0   | -   |                      |
| ▪ gesamt   |                                   |   |   | 3.339                |
| ST 23      |                                   |   |   |                      |
| ▪ lokal    | 39,6                              | 13,7  | 10,9  |                      |
| ▪ regional | 303,2                             | 63,6  | -   |                      |
| ▪ gesamt   |                                   |   |   | 431                  |

Tabelle 21: Die monetäre Bewertung der vier möglichen Schadensszenarien eines schweren Reaktorunfalls in MEURO

| Ursache | Wahrscheinlichkeit einer Kernschmelzung (reactor.year <sup>-1</sup> ) | Conditional Probability | Gesamtkosten (MEURO) | Kosten* Wahrscheinlichkeit (MEURO) | mEURO per kWh* |
|---------|---|-------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------|
| ST 2    | 5 E-05  | 0,19                    | 83 252               | 0,790                              | 0,104          |
| ST 21   | 5 E-05  | 0,19                    | 17 093               | 0,162                              | 0,021          |
| ST 22   | 5 E-05  | 0,19                    | 3 339                | 0,032                              | 0,0042         |
| ST 23   | 5 E-05  | 0,81                    | 431                  | 0,017                              | 0,0023         |

Tabelle 22: Ergebnisse der Unfallanalyse für vier verschiedene Szenarien inklusive der öffentlichen Gesundheitsschäden und der Kosten für Gegenmaßnahmen

\* 7,6 TWh/reactor.year als Quelle für einen 1200 MW<sub>e</sub> Reaktor

### 2.11.9 Übersicht über weitere Studien zur Quantifizierung der externen Kosten im Kernenergiebereich

In der nachfolgenden Tabelle sind die ermittelten Schätzwerte für die externen Kosten des Kernkraftzyklus im Rahmen der ExternE-Studie sowie weiterer Studien aus Europa und den USA ausgewiesen. Ein direkter Zahlenvergleich ist jedoch aufgrund unterschiedlicher Systemabgrenzungen und abweichender Methoden in der Schadeneinschätzung nicht möglich. Die relativ große Bandbreite bei den ermittelten Schätzwerten ist vor allem auf folgende Unterschiede zurückzuführen:

- In den einzelnen Studien wird zur Quantifizierung und Monetarisierung der Schadenwerte eine unterschiedliche Anzahl von betrachteten Prozessstufen mit einbezogen.
- Die Methodik zur Evaluierung der Gesundheitskosten durch externe Effekte im Kernkraftzyklus erfolgt in den einzelnen Studien oft auf sehr unterschiedliche Art und Weise.
- Verwendung unterschiedlicher Diskontraten bei der Schadensbewertung
- Darüber hinaus wird nicht in allen oben ausgewiesenen Studien die Einschätzung der globalen physischen Wirkungen durch externe Effekte im Kernkraftbereich berücksichtigt und außerdem existiert nicht in allen Studien eine Methodik für die Einschätzung von schweren Kraftwerksunfällen.

|                        | Gesamtkosten [mEURO/kWh] | Kosten ohne Berücksichtigung von Unfällen [mEURO/kWh] |
|------------------------|--------------------------|---|
| CEPN (DR=0 %)          | 2,5 – 2,6                | 2,5   |
| (DR=3 %)               | nicht vollständig        | 0,1   |
| (DR=10 %)              | nicht vollständig        | 0,05  |
| ORNL 1993 Ø-Wert SE-KW | 0,3                      | 0,2   |
| Ø-Wert SW-KW           | 0,2                      | 0,2   |
| Pearce et al 1992      | 0,8 – 1,8                | 0,5 – 1,2   |
| Friedrich & Voss 1993  | 0,1 – 0,7                | 0,1 – 0,4   |
| Pace 1990              | 29,1                     | 6,1   |
| Hohmeyer 1991          | 14,6 – 88,2              | nicht durchgeführt                                    |
| Hohmeyer 1988          | 5,0 – 50,4               | nicht durchgeführt                                    |

Tabelle 23: Vergleich von externen Kosteneinschätzungen in verschiedenen Studien

Quelle: ExternE (1995), Vol. 5, S. 311

Das **Oak Ridge National Laboratory (ORNL, 1993)** verwendet im Wesentlichen den gleichen methodischen Ansatz zur Quantifizierung und Monetarisierung externer Effekte im Kernenergiebereich wie er auch im Rahmen der ExternE-Studie der Europäischen Kommission verwendet wird, die vom CEPN (Centre d'étude sur l'évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire) durchgeführt wurde. Unterschiede sind hier im Wesentlichen auf eine unterschiedliche Definition der Kernenergie-Prozesskette sowie der Systemgrenzen zurückzuführen. Keine Berücksichtigung findet in dieser US-Studie im Rahmen der Analyse der zugrunde liegenden Prozesskette die Stufe der Wiederaufbereitung - diese Stufe „existiert“ in den USA nicht. Außerdem werden die Prozessstufen Gesteinsumwandlung, Anreicherung und Produktion der Brennelemente nicht mit vorrangiger Priorität behandelt. In der EU-Studie werden ergänzend zur lokalen Betrachtungsweise die Systemgrenzen zur Einschätzung der externen Effekte im Kernkraftzyklus auf eine regionale und globale Ebene ausgeweitet, um Vergleiche mit den anderen untersuchten Prozessketten in der ExternE-Studie zu ermöglichen. Weitere Abweichungen zwischen diesen Studien ergeben sich in unterschiedlich definierten Referenztechnologien und -standorten. Die Methodik zur Einschätzung eines schweren Kernkraftwerkunfalles ist in beiden Studien dieselbe.

In der Studie von **Pearce (1992)** werden die Auswirkungen eines schweren Reaktorunfalles auf die Schadenbereiche Mortalität, Morbidität, sonstige Gesundheitsschäden und Treibhausgasemissionen untersucht. Gleichzeitig erfolgt hier jedoch unter der Annahme der sehr kleinen Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Reaktorunfalles (die Wahrscheinlichkeit hierfür wird mit  $10^{-6}$  geschätzt) eine Vernachlässigung der sonstigen Gesundheitsschäden infolge eines schweren Reaktorunfalles.

Der statistische Wert eines Lebens (VSL) wird in der Pearce-Studie auf 1,4 - 2,4 MEURO geschätzt (in der ExternE-Studie beträgt der VSL-Wert 2,6 MEURO bzw. seit 1998 rund 3,1 MEURO auf der Preisbasis 1995). In der Pearce-Studie wird jedoch im Gegensatz zur ExternE-Studie zumindest versucht, die Risikoaversion für die Berücksichtigung der externen Risikokosten bei Kernkraftwerken in die Schätzwerte mit einzubeziehen.

**Friedrich und Voss (1993)** schätzen die externen Kosten für Kernkraftwerke ausschließlich für den Normalbetrieb, während die Schätzwerte für einen potentiellen Reaktorunfall auf den Ergebnissen einer Studie der US-Nuclear-Regulatory-Commission basieren. Für den statistischen Wert des Lebens wird ein Betrag von rund 2,9 Mio. US-\$ festgelegt.

Die **PACE-Studie (1990)** berücksichtigt externe Effekte im Kraftwerks-Normalbetrieb, schwere Unfälle im Reaktorbereich und externe Effekte bzw. Kosten einer Auflassung des Kraftwerkes sowie einer Endlagerung des radioaktiven Abfalls. In der PACE-Studie wird der Verlust eines Menschenlebens mit 4 Mio. US-\$ bewertet. Die Kosten für externe Effekte im Normalbetrieb werden im Vergleich zur ExternE-Studie sowie bei einer Mitberücksichtigung der globalen Schäden aufgrund einer freigesetzten Strahlungsdosis rund viermal höher eingestuft. Dies lässt sich hauptsächlich darauf zurückführen, dass in der PACE-Studie die Kosten für jene Gesundheitsschäden, die im Normalbetrieb des Kraftwerkes entstehen, um das Sechsfache höher geschätzt werden, als es in der ExternE-Studie der Fall ist.

Die Gesamtkosten für eine Demontage des Kraftwerkes werden in der PACE-Studie teilweise überbewertet und belaufen sich auf US-\$ 5 Mio./kWh (Annahme: Wert in US-\$). In der europäischen Studie werden hingegen nur 0,017

mEURO/kWh für die Auflfassung eines Kernkraftwerkes berechnet, wobei hier die Gesundheitsschäden aus dem Normalbetrieb und die Strahlungsdosiswirkungen auf die Bevölkerung beim Transport von radioaktivem Material mit berücksichtigt werden. Dieser Schadenswert enthält aber nicht die Gesamtkosten einer Kraftwerksdemontage, da diese - so die getroffene Annahme - internalisiert werden. Die Wahrscheinlichkeit für die Freisetzung von radioaktiver Strahlung infolge eines Unfalles wird in der PACE-Studie um das Achtfache höher eingeschätzt als die diesbezüglich größte Wahrscheinlichkeit in der CEPN-Studie ausmacht.

Die Unfallkosten in der PACE-Studie basieren auf den Daten des Super-GAUs von Tschernobyl (1986), wobei hier keine Unterschiede im jeweiligen Technologiestandard berücksichtigt werden. Außerdem wird im Vergleich zur UNSCEAR-Studie (1988) in der PACE-Studie die internationale radioaktive Strahlungsdosis auf die Bevölkerung infolge eines Super-GAUs rund viermal höher angenommen. Insgesamt werden die Gesamtkosten eines möglichen schweren Unfalls in der PACE-Studie um das Siebenfache höher eingeschätzt als es in der CEPN-Studie erfolgt. Während die PACE-Studie diese Gesamtkosten mit rund 23 mEURO/kWh/Reaktor/Jahr quantifiziert, wird in der ExternE-Studie der Schätzwert mit 0,14 mEURO/kWh/Reaktor/Jahr ausgewiesen. Abschließend muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass im IRP-Report (1994) sämtliche Schätzwerte der PACE-Studie als überhöht beurteilt wurden.

**Hohmeyer (1988 und 1991)** berücksichtigt in der Schätzung der externen Kosten des Kernkraftzyklus für den Schadenbereich Gesundheitsschäden nur die Schäden durch die freigesetzte Strahlung infolge von Unfällen, wobei hier im Wesentlichen auf die Basisdaten der PACE-Studie zurückgegriffen wurde. Primäres Ziel dieser Studie

war die Errechnung der externen Gesundheitskosten infolge der Freisetzung radioaktiver Strahlung durch Unfälle für Deutschland. So wird beispielsweise das Auftreten von Krebserkrankungen durch radioaktive Strahlung mit 750.000 DM bewertet.

Hohmeyer weist eher konservative Schätzwerte aus, basierend auf aus heutiger Sicht simplen Berechnungen der externen Kosten für jede untersuchte Prozessstufe. Im Jahr 1991 veröffentlichte Hohmeyer eine überarbeitete Studie über die Einschätzung der externen Kosten durch einen schweren Reaktorunfall, wobei jedoch auch in dieser Publikation die Hauptgründe für die Erhöhung der Schätzwerte auf 15 - 88 mEURO/kWh nicht angeführt waren.

#### 2.11.10 Forschungsbedarf im Bereich der Kernenergie des ExternE-Projektes<sup>34</sup>

Für eine Präzisierung der Schätzwerte in der ExternE-Studie besteht ein zukünftiger Forschungsbedarf im Speziellen in der Ausarbeitung einer verbesserten Methode zur Einschätzung der vorhandenen Unsicherheiten in den Ergebnissen, in der Quantifizierung der verursachten externen Kosten, in der Unfallfolgenabschätzung schwerer Unfälle, in der Ermittlung gültiger individueller Strahlungsdosen, denen bei einem schweren Kernkraftunfall ein Großteil der Bevölkerung ausgesetzt ist, sowie in der Entwicklung von brauchbaren Methoden zur richtigen Schätzung der Auswirkungen durch große Zeit- und Raumdifferenzen.

So erfolgt beispielsweise die Bewertung der Unsicherheiten aufgrund mancher Informationsmängel zur Zeit primär auf qualitativer Basis und nicht auf quantitativer Ebene, wobei jedoch durch die Weiterentwicklung der in der ExternE-Studie verwendeten Modelle zur Schadenabschätzung

infolge der externen Effekte im Kernkraftzyklus in verstärktem Ausmaß quantitative Einschätzungen der zugrunde liegenden Unsicherheiten zur Verfügung stehen würden.

Ein weiterer Forschungsbedarf besteht in der Bestimmung der externen Kosten der physischen Schadensbereiche. So können z.B. öffentliche Gesundheitsschäden eindeutig als externe Kosten der Kernkraftprozesskette identifiziert werden. Demgegenüber stehen jedoch gesundheitliche Berufsrisiken (Berufskrankheiten und Arbeitsunfälle), die nicht ausschließlich als externe Kosten betrachtet werden können. Darüber hinaus beinhaltet die Einschätzung der Auswirkungen von Reaktorunfällen noch keine Bewertung der Zuverlässigkeit vorliegender internationaler Versicherungsprogramme auf die zur Schadenabschätzung zurückgegriffen wird.

Die Einschätzung von potentiellen Reaktorunfällen basiert auf dem Risikoansatz. Obwohl der Einsatz dieser Methode zur Schadensabschätzung nicht generell akzeptiert wird, stellt jedoch dieser Ansatz eine geeignete Basis für die Quantifizierung der physischen Schäden unter Berücksichtigung von Unsicherheitsfaktoren dar.

Daraus resultiert die Erfordernis, die Methodik zur Berechnung der zusätzlichen sozialen Schäden und Kosten durch externe Effekte im Kernkraftzyklus, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden, zu erweitern bzw. weiterzuentwickeln.

## 2.12 Übersicht über weitere Studien zur Quantifizierung der externen Kosten im Energiebereich

| Energieträger   | Bandbreite externer Kostenschätzungen  |
|---|--|
| Schätzungen HOHMEYER, 1994 (D) <ul style="list-style-type: none"> <li>■ fossile Brennstoffe</li> <li>■ Kernenergie</li> <li>■ Windenergie</li> <li>■ Photovoltaik</li> </ul>  | 41,40 - 60,85 Pf/kWh (290 - 426 g/kWh)<br>4,32 - 26,06 Pf/kWh (30 - 182 g/kWh)<br>0,01 Pf/kWh (0,07 g/kWh)<br>0,44 Pf/kWh (3 g/kWh)  |
| Schätzungen OTTINGER, 1991 (USA) <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kohle</li> <li>■ Öl</li> <li>■ Gas</li> <li>■ Kernenergie</li> <li>■ Windenergie</li> <li>■ Photovoltaik</li> </ul>   | 2,8 - 6,8 cents/kWh (34 - 82 g/kWh)<br>3,0 - 7,9 cents/kWh (36 - 95 g/kWh)<br>0,78 - 1,1 cents/kWh (9 - 13 g/kWh)<br>2,91 cents/kWh (35 g/kWh)<br>0,0 - 0,1 cents/kWh (0 - 1 g/kWh)<br>0,0 - 0,4 cents/kWh (0 - 5 g/kWh)   |
| Schätzungen FRIEDRICH/VOSS, 1993 (D) <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kohle</li> <li>■ Kernenergie</li> <li>■ Windenergie</li> <li>■ Photovoltaik</li> </ul>  | 0,44 - 1,68 Pf/kWh (3 - 12 g/kWh)<br>0,03 - 0,17 Pf/kWh (0,2 - 1,2 g/kWh)<br>0,02 - 0,06 Pf/kWh (0,1 - 0,4 g/kWh)<br>0,06 - 0,09 Pf/kWh (0,4 - 0,6 g/kWh)  |
| Schätzungen PEARCE/BANN/GEORGIU 1992 (GB) <ul style="list-style-type: none"> <li>■ vorhandene Kohlekraftwerke</li> <li>■ neue Kohlekraftwerke</li> <li>■ Öl</li> <li>■ Gas</li> <li>■ Kernenergie</li> <li>■ Photovoltaik</li> <li>■ Windenergie</li> <li>■ Wasserkraft</li> <li>■ Blockheizkraftwerke</li> </ul> | 5,00 pence/kWh (100 g/kWh)<br>1,18 pence/kWh (24 g/kWh)<br>5,56 pence/kWh (111 g/kWh)<br>0,38 pence/kWh (8 g/kWh)<br>0,05 pence/kWh (1 - 6 g/kWh)<br>0,07 pence/kWh (1,4 g/kWh)<br>0,04 pence/kWh (0,8 g/kWh)<br>0,04 pence/kWh (0,8 g/kWh)<br>0,44 - 0,47 pence/kWh (9 g/kWh) |

Tabelle 24: Externe Kosten der Stromerzeugung bei verschiedenen Energieträgern

Quelle: ZEW Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (1995), „Externe Kosten der Energieversorgung und ihre Bedeutung im Konzept einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung“ (Autoren: Rennings, Koschl)

### 3. Die externen Kosten der Energieversorgung: Zusammenfassung der Ergebnisse der ExterneE-Studie (Preisbasis 1995)

#### 3.1 Kernenergie

|                                       |   |       |                     |       |                     |       |                    |       |                  |
|---------------------------------------|---|-------|---------------------|-------|---------------------|-------|--------------------|-------|------------------|
| <p><b>gesichert</b></p>               | <p>Todesfälle, WDL und PD aufgrund von Arbeitsunfällen im Normalbetrieb (verwendete Daten von den franz. Sozialversicherungen und der nationalen Krankenversicherung)</p> <p>Todesfälle und Gesundheitsschäden aufgrund radioaktiver Strahlung (Analyse durch das DOSE-RESPONSE-Modell), akute und nicht akute Krebserkrankungen, schwerwiegende Erbgutschäden</p> <p>Möglichkeit eines Großunfalls und von Unfällen beim Transport von radioaktivem Material</p> <p>Umweltschäden (Indikatoren sind Populationsgröße der verschiedenen Spezien, entwicklungs- und verhaltensbedingte Veränderungen, genetische Veränderungen, Veränderungen in der Gesamtzahl, Erhöhung der Fruchtbarkeitsrate, Veränderung der Biomasse)</p> <p><u>Normalbetrieb (bei Verwendung von Diskontraten):</u></p> <p>0 % = <b>2,48E + 00 mEURO/kWh</b></p> <p>2 % = <b>9,52E - 02 mEURO/kWh</b></p> <p>10 % = <b>4,97E - 02 mEURO/kWh</b></p> |       |                     |       |                     |       |                    |       |                  |
| <p><b>teilweise gesichert</b></p>     | <p>Auftreten von Gesundheitsschäden unterhalb des stochastischen Dosis-Schwellenwertes</p> <p><u>Großunfall</u> (Verwendung von 4 Schadensszenarien):</p> <table data-bbox="491 1256 1380 1346"> <tr> <td>ST 2</td> <td><b>83.252 MEURO</b></td> <td>ST 21</td> <td><b>17.093 MEURO</b></td> </tr> <tr> <td>ST 22</td> <td><b>3.339 MEURO</b></td> <td>ST 23</td> <td><b>431 MEURO</b></td> </tr> </table>  | ST 2  | <b>83.252 MEURO</b> | ST 21 | <b>17.093 MEURO</b> | ST 22 | <b>3.339 MEURO</b> | ST 23 | <b>431 MEURO</b> |
| ST 2                                  | <b>83.252 MEURO</b>   | ST 21 | <b>17.093 MEURO</b> |       |                     |       |                    |       |                  |
| ST 22                                 | <b>3.339 MEURO</b>  | ST 23 | <b>431 MEURO</b>    |       |                     |       |                    |       |                  |
| <p><b>vermutet</b></p>                | <p>Für Schäden durch die Ablagerung von radioaktiv verseuchtem Müll im öffentlichen Bereich wird das Schadeneinschätzungsmodell PAGIS verwendet.</p> <p><u>Großunfall:</u> Verwendung des Computer-Modells COSYMA zur Identifizierung der Schäden (Anwendung von vier verschiedenen Szenarien); Einschätzung der Auswirkung von Transportunfällen mittels INTERTRAN Computer -Modell</p>  |       |                     |       |                     |       |                    |       |                  |
| <p><b>nicht erfasst/erfassbar</b></p> | <p>Effekte bei Lagerstätten durch radioaktiven Abfall im Arbeitsbereich (Ursache entweder radioaktiv oder nicht radioaktiv verstrahlt) konnten nicht quantifiziert werden.</p> <p>öffentliche Wahrnehmung, Risikoaversion, Verluste aus der Unterbrechung der Stromerzeugung; Sicherung von zerstörten Reaktoren nach einem Unfall</p>  |       |                     |       |                     |       |                    |       |                  |
| <p><b>Bemerkungen</b></p>             | <p>Für die Quantifizierung der Gesundheitsrisiken im Arbeitsbereich wurden auch Daten aus der chemischen Industrie herangezogen.</p> <p>Für Frankreich stehen keine Daten über die Zahlungsbereitschaft von Gesundheitsschäden zur Verfügung. Es werden daher die Kosten der nationalen Krankenversicherung herangezogen.</p>   |       |                     |       |                     |       |                    |       |                  |

### 3.2 Wasserkraft

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>gesichert</b>               | Unfälle, Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft, Wasserversorgung und Fährverkehr; sehr standortspezifische Analyse   |
| <b>teilweise gesichert</b>     | <p>Auswirkungen auf Erholungsgebiete und kulturelle Stätten werden mittels der Zahlungsbereitschaft identifiziert und monetarisiert.</p> <p>Normalbetrieb (sehr standortspezifisch, bestimmte Werte variieren sehr stark)</p> <p>externe Kosten:</p> <p>Landwirtschaft:       - 0,0098 - 0,0011mEURO/kWh</p> <p>Forstwirtschaft:       - 0,0001- 0,0004 mEURO/kWh</p> <p>Wasserversorgung:   - 0,0034- 0,0135mEURO/kWh</p> <p>Fährverkehr:           + 0,0046 mEURO/kWh</p> <p>restliche Schäden:   - 2,2885453 mEURO/kWh</p> |
| <b>vermutet</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung des Beschäftigungseffektes</li> <li>• Schäden an der Vogelpopulation durch Kontakt mit den Stromleitungen</li> </ul>   |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bewertung von lokalen Einkommenseffekten</li> <li>• visuelle Beeinträchtigung, öffentliche Gesundheit durch Dammbüche, Schäden verursacht durch elektromagnetische Strahlung der Stromleitungen, Treibhausgasemissionen vom Staudamm, marine Ökosysteme, erhöhtes Wachstum toxischer Algen durch den vermehrten Frischwasserzufluss</li> </ul>   |
| <b>Bemerkungen</b>             | <p>Es werden hauptsächlich Expertenschätzungen herangezogen. Aufgrund der hohen Relevanz des Standortes ist es kaum möglich allgemein geltende Dosis-Wirkungsfunktionen wenigstens für ein paar Schadenbereiche zu formulieren.</p> <p>Außerdem ist die Validität des Nutzentransfer-Ansatzes fraglich - genauere Studien sind erforderlich.</p>  |

### 3.3 Windkraft

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>atmosphärische Emissionen durch die Produktion der Materialien, die für den Bau der Anlage verwendet werden</li> <li>Angaben zu Unfällen im Windenergiezyklus durch durchschnittliche Unfalldaten aus dem Industriebereich und im Verkehr</li> </ul>  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | <p>Lärmbelästigung ist sehr standortbezogen und abhängig von der Sensibilität der Bevölkerung. Eine exakte Monetarisierung der Schäden ist nicht möglich, da bei der Quantifizierung schon große Unsicherheiten bestehen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Delabole <b>2,3 mEURO/kWh</b></li> <li>Llidiarhywaun <b>1,27 mEURO/kWh</b></li> </ul> |
| <b>vermutet</b>                |  |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | Daten zur Quantifizierung der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes in England (Referenzstandort) nicht vorhanden - es werden jedoch teilweise aus anderen Ländern Daten herangezogen   |
| <b>Bemerkungen</b>             |  |

### 3.4 Fossile Energieträger: Braun-, Steinkohle, Erdöl und Erdgas

#### 3.4.1 Menschliche Gesundheit (allgemein)

|   |  |
|---|--|
| <b>externe Effekte</b>                        | akute/chronische Mortalität/Morbidität durch Staubpartikeln sowie Gesundheitswirkungen durch Ozon aufgrund NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> und O <sub>3</sub> -Belastung (letzteres auf lokaler Ebene); Quantifizierung von Transportunfällen im Erdgas- und Steinkohlereferenzkraftwerk; akute und chronische Krankheitseffekte umfassen Spitalsaufenthalte, Asthma-Notaufnahmen, Krankheitsfälle mit eingeschränkter Arbeitsfähigkeit, asthmatische Anfälle  |
| <b>Bewertungsmethode/<br/>Monetarisierung</b> | Schätzung von Gesamtschadenskosten (Schadenskostenansatz):<br>Steinkohle: <b>4 - 13 mEURO/kWh</b><br>Braunkohle: <b>10 mEURO/kWh</b><br>Erdgas: <b>0,31 - 0,72 mEURO/kWh</b><br>Erdöl: <b>0,22 - 0,27 mEURO/kWh</b> für Primärschadstoffe<br><b>10 - 22 mEURO/kWh</b> für Sekundärschadstoffe<br><b>0,22 mEURO/kWh</b> für Ozon-Belastung (lokal)<br><br>Für das Steinkohle-Referenzkraftwerk in GB wurden externe Kosten durch Lärmbeeinträchtigungen auf <b>0,15 mEURO/kWh</b> geschätzt (hedonistische Preisanalyse). Die Lärmkosten für das Gasreferenzkraftwerk betragen <b>0,03 mEURO/kWh</b> .  |
| <b>Unsicherheiten</b>                         | europaweiter Betrachtung wahrscheinlich deutlich höher   |
| <b>nicht erfassbar/<br/>nicht erfasst</b>     | Schadstoffe, wie Schwermetalle und Kohlenwasserstoffe aufgrund nicht signifikanter Belastungen; Gesundheitseffekte auf die Lungenflügel aufgrund z.Z. fehlender ökonomischer Bewertungsmöglichkeiten   |
| <b>Bemerkungen</b>                            | chronische Effekte: Werte auf Basis epidemiologischer Studien aus den USA ( <i>Pope, 1995</i> )<br><u>Forschungsbedarf bei:</u><br>Bewertung der Auswirkungen von Ozon auf regionaler Ebene<br>Expositions-Wirkungsfunktion für Mortalität durch chronische Effekte für Europa (epidemiologische Untersuchungen erforderlich)<br><u>Krankheitskosten-Kategorien</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zeitverlust durch Krankheit (Schätzung der Kosten durch entgangene Freizeit und Opportunitätskosten für Freizeit)</li> <li>▪ Nutzenentgang durch Schmerzen und Leid (Schätzung mittels Contingent-Valuation-Methode)</li> <li>▪ Ausgaben für Prophylaxe und Behandlungskosten (tatsächliche Behandlungskosten)</li> </ul> |

### 3.4.2 Gesundheit am Arbeitsplatz

|   |   |
|---|---|
| <b>externe Effekte</b>                        | <p>Berufskrankheiten durch Luftschadstoffe und Arbeitsunfälle von Erwerbstätigen bei den Aktivitäten der verschiedenen Prozesse in den fossilen Energiesystemen</p> <p><u>Braun- und Steinkohle:</u> Berufskrankheiten durch Radon- und Kohlestaub bzw. Minenunfälle, Unfälle bei der Kalksteingewinnung, Transportunfälle, Unfälle in der Energiegewinnung, Bau/Abbau von Anlagen</p> <p><u>Erdöl- und Erdgas:</u> v.a. Unfälle im Offshore-Bereich beim Pipelinebetrieb und beim Rohöl-/Heizöltransport</p> |
| <b>Bewertungsmethode bzw. Monetarisierung</b> | <p>gesamte Schadenskosten (Schätzwerte) durch <u>Arbeitsunfälle</u>:</p> <p>Steinkohle: <b>0,8 - 2,0 mEURO/kWh</b></p> <p>Braunkohle: <b>0,14 mEURO/kWh</b></p> <p>Erdöl: <b>0,3 - 0,5 mEURO/kWh</b></p> <p>Erdgas: <b>0,10 mEURO/kWh</b></p> <p>gesamte Schadenskosten (Schätzwerte) durch <u>Berufskrankheiten</u> (nur bei Steinkohle): <b>0,107 - 0,32 mEURO/kWh</b></p>  |
| <b>Unsicherheiten</b>                         |   |
| <b>nicht erfassbar/<br/>nicht erfasst</b>     | keine Berücksichtigung von Synergieeffekten   |
| <b>Bemerkungen</b>                            | <p>Beschwerden aus der Belastung des Bewegungsapparates werden in der Kategorie Berufskrankheiten nicht berücksichtigt. Aufgrund des Tageabbaues der Braunkohle sind hier die Sterblichkeitsraten sowie sonstige gesundheitliche Effekte geringer.</p> <p>Inwieweit die geschätzten Schadenswerte beispielsweise durch Zahlung von Versicherungsprämien oder Lohnprämien bereits internalisiert sind, konnte nicht ermittelt werden.</p>  |

### 3.4.3 Landwirtschaft

|   |   |
|---|---|
| <b>externe Effekte</b>                        | <p>direkte Effekte durch unmittelbare Emission aus erdölbetriebenen Energiesystemen infolge SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> sowie indirekte Effekte durch Sekundärschadstoffe infolge O<sub>3</sub>, saure Deposition (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</p> <p>Untersucht werden die Ernteauffälle durch SO<sub>2</sub>- und Ozonbelastungen und Effekte aus der Aufbringung von Kalk, um einer Versauerung des Bodens durch den Entzug von Nährstoffen infolge der Emissionen durch Energiesysteme entgegenzuwirken.</p>  |
| <b>Bewertungsmethode/<br/>Monetarisierung</b> | <p>Verfahren zur Schadensbewertung: Expositions-Wirkungsbeziehungen für SO<sub>2</sub> bzw. O<sub>3</sub> (siehe: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung“, S. 99 ff.)</p> <p>Bewertung der <u>Brutto-Ertragseinbußen</u> durch direkte Effekte von SO<sub>2</sub>-Emissionen mit Weltmarktpreisen<sup>35</sup>:</p> <p>Steinkohle: <b>0,022 - 0,035 mEURO/kWh</b></p> <p>Braunkohle: <b>0,0065 - 0,027 mEURO/kWh</b></p> <p>Gasturbine: <b>0,015 - 0,062 mEURO/kWh</b></p> <p>Gas- und Dampfturbine: <b>0,009 - 0,037 mEURO/kWh</b></p> <p>Schadenskosten durch erhöhte <u>Ozonbelastung</u>:</p> <p>Gasturbine: <b>0 mEURO/kWh</b> (nur im Winter in Betrieb)</p> <p>Gas- und Dampfturbine: <b>0,00013 - 0,00016 mEURO/kWh</b></p> <p>Braunkohlekraftwerk (Lauffen, D): <b>0,00035 - 0,00038 mEURO/kWh</b></p> |
| <b>Unsicherheiten</b>                         | <p>Gesamtschadensbetrag wahrscheinlich höher und daher bilden die ausgewiesenen Schadenskosten die untere Bewertungsgrenze</p>  |
| <b>nicht erfassbar/<br/>nicht erfasst</b>     | <p>keine Quantifizierung der Auswirkungen auf die Qualität der Feldpflanzen oder indirekter Effekte (verminderte Resistenz gegenüber Schädlingen)</p>   |
| <b>Bemerkungen</b>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bei Gaskraftwerken gibt es keine SO<sub>2</sub>-Emissionen</li> <li>▪ erhöhte Ozonbelastung: nur eine lokale Bewertung erfolgt (keine europaweite Ermittlung der Auswirkungen)</li> <li>▪ für direkte Effekte durch NO<sub>x</sub> und sauren Niederschlag existieren z.Z. keine Expositions-Wirkungs-Funktionen</li> <li>▪ keine Berücksichtigung von Schadstoffen &amp; Ungeziefer</li> <li>▪ <u>Forschungsbedarf</u>: Berücksichtigung von Synergieeffekten infolge der Einwirkung mehrerer Schadstoffe sowie von indirekten Effekten (Verschmutzungsarten in Zusammenhang mit Klimaeinflüssen)</li> <li>▪ Expositions-Wirkungs-Beziehungen v.a. für niedrige Schadstoffkonzentrationen erforderlich</li> </ul>   |

### 3.4.4 Waldschäden

|   |  |
|---|--|
| <b>externe Effekte</b>                        | Schadstoffe SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> und O <sub>3</sub> sowie Säuren  |
| <b>Bewertungsmethode/<br/>Monetarisierung</b> | <p>Die Schäden durch Holzverlust in den <i>Steinkohle-Referenzkraftwerken</i> aufgrund Verschmutzung, klimatischer Effekte, Schädlinge und chemischer Düngemittel werden mit <b>0,004 - 0,013 mEURO/kWh</b> quantifiziert.</p> <p>Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft - <i>Braunkohle-Referenzkraftwerk</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ermittlung der <u>kurzfristigen</u> (Betrachtungszeitraum: 5 Jahre) Effekte durch erhöhte saure Deposition mittels Grenzwertbetrachtung: <b>0,002 - 0,006 mEURO/kWh</b></li> <li>▪ Ermittlung der <u>langfristigen</u> Effekte ohne Grenzwertbetrachtung: <b>0,157 mEURO/kWh</b> für das gesamte Energiesystem, davon <b>0,153 mEURO/kWh</b> durch die Energiegewinnung (Werte aus der IIASA-Waldstudie)</li> </ul> |
| <b>Unsicherheiten</b>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ allgemein sehr komplexe Wirkungsbeziehungen</li> <li>▪ tatsächliche Gesamtschadenskosten dürften jedoch wesentlich höher sein, weil in der ExternE-Studie nur die Quantifizierung von Ertragsausfällen in der Forstwirtschaft erfolgte</li> </ul>   |
| <b>nicht erfassbar/<br/>nicht erfasst</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ keine Berücksichtigung sonstiger Waldfunktionen (Erholungs-, Bodenstabilisierungs-, Kohlenstoffumwandlungs- und Artenschutzfunktion)</li> </ul>   |
| <b>Bemerkungen</b>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufgrund der komplexen und z.T. unbekanntem Zusammenhänge wird mit Hilfe kritischer Konzentrationen („<b>critical level</b>“) bzw. kritischer Eintragungswerte („<b>critical load</b>“) jener Grenzwert der Schadstoffkonzentration und -deposition ermittelt, bei dem nach dem heutigen Wissensstand keine Schädigung/Veränderung von naturnahen Ökosystemen erfolgt und bei dem die eingetragene Schadstoffmenge die Abbaurate der Schadstoffkonzentration nicht übersteigt.</li> </ul>   |

### 3.4.5 Treibhauseffekt (Klimaschäden)

|   |   |
|---|---|
| <b>externe Effekte</b>                        | Treibhausgase im Energiebereich: CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> -Vorläufer (NO <sub>x</sub> , VOC); weitere Treibhausgase sind CH <sub>4</sub> , FCKW, CKW, HFCKW   |
| <b>Bewertungsmethode/<br/>Monetarisierung</b> | In der ExternE-Studie erfolgte keine eigene Berechnung zur Einschätzung der Auswirkungen des Treibhauseffektes durch die Referenzkraftwerke. Für diesen Schadenbereich wird auf veröffentlichte Studien zurückgegriffen (Hohmeyer/Gärtner 1992, Cline 1992, Frankhauser 1993, Tol 1995). In einem weiteren Schritt werden die treibhausgasspezifischen Schadenskosten mit den Emissionsfaktoren für die einzelnen Energiesysteme multipliziert, um die Schadenskosten der Referenzenergiesysteme zu erhalten.<br><br><u>Schätzwerte in mEURO/kWh</u><br>Erdöl: 6 - 4.500 Erdgas: 4 - 2.100<br>Steinkohle: 10 - 5.030 Braunkohle: 19 - 6.200 |
| <b>Unsicherheiten</b>                         | zugrunde liegende Schadensschätzwerte für die Auswirkungen des Treibhauseffektes sind sehr komplex, unsicher, abhängig vom unterstellten Szenario und Zeithorizont  |
| <b>nicht erfassbar/<br/>nicht erfasst</b>     | siehe Zusammenfassung INFRAS/PROGNOS-Studie   |
| <b>Bemerkungen</b>                            | Verwendung der Vermeidungskosten (Zielvorgabe muss definiert werden) als Substitut für die Schadenskosten aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Schadenskosten, möglicher Schäden des globalen Ökosystems und den möglichen langfristigen Belastungen für künftige Generationen; stark voneinander abweichende Ergebnisse sind hier v.a. auf energiepolitische Rahmenbedingungen zurückzuführen  |

### 3.4.6 Materialschäden an Gebäuden

|   |  |
|---|--|
| <b>externe Effekte</b>                        | Ermittlung der Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten infolge von Säureeinwirkungen (SO <sub>2</sub> und saurer Regen) auf Oberflächen   |
| <b>Bewertungsmethode/<br/>Monetarisierung</b> | <p>Von Fachleuten werden abgeleitete wahrscheinliche/notwendige „kritische Materialabträge je Materialkategorie“ vorgegeben. Mittels der realen kritischen Materialabträge lassen sich die von den Betroffenen tatsächlich aufgewendeten Instandhaltungskosten bestimmen, wobei die kritischen Materialabträge aus bisher veröffentlichten Studien übernommen werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ermittlung der zusätzlich verursachten Korrosionsschäden (bewertet mit Reparaturkosten zu Marktpreisen) für Stein- und Braunkohlekraftwerke: <b>0,006 - 0,08 mEURO/kWh</b></li> <li>▪ Erhaltungskosten für die Beseitigung der Säureeinwirkungen auf Oberflächen für Stein- und Braunkohlekraftwerke: <b>0,77 mEURO/kWh</b></li> <li>▪ zusätzliche Instandhaltungskosten für die Referenzkraftwerke (europaweite Betrachtungsebene): <b>0,12 - 0,2 mEURO/kWh</b></li> </ul> |
| <b>Unsicherheiten</b>                         | Es ist keine Erhebung anderer sozio-ökonomischer Effekte erfolgt, um den Zusammenhang zwischen Zustand der Materialoberfläche und Instandhaltung zu untersuchen.   |
| <b>nicht erfassbar/<br/>nicht erfasst</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ keine Berücksichtigung von Materialschäden an historischen Gebäuden oder an Industriegebäuden</li> <li>▪ keine Berücksichtigung von Synergieeffekten</li> </ul>   |
| <b>Bemerkungen</b>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ gut abgesicherte Expositions-Wirkungs-Beziehungen liegen vor</li> <li>▪ es werden keine Materialschäden durch Ozon-Wirkungen analysiert</li> </ul>  |

#### 4. Die externen Kosten der Energieversorgung: Zusammenfassung der Ergebnisse der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Studie (1996)<sup>36</sup>

(Preisbasis 1993; Angaben in Schweizer Franken (Fr))

Auf die Details der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Studie wurde bereits in „Externe Kosten der Energieversorgung - 1. Zwischenbericht“ (1995) ausführlich eingegangen und sie werden daher nicht nochmals behandelt.

##### 4.1 Waldschäden

|                                |  |                             |
|--------------------------------|--|-----------------------------|
| <b>externe Effekte</b>         | physische Schäden durch energiebedingte Schadstoffemissionen (v.a. NO <sub>x</sub> , VOC, SO <sub>2</sub> ); die verfügbaren Kostenschätzungen zu den Waldschäden gehen von den berücksichtigten Waldfunktionen und von ihrer Beeinträchtigung durch Waldschäden aus   |                             |
| <b>gesichert</b>               |  |                             |
| <b>teilweise gesichert</b>     |  |                             |
| <b>vermutet</b>                | Forstwirtschaft (Schadenskosten)   | 380 - 640 Mio. Fr/a         |
|                                | Naturgefahren (Schadens- oder Vermeidungskosten)   | 1300 - 2000 Mio. Fr/a       |
|                                | Berglandwirtschaft (Einkommensausfälle)  | 45 - 55 Mio. Fr/a           |
|                                | Tourismus (Einkommensausfälle)   | 350 Mio. Fr/a               |
|                                | Erholungsnutzen (Einkommensausfälle)   | 0 - 230 Mio. Fr/a           |
|                                | <b>Total ohne Schadenanteil LW:</b>  | <b>450 - 1170 Mio. Fr/a</b> |
|                                | (Kosten der energiebedingten Emissionen)   |                             |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | Auswirkungen der Luftschadstoffe auf das Grundwasser (Nitrate), Aufwendungen für die Waldforschung, Wertminderung verbleibender Bestände und Böden, übrige regionalwirtschaftliche Effekte (Abwanderung), andere Schäden an Flora und Fauna  |                             |
| <b>Bemerkungen</b>             | Die Waldschadensszenarien bestimmen die Ergebnisse, die neuesten Erkenntnisse der Waldzustands- und Waldschadenforschung deuten darauf hin, dass die künftige Schadenentwicklung eher moderater verlaufen könnte; weiterer Bedarf:<br><br>Ursachenforschung<br><br>Forschungsbedarf bei der monetären Bewertung von Erlebnis- und Existenznutzen |                             |

## 4.2 Landwirtschaft

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Bereich</b>                 | nur Ozonbelastungen werden als relevant erachtet; Anpassungsreaktoren werden berücksichtigt   |
| <b>gesichert</b>               | <p>Berechnungsmethode: Produktionsausfälle für bestimmte Kulturen und Wirkungsfunktionen geben für div. Pflanzenkulturen an, wie ihr Wachstum durch bestimmte Schadstoffexposition vermindert wird. Schadenszenario auch durch die neuesten Versuche in der Schweiz weitgehend abgesichert</p> <p>Total: 70 - 160 Mio. Fr/a<br/>energiebedingt: <b>40 - 80 Mio. Fr/a</b></p>  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | Die Kostenschätzung ist empirisch gut abgestützt, aber unvollständig (= untere Grenze der effektiven Kosten der Ozonbelastung in der Landwirtschaft)  |
| <b>vermutet</b>                |   |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ nur die wichtigsten ozonempfindlichen Kulturen sind berücksichtigt, keine Naturwiesen, Weiden aufgrund fehlender Expositions-Wirkungsfunktionen</li> <li>▪ keine Berücksichtigung von Synergiewirkungen anderer Schadstoffe</li> <li>▪ keine Berücksichtigung einer langfristigen Gefährdung der Bodenqualität (Versauerung) und deren künftiger Produktivität</li> <li>▪ keine Berücksichtigung von Einflüssen auf die Tierhaltung</li> </ul> |
| <b>Bemerkungen</b>             | Bewertung der Produktionseinbußen mit Preisen, die zwischen den Weltmarktpreisen (untere Grenze) und EU-Preisen (obere Grenze) liegen (ohne Subventionen)   |

### 4.3 Gesundheit

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               | Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen bei Erwerbstätigen durch die ausgewählten Schadstoffe  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | <p>Abschätzung der Kosten der immissionsbedingten Gesundheitsschäden in der CH mit Hilfe einer deutschen Studie von Heinz und Klaaßen-Mielke (1990); mit Krankenkassendaten von Bevölkerungsgruppen in unterschiedlich belasteten Gebieten wird der Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und Häufigkeit sowie Dauer von Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen abgeleitet; die Auswirkungen umfassen nur Atemwegserkrankungen und Herz-/Kreislaufkrankungen von Erwerbstätigen; <u>Adaptierungen für die CH</u>: Definition von Belastungsgebieten (51 Städte), schweizerische Kostensätze im Gesundheitswesen, zusätzlich werden die Nichterwerbstätigen einbezogen (nur Behandlungskosten)</p> <p><u>Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen</u></p> <p>Total: <b>320 – 1.600 Mio. Fr/a</b></p> <p>davon bei Nichterwerbstätigen: <b>70 - 340 Mio. Fr/a</b></p> |
| <b>vermutet</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schädigungen durch Synergieeffekte</li> <li>▪ andere Schadstoffe, Synergieeffekte)</li> </ul>   |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erhöhung der Mortalität nicht abgeklärt, nur Morbiditätserhöhungen erfasst; nur Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen, keine Allergien, Synergieeffekte, Schmerzen, Leid, etc. erfasst</li> <li>▪ Krankheitsfälle ohne Arbeitsunfähigkeit; Nutzen der ausgefallenen informellen Arbeit; Nutzen der Freizeit bei Kranken; psychosoziale Kosten, Schmerzen, Leid</li> </ul>   |
| <b>Bemerkungen</b>             | <p>Forschungsbedarf: Epidemiologie in der Schweiz (diverse Projekte in Arbeit, z.B. SAPALDIA: Schweizerische Studie über Luftverschmutzung und Atemwegserkrankungen bei Erwachsenen hat 1991 9651 Erwachsene in acht verschiedenen Regionen einer Gesundheitsbefragung und medizinischen Tests unterzogen)</p> <p>Forschungsbedarf: epidemiologische Untersuchungen auf andere Schadstoffe (Ozon, krebserregende VOC, C<sub>b</sub>H<sub>m</sub>, allergieauslösende Stoffe)</p> <p>Übertragbarkeit der festgestellten Gesundheitsschäden in BRD-Belastungsgebieten auf die Schweiz ist nicht unproblematisch: in CH weniger Staub und SO<sub>2</sub>, dafür mehr O<sub>3</sub></p>  |

#### 4.4 Gebäudeschäden

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               | Normalgebäudebestand<br>immissionsbedingte Erhöhung der Kapitalkosten der Gebäudehülle: <b>860 – 1.260 Mio. Fr/a</b>   |
| <b>teilweise gesichert</b>     | immissionsbedingte Erhöhung der Reinigungskosten der Fenster von Geschäftsbauten, Immissionskategorie „Stadt“: <b>120 - 240 Mio. Fr/a</b><br>Total Kapitel- und Reinigungskosten: <b>1.020 – 1.460 Mio. Fr/a</b>   |
| <b>vermutet</b>                |  |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | historische Gebäude, Denkmäler, immissionsbedingte Schäden im Gebäudeinneren und an anderen Infrastrukturanlagen; keine Kosten in ländlichen Gebieten; keine Reinigungskosten von Metallfassaden, Storen, Rollläden, Fensterläden; keine Reinigungskosten an Wohngebäuden, keine ästhetischen Kosten |
| <b>Bemerkungen</b>             |  |

#### 4.5 Transport, Lagerung, Raffination von Erdöl

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>gesichert</b>               | Meeresverunreinigungen durch Tanker, Offshoreförderung und Raffinerien weltweit; Transport und Lagerung in der Schweiz  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | bezogen auf den Weltverbrauch: 3,4 - 17 Mrd. Fr/a<br>bezogen auf den Verbrauch in der Schweiz: <b>13 - 65 Mio. Fr/a</b> |
| <b>vermutet</b>                |   |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | beim Transport auf dem Rhein, in anderen Ländern, schnell vorübergehende Schäden an Flora und Fauna                     |
| <b>Bemerkungen</b>             | Bedeutung relativ gering, ein Teil schon internalisiert (Versicherung, Reparatur)                                       |

#### 4.6 Transport und Lagerung von Erdgas

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               |  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | Gasunfälle bei Hochdruck-Erdgasanlagen und bei Niederdruckanlagen in der Schweiz; in der Schweiz: externe Kosten vernachlässigbar, Rest ist internalisiert |
| <b>vermutet</b>                |  |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | Flüssiggasunfälle; nur Ereignisse in der Schweiz<br><br>Hochdruckanlagen fehlen weitgehend   |
| <b>Bemerkungen</b>             | im Vergleich zu den anderen Externalitäten vernachlässigbar; ein Teil schon internalisiert   |

#### 4.7 Treibhauseffekt

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               |  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | weltweite Erhöhung der Durchschnittstemperaturen; künftige Klimaveränderungen infolge der Treibhausgasemissionen; generell: Generationen<br><br>Vermeidungskostenansatz: mittlerer Emissionszuschlag pro Tonne CO <sub>2</sub> in der Periode von 1990 - 2025 (für CO <sub>2</sub> -Reduktion um 50 %): 100-130 Fr/t CO <sub>2</sub> ; d.h. für die Schweiz 1993: <b>3.400 – 4.400 Mio. Fr/a</b> |
| <b>vermutet</b>                | Ausmaß der Klimaveränderungen, zeitlicher Ablauf und regionale Verteilung von Temperaturveränderungen, Niederschlägen und Unwettern<br><br>Schadenkosten bezogen auf 1 t CO <sub>2</sub> : 15-1800 Fr/t CO <sub>2</sub><br><br>d.h. für die Schweiz 1993: <b>500-60.000 Mio. Fr/a</b> ; Vermeidungskostenansatz ist angemessener   |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | Viele Auswirkungen der Klimaveränderungen und der ausgelösten sozialen Prozesse (Migration) sind nicht erfassbar oder auch nur abschätzbar. Alle Schadenkostenschätzungen sind unvollständig.  |
| <b>Bemerkungen</b>             | Auswirkungen stark verzögert und irreversibel, daher spezielles Risiko, Vorsorgeprinzip<br><br>alle Schadenkostenschätzungen sind unvollständig; Bewertungsprobleme; die Vermeidungskosten sind infolge des zu erwartenden technischen Fortschrittes eher zu hoch angesetzt  |

#### 4.8 Kernenergie

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               | Gesundheitsschäden und Todesfälle im Normalbetrieb; Möglichkeit eines großen Unfalles<br>Normalbetrieb - KKW-Park Schweiz: <b>3 - 16 Mio. Fr/a</b>   |
| <b>teilweise gesichert</b>     | Folgen radioaktiver Bestrahlung nur bei höheren Dosen gesichert, Eintrittswahrscheinlichkeiten, Unfälle<br>bei Großunfall: Schäden in Billionenhöhe sind nicht auszuschließen; Risikoaversion teilweise vorhanden, Bewertung der Schäden im Erwartungswert |
| <b>vermutet</b>                | Ablauf, Ausmaß und räumliche Verteilung eines KKW-Unfalles;<br>Bewertung mit Berücksichtigung der Risikoaversion   |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | nicht gedeckte Entsorgungskosten, psychosoziale Schäden, gesellschaftliche und wirtschaftliche Destabilisierung bei einem Großunfall; nukleare Entsorgung  |
| <b>Bemerkungen</b>             | monetäre Bewertung in Form von Erwartungswerten verdeckt das Risikoaversion nicht Rechnung   |

#### 4.9 Wasserkraft

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               | Beeinträchtigung der Wasserhaushalte, Möglichkeit von Damm- und Wehrbrüchen  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | landwirtschaftliche Produktionseinbußen; Gefährdung der Naturräume qualitativ beschreibbar<br><u>Normalbetrieb aller Speicherkraftwerke: 110 - 310 Mio. Fr/a</u><br>Großunfälle: 27 Mio. Fr/a<br>Ode 0,14 Rp./kWh (Erwartungswert)<br><u>Normalbetrieb der Laufwasserkraftwerke: 35 - 80 Mio. Fr/a</u><br>Großunfälle: 12 Mio. Fr/a oder 0,07 Rp./kWh (Erwartungswert) |
| <b>vermutet</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ in Einzelfällen sehr hohe Naturschäden möglich</li> <li>▪ Wirkungen auf die menschliche Gesundheit (Magnetfelder)</li> </ul>  |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> | Die konkrete Gefährdung kann nur in Einzelfällen abgeschätzt werden.   |
| <b>Bemerkungen</b>             | Die Naturschäden können nur ganz grob geschätzt werden;<br>Zahlungsbereitschaftskonzepte müssen weiterentwickelt werden  |

#### 4.10 Übertragung und Verteilung von Elektrizität

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>gesichert</b>               |  |
| <b>teilweise gesichert</b>     | Wirkung auf die Natur (Vogelwelt, naturnahe Wälder):<br>14 - 26 Mio. Fr/a oder 0,02 - 0,04 Rp./kWh |
| <b>vermutet</b>                |  |
| <b>nicht erfasst/erfassbar</b> |  |
| <b>Bemerkungen</b>             | Schadenabschätzung stark abhängig von der visuellen Beeinträchtigung der Landschaft                |

## 5. Vergleich INFRAS/PROGNOS-Studie mit ExternE-Studie<sup>37</sup>

Vergleichende Gegenüberstellung der Studienziele, des Untersuchungsgegenstandes, der Vorgehensweise und der Bewertungsmethoden der INFRAS/PROGNOS-Studie und der EU-Studie (ExternE)

### *Ziele der Untersuchung der INFRAS/PROGNOS-Studie*

- **aggregierte Schadenswerte** für einzelne Schadenbereiche (Gesundheit, Lärm, Landwirtschaft usw.)
- Ermittlung der **externen Kosten** für die gesamte schweizerische Energieversorgung im Jahr 1990 bzw. 1993 (inkl. externer Kosten des Verkehrs)<sup>38</sup>
- Ermittlung von **kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen** für eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung, in welcher auch die externen Kosten der Umweltbelastung mit berücksichtigt werden, um dadurch die Konkurrenzfähigkeit von alternativen Energien und Energiesparmaßnahmen zu verbessern
- Kalkulatorische Energiepreiszuschläge werden pro Energieträger und pro Energiesystem (z.B. Gasheizungen, Ölheizungen, Gas-WKK-Anlagen usw.) berechnet (= monetarisierte externe Kosten).
- Die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge werden nur für die Anwendung im Strom- und Wärmebereich abgeleitet.

### *Ziele der Untersuchung im Rahmen von ExternE*

- **keine Aggregation** von Teilschäden, sondern Ermittlung von Einzelwerten für die jeweilige Schadenkategorie
- Entwicklung einer **einheitlichen Methode** zur Quantifizierung der Umweltwirkungen und sozialen Kosten, die aus Produktion und Konsumption von Energie verschiedener Brennstoffe resultieren
- Nutzung dieser Methode zur Evaluierung der externen Kosten einer verstärkten Nutzung unterschiedlicher Energieträger an verschiedenen Standorten innerhalb der EU
- Identifizierung von kritischen methodischen Fragen und Forschungsnotwendigkeiten

**Untersuchungsgegenstand der INFRAS/  
PROGNOS-Studie**

Untersucht wurden folgende Energieträger:

- Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas, Nuklearenergie und Wasserkraft  
und folgende Alternativenenergieanlagen bzw. Energiesparmaßnahmen
- Photovoltaik-Anlagen
- Sonnenkollektoren
- Isolierfenster
- Wärmedämmstoffe

Analysiert wurden externe Effekte bei folgenden Energieversorgungsstufen:

1. bei der **Energiegewinnung** von Kohle (Steinkohlebergbau, Braunkohletagbau) und die Erdöl- und Erdgasförderung
2. bei der **Energieumwandlung und -aufbereitung** in Kraft- und Fernheizwerken, sowie in emissionsrelevanten Umwandlungsanlagen (Kokereien, Brikettfabriken, Raffinerien),
3. beim **Transport der Energie** (Auswirkungen der verschiedenen Energieverteilungssysteme wie Hochspannungsleitungen, Erdöl- und Erdgaspipelines): Schäden, die durch Unfälle beim Transport von Energieträgern auf dem Wasser- und Landweg entstehen
4. beim **Endenergieverbrauch** (Verkehr, Belastungen durch Emissionen der Haushalte (Raumheizung))
5. **Entsorgung:** Entsorgung von Rest- und Abfallstoffen (Asche, Reststoffe aus Rauchgasreinigung, Komponenten der Energiesysteme z.B. Elemente von photovoltaischen Systemen oder Sonnenkollektoren)

**Untersuchungsgegenstand im Rahmen  
des ExternE-Projekts**

Analysiert wurden die wichtigsten fossilen Brennstoffzyklen, nämlich

- Steinkohle
- Braunkohle
- Öl
- Erdgas
- Nuklearenergie

sowie zwei erneuerbare Energieträger, nämlich

- Wasserkraft und Windkraft

Dabei wurde auf die Verwendung unterschiedlicher Technologien zur Nutzung der Brennstoffe Bedacht genommen.

Folgende Phasen der Brennstoffzyklen wurden untersucht:

1. **Gewinnung** des Brennstoffs (z.B. Errichtung von Minen)
2. **Bearbeitung** des Brennstoffs (z.B. Errichtung der Anlagen, Reinigung des Brennstoffs bei Kohle)
3. **Transport** des Brennstoffs (Errichtung der Anlagen, Aufladen des Brennstoffs, Transport, Entladen des Brennstoffs)
4. **Energieverbrauch** (Errichtung der Anlagen, Produktion)

**Vorgangsweise in der INFRAS/PROGNOS-Studie**

1. Identifizierung externer Effekte im Strom- und Wärmebereich
2. Quantifizierung der daraus resultierenden Effekte bzw. Schäden
3. Monetarisierung der daraus resultierenden Effekte bzw. Schäden

Untersucht wurden

1. Externe Kosten der Luftverschmutzung
  - a) Waldschäden
  - b) landwirtschaftliche Produktionsausfälle
  - c) Gesundheitsschäden
  - d) Gebäudeschäden
2. Externe Kosten der ölbedingten Meeres- und Bodenverschmutzung
3. Kosten des Treibhauseffektes
4. Externe Kosten der Elektrizitätsversorgung und -verteilung
  - a) Beeinträchtigung von Gewässern und Landschaft
  - b) Großrisiken bei Kernkraftwerken und Staudämmen

**Vorgangsweise im Rahmen des ExterneE-Projekts**

- Konzentration der Untersuchung auf anlagenbezogene Referenztechnologien; dadurch werden technologiebezogene Emissionsdaten für bestimmte Standorte ermittelt
- Verwendung von „Verschmutzungsverbreitungsmodellen“ (mit detaillierter Information bezüglich der Verteilung der Emissionen sowie Informationen über die Reaktionen/Auswirkungen in Bezug auf unterschiedliche Ausmaße der Belastung („Höhe der Dosis“))
- Verwendet wird die „**impact-pathway**“- oder „**damage-function**“-Methode. Hier wird der Weg des Schadstoffes von seiner Entstehung bis hin zu den von ihm betroffenen Rezeptoren untersucht. Die wichtigsten Schritte dabei können wie folgt zusammengefasst werden:
  - **Emission:** Charakterisierung der relevanten Technologien und Umweltwirkungen, die durch Emissionen entstehen (z.B. Tonnen von NO<sub>x</sub>, die pro GWh<sub>el</sub> von einem bestimmten Kraftwerk emittiert werden)
  - **Verteilung:** Berechnung der Schadstoffkonzentration in den betroffenen Regionen unter Verwendung von atmosphärischen Verteilungsmodellen
  - **Auswirkung:** Charakterisierung der von der zusätzlichen Schadstoffbelastung Betroffenen; Identifizierung einer passenden Dosis-Wirkungsfunktion zur Schadensabschätzung
  - **Kosten:** ökonomische Bewertung der Auswirkungen und Schätzung jenes Teils der Schadenskosten, der noch nicht internalisiert ist

### **Bewertungsmethoden in der INFRAS/ PROGNOS-Studie**

#### **1. Direkte monetäre Bewertung:**

- landwirtschaftliche Produktionsausfälle
- Gebäudeschäden
- Teile der Waldschadenskosten (Ausfälle von forstwirtschaftlichen Einkommen, Kosten für zusätzlich notwendige Verbauung oder Schutzmaßnahmen)
- Teile der Gesundheitskosten (Produktionsausfälle durch Krankheit, Behandlungskosten)
- minimale Teile des Treibhauseffekts (z.B. Deicherhöhungen)

#### **2. Bewertung über Zahlungsbereitschaftskonzepte (CV-Methoden)**

Immaterielle Werte sind nur aus der allgemeinen Nutzen- und Präferenzsphäre der Menschen monetär bewertbar. Die Betroffenen werden dabei nach dem monetären Stellenwert, den sie der Beseitigung oder Verhinderung des Schadens beimessen, befragt. Immaterielle Werte sind z.B. Verluste an Menschenleben, Gefährdung der Erholungs- und Erlebnisfunktion im Naturraum, Verlust der Artenvielfalt in Flora und Fauna, Zerstörung des Landschaftsbildes, Verlust der Heimat, Schmerz, Trauer, Aufbrechen gesellschaftlicher Konflikte im Katastrophenfall.

### **Bewertungsmethoden im Rahmen des ExternE-Projekts**

**1. Direkte Bewertung zu Marktpreisen**, wenn Güter von einer Umweltschädigung betroffen sind (Holz, Nutzpflanzen, Gebäude)

#### **2. Indirekte Bewertung zu**

- hedonistischen Preisen bzw. über
- Reisekostenanalyse („travel-costs“)

Diese Verfahren werden v.a. zur Bewertung von Umweltwirkungen auf Erholungsgebiete angewendet.

**3. Bewertung über hypothetische Märkte mittels der Contingent Valuation-Methode (CVM)** bei Schäden, die keiner Marktbewertung unterliegen (etwa bei Schäden am Ökosystem einer Region)

**Verwendung von Diskontraten**, weil sich Umweltschäden durch gegenwärtigen Handlungen oft erst Jahre später auswirken. Je höher die unterstellte Diskontrate, desto geringer ist der Wert, der diesen Schäden heute beigemessen wird. Hohe Diskontraten und lange Zeitperioden verringern den Schadenswert erheblich. Im ExternE-Projekt werden Diskontraten von 0 %, 3 % und 10 % verwendet. Die Erfassung erfolgt durch das Konzept der „Zeitpräferenz“. Schaden in EURO zum „jetzigen“ Zeitpunkt:

$$X_t = X_0 / (1+r)^t$$

$X_t$  = Schaden in EURO zum Zeitpunkt t

r = Diskontrate

$X_0$  = Schaden in EURO heute

t = Schaden tritt nach t Jahren ein

## 6. Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)

Ein Computer-Instrument zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen

GEMIS ist ein Computerprogramm, das vom Öko-Institut Darmstadt im Auftrag des Umweltministeriums in Hessen sowie in Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe Umweltsystemanalyse der Gesamthochschule Kassel erstellt wurde. GEMIS beschreibt die Ist- (Jahr 1989), Standard- (1995 - 2000) und Zukunftssituation (nach 2000) für Deutschland. Hierbei wurde eine Datenbasis und eine Methodik für umweltbezogene Analysen und Vergleiche von Energiesystemen zur Bereitstellung von Wärme und Elektrizität entwickelt und ein gleichnamiges Computerprogramm zur Umweltanalyse in Energiesystemen erstellt (ÖKO/GhK 1989). Für vorgelagerte Prozessstufen werden vereinfachend typische Betriebsbedingungen angenommen. Darüber hinaus werden für recycelte Materialien so genannte „Gutschriften“ verwendet. In GEMIS wird zur Umrechnung von Rohenergieträgern der *Heizwert* verwendet (Verbrennungswärme ohne Energie der Verbrennungsgase).

GEMIS 1.0 wurde in den Jahren 1987 bis 1989 entwickelt und seitdem kontinuierlich verbessert und aktualisiert. GEMIS umfasst folgende Grunddaten:

- Bereitstellung von Energieträgern (Prozessketten- und Brennstoffdaten) – neben fossilen Energieträgern (Stein- und Braunkohle, Erdöl, Erdgas), regenerativen Energien, Hausmüll und Uran auch sog. nachwachsende Rohstoffe (schnellwachsende Hölzer, Raps ...) sowie Wasserstoff
- Technologien zur Bereitstellung von Wärme und Strom (Heizungen, Warmwasser, Kraftwerke aller Größen und Brennstoffe, Heizkraftwerke, BHKW)
- Stoffbereitstellung (vor allem Grundstoffe und Baumaterialien) inklusive deren vorgelagerter Prozesse (bei Importen auch im Ausland)
- Transportprozesse, d.h. Personenkraftwagen (für Benzin, Diesel, Strom, Biokraftstoffe), öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Bahn) und Flugzeuge sowie Prozesse zum Gütertransport (Lastkraftwagen, Bahn, Schiffe und Pipelines)

GEMIS berücksichtigt von der Primärenergie- bzw. Rohstoffgewinnung bis hin zur Nutzenergie bzw. Stoffbereitstellung alle Prozessschritte und bezieht Hilfsenergie- und Materialaufwand zur Herstellung von Energieanlagen und Transportsystemen ein.

Die Datenbasis enthält für alle Prozesse:

- Kenndaten zu Nutzungsgrad, Leistung, Auslastung, Lebensdauer
- direkte Luftschadstoffemissionen (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Halogene, Staub, CO, NMVOC)
- Treibhausemissionen (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O sowie alle FCKW/FKW)
- feste Reststoffe (Asche, Entschwefelungsprodukte, Klärschlamm, Produktionsabfall, Abraum)
- flüssige Feststoffe (AOX<sup>39</sup>, BSB5, CSB, N, P, anorganische Salze)
- sowie den Flächenbedarf

Seit GEMIS 2.0 und 2.1 kann das Computermodell Kosten analysieren; die entsprechenden Kenndaten der Brenn- und Treibstoffe sowie der Energie- und Transportprozesse (Infektions- und Betriebskosten) sind in der Datenbasis enthalten. Mit GEMIS können die Ergebnisse von Umwelt- und Kostenanalysen auch bewertet werden: durch die Aggregation von klimarelevanten Schadstoffen

zu sog. CO<sub>2</sub>-Äquivalenten<sup>40</sup> und die Ermittlung externer Umweltkosten, die zusammen mit den betriebswirtschaftlichen („internen“) Kosten zur Bestimmung der volkswirtschaftlichen Gesamtkosten dienen können<sup>41</sup>.

## 6.1 Energie-Prozessketten in GEMIS 2.1

### 6.1.1 Methodisches Vorgehen

Als methodische Basis zur Erfassung der Gesamtemissionen gilt die Prozesskettenanalyse: ein Energiesystem wird ausgehend von der Primärenergiegewinnung über Transport- und Umwandlungsschritte bis hin zur Nutzenergie in einzelne Stufen zerlegt. Die Gesamtheit aller Anlagen, die zur Bereitstellung von Nutzenergie aus einem

bestimmten System dienen, wird als Prozesskette bezeichnet.

Die in GEMIS 1.0 angewandte Datenbasis für vorgelagerte Prozessketten musste wegen der Einbeziehung weiterer Umweltaspekte sowie der Materialprozessketten überarbeitet werden. Dabei wurden bei der Anpassung der Struktur des Computermodells die gesamten Prozessketten einer Aktualisierung unterzogen und neue Datenquellen mit dem bisherigen Datenkern verknüpft.

GEMIS bildet die komplexen Prozessketten im Bereich Energie, Stoffe und Transporte durch einen modularen Aufbau übersichtlich ab. Es umfasst wichtige Technikdaten (Effizienz, Leistung, Auslastung), Umweltparameter (Emissionen, Rest-

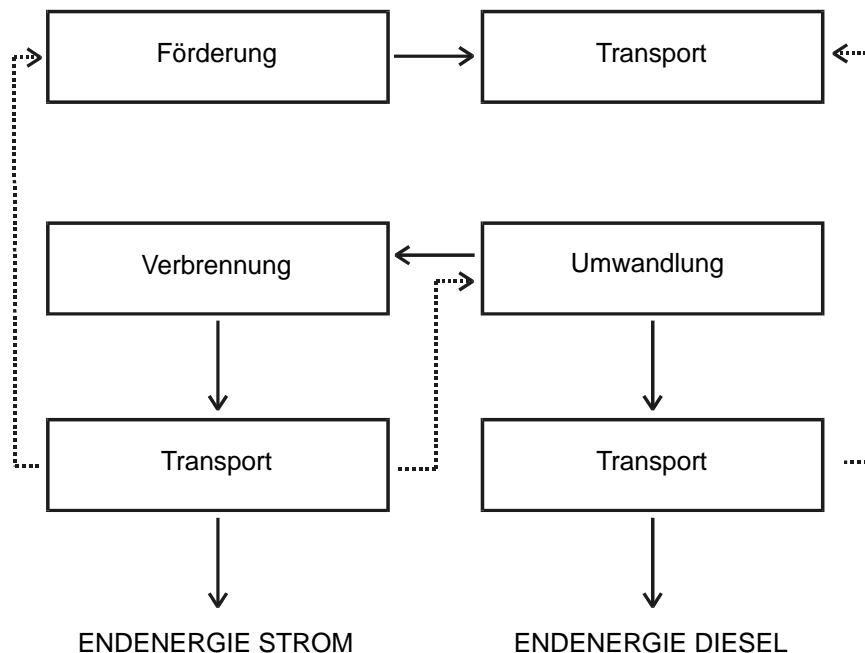


Abbildung 12: Darstellung der Erdölprozesskette ohne Materialvorleistungen und Hilfsmaterialien  
Quelle: Öko-Institut, GEMIS 3.0, S. 2

stoffe, Flächen), Kostendaten (Investitionen fix und variabel), Ortsbezug (Region oder Land) und Datenreferenz (Quellen und Qualität).

### 6.1.2 Zuordnung von Hilfsenergien und Neben- sowie Kuppelprodukten in GEMIS

Die Methodik zur Einbeziehung von Hilfsenergien und Hilfsstoffen sowie evtl. vorhandener Gutschriften von Kuppelprodukten in GEMIS 2.1 geht generell davon aus, dass:

- die real von Prozessen genutzten Hilfsenergieträger und -produkte verwendet werden
- der gesamte Energieaufwand und alle Umweltaspekte für einen Prozess dem bereitgestellten (Haupt)Produkt zugerechnet werden, sodass Nebenprodukte kostenfrei anfallen
- nur bei tatsächlichen Kuppelprodukten ein Bonus für das bereitgestellte zweite Produkt angerechnet wird

### 6.2 Einbeziehung von klimarelevanten Schadstoffen

Die klimarelevanten Schadstoffe CO<sub>2</sub>, Kohlenmonoxid, Methan, flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe sowie Distickoxid wurden in der Version GEMIS 1.0 noch nicht berücksichtigt. Dies erforderte die Struktur der bisherigen Prozessketten zu überarbeiten. Um die komplexen Verknüpfungen zwischen Energieprozessketten, Transportsystemen und Stoffflüssen logisch überprüfbar zu machen, enthält GEMIS 2.1 sowohl eine erweiterte Klassifizierung von Prozessen als auch logische Verknüpfungsregeln, die bei der Erstellung von Prozessketten beachtet werden müssen.

In GEMIS werden jedoch auch die Materialvorleistungen mit einbezogen. Neben Energieflüssen werden auch Stoffflüsse sowie die Kopplungen zwischen beiden betrachtet. Auch bei Materialprozessketten sind Extraktion, Transporte, Umwandlungen usw. mit jeweils spezifischen Umwelteffekten zu beachten.

### 6.3 Nutzungsmöglichkeiten von GEMIS

Zu den Vorzügen von GEMIS gegenüber bisherigen Emissionsabschätzungen zählen:

- die Berücksichtigung „ökologischer Rucksäcke“, d.h. GEMIS berechnet nicht nur die direkten Emissionen aus Energiesystemen, sondern auch sämtliche vor- und nachgelagerte Emissionen von der Primärenergiegewinnung über die Verarbeitung und den Transport bis hin zur Behandlung der Reststoffe
- angebots- und nachfragebezogene Maßnahmen können analysiert werden, d.h. es werden nicht nur die Umweltwirkungen der Energiebereitstellung, sondern auch Auswirkungen nachfrageseitiger Maßnahmen, bspw. Wärmedämmung oder der Einsatz von Energiesparlampen analysiert
- schnelle und unkomplizierte Handhabung komplexer Zusammenhänge
- Berücksichtigung rekursiver Vorgänge (z.B.: zur Stromerzeugung wird Kohle benötigt, die mit der Bahn zum Kraftwerk transportiert wird; die Bahn benötigt für den Transport Strom usw.)
- einheitliches Werkzeug zur Emissionsberechnung; d.h. mit Hilfe der Standardversion können unterschiedliche Energiekonzepte hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Kriterien verglichen werden
- einfache ökonomische Berechnung

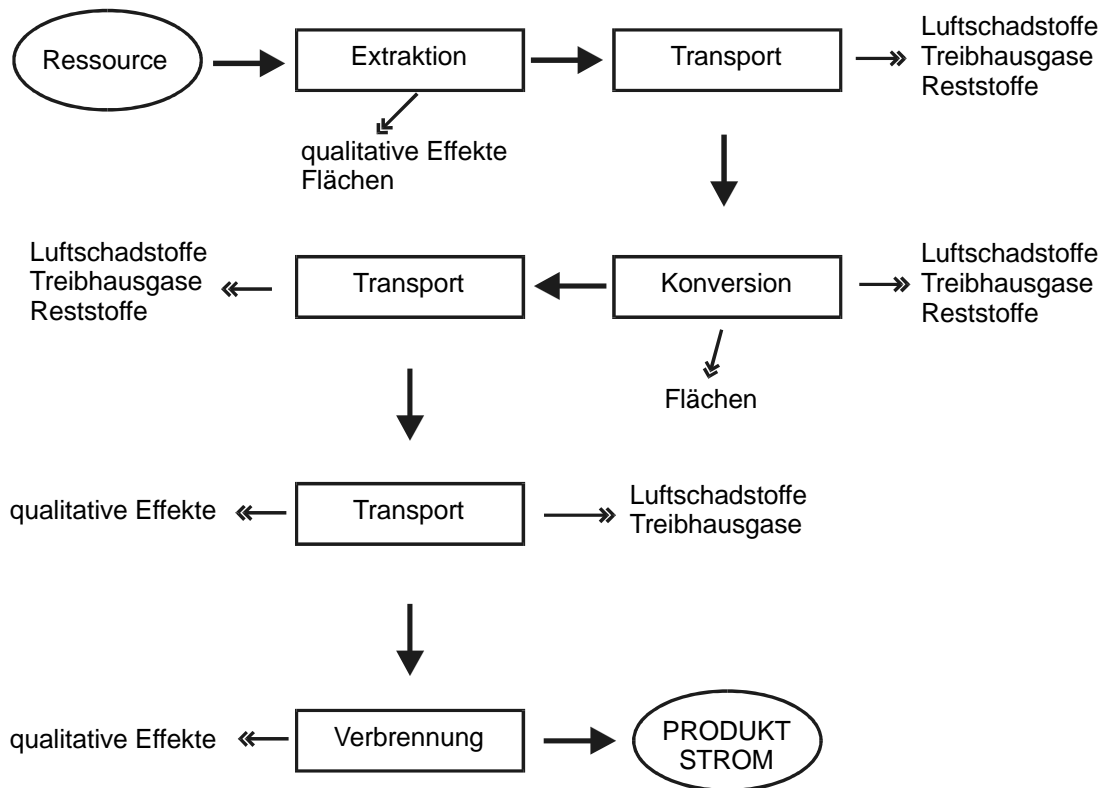


Abbildung 13: Darstellung der direkten und indirekten Umwelteffekte von Energieprozessen in GEMIS 2.1 bei Berücksichtigung der Materialvorleistungen

Quelle: Öko-Institut, GEMIS 3.0, S. 2

Mögliche Anwendungen von GEMIS finden sich bei der Erarbeitung von Klimaschutzstrategien, für Energiekonzepte für Bund, Länder und Gemeinden, betriebliche Umweltkonzepte und für das Stofftransportmanagement.

Bevor die verschiedenen Prozessketten in GEMIS 2.1 diskutiert werden, werden Anlagen dargestellt, die in mehreren Prozessketten verwendet werden. Sie umfassen Anlagen für Prozesse zur Kraftbereitstellung, für generische Prozesswärmebereitstellung, generische Strombereitstellung und generische Gütertransportprozesse.

### 6.3.1 Prozesskette für Steinkohle

- Gewinnung deutscher Steinkohle
- Gewinnung von Importsteinkohle aus Australien und den USA, aus der GUS, aus Polen und aus Südafrika
- Steinkohlebrikettherstellung
- Koksherstellung
- Transport von Steinkohle, Brikett und Koks

| vorgelagerte Emissionen [kg/TJ <sub>end</sub> ] | AUS/US via Schiff | GUS via Bahn | Polen via Bahn | Südafrika via Schiff | Importkohlemix |
|---|-------------------|--------------|----------------|----------------------|----------------|
| SO <sub>2</sub>                                 | 82,2              | 74,4         | 34,4           | 110,6                | 87,6           |
| NO <sub>x</sub>                                 | 60,8              | 31,7         | 25,0           | 72,8                 | 57,3           |
| Staub   | 6,4               | 11,5         | 8,3            | 11,6                 | 8,4            |
| CO <sub>2</sub>                                 | 6 149             | 12 557       | 4 476          | 8 375                | 7 179          |
| CO  | 11,8              | 14,7         | 2,9            | 13,9                 | 11,7           |
| CH <sub>4</sub>                                 | 107,9             | 157,4        | 641,3          | 599,7                | 269,9          |
| NMVOC   | 2,9               | 1,8          | 0,1            | 3,0                  | 2,5            |
| N <sub>2</sub> O                                | 0,1               | 0,5          | 0,3            | 0,2                  | 0,2            |
| CO <sub>2</sub> - Äquivalente*                  | 7 360             | 14 413       | 11 599         | 14 177               | 10 194         |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]           | 1,08              | 1,25         | 1,05           | 1,11                 | 1,10           |

Tabelle 25: Kenndaten der Prozessketten für Import-Steinkohle frei Grenze BRD

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

| vorgelagerte Emissionen [kg/TJ <sub>end</sub> ] | Mix-Kohle via Bahn + Schiff | Dt. Kohle via Bahn + Schiff | StK-Brikett via Lkw | StK-Koks via Lkw |
|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|
| SO <sub>2</sub>                                 | 17,3                        | 4,8                         | 5,4                 | 5,5              |
| NO <sub>x</sub>                                 | 12,8                        | 4,5                         | 7,9                 | 8,5              |
| Staub   | 1,6                         | 0,4                         | 0,8                 | 0,8              |
| CO <sub>2</sub>                                 | 4 706                       | 4 215                       | 4 632               | 4 686            |
| CO  | 2,9                         | 1,2                         | 2,6                 | 2,8              |
| CH <sub>4</sub>                                 | 500,1                       | 540,6                       | 543,9               | 543,9            |
| NMVOC   | 0,7                         | 0,3                         | 1,5                 | 1,6              |
| N <sub>2</sub> O                                | 0,1                         | 0,1                         | 0,1                 | 0,1              |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                   | 10 235                      | 10 188                      | 10 641              | 10 696           |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]           | 1,06                        | 1,05                        | 1,06                | 1,06             |

Tabelle 26: Kenndaten der Prozessketten für Steinkohle frei Verbraucher in der BRD

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

### 6.3.2 Prozesskette für Braunkohle

- Braunkohleförderung in Ostdeutschland und in Westdeutschland
- Brikettierung/Staubherstellung aus Braunkohle in Ost- und Westdeutschland
- Transport von Braunkohleprodukten

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | rheinische<br>Rohbraunkohle<br>(Köln/Aachen) | ostelbische<br>Rohbraunkohle<br>(Lausitz) | westelbische<br>Rohbraunkohle<br>(Leipzig/Halle) |
|--|--|---|--|
| SO <sub>2</sub>                                    | 1,5  | 1,2                                       | 1,0  |
| NO <sub>x</sub>                                    | 2,7  | 1,1                                       | 0,9  |
| Staub  | 0,4  | 0,1                                       | 0,1  |
| CO <sub>2</sub>                                    | 3 788  | 1 681                                     | 1 274  |
| CO   | 0,9  | 0,5                                       | 0,4  |
| CH <sub>4</sub>                                    | 1,8  | 1,8                                       | 1,6  |
| NM VOC   | 0,1  | 0,0                                       | 0,0  |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,1  | 0,0                                       | 0,0  |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 3 836  | 1 714                                     | 1 302  |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,03   | 1,02                                      | 1,02   |

Tabelle 27: Kenndaten der Prozessketten für Rohbraunkohle

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NM VOC

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | rhein. BrK-Brikett<br>via Lkw | ostelb. BrK-<br>Brikett<br>via Lkw | westelb. BrK-<br>Brikett<br>via Lkw | rhein. BrK-Staub<br>via Lkw |
|--|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 9,4                           | 16,9                               | 16,6                                | 9,3                         |
| NO <sub>x</sub>                                    | 18,6                          | 16,9                               | 15,8                                | 17,9                        |
| Staub  | 2,0                           | 2,0                                | 1,9                                 | 1,9                         |
| CO <sub>2</sub>                                    | 18 173                        | 23 034                             | 20 656                              | 18 111                      |
| CO   | 9,2                           | 9,6                                | 9,2                                 | 8,9                         |
| CH <sub>4</sub>                                    | 2,5                           | 3,3                                | 3,0                                 | 2,5                         |
| NM VOC   | 2,7                           | 1,5                                | 1,4                                 | 2,5                         |
| N <sub>2</sub> O                                   | 5,3                           | 7,7                                | 7,7                                 | 5,3                         |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 19 631                        | 25 150                             | 22 762                              | 19 569                      |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,17                          | 1,22                               | 1,22                                | 1,17                        |

Tabelle 28: Kenndaten der Prozessketten für Braunkohleprodukte

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NM VOC

### 6.3.3 Prozesskette für Erdölprodukte

- Erdöl-Exploration – Suche und Erschließung von Lagerstätten
- Ölförderung und -aufbereitung mit Rohöl aus der EU (Nordsee), Rohöl aus der OPEC, Rohöl aus der GUS
- internationaler Transport von Öl
- Raffination von Erdöl in Deutschland: Raffination von OPEC-Öl bzw. von GUS-Öl
- nationaler Transport von Ölprodukten

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | EU via Pipeline | GUS via Pipeline | OPEC via Tanker | Importmix |
|--|-----------------|------------------|-----------------|-----------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 0,1             | 85,9             | 42,3            | 45,6      |
| NO <sub>x</sub>                                    | 1,7             | 26,8             | 28,0            | 23,0      |
| Staub  | 0,0             | 6,5              | 2,9             | 3,3       |
| CO <sub>2</sub>                                    | 981             | 11 120           | 3 461           | 4 929     |
| CO   | 1,5             | 11,9             | 6,1             | 6,7       |
| CH <sub>4</sub>                                    | 3,0             | 36,2             | 5,9             | 12,9      |
| NMVOC  | 1,3             | 20,8             | 4,2             | 7,8       |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,0             | 0,3              | 0,0             | 0,1       |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 1 021           | 11 585           | 3 535           | 5 095     |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,01            | 1,12             | 1,04            | 1,05      |

Tabelle 29: Kenndaten der Prozessketten für Import-Rohöl

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Öl-S via Bahn | Öl-EL via Bahn | Öl-EL/Diesel<br>via Lkw | Benzin via Lkw |
|--|---------------|----------------|-------------------------|----------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 54,7          | 50,1           | 50,6                    | 64,4           |
| NO <sub>x</sub>                                    | 29,4          | 26,3           | 29,8                    | 39,1           |
| Staub  | 3,7           | 3,5            | 3,8                     | 4,4            |
| CO <sub>2</sub>                                    | 10 699        | 7 937          | 8 180                   | 16 457         |
| CO   | 10,0          | 8,5            | 9,8                     | 14,4           |
| CH <sub>4</sub>                                    | 21,3          | 17,8           | 17,7                    | 28,4           |
| NMVOC  | 18,9          | 18,4           | 19,4                    | 153,9          |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,2           | 0,1            | 0,1                     | 0,3            |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 10 987        | 8 172          | 8 414                   | 16 848         |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,15          | 1,11           | 1,11                    | 1,24           |

Tabelle 30: Kenndaten der Prozessketten für Ölprodukte frei Verbraucher in der BRD

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

### 6.3.4 Prozesskette für Erdgas

- Gas-Exploration
- Gasförderung und -aufbereitung in Norwegen, in Deutschland, in der GUS
- internationaler Gastransport: Erdgas aus der GUS, Liquid Natural Gas aus Algerien
- Gastransport und Speicherung in Deutschland: Lokale Gas-Unterverteilung, Gas-Speicherung

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | GUS via<br>Pipeline | NL via<br>Pipeline | NOR via<br>Pipeline | Importmix | LNG via<br>Schiff |
|--|---------------------|--------------------|---------------------|-----------|-------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 2,2                 | 0,5                | 0,8                 | 1,3       | 11,0              |
| NO <sub>x</sub>                                    | 23,2                | 2,8                | 5,1                 | 12,5      | 66,5              |
| Staub  | 1,0                 | 0,3                | 0,4                 | 0,6       | 1,7               |
| CO <sub>2</sub>                                    | 4 724               | 837                | 1 429               | 2 734     | 10 632            |
| CO   | 24,6                | 3,6                | 6,5                 | 13,8      | 33,0              |
| CH <sub>4</sub>                                    | 317,3               | 49,3               | 52,2                | 170,6     | 101,2             |
| NMVOG  | 1,6                 | 0,1                | 0,3                 | 0,8       | 2,6               |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,2                 | 0,1                | 0,1                 | 0,1       | 0,5               |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 8 266               | 1 392              | 2 002               | 4 643     | 11 874            |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,14                | 1,01               | 1,02                | 1,07      | 1,19              |

Tabelle 31: Kenndaten der Prozessketten für Import-Erdgas

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOG

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Haushalte und Kleinverbrauch | Kraftwerke und Industrie |
|--|------------------------------|--------------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 2,0                          | 1,4                      |
| NO <sub>x</sub>                                    | 12,2                         | 11,5                     |
| Staub  | 0,7                          | 0,6                      |
| CO <sub>2</sub>                                    | 3 012                        | 2 705                    |
| CO   | 15,2                         | 12,8                     |
| CH <sub>4</sub>                                    | 287,6                        | 148,6                    |
| NMVOG  | 0,9                          | 0,7                      |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,1                          | 0,1                      |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 6 209                        | 4 371                    |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,08                         | 1,07                     |

Tabelle 32: Kenndaten der Prozessketten für Erdgas frei Verbraucher

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOG

### 6.3.5 Prozesskette für Uran

- Förderung und Konversion von Uran aus Afrika, Kanada und der GUS
- Urananreicherung
- Uran-Brennelementfertigung

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Uranangaben aus<br>Afrika* | Uranangaben aus der GUS* | Uranangaben aus USA und<br>CANADA* | BRD-Mix** |
|--|----------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 72,7                       | 42,6                     | 8,8                                | 11,6      |
| NO <sub>x</sub>                                    | 27,1                       | 24,5                     | 18,6                               | 10,9      |
| Staub  | 9,0                        | 6,5                      | 2,1                                | 1,7       |
| CO <sub>2</sub>                                    | 8 515                      | 6 484                    | 4 656                              | 2 646     |
| CO   | 7,7                        | 9,6                      | 3,1                                | 3,2       |
| CH <sub>4</sub>                                    | 17,4                       | 17,9                     | 4,7                                | 3,9       |
| NMVOC  | 1,3                        | 1,3                      | 0,9                                | 0,4       |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,4                        | 0,2                      | 0,3                                | 0,1       |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente***                    | 8 807                      | 6 744                    | 4 774                              | 2 715     |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,11                       | 1,10                     | 1,07                               | 1,04      |

Tabelle 33: Kenndaten der Prozessketten für Uran-Brennelemente frei AKW

\* Anreicherung im Lieferland mit dortigem Kraftwerksmix, ohne BE-Herstellung

\*\* Anreicherung in der BRD mit hiesigem Grundlast-Kraftwerksmix, inkl. BE-Herstellung

\*\*\*Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

### 6.3.6 Prozesskette für Wasserstoff

In GEMIS 2.1 wurde auch Wasserstoff als Treibstoff für den Verkehrssektor untersucht (ZUKUNFT). Da fossil oder nuklear erzeugter Wasserstoff bislang kaum energiepolitische Beachtung fand, wird nur die Bereitstellung von sog. Solarwasserstoff betrachtet, der aus Solar- und Wasserkraftstrom erzeugt wird.

- Energiequellen zur H<sub>2</sub>-Bereitstellung
- H<sub>2</sub>-Herstellung
- Verflüssigung von GH<sub>2</sub> zu LH<sub>2</sub>
- Transport von LH<sub>2</sub>
- Varianten zur Wasserstoff-Prozesskette: Verflüssigung und Pipelinetransport oder Einsatz von H<sub>2</sub> zur Verflüssigung

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | LH <sub>2</sub> -REF* | LH <sub>2</sub> -REQ** |
|--|-----------------------|------------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 28,0                  | 15,9                   |
| NO <sub>x</sub>                                    | 170,8                 | 30,3                   |
| Staub  | 4,4                   | 4,9                    |
| CO <sub>2</sub>                                    | 52 799                | 9 697                  |
| CO   | 91,3                  | 31,9                   |
| CH <sub>4</sub>                                    | 99,4                  | 22,3                   |
| NMVOC  | 8,0                   | 1,8                    |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,7                   | 0,6                    |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente***                    | 54 072                | 10 096                 |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 2,20                  | 1,82                   |

Tabelle 34: Kenndaten der Prozessketten für liquiden Wasserstoff

\* Verflüssigung mit Strom aus Gas-GuD-Kraftwerken

\*\* Verflüssigung mit Strom aus H<sub>2</sub> mit regenerativen Energien (Wasser/PV)

\*\*\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

### 6.3.7 Prozessketten für Biomasse

Bei den Prozessketten für Biomasse wird zwischen Rest-Biomassen und nachwachsenden Rohstoffen unterschieden. Bei der energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen werden Pflanzenteile oder die gesamte Pflanze zur Energiegewinnung verbrannt oder fermentiert, oder es werden Öle für die Treibstoffherstellung gewonnen. Für die energetische Nutzung von Biomasse-Reststoffen ist nur der Teil der Prozesskette zu betrachten, der speziell mit der energetischen Nutzung verbunden ist.

#### 6.3.7.1 Prozessketten für Stückholz, Holz-Hackschnitzel und Holzgas aus Restholz

- Bereitstellung von Stückholz
- Holz-Hackschnitzel aus Restholz
- Gewinnung von Holz-Hackschnitzel
- Brennstoff-Aufbereitung und Trocknung
- Transport von Holz-Hackschnitzel
- Vergasung von Holz-Hackschnitzel

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Stückholz via Lkw | Holz-Hackschnitzel via<br>Lkw | Holzgas frei<br>Nutzer |
|--|-------------------|-------------------------------|------------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 0,8               | 6,0                           | 8,0                    |
| NO <sub>x</sub>                                    | 5,9               | 44,4                          | 18,3                   |
| Staub  | 0,4               | 3,6                           | 1,6                    |
| CO <sub>2</sub>                                    | 506               | 3 830                         | 10 496                 |
| CO   | 2,2               | 13,9                          | 11,1                   |
| CH <sub>4</sub>                                    | 0,3               | 2,0                           | 25,0                   |
| NMVOC  | 1,6               | 3,8                           | 3,0                    |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,0               | 0,1                           | 0,4                    |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 510               | 3 883                         | 10 760                 |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,01              | 1,06                          | 1,28                   |

Tabelle 35: Kenndaten der Prozessketten für Stückholz, Holz-Hackschnitzel und Holzgas

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

#### 6.3.7.2 Prozessketten für Stroh und Strohcobs aus Reststroh

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Stroh-Ballen via Lkw | Stroh-Cobs via Lkw |
|--|----------------------|--------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 0,8                  | 3,4                |
| NO <sub>x</sub>                                    | 6,2                  | 14,5               |
| Staub  | 0,4                  | 1,1                |
| CO <sub>2</sub>                                    | 530                  | 3 139              |
| CO   | 2,3                  | 8,5                |
| CH <sub>4</sub>                                    | 0,3                  | 6,3                |
| NMVOC  | 1,7                  | 3,5                |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,0                  | 0,1                |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 534                  | 3 229              |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,01                 | 1,05               |

Tabelle 36: Kenndaten der Prozesskette für Reststroh

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

Für die energetische Verwendung kommen Rest- und Überschussstroh in Frage. Aufgrund der Konkurrenz mit der stofflichen Nutzung (Einstreu, Bodenhilfsmittel, Futterzusatz ...) sind allerdings die Potentiale begrenzt, wenngleich durch den ökologisch gebotenen Verzicht auf das Abflammen von Überschussstroh regional beachtliche Strohmengen verfügbar gemacht werden können (Beispiel Dänemark).

- Gewinnung von Reststroh
- Strohaufbereitung
- Transport von Strohcocks

#### 6.3.7.3 Prozessketten für Biogas

Bei der Vergärung von organischen Reststoffen aus der Tierhaltung (Exkrememente, Futterreste) als Gülle oder Festmist entsteht methanhaltiges Biogas.

- Gewinnung und Transport von Gülle und Festmist
- Gülle-Fermentation
- Biogas aus organischen Hausmüll-Anteilen
- Sammlung und Transport des Biomülls
- Fermentation und Nachkompostierung

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Biogas dezentral | Biogas zentral | Biomüllgas zentral |
|--|------------------|----------------|--------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 0,1              | 0,3            | 0,0                |
| NO <sub>x</sub>                                    | 0,1              | 1,5            | 0,1                |
| Staub  | 0,0              | 0,2            | 0,0                |
| CO <sub>2</sub>                                    | 36               | 238            | 17                 |
| CO   | 0,3              | 1,1            | 0,3                |
| CH <sub>4</sub>                                    | 0,1              | 0,4            | 0,1                |
| NMVOG  | 0,0              | 0,3            | 0,0                |
| N <sub>2</sub> O                                   | 0,0              | 0,0            | 0,0                |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 38               | 247            | 18                 |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,36             | 1,21           | 1,67               |

Tabelle 37: Kenndaten der Prozessketten für Biogas frei Nutzer

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOG

#### 6.3.7.4 Prozessketten für Holz

Darunter versteht man den gezielten Anbau von schnell wachsenden Baumarten wie Pappeln, Erlen, Weiden und Espen. Diese Baumarten erzeugen große Biomasseerträge und können in Plantagen angebaut werden. Die Erforschung von schnell wachsenden Hölzern hinsichtlich Anbaubedingungen, Ernte-technik, Aufbereitung und Pflegebedarf befindet sich noch in der Erprobungsphase.

- Produktion von schnell wachsendem Holz in Plantagen
- Ernte von schnell wachsenden Hölzern
- Aufbereitung von schnell wachsenden Hölzern und Vergasung

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Holz-Hackschnitzel-NR | Holzgas aus Holz-<br>Hackschnitzel-NR |
|--|-----------------------|---------------------------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 4,6                   | 11,1                                  |
| NO <sub>x</sub>                                    | 71,4                  | 81,4                                  |
| Staub  | 1,5                   | 2,1                                   |
| CO <sub>2</sub>                                    | 2 809                 | 12 275                                |
| CO   | 6,9                   | 13,5                                  |
| CH <sub>4</sub>                                    | 5,1                   | 29,9                                  |
| NMVOG  | 5,7                   | 5,9                                   |
| N <sub>2</sub> O                                   | 16,3                  | 18,3                                  |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 7 260                 | 17 536                                |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,06                  | 1,32                                  |

Tabelle 38: Kenndaten der Prozessketten für Holz als nachwachsender Rohstoff

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOG

#### 6.3.7.5 Prozessketten für Chinagrass oder -schilf (*Miscanthus sinensis*)

Die in Japan, China, Korea und dem fernöstlichen Teil der GUS beheimatete Pflanze wurde vor 50 Jahren in DK eingeführt (dort gibt es bereits Anbauversuche für die Verwendung als Energiepflanze). Chinagrass oder auch Elefantengrass gehört zu den sog. C<sub>4</sub>-Pflanzen, die aufgrund einer modifizierten Photosynthese das Angebot an Sonnenenergie, Wasser und Nährstoffen effektiver als C<sub>3</sub>-Pflanzen (Weizen, Gerste, Rügen) nutzen und daher vergleichsweise mehr Biomasse produzieren.

- landwirtschaftliche Produktion
- Düngerbedarf und Ertrag
- Ernte
- Lagerung und Trocknung
- Verarbeitung und Transport

| Vorgelagerte Emissionen [kg/TJ <sub>end</sub> ] | Miscanthus via Lkw |
|---|--------------------|
| SO <sub>2</sub>                                 | 5,4                |
| NO <sub>x</sub>                                 | 39,1               |
| Staub   | 1,2                |
| CO <sub>2</sub>                                 | 3 420              |
| CO  | 11,3               |
| CH <sub>4</sub>                                 | 6,2                |
| NMVOC   | 2,2                |
| N <sub>2</sub> O                                | 7,9                |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                   | 5 627              |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]           | 1,05               |

Tabelle 39: Kenndaten der Prozesskette für Miscanthus

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

#### 6.3.7.6 Prozesskette für Raps und Rapsmethylester

- landwirtschaftliche Produktion und Ernte
- Umwandlung von Raps zu Sekundärenergieträgern (Rapsmethylester RME)
- Nebenprodukte der Raps-, Rapsöl- und RME-Bereitstellung

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | Rapsöl-brutto<br>(ohne Gutschrift) | Rapsöl-netto<br>(mit Gutschrift) | RME-brutto<br>(ohne Gutschrift) | RME-netto<br>(mit Gutschrift) |
|--|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 65,0                               | -14,7                            | 69,2                            | -10,5                         |
| NO <sub>x</sub>                                    | 478,6                              | 322,2                            | 484,8                           | 328,4                         |
| Staub  | 14,2                               | 8,6                              | 14,5                            | 8,9                           |
| CO <sub>2</sub>                                    | 39 278                             | 30 288                           | 46 133                          | 37 131                        |
| CO   | 43,6                               | 29,9                             | 48,1                            | 34,4                          |
| CH <sub>4</sub>                                    | 74,6                               | 60,9                             | 104,3                           | 90,5                          |
| NMVOC  | 26,5                               | 19,0                             | 27,6                            | 20,1                          |
| N <sub>2</sub> O                                   | 161,4                              | 131,1                            | 161,6                           | 131,2                         |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 83 688                             | 66 344                           | 90 907                          | 73 549                        |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 1,81                               | 0,67                             | 2,05                            | 0,90                          |

Tabelle 40: Kenndaten der Prozessketten für Rapsöl und RME

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

### 6.3.7.7 Prozesskette für Bioäthanol aus Zuckerhirse

Diese Möglichkeit der Bereitstellung von energetisch nutzbaren nachwachsenden Rohstoffen wird vor allem in Brasilien praktiziert.

- Anbau und Ernte von Zuckerhirse
- Äthanolherstellung

| vorgelagerte Emissionen [kg/TJ <sub>end</sub> ] | Bioäthanol via Lkw |
|---|--------------------|
| SO <sub>2</sub>                                 | 75,4               |
| NO <sub>x</sub>                                 | 276,8              |
| Staub   | 11,4               |
| CO <sub>2</sub>                                 | 50 339             |
| CO  | 44,5               |
| CH <sub>4</sub>                                 | 36,2               |
| NMVOC   | 21,8               |
| N <sub>2</sub> O                                | 51,9               |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                   | 64 742             |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]           | 1,95               |

Tabelle 41: Kenndaten der Prozesskette für Bioäthanol

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

### 6.3.8 Prozessketten für Strom

In diesem Bereich interessieren die verschiedenen Arten der Strombereitstellung für generische Anwendungen. Hierzu ist es notwendig, die Verteilung der Stromerzeugung nach Kraftwerkstypen und Brennstoffen sowie die Eigenschaften des Stromtransports festzustellen.

- Bereitstellung von Netzstrom
- Bereitstellung von Bahnstrom

| vorgelagerte Emissionen<br>[kg/TJ <sub>end</sub> ] | mittlerer<br>Strom (Mix) | Grundlast-<br>strom | Fahrstrom<br>Bahn | Heizstrom<br>(Mix) | Heizstrom<br>(Kohle) |
|--|--------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| SO <sub>2</sub>                                    | 141,7                    | 118,3               | 131,9             | 196,0              | 222,7                |
| NO <sub>x</sub>                                    | 232,5                    | 133,9               | 146,9             | 194,4              | 222,2                |
| Staub  | 22,8                     | 18,1                | 18,2              | 26,5               | 30,8                 |
| CO <sub>2</sub>                                    | 197 790                  | 171 261             | 182 468           | 235 484            | 270 161              |
| CO   | 160,3                    | 59,6                | 78,8              | 124,6              | 131,4                |
| CH <sub>4</sub>                                    | 488,2                    | 203,4               | 652,2             | 974,1              | 1 376,9              |
| NMVOC  | 22,3                     | 3,6                 | 8,4               | 10,6               | 13,1                 |
| N <sub>2</sub> O                                   | 7,6                      | 4,6                 | 7,7               | 11,0               | 13,8                 |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente*                      | 205 212                  | 174 749             | 191 720           | 249 167            | 289 036              |
| Primärenergie [TJ/TJ <sub>end</sub> ]              | 3,22                     | 2,86                | 2,73              | 2,96               | 2,92                 |

Tabelle 42: Kenndaten der aktualisierten Strom-Prozesskette frei Verbraucher

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von Methan, Kohlenmonoxid, NO<sub>x</sub> und NMVOC

Ein weiteres Kapitel im GEMIS-Bericht umfasst die Untersuchung der Energieprozesse. Es werden darin Energiekenndaten für konventionelle und zukünftige Kraft- und Heizkraftwerke, von Spitzenkesseln und Wärmeverteilsystemen sowie von Heizsystemen (Festbrennstofföfen, Ölöfen, Gasöfen ...) analysiert.

Ein weiterer Bereich umfasst die

- Emissionsdaten von kohlebefeuernden Kraft- und Heizkraftwerken (Emissionen von Prozessen mit Steinkohle, mit Braunkohle aus West- und Ostdeutschland)
- Emissionsdaten von ölbetriebenen Kraft- und Heizkraftwerken (Feuerungen, Gasturbinensysteme, Dieselmotoren, Wärmepumpenanlagen)
- Emissionen gasbetriebener Kraft- und Heizkraftwerke (Feuerungen, Gasturbinensysteme, Motorenanlagen, Wärmepumpenanlagen)
- Emissionen von Heizsystemen (Prozesse zur Wärmebereitstellung aus Kohle, Prozesse zur Wärmebereitstellung aus Öl und Gas, Prozesse zur Wärmebereitstellung aus Biomasse mit Holzfeuerung und Strohfeuerung)
- Emissionsdaten von sonstigen Energieträgern (aus Müllverbrennung, Nutzung von Wasserstoff, regenerativer Energien, Prozessen für „NegaWatt“)

## 6.4 Verkehrsprozesse

Die Betrachtung von Verkehrssystemen zielt wegen der Grundgröße „Verkehrsleistung“ auf Emissionen pro Kilometer ab, womit zur Umrechnung auf energiebezogene Emissionsfaktoren Angaben zum spezifischen Treibstoffbedarf erforderlich sind.

Als Basis für die Verkehrssysteme in GEMIS 2.1 wurde eine Anzahl von Arbeiten verwendet, die im Bereich des motorisierten Individualverkehrs auf Arbeiten des Umweltbundesamtes und auf Studien der Klima-Enquête-Kommission (IFEU, TÜV, Rheinland) und im Bereich des Güterverkehrs auf Untersuchungen für den Bundesminister (DIW, PROGROS, VIA) beruhen.

Die Tabellen zeigen für den Privatverkehr die Emissionsdaten für Otto-Motoren mit und ohne Kat, für Dieselmotoren, für Elektrofahrzeuge, für Fahrzeuge mit Rapsöl- oder RME-Betrieb, für Pkw mit Bioäthanol und für LH<sub>2</sub>-Fahrzeuge mit Brennstoffzellen. Für den öffentlichen Verkehr umfassen die Tabellen Emissionsdaten von Dieseln und -bahnen und Flugzeugverkehr. Im Bereich Gütertransport werden die Emissionen von Lastkraftwagen, der Bahn, Schiffen, Flugzeugen und dem Pipeline-Betrieb analysiert.

## 6.5 Materialprozessketten

Neben den direkten Emissionen von Energie- und Verkehrssystemen und den Schadstoffangaben durch vorgelagerte Prozesse beinhaltet das Computermodell GEMIS 2.0 bzw. 2.1 auch Daten über jene Umweltaspekte, die mit der Herstellung der Energie- und Verkehrssysteme verbunden sind. Das Ziel ist neben direkten und vorgelagerten Emissionen auch die Herstellung und damit den Materialpfad zu berücksichtigen.

Unter Materialaufwand sind alle mit der Rohmaterialherstellung, -verarbeitung und der Konstruktion des Prozesses verbundenen Vorleistungen zu verstehen. Ergänzend treten die Aufwendungen für Abriss und Entsorgung der Anlagen hinzu, da diese zum Lebenszyklus dazugehören. Bei vielen Prozessen sind auch wesentliche Teile der Komponenten recycelbar.

| Emissionen [kg/t]            | Aluminium | Glas  | Kupfer | Kunststoffe | Simono* | Simulti* | Simorph* | Stahlmix | Zement |
|------------------------------|-----------|-------|--------|-------------|---------|----------|----------|----------|--------|
| SO <sub>2</sub>              | 41,9      | 0,2   | 16,3   | 3,5         | 162,1   | 102,6    | 106,2    | 3,4      | 0,4    |
| NO <sub>x</sub>              | 34,0      | 1,5   | 16,4   | 2,3         | 267,4   | 169,0    | 175,0    | 4,6      | 2,4    |
| Staub                        | 6,8       | 1,1   | 1,5    | 0,3         | 29,1    | 18,8     | 17,0     | 0,6      | 1,0    |
| CO <sub>2</sub>              | 15 730    | 948   | 2 633  | 1 555       | 221 602 | 137 757  | 150 732  | 1 558    | 898    |
| CO                           | 160,8     | 0,3   | 4,0    | 1,1         | 155,3   | 97,0     | 104,8    | 23,9     | 0,4    |
| CH <sub>4</sub>              | 17,2      | 1,5   | 2,9    | 3,5         | 539,0   | 334,0    | 369,9    | 6,8      | 1,7    |
| NMVOC                        | 1,7       | 0,0   | 0,6    | 0,8         | 25,3    | 16,0     | 16,7     | 0,6      | 0,0    |
| N <sub>2</sub> O             | 0,5       | 0,0   | 0,1    | 0,1         | 8,6     | 5,4      | 5,8      | 0,0      | 0,2    |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente | 16 063    | 970   | 2 700  | 1 609       | 229 851 | 142 879  | 156 369  | 1 638    | 957    |
| Primärenergie [GJ/t]         | 248,1     | 10,7  | 37,7   | 68,6        | 3 631,0 | 2 264,0  | 2 457,0  | 20,2     | 4,4    |
| Primärmaterial [kg/t]        | 5 062     | 1 106 | 3 045  | 1 120       | 1 477   | 1 477    | 1 477    | 897      | 1 002  |

Tabelle 43: Kenndaten der Materialbereitstellung in GEMIS 2.1

\* Siliziumbereitstellung inkl. Zellen- und Modulfertigung für eine zukünftige Großproduktion

| Emissionen [kg/t]             | Ammoniak | Kalk  | Mineralwolle | Mineralöl-Produkte | Stickstoffdünger | Ziegel |
|-------------------------------|----------|-------|--------------|--------------------|------------------|--------|
| SO <sub>2</sub>               | 0,1      | 0,4   | 2,2          | 2,4                | 4,2              | 0,6    |
| NO <sub>x</sub>               | 1,1      | 0,2   | 2,9          | 1,4                | 101,6            | 0,3    |
| Staub                         | 0,0      | 1,0   | 1,2          | 0,2                | 0,1              | 1,0    |
| CO <sub>2</sub>               | 1 214    | 644   | 1 127        | 623                | 2 343            | 302    |
| CO                            | 0,8      | 0,1   | 0,5          | 0,5                | 2,1              | 0,1    |
| CH <sub>4</sub>               | 6,5      | 0,3   | 1,5          | 1,3                | 8,5              | 0,4    |
| NMVOC                         | 0,1      | 0,0   | 0,1          | 0,8                | 4,9              | 0,0    |
| N <sub>2</sub> O              | 0,0      | 0,0   | 0,1          | 0,0                | 0,2              | 0,0    |
| CO <sub>2</sub> -Äquivalente* | 1 293    | 650   | 1 161        | 642                | 2 480            | 311    |
| Primärenergie [GJ/t]          | 46,1     | 2,5   | 11,7         | 49,8               | 52,6             | 3,2    |
| Primärmaterial [kg/t]         | 1 521    | 1 001 | 1 104        | 1 007              | 1 523            | 1 001  |

Tabelle 44: Kenndaten der Hilfsmaterialbereitstellung in GEMIS 2.1

\* Für 100 Jahre Integrationszeitraum, ohne indirekte Effekte von CH<sub>4</sub>, CO, NMVOC und NO

Sie stehen als Sekundärprodukt wieder zur Verfügung, womit sich das dem Prozess zurechenbare Primärprodukt verringern kann.

In GEMIS 2.0 bzw. 2.1 werden die Emissionsdaten für die Prozessketten von Aluminium, Glas, Kupfer, Kunststoffen, für Solar-Silizium, Stahl und Zement bestimmt, die sich sowohl aus den direkten Angaben als auch aus den Hilfsenergie- und Transportbedarfen ergeben.

Tabelle 43 und 44 zeigen eine Übersicht.

Ergänzend zu den genannten Materialien zur Herstellung von Prozessen werden in GEMIS auch Hilfsprodukte für den Betrieb von Energieprozessen bzw. bei der Materialherstellung benötigt. Für diese Stoffe wurden mit Hilfe von CORINAIR, UBA-Werten und eigenen Abschätzungen grobe Prozessketten ermittelt, die direkte und energiebedingte Emissionen umfassen.

Es werden keine Transport- und Verarbeitungsschritte angenommen, womit die Ergebnisse eine untere Grenze für die Umwelteffekte darstellen. Die Datengüte ist sowohl bei Baumaterialien als auch bei Hilfsmaterialien noch relativ schlecht.

### 6.5.1 Materialdaten für Prozesse

Die Definition der Zusammensetzung von Energiesystemen hinsichtlich emissionsseitig interessanter Materialien wird anhand von Modell-Prozessen durchgeführt.

| Kenngroße                  | Onshoreförderung | Offshoreförderung | Modell-Raffinerie |
|----------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Stahl [t]                  | 77 000           | 115 000           | 35 000            |
| Zement [t]                 | 30 000           | 45 000            | 50 000            |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 1 000            | 1 000             | 1 000             |

Tabelle 45: Prozesskette Erdöl

| Kenngroße                  | Onshoreförderung | Offshoreförderung | Gasaufbereitung |
|----------------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| Stahl [t]                  | 10 000           | 15 000            | 30 000          |
| Zement [t]                 | 20 000           | 30 000            | 60 000          |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 1 000            | 1 000             | 1 000           |

Tabelle 46: Prozesskette Erdgas

| Kenngroße                  | GUS     | NL     | NOR    | national | lokal |
|----------------------------|---------|--------|--------|----------|-------|
| Stahl [t]                  | 280 000 | 24 000 | 68 000 | 12 000   | 5 000 |
| Plastik [t]                | 0       | 0      | 0      | 0        | 5 000 |
| Entfernung [km]            | 7 000   | 600    | 1 700  | 250      | 10    |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 1 000   | 1 000  | 1 000  | 1 000    | 100   |

Tabelle 47: Prozesskette Erdgas-Transport

| Kenngroße                  | Steinkohle/Tiefbau | Braunkohle/Tagbau | Kohle/Brikettfabrik |
|----------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Stahl [t]                  | 100 000            | 70 000            | 1 000               |
| Zement [t]                 | 100 000            | 0                 | 5 000               |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 15 000             | 15 000            | 500                 |

Tabelle 48: Input-Werte zur Kohle-Förderung und -Aufbereitung

| Kenngroße                  | Mine   | UF <sub>6</sub> | Anreicherung | BE-Fabrik |
|----------------------------|--------|-----------------|--------------|-----------|
| Stahl [t]                  | 5 000  | 8 000           | 700          | 1 000     |
| Zement [t]                 | 1 000  | 20 000          | 1 500        | 10 000    |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 13 800 | 8 000           | 10 000       | 20 000    |

Tabelle 49: Input-Werte für die Uran-Prozesskette

| Kenngröße                  | Steinkohle | Braunkohle | Öl und Gas<br>DT | Öl und Gas<br>GT | Wasserkraft | Atomkraft-<br>werk |
|----------------------------|------------|------------|------------------|------------------|-------------|--------------------|
| Stahl [t]                  | 70 000     | 72 000     | 22 500           | 1 250            | 20 000      | 125 000            |
| Zement [t]                 | 175 000    | 150 000    | 67 500           | 3 250            | 100 000     | 875 000            |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 700        | 600        | 450              | 50               | 50          | 1 250              |

Tabelle 50: Input-Werte für die Errichtung großer Kraftwerke

| Kenngröße                  | Hochspannung | Niederspannung |
|----------------------------|--------------|----------------|
| Stahl [t]                  | 625 000      | 45 000         |
| Zement [t]                 | 31 250       | 4 500          |
| Entfernung [km]            | 1 000        | 10             |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 1 000        | 100            |

Tabelle 51: Input-Werte für die Stromverteilung

| Kenngröße                  | dezentral | zentral |
|----------------------------|-----------|---------|
| Kupfer [t]                 | 0,2       | 10      |
| Stahl [t]                  | 1,5       | 100     |
| Glas [t]                   | 0,75      | 55      |
| Kunststoff [t]             | 0,5       | 50      |
| Silizium [t]               | 0,25      | 25,5    |
| Zement [t]                 | 0         | 545     |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,01      | 1,0     |

Tabelle 52: Input-Werte für Solarzellen

| Kenngröße                  | Wind-klein | Wind-mittel | Wind-groß |
|----------------------------|------------|-------------|-----------|
| Stahl [t]                  | 10         | 50          | 125       |
| Kunststoff [t]             | 2          | 7,5         | 10        |
| Zement [t]                 | 50         | 300         | 750       |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 100        | 500         | 1 000     |

Tabelle 53: Input-Werte für Windkraftwerke

| KenngroÙe                  | Reaktivierung | Sanierung | Neubau |
|----------------------------|---------------|-----------|--------|
| Stahl [t]                  | 1,5           | 11        | 11     |
| Zement [t]                 | 2,5           | -         | 20     |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,01          | 0,10      | 0,10   |

Tabelle 54: Input-Werte für kleine Wasserkraftwerke

| KenngroÙe                  | Stk-EK | BrK-EK | StK-GD | BrK-GD |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Stahl [t]                  | 10 000 | 12 000 | 5 000  | 5 000  |
| Zement [t]                 | 40 000 | 48 000 | 20 000 | 24 000 |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 100    | 100    | 50     | 50     |

Tabelle 55: Input-Werte für kohlebetriebene Heizkraftwerke

| KenngroÙe                  | Gas-GT-HKW | Gas-GT-HKW | Gas-GuD-HKW | Gas-GuD-HKW |
|----------------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Stahl [t]                  | 200        | 750        | 1 250       | 2 000       |
| Zement [t]                 | 100        | 500        | 4 750       | 8 500       |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 10         | 50         | 50          | 100         |

Tabelle 56: Input-Werte für Öl- und Gas-HKW mit Gasturbinen

| KenngroÙe                  | Mager-mini | Kat-klein | Kat-mittel | Kat-groÙ | Mager-groÙ |
|----------------------------|------------|-----------|------------|----------|------------|
| Stahl [t]                  | 0,5        | 1         | 5          | 7        | 10         |
| Zement [t]                 | 1          | 10        | 25         | 45       | 50         |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,005      | 0,05      | 0,25       | 0,50     | 1,0        |

Tabelle 57: Input-Werte für Gasmotor-BHKW

| KenngroÙe                  | BHKW klein | BHKW groÙ |
|----------------------------|------------|-----------|
| Stahl [t]                  | 3          | 15        |
| Zement [t]                 | 20         | 75        |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,1        | 1,0       |

Tabelle 58: Input-Werte für Dieselmotor-BHKW

| KenngroÙe                  | Hausverteilung | Nah-EFH | Nah-MFH | Nah-Misch | Fernwärme |
|----------------------------|----------------|---------|---------|-----------|------------|
| Stahl [t]                  | 0,15           | 0,5     | 0,6     | 1,8       | 1 300      |
| Kunststoff [t]             | 0,01           | 1,9     | 2,3     | 6,8       | 50         |
| Zement [t]                 | 0              | 0,3     | 0,3     | 0,9       | 100        |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,01           | 0,25    | 0,3     | 0,9       | 100        |

Tabelle 59: Input-Werte für Wärmenetze

| KenngroÙe                  | Ol-Heizung | Gas-Heizung | Brikett-Heizung | Holz-Heizung |
|----------------------------|-------------|-------------|-----------------|--------------|
| Stahl [t]                  | 0,40        | 0,20        | 0,25            | 0,25         |
| Zement [t]                 | 0,01        | 0,01        | 0,01            | 0,01         |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,01        | 0,01        | 0,01            | 0,01         |

Tabelle 60: Input-Werte für Heizsysteme (inkl. Hausverteilung)

| KenngroÙe                  | Ol-Ofen | Elektrospeicher | Brikett-Ofen |
|----------------------------|----------|-----------------|--------------|
| Stahl [t]                  | 0,055    | 0,20            | 0,05         |
| Zement [t]                 | 0        | 0,5             | 0            |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,005    | 0,005           | 0,005        |

Tabelle 61: Input-Werte für Einzel-Heizsysteme (ohne Hausverteilung)

| KenngroÙe                  | elektrobivalent | elektromonovalent | Gas-Absorption |
|----------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| Stahl [t]                  | 0,275           | 0,40              | 0,40           |
| Zement [t]                 | 0,135           | 0,26              | 0,11           |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,005           | 0,01              | 0,01           |

Tabelle 62: Input-Werte für Wärmepumpen (inkl. Hausverteilung)

| KenngroÙe                  | Kupfer-Kollektor | Plastik-Kollektor | Solar-Heizkraftwerk* |
|----------------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| Aluminium [t]              | 0,045            | 0                 | 106                  |
| Stahl [t]                  | 0,061            | 0                 | 245                  |
| Kupfer [t]                 | 0,020            | 0,006             | 21                   |
| Glas [t]                   | 0,050            | 0                 | 165                  |
| Plastik [t]                | 0,051            | 0,057             | 423                  |
| Zement [t]                 | 0                | 0                 | 2 417,5              |
| Output [MW <sub>th</sub> ] | 0,001            | 0,001             | 3,6                  |

Tabelle 63: Input-Werte für Solarkollektoren

\* Inkl. des saisonalen Speichers und Wärmenetzes, zukünftiges System mit 80 % solarem Deckungsanteil

### 6.5.2 Materialdaten für Verkehrssysteme

| KenngroÙe      | Otto | Diesel | Elektro |
|----------------|------|--------|---------|
| Stahl [t]      | 0,85 | 0,95   | 0,95    |
| Kupfer [t]     |      |        | 0,05    |
| Kunststoff [t] | 0,15 | 0,15   | 0,15    |

Tabelle 64: Input-Werte für heutige Personenkraftwagen

| KenngroÙe      | Lkw | Zug | Schiff | Tanker  |
|----------------|-----|-----|--------|---------|
| Stahl [t]      | 8   | 300 | 1 000  | 20 000  |
| Kunststoff [t] | 1   |     |        |         |
| Nutzlast [t]   | 10  | 100 | 20 000 | 120 000 |

Tabelle 65: Input-Werte für Güterverkehrsmittel

## 6.6 Kostendaten in GEMIS 2.1

In GEMIS 2.1 ist zusätzlich eine Kostenbilanzierung möglich. Es soll damit eine Orientierung über die groben ökonomischen Konsequenzen geben und damit eine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit unterstützen.

Die Rechenmethode zur Bestimmung der betrieblichen Kosten ist einfach gehalten. Aus den Investitionskosten von Prozessen werden über einen von den NutzerInnen vorgegebenen einheitlichen Zinssatz und Betrachtungszeitraum die Kapitalkosten annuitätisch als Jahreskosten ermittelt. Dazu werden die jährlichen Fixkosten, variable Betriebskosten und Brenn- oder Treibstoffkosten gezählt. Die Kostenbetrachtung in GEMIS ist eine reine Bilanzierung, die von allen weiteren Details absieht. Ebenfalls werden in GEMIS keine Kosten für Materialvorleistungen berücksichtigt, weil die Daten zu Investitions- und Betriebskosten der Prozesse schon Ausgaben für Hilfs- und Betriebsmittel enthalten und die Materialien zum Bau eines Kraftwerks in den Investitionskosten implizit berücksichtigt sind.

Neben den direkten betriebswirtschaftlichen Kosten erlaubt GEMIS 2.1 auch externe Kosten zu bestimmen, die durch die Emission von Luftschadstoffen und Treibhausgasen entstehen. Für die Bewertung von externen Effekten von Energiesystemen verwendet das Ökoinstitut die indirekte Methode der Monetarisierung – den Vermeidungskostenansatz.

Es wird in GEMIS 2.1 vielfach auf bereits vorhandene Studien verwiesen.

Die Ergebnisse von GEMIS 2.1 zeigen Übereinstimmung mit der US-Studie PACE aus dem Jahr 1990. Es werden zusätzlich deutsche Studien angegeben, wie sie von Hohmeyer 1990 und ISI 1989 durchgeführt wurden.

## 6.7 Neuerungen in GEMIS 3.0

Mit der aktuellen Version 3.0 wurde GEMIS um weitere Daten, insbesondere im Verkehrsbereich und bei den Stoffströmen ergänzt. Die neuen Daten aus GEMIS 3.0 sind besser abgesichert als die in GEMIS 2.1. Bei den Energieprozessen wurden die Kosten aktualisiert und fremde Daten (z.B. IKA-RUS-Projekt des Bundesforschungsministeriums) berücksichtigt. Generell sind hier die Ergebnisse mit denen aus GEMIS 2.1 vergleichbar. GEMIS wurde auf WINDOWS umgestellt.

Neuerungen im Einzelnen:

- Alle Verbrennungsprozesse (thermische Kraftwerke, Kessel, Heizungen) können mit eigenständigen Emissionsminderungsmodulen verknüpft werden; die GEMIS-Datenbank enthält eine Vielzahl solcher Technologien für verschiedene Brennstoffe und Leistungsklassen (z.B. Entstaubungs-, Entschwefelungs- und Entstickungsverfahren).
- Alle Prozesse sind mit einem Ortsbezug versehen, damit kann GEMIS genau ermitteln, wo Emissionen anfallen. Der Ortsbezug umfasst die einzelnen EU-Staaten, die GUS, Staaten in Afrika sowie Australien und die USA. Daneben wurden bestimmte Regionen (OPEC, Tropen) definiert.
- Alle Datensätze haben eine Datenquelle - neben den vom Öko-Institut definierten findet man in GEMIS 3.0 nun auch Daten von Dritten (IKARUS, UBA zu Pkw und Lkw, GH Kassel zu Landwirtschaft und Ernährung).
- Die Stoffprozesse wurden drastisch erweitert, komplett überarbeitet und aktualisiert. Neben Grund- und Baustoffen sind auch regionalspezifische Importe (z.B. Aluminium) mit erfasst.
- Die Kostendaten für Energiesysteme wurden aktualisiert.
- Alle Kostendaten wurden auf DM-1996 umgerechnet.

- Bei der Bewertungshilfe zur Klimarelevanz wurden die neuesten Daten des IPCC (von 1996) zu den CO<sub>2</sub>-Äquivalenzfaktoren (inkl. FCKW und FKW) berücksichtigt.

Im Sommer 1998 war eine weitere Datenaktualisierung geplant, wobei hierzu vorwiegend auf Ergebnisse laufender Forschungsprojekte für das Umweltbundesamt zurückgegriffen wurde.

Darüber hinaus sind seit Ende 1997 spezielle Länderdatensätze für Luxemburg, Österreich und Tschechien verfügbar. Am 5. Oktober 1998 wurde die neue Österreichadaption im Umweltbundesamt der Öffentlichkeit präsentiert und steht seitdem kostenlos zur Verfügung. Bislang wurde das Modell für interne Zwecke verwendet.

Die Daten aus GEMIS wurden für die Erstellung des Klimaschutzberichtes und für Vergleiche zwischen Heizsystemen genutzt. Weiters wurden in Österreich für die Städte Wien und Villach Emissionsbilanzen vom Österreichischen Ökologie-Institut erstellt. Im Rahmen der Studie „LCP<sup>42</sup>-Maßnahmen in Österreich“ vom Österreichischen Ökologie-Institut wurde für die Abschätzung des Emissionsreduktionspotentials einzelner LCP-Maßnahmen ebenfalls GEMIS verwendet. Mit der Präsentation am 5. Oktober 1998 wurde auch eine CD-ROM veröffentlicht, auf der die für die Österreich-Anpassung erstellten Studien enthalten sind.

Die detaillierten aktuellen Ergebnisse sind im Anhang von GEMIS 3.0 zu finden. Mit diesen Tabellen ist eine Bilanzierung vorgelagerter Prozessketten unabhängig vom Computerprogramm möglich.

## 6.8 Stand der GEMIS-Anpassung für Österreich (Ende 1998)

| Anpassungsschritt                            | bereits vorhanden/beauftragt   | noch offen   |
|--|--|--|
| <b>Primärenergie - Endenergie</b>            | schriftlicher Bericht über die Emissionsfaktoren CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> für fossile Energieträger vom Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik (zum Teil erst beauftragt)<br><br>Modellierung der Strom- und Fernwärmebereitstellung (ÖKO-I) GEMIS-BRD | CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , NMVOC, HF, HCL, N <sub>2</sub> O und Staub<br><br>erneuerbare Energieträger: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub></li> <li>▪ NMVOC, HF, HCL, N<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und Staub</li> </ul> Workshop |
| <b>Endenergie - Nutzenergie</b>              | Literaturstudie: Emissionsfaktoren der Raumwärmeversorgung (Joanneum Research)<br><br>Messung der Emissionen von Kleinf Feuerungsanlagen<br><br>Emissionsfaktoren industrieller Prozesse   | Nutzbarmachung und Erweiterung der Ergebnisse für eine GEMIS-Anpassung in Form eines Berichts<br><br><br><br><br>Workshop  |
| <b>Nutzenergie - Energiedienstleistung</b>   |  | Nutzbarmachung und Erweiterung der Ergebnisse für eine GEMIS-Anpassung in Form eines Berichts<br><br>Workshop  |
| <b>Graue Energie</b>                         | für Materialverbrauch und Herstellung ausländischer Anlagen können die deutschen GEMIS-Werte übernommen werden   | Material- und Reststoffprozesse in Österreich: CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NMVOC, HF, HCL, N <sub>2</sub> O, CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> und Staub   |
| <b>Kosten</b>                                | interne Kosten einzelner Technologien und Anlagen (LCP-Studie der EVA, ÖKO-Institut)   | sonstige interne Kosten<br>externe Kosten  |
| <b>Regionalisierung</b>                      | CO <sub>2</sub> - und CH <sub>4</sub> -Emissionsbilanzen für Wien (ÖKO-Institut)   | übrige Bundesländer<br>Workshop  |
| <b>Adaptierung des Computermodells GEMIS</b> | CO <sub>2</sub> - und CH <sub>4</sub> -Emissionen in Wien, Ergebnisse der Studien von Prof. Hackl und DI Mauschwitz, österreichischer Kraftwerkspark, wichtige Fernwärme- werke  | Aufbereitung der ermittelten Inputdaten, Adaptierung des Computermodells und Erstellung eines Benutzerhandbuches   |

Tabelle 66: Übersicht über den Stand der GEMIS-Anpassung für Österreich

## 7. Ermittlung von Emissions- und kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen für erweiterte Wirtschaftlichkeitsberechnungen

(Modell Amt für Bundesbauten, Schweiz)

### 7.1 Modellbeschreibung

Das Schweizer Amt für Bundesbauten (AFB) und einige Kantone und Gemeinden in der Schweiz schreiben für öffentliche Aufträge (Gebäude) die Einberechnung der externen Kosten vor. Bei herkömmlichen Wirtschaftlichkeits- und Investitionsrechnungen wird die Umweltbelastung verschiedener Energiesysteme nicht mit einbezogen.

So genannte **erweiterte Wirtschaftlichkeitsberechnungen** (Erweiterung um gesamtwirtschaftliche Kosten) ermöglichen die Mitberücksichtigung der externen Kosten im Rahmen von Planungen, Projektierungen und Kosten-/Nutzen-Analysen. Dabei werden in den Bereichen Gebäudehülle und Haustechnik (Energiesystem) zu den aktuellen Energiepreisen der eingesetzten Energieträger die externen Kosten in Form von Emissions-, Energie- und Risikozuschlägen addiert. Durch die neue Wirtschaftlichkeitsberechnung werden innovative Technologien künftig nicht mehr benachteiligt und somit Lösungen realisiert, die auf längere Sicht kostenoptimaler sind.

Die verbindliche Anwendung der Energiepreiszuschläge des „Modells AFB“ bei kantonalen und kommunalen Projekten (öffentliche Gebäude und Anlagen) zwecks Internalisierung der externen Kosten war bis 1998 in den Kantonen Bern, Zug, Basel-Land, Basel-Stadt, Thurgau, Neuchâtel verwirklicht, im Kanton Solothurn ist die Modellanwendung eingeführt, aber nicht verbindlich. Bisher wurde bereits eine große Zahl potentieller Investitionsmöglichkeiten mit Energiepreiszuschlägen und ohne durchgerechnet: Das Resultat ist, dass früher als unwirtschaftlich beurteilte Energiesparmaß-

nahmen sich unter Anrechnung ihrer externen Kosten oft als gesamtwirtschaftlich rentabel erweisen.

Im Energieplanungsbericht 1998 soll u.a. dargelegt werden, dass der Einfluss von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen beschränkt ist. Energetische Maßnahmen an Neubauten (z.B. Einbau von Fenstern und Fassaden mit hochwertiger Wärmedämmung) sind meist auch ohne Berücksichtigung der externen Kosten wirtschaftlich. Dies ist auch dann der Fall, wenn Bauteile im Rahmen des Gebäudeunterhalts ohnehin ersetzt oder umfassend erneuert werden. Hingegen sind energetische Maßnahmen an Bauteilen trotz Berücksichtigung der externen Kosten meist nicht wirtschaftlich, wenn sie allein aus Gründen der rationellen Energienutzung durchgeführt werden. Bei Investitionen, die der Nutzung erneuerbarer Energien (Holz, Fernwärme, Umgebungswärme) dienen, kann sich der Einbezug externer Kosten auf die Entscheidungsfindung auswirken. Das sind aber in der Regel Sonderprojekte, die ohnehin außerhalb von Routineabläufen entschieden werden. Hier werden die externen Kosten in die Entscheidungsfindung einbezogen.

Weil sich der Einbezug externer Kosten nur in Sonderfällen auf Bauentscheide auswirkt und zudem die Wirtschaftlichkeit kaum je allein ausschlaggebend für Entscheide ist, soll das Verfahren der Berücksichtigung der externen Kosten nicht generell angewendet werden. Vielmehr werden in jedem Einzelfall eingehende Abklärungen über die sinnvollste Lösungsvariante vorgenommen. Dabei werden alle Elemente (Bau- und Haustechnik) im Interesse einer sinnvollen Gesamtlösung in die Betrachtung einbezogen.

Bei Sonderprojekten werden für die Entscheidungsfindung die externen Kosten als weiteres Kriterium einbezogen, wenn die übrigen nicht zu einer eindeutigen Beurteilung führen. Ein Beispiel für ein solches Sonderprojekt ist die Nutzung der Abwärme des Elektrizitätswerks Rheinau durch die Psychiatrische Klinik Rheinau. Die durch den Einbezug der externen Kosten verbesserte Wirtschaftlichkeit war ein entscheidender Faktor für die Bewilligung dieses Vorhabens<sup>43</sup>.

Im Folgenden wird die Berechnungsvariante der ermittelten kalkulatorischen Energiepreiszuschläge beschrieben. Die Energiepreiszuschläge basieren auf den **Durchschnittswerten** der für die Schweiz errechneten externen Kosten der Verbrennung von Erdgas, Heizöl und Holz in der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS - Publikation „Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“ (1996).

Theoretisch müsste die Ermittlung der kalkulatorischen Energiepreiszuschläge (KEPZ) auf Basis einer Grenzkostenbetrachtung erfolgen. Werden die Durchschnittskosten verwendet, so wird angenommen, dass jede Einheit Umweltbelastung (z.B. Luftschadstoffe) gleich hohe Kosten verursacht und somit konstante Kostenverläufe zu erwarten sind (konstante externe Grenzscha­denkosten). In der

Realität steigen aber die Folgekosten je Tonne Schadstoffe, je höher die emittierte Schadstoffmenge ist, d.h. die Grenzkosten steigen an und liegen somit über den Durchschnittskosten.

Im INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Projekt werden jedoch, um eine praktische Anwendung durchzuführen, Vereinfachungen vorgenommen und somit **durchschnittliche Emissions- (EMZ) bzw. Energiepreiszuschläge (KEPZ)** ermittelt. Die Zusammenhänge Energieverbrauch - Emissionen - Immissionen - Schäden müssten sonst zeitlich, räumlich und nach Schadstoff differenziert werden, was jedoch aufgrund der vorhandenen wissenschaftlichen Forschungsergebnisse nur sehr bedingt möglich ist.

Aufgrund der Entstehung von Schäden infolge von Synergieeffekten einzelner Schadstoffe muss der Einfluss der einzelnen Schadstoffimmissionen gewichtet werden. Im INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Projekt erfolgt dies durch:

1. eine relative Gewichtung nach Maßgabe jener Emissionsmenge, die den zugrunde liegenden Zielwert überschreitet und
2. eine grobe Gewichtung der Schadstoffe aufgrund ihrer relativen Schädlichkeit (**Toxizitätsfaktoren**)

|                          | <b>Toxizitätsfaktor, bezogen auf Kohlenmonoxid (CO)</b> |                |                   |
|--------------------------|---|----------------|-------------------|
|                          | <i>Mensch</i>   | <i>Gebäude</i> | <i>Vegetation</i> |
| <i>CO (Referenzwert)</i> | 1   | 1              | 1                 |
| <i>SO<sub>2</sub></i>    | 100   | 100            | 125               |
| <i>NO<sub>x</sub></i>    | 125   | 125            | 125               |
| <i>NM VOC</i>            | 100   | 100            | 100 - 200         |
| <i>Staub</i>             | 100   | 100            | 100               |

Tabelle 67: Toxizitäts- bzw. Schädlichkeitsfaktoren von Luftschadstoffen bezogen auf Kohlenmonoxid nach Schadenbereich; Quelle: INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996), „Die vergessenen Milliarden- Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“.

Aufgrund der Datenlage für die Schweiz wurde keine saisonale Differenzierung durchgeführt. Eine regionale Differenzierung erfolgte bei Gebäuden und Gesundheitsschäden nach Belastungsgebieten (Agglomeration, Stadt, Land). Grundsätzlich wurden die errechneten KEPZ nicht lokal differenziert.

Rußpartikel) bzw. der Einsatz von Energieträgern in Systemen zur Energieproduktion, -verteilung oder -nutzung.

Der schweizerische Energieverbrauch und die Schadstoffemissionen beziehen sich auf das Jahr 1993. Warum orientiert man sich an grenzwertüberschreitenden Emissionsmengen?

## 7.2 Emissionszuschläge (EMZ)

$$EMZ = [SFR/kg \text{ Schadstoff}] = \frac{\text{Schadenskosten}^*}{\text{Gesamtemission}^{**}}$$

\* energiebedingte externe Kosten der Luftverschmutzng.

\*\* grenzwertüberschreitend

Die physische Ursache der jeweiligen externen Effekte ist immer eine energiebedingte Emission (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC, SO<sub>2</sub>, Radionuklide, Staub-

Wirtschaftliche Entscheidungen basieren auf Grenzkostenentscheidungen und nicht auf externen Durchschnittskosten. Die Grenzkosten können jedoch zur Zeit mit den verfügbaren Informationen nicht ermittelt werden. Stattdessen wird eine grobe Annäherung durchgeführt, indem die externen Kosten nicht auf die gesamten emittierten Schadstoffmengen umgelegt werden, sondern nur auf die Emissionsmengen, die über den Emissionszielen des Luftreinhaltekonzeptes liegen (mit Ausnahme der Partikelemissionen TSP).

|                              | energiebedingte Emissionen 1993<br>[1000 t/a] | Emissionsziel <sup>1</sup><br>[1000 t/a] | schädigende Emissionen<br>[1000 t/a] | <b>Emissionszuschläge<br/>[Franken/kg]</b> |
|------------------------------|---|--|--------------------------------------|--|
| NO <sub>x</sub> Winter       | 137,3   | 63,6                                     | 73,7                                 | <b>15 - 34</b>                             |
| SO <sub>2</sub>              | 57,6  | 54,9                                     | 2,7                                  | <b>15 - 34</b>                             |
| NMVOCSommer                  | 130,5   | 78,4                                     | 52,1                                 | <b>16 - 36</b>                             |
| NO <sub>x</sub> Sommer       | 63,0  | 28,0                                     | 35,0                                 | <b>16 - 36</b>                             |
| TSP (Staub-<br>/Rußpartikel) | 6,8   | -  | 6,8                                  | <b>11 - 25</b>                             |
| CO <sub>2</sub>              |   |  |                                      | <b>0,10 - 0,13</b>                         |

Tabelle 68: Umlegung der externen Kosten auf die Schadstoffe: Emissionszuschläge auf die schadenrelevanten Emissionsmengen pro Schadstoffe für das Jahr 1993

<sup>1</sup> Abgeleitet von den Emissionszielen des Luftreinhaltekonzeptes des Bundes (EDI 1986)

Quelle: INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996), „Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“, S. 94, ergänzt um die externen Klimakosten auf Basis der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten.

### 7.3 Kalkulatorische Energiepreiszuschläge (KEPZ)

Die kalkulatorischen Energiepreiszuschläge [SFR/kWh] entsprechen den durch einen bestimmten Energieverbrauch verursachten externen Kosten und errechnen sich aus der Kombination von **Emissionszuschlägen** [SFR/kg] verschiedener Energieträger mit den **spezifischen Emissionen pro Endenergieeinheit** [kg/TJ] eines bestimmten **Energiesystems**.

Zugrunde gelegt wurden die **Schadenkosten** bei Produktion und Verbrennung fossiler Energieträger und die Kosten, die zur Vermeidung des Treibhauseffektes aufgebracht werden müssen (**Vermeidungskostenansatz**). Die Energiepreiszuschläge für die Feuerungen beziehen sich auf die eingesetzten Energieträger [kWh<sub>in</sub>]. Bei der Elektrizität hingegen gelten sie für die Kilowattstunde Elektrizität ab Kraftwerk bzw. Verteilnetz [kWh<sub>out</sub>]. Die errechneten Zuschläge sind als erste grobe Richtwerte (**Untergrenze**) anzusehen, die bei Energiesparmaßnahmen (z.B. Wärmedämmung) recht gut die Ausweitung der bisher üblichen, betriebswirtschaftlichen Rentabilitäts-

rechnung an die volkswirtschaftliche Sichtweise ermöglichen.

Beim Vergleich von Energiesystemen ist zu berücksichtigen, dass in Abhängigkeit vom Energiesystem bei gleichem Energieträgereinsatz aufgrund unterschiedlich verursachter Emissionen voneinander abweichende externe Kosten entstehen.

In der INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS-Studie werden drei Varianten der KEPZ-Ermittlung unterschieden:

#### KEPZ-Variante 1:

Die KEPZ-Berechnung mittels **Schadenkostenschätzungen** (Kosten des Treibhauseffektes); hier werden zusätzlich die Emissionen aus vorgelagerten Prozessstufen im Ausland zur Bereitstellung der Energieträger (Brennstoffförderung, Umwandlung und Transport) berücksichtigt.

#### KEPZ-Variante 2:

KEPZ basieren beim **Treibhauseffekt auf Vermeidungskosten**. In den übrigen Bereichen werden die Schadenkosten verwendet (unter

|   | Risikozuschläge 1993 [Rp/kWh] |
|---|-------------------------------|
| <b>1. Risikoneutralität (Erwartungswerte)</b> |                               |
| + Kernkraftwerke                              | <b>0,001 - 0,18</b>           |
| + Speicherkraftwerke                          | <b>0,13</b>                   |
| + Laufkraftwerke                              | <b>0,08</b>                   |
| <b>2. Risikoaversion (illustrativ)</b>        |                               |
| + Kernkraftwerke (Prognose)                   | <b>2,2 - 35</b>               |
| + Kernkraftwerke (Zweifel, 1994)              | <b>1,1</b>                    |

Tabelle 69: Risikozuschläge zur Berücksichtigung der externen Risikokosten bei Kernkraftwerken und Wasserkraftwerken für das Jahr 1993 (Stromproduktionsdaten 1993).

Quelle: INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996): „Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“, S. 152

|  | aktueller Energiepreis<br>der Energieträger 1993<br>[1990]   | <b>Preiszuschlag für die<br/>externen Kosten 1993<br/>[1990]</b>                          | Energiepreise inkl.<br>externer Kosten 1993<br>[1990] |
|--|--|---|---|
| <b>Gasfeuerung</b><br>(Low NO <sub>x</sub> )       | 5,0 Rp/kWh<br><i>[5 Rp/kWh]</i>                              | <b>2,2 - 3,4 Rp/kWh</b><br><i>[3,4 - 5,0 Rp/kWh]</i>                                      | 7,2 - 8,4 Rp/kWh                                      |
| <b>Ölfeuerung</b><br>(Low NO <sub>x</sub> )        | 3,0 Rp/kWh<br>34 Fr/100 kg<br><i>[3,5 Rp/kWh]</i>            | <b>3,3 - 5,4 Rp/kWh</b><br><b>39 - 62 Fr/100 kg</b><br><i>[4,9 - 7,6 Rp/kWh]</i>          | 6,3 - 8,4 Rp/kWh<br>73 - 97 Fr/100 kg                 |
| <b>Holzschnitzel-<br/>feuerung</b>                 | 4,0 Rp/kWh<br>35 Fr/Sm <sup>3</sup> *<br><i>[4,0 Rp/kWh]</i> | <b>1,0 - 2,1 Rp/kWh</b><br><b>8,4 - 19 Fr/Sm<sup>3</sup></b><br><i>[1,7 - 3,9 Rp/kWh]</i> | 5,0 - 6,1 Rp/kWh<br>43 - 54 Fr/Sm <sup>3</sup>        |
| <b>Elektrizität</b>                                |  |   |   |
| ▪ Laufkraftwerk                                    |  | <b>0,4 - 0,9 Rp/kWh</b><br><i>[0,20 - 0,51 Rp/kWh]</i>                                    |   |
| ▪ Speicherkraftwerk                                |  | <b>0,5 - 1,3 Rp/kWh</b><br><i>[0,50 - 1,4 Rp/kWh]</i>                                     |   |
| ▪ Kernkraftwerk                                    |  | <b>0,3 - 0,6 Rp/kWh</b><br><i>[0,6 - 1,4 Rp/kWh]</i>                                      |   |
| ▪ Gas-<br>Kombikraftwerk neu                       |  | <b>4,3 - 7,0 Rp/kWh<sup>1</sup></b><br><i>[8,5 - 12,7 Rp/kWh]</i>                         |   |
| <b>Elektrizität<br/>Produktionsmix<br/>Schweiz</b> | 15,6 Rp/kWh<br><i>[14,5 Rp/kWh]</i>                          | <b>0,8 - 1,8 Rp/kWh</b><br><i>[0,7 - 1,6 Rp/kWh]</i>                                      | 16,4 - 17,4 Rp/kWh                                    |
| <b>Elektrizität<br/>Produktionsmix<br/>UCPTE</b>   |  | <b>5,0 - 7,9 Rp/kWh</b>   | 20,6 - 23,5 Rp/kWh                                    |

Tabelle 70: Energiepreiszuschläge zur Anrechnung der externen Kosten und resultierende Energiepreise inkl. externer Kosten (ohne Risikozuschläge) im Vergleich mit den aktuellen Energiepreisen (ohne externe Kosten) für 1990 bzw. 1993. In der eckigen Klammer sind kursiv die Werte für das Jahr 1990 ausgewiesen. Die externen Klimakosten basieren auf den CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten.

\* Schüttraummeter

<sup>1</sup> Bezogen auf Elektrizität ab Kraftwerk

Quelle: INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996), „Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“, S. 151

Berücksichtigung der Energieverbrauchsreduktion infolge der Vermeidungsstrategie). Auch hier werden die vorgelagerten Prozessstufen mit berücksichtigt.

**KEPZ-Variante 3:**

KEPZ aufgrund von Schadenkostenabschätzungen, aber **ohne externe Kosten des Treibhauseffektes**. Hier werden nur die Externalitäten der Luftschadstoffbelastung (einschließlich vorgelagerter Prozessstufen), der Ölunfälle und der Elektrizitätserzeugung berücksichtigt.

Die folgenden Preiszuschläge beziehen sich auf die von der Studie empfohlene Variante 2 (Vermeidungskosten für Treibhauseffekt, sonst Schadenkosten) und sind eine Momentaufnahme für die Verbrauchs-, Emissions- und Schadenssituation in der Schweiz im Jahr 1993.

- Produktionsmix Schweiz (1990): KKW 37,1 %, Wasserkraft 61,1 %, Gas 1,1 %, Öl 0,7 %
- Produktionsmix UCPT (1990): KKW 36,2 %, Wasserkraft 15,2 %, Gas 10,2 %, Öl 9,6 %, Steinkohle 18,3 %, Braunkohle 10,5 %

Für Kernkraftwerke und Wasserkraftwerke müssen zusätzlich zu den oben ausgewiesenen KEPZ **Risikozuschläge** hinzugerechnet werden, mit denen mögliche große Unfälle beim Betrieb dieser Energiesysteme berücksichtigt werden.

- Risikoneutralität -> Erwartungswerte
- Risikoaversion ->  $a \times$  Erwartungswert;  $a > 1$ ;  $a$  = Aversionszuschlag

Für Vergleichswerte werden nachfolgend die detaillierten kalkulatorischen Energiepreiszuschläge (KEPZ) für das Jahr 1990 ausgewiesen (siehe Tab. 71).

Nähere Ausführungen siehe:

- INFRAS/PROGNOS (1994), „Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich“, Kapitel 4, S. 119 - 144
- INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996), „Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“, Kapitel 10, S. 141 - 151

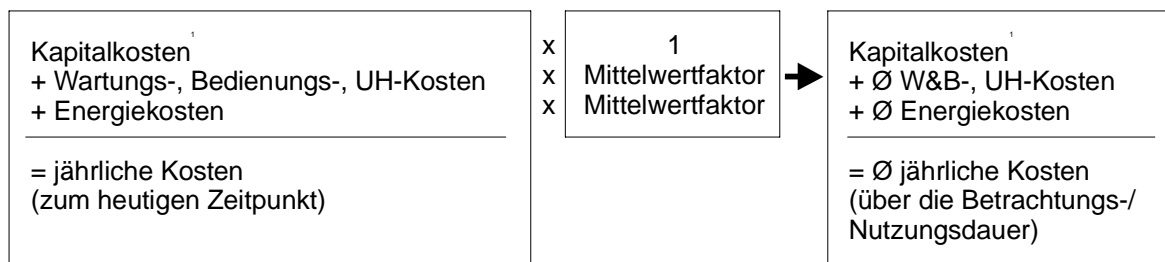


Abbildung 14: Grundprinzip in der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Energiesysteme

<sup>1</sup> Kapitalkosten = Investitionsausgaben x Annuität

|  | Energie-<br>preise<br>1992 | kalkulatorische Energiepreiszuschläge Schweiz<br>1990 |                  |                  |
|--|----------------------------|---|------------------|------------------|
|  |                            | VARIANTE 1  | VARIANTE 2       | VARIANTE 3       |
|  | Rp/kWh                     | Rp/kWh  | Rp/kWh           | Rp/kWh           |
| <b>ERDGAS</b>  |                            |   |                  |                  |
| Gebläse, Anlage 87 (< 1 MW)                                    | 5                          | 1,4 - 27  | 3,4 - 5,1        | 0,4 - 0,8        |
| atmosphärisch 1987 (< 1 MW)                                    | 5                          | 1,5 - 27  | 3,5 - 5,3        | 0,5 - 1,3        |
| Gebläse 1990 (< 0,1 MW)  | 5                          | 1,4 - 27  | 3,4 - 5,1        | 0,4 - 0,8        |
| atmosphärisch 90 (< 0,1 MW)                                    | 5                          | 1,5 - 27  | 3,5 - 5,3        | 0,5 - 1,1        |
| Low NO <sub>x</sub> 1990 (< 0,1 MW)                            | 5                          | 1,3 - 27  | 3,4 - 5,0        | 0,3 - 0,6        |
| Industrie-Anlage 90<br>(> 0,1 MW)                              | 5                          | 1,4 - 27  | 3,5 - 5,2        | 0,4 - 1,0        |
| <b>ERDÖL</b>   |                            |   |                  |                  |
| bestehende Anlage 1987   | 3,5                        | 2,5 - 39  | 4,9 - 7,8        | 1,2 - 2,7        |
| Low NO <sub>x</sub> , Neuanlage 1990                           | 3,5                        | 2,4 - 38  | 4,9 - 7,6        | 1,0 - 2,4        |
| Brennwertkessel 1990   | 3,5                        | 2,4 - 38  | 4,9 - 7,6        | 1,0 - 2,4        |
| Industrie HEL-CH 1990  | 3,5                        | 2,4 - 38  | 4,9 - 7,6        | 1,0 - 2,4        |
| Industrie Heizöl schwer 1990                                   | 1,7                        | 4,6 - 44  | 6,0 - 10,3       | 3,2 - 7,6        |
| <b>HOLZ</b>  |                            |   |                  |                  |
| Holzschnitzel feucht 1990                                      | 4,0                        | 1,7 - 3,9   | 0,9 - 2,1        | 1,7 - 3,9        |
| <b>WKK</b>   |                            |   |                  |                  |
| Gas-WKK 1990   | 5                          | 1,3 - 27  | 3,4 - 5,1        | 0,3 - 0,8        |
| <b>ELEKTRIZITÄT</b>  |                            |   |                  |                  |
| Laufkraftwerke/Normalbetrieb                                   |                            | 0,20 - 0,51   | 0,20 - 0,51      | 0,20 - 0,51      |
| Speicherkraftwerke/Normal-<br>betrieb                          |                            | 0,50 - 1,4  | 0,50 - 1,4       | 0,50 - 1,4       |
| Dampfturbinen-KW Heizöl S                                      |                            | 6,7 - 98  | 12,5 - 19,8      | 3,2 - 7,5        |
| Gas-Dampfturbinen-KW   |                            | 3,7 - 68  | 8,5 - 12,7       | 1,2 - 2,9        |
| Kernkraftwerke Normalbetrieb                                   |                            | 0,33 - 3,3  | 0,6 - 1,4        | 0,2 - 0,5        |
| Transport/Verteilung   |                            | 0,02 - 0,05   | 0,02 - 0,05      | 0,02 - 0,05      |
| <b>Elektrizität Mix CH 90/91<br/>ohne externe Risikokosten</b> | 14,5                       | <b>0,5 - 3,8</b>                                      | <b>0,7 - 1,6</b> | <b>0,4 - 1,0</b> |

Tabelle 71: Kalkulatorische Energiepreiszuschläge in der Schweiz für 1990

Quelle: INFRAS/PROGNOS (1994), „Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich“, S. 132

|  |   |
|--|---|
| <b>Berechnungsmethode</b>  | dynamische Annuitätenmethode  |
| <b>Beurteilungskriterium bei Energiesystemvergleich</b>  | geringste „mittlere jährliche Kosten“   |
| <b>Beurteilungskriterium bei Energie-sparmaßnahmen</b>   | „mittlere jährliche Einsparungen“ > „mittlere jährliche Kosten“, evtl. Ergänzung um weitere Kriterien (interner Zinssatz, Rentabilitätsindex)   |
| <b>Wirtschaftlichkeitsberechnung ohne externe Kosten (betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsberechnung)</b> | Berücksichtigung der tatsächlich anfallenden Kosten und Erträge zuzüglich allfälliger Energieabgaben und abzüglich Subventionen und Steuererleichterungen   |
| <b>Wirtschaftlichkeitsberechnung mit externen Kosten (erweiterte Wirtschaftlichkeitsberechnung)</b>              | keine Berücksichtigung von Energieabgaben, Subventionen und Steuervergünstigungen, sofern diese energiepolitisch begründet sind und eine Verringerung der externen Kosten bezwecken   |
| <b>Kalkulationszinssatz (Realzinsen) auf Preisbasis des Berechnungsjahres</b>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bund 2 %</li> <li>▪ Kantone und Gemeinden 2,5 %</li> <li>▪ Private 3 %</li> </ul>  |
| <b>Teuerung bei Nominalwertberechnung</b>  | jährliche Teuerung von 2 % beim Kalkulationszinssatz und den Preisen  |
| <b>Nutzungsdauer</b>   | im Durchschnitt 15 Jahre für technische Anlagen und 30 Jahre für Bauteile   |
| <b>Energiepreise</b>   | <p>reale jährliche Kostensteigerung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Heizöl 1,5 %</li> <li>▪ Erdgas 1,0 %</li> <li>▪ Holz 0,5 %</li> <li>▪ Elektrizität 1,0 %</li> </ul> <p>Fernwärme - gemäß Tarifen und Zusammensetzung der Energie ist dieser Wert für jede Fernwärmeversorgung individuell festzulegen</p> |
| <b>Berücksichtigung von Energieabgaben</b>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. konstante Zuschläge zu den Energiepreisen</li> <li>2. als erhöhte reale jährliche Kostensteigerungen</li> </ol>   |
| <b>kalkulatorische Energiepreise</b>   | siehe Tabelle 70 und 71   |
| <b>Betriebskosten (Wartungs- und Unterhaltskosten)</b>   | Verwendung von Schätzwerten möglich   |
| <b>Berechnung Energieverbrauch je Gebäude</b>  | SIA 380/1   |

Tabelle 72: Rahmendaten für die Durchführung erweiterter Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei einer Mitberücksichtigung externer Kosten der Energieträger

Quelle: Bundesamt für Energiewirtschaft (Bern), „Empfehlung für energetische Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit Einbezug der externen Kosten“, 9/97 (Loseblatt)

#### 7.4 Empfehlung für energetische Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit Einbezug der externen Kosten

Das Bundesamt für Energie hat 1997 mit Hilfe der kantonalen Energiefachstellen und des Amtes für Bundesbauten „Empfehlungen für energetische Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit Einbezug der externen Kosten“ erarbeitet. In einer Tabelle sind die ausgearbeiteten Methoden und Rahmendaten für die Durchführung erweiterter Wirtschaftlichkeits- und Investitionsberechnungen zusammenfassend ausgewiesen (siehe Tab. 72).

#### 7.5 Zusammenfassung der Programmbeschreibung EXCEL-Arbeitsmappen zu Wirtschaftlichkeitsberechnungen

##### 7.5.1 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen

Mit dem EDV-Programm „WIRTENSY.XLW“ können ein Vergleich und die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von maximal vier verschiedenen Varianten von Energiesystemen durchgeführt werden (z.B. eine konventionelle Heizung mit einer Wärmepumpen- und einer Holzschnitzel-Heizung).

Für die Beurteilung von Energiesparmaßnahmen wurde das Programm „WIRTENMA.XLW“ entwickelt, das die Eingabe zahlreicher Einzelmaßnahmen und deren Bewertung ermöglicht. Durch einen Vergleich der Gestehungskosten eines Energiesystems - diese geben Auskunft über die Kosten pro erzeugter kWh Nutzenergie für das jeweilige Energiesystem - mit dem Programm „WIRTENSY.XLW“ und dem entsprechenden äquivalenten Energiepreis des Programms „WIRTENMA.XLW“ kann bei ungefähr gleicher Betrachtungsdauer eine Investitionsstrategie (Investitionen in Energiesysteme oder in Energiesparmaßnahmen) ermittelt werden. Wenn die Gestehungskosten geringer sind als der äquivalente Energiepreis, so ist es zweckmäßiger, Investitionen in Energiesysteme durchzuführen.

##### 7.5.2 Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen kann das Programm „WIRTENMA.XLW“ eingesetzt werden. Mit der so genannten Annuitätenmethode werden die durchschnittlichen jährlichen Kosten einer Energiesparmaßnahme ermittelt und den mittleren Energiekosten-Einsparungen für den Zeitraum ihrer Nutzungsdauer

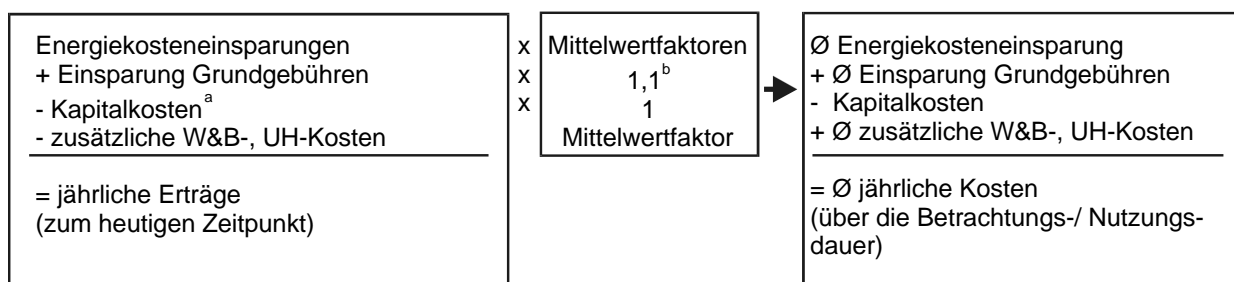


Abbildung 15: Grundprinzip in der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen

<sup>a</sup> Kapitalkosten = Investitionsausgaben x Annuität

<sup>b</sup> Annahme: fixer durchschnittlicher Mittelwertfaktor für die Grundgebühren-Änderungen, der Mittelwertfaktor könnte in der Arbeitsmaßnahmenliste geändert werden

gegenübergestellt (unter Berücksichtigung der künftigen Preisentwicklung). Die Durchführung der Berechnungen erfolgt mit dem realen Zinssatz. Jene Maßnahmen, welche positive mittlere jährliche Erträge über ihre Nutzungsdauer aufweisen, werden als wirtschaftlich beurteilt.

### 7.5.3 Wichtige Eingabegrößen

Einen groben Überblick über die in den beiden Programmen verwendeten Eingabegrößen und Ergebnisse soll die nachstehende Liste ermöglichen.

Programm "WIRTENSY.XLW" zur Wirtschaftlichkeitsberechnung von Energiesystemen:

Die Eingabe umfasst

- ♦ Projektinformation über die Anlage und die Beteiligten
- ♦ wirtschaftliche Grundlagendaten (Zinssätze, Energieträger, Energiepreise ...)
- ♦ Variantenbeschreibung
- ♦ Nutzenergie
- ♦ Endenergie, Veränderung
- ♦ Bauteile
- ♦ Investitionsausgaben für die Bauteile
- ♦ Nutzungsdauer; dazu existiert eine vom Amt für Bundesbauten herausgegebene Liste über Nutzungszeiten von Gebäuden und Bauteilen
- ♦ Bauteil - Servicebeschreibung
- ♦ Bauteil-/Anlagewert
- ♦ Grundgebühren
- ♦ (End-)Energieverbräuche

Daraus werden Kapitalkosten, Wartungs-, Bedienungs- und Unterhaltskosten, Energiekosten für Wärme und Elektrizität ermittelt. In den Grundlagendaten sind Zuschläge für Umweltkosten enthalten, das Programm rechnet diese zu den jeweils eingegebenen Endenergiepreisen dazu.

Das Programm "WIRTENMA.XLW" zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen enthält folgende Eingabedaten:

- ♦ Projektinformationen
- ♦ wirtschaftliche Grundlagendaten
- ♦ Wärmeerzeugungssystem
- ♦ Maßnahmen; dazu existiert eine umfangreiche Checkliste für die Beurteilung von Energiesparmaßnahmen und eine Reihe von "Faustformeln" zur Überprüfung dieser Energiesparmaßnahmen
- ♦ Nutzungsdauer (wie oben)
- ♦ Gesamtinvestition
- ♦ Energieanteil an der Investition
- ♦ Elektrizitätseinsparung
- ♦ Elektrizitätseinsparung nach Tarifstufen
- ♦ Wärmeeinsparung
- ♦ Einsparung von Grundgebühren und leistungsabhängigen Kosten
- ♦ zusätzliche Wartungs-, Bedienungs- und Unterhaltskosten
- ♦ ausgesuchte Energiesparmaßnahmen

Grundsätzlich werden diese Schritte für jede Energiesparmaßnahme durchgeführt, diese entstammen einer Maßnahmenliste, die in Form eines Arbeitsblattes vorliegt. Letztlich entstehen daraus ein oder mehrere Maßnahmenpakete.

Manuale und die beiden Programme selbst können in der Schweiz beim Wasser- und Energiewirtschaftsamt (WEA) des Kantons Bern, Reiterstraße 11, CH-3011 Bern, angefordert werden.

Die Zuschlagssätze werden nach Angabe des Bundesamtes jährlich überprüft und bei Bedarf mit einer neuen Weisung angepasst. Die zuständigen Stellen sind angewiesen, einen jährlichen kurzen Bericht zu verfassen, in dem die durch die neue Methode erzeugten Mehrinvestitionen sowie die damit erhoffte Einsparung an Betriebs- und Externen Kosten grob abgeschätzt werden.

## 8. Schlussbemerkung

Die vorliegende Literaturstudie „Externe Kosten im Energiebereich“ stellt einen zweiten Zwischenbericht zur Problematik externer Effekte bzw. Kosten in der Energiebereitstellung und -nutzung dar. Diese Arbeit kann insofern nicht als „abgeschlossen“ angesehen werden, als dieses Thema die Basis zahlreicher weiterer ExpertInnenstudien bildet und laufend weitere Beiträge und wissenschaftliche Erkenntnisse dazu zu erwarten sind. Eine Fortsetzung dieser Literaturstudie ist u.a. in folgenden Bereichen vorgesehen:

- Übersicht über veröffentlichte Studien der externen Effekte bzw. Kosten im Verkehrsbereich
- Externe Effekte in der Raumwärmebereitstellung für die EndverbraucherInnen unter Berücksichtigung der verursachten Emissionen verschiedener Heizsysteme im Wohnungsbau bzw. die Analyse der Wirkungen von emissionsmindernden Maßnahmen auf die Schadstoffbewertung der Heizsysteme unter Berücksichtigung der damit verbundenen Kosten
- Externe Effekte bzw. Kosten beim Einsatz erneuerbarer Energieträger (Biomasse, Geothermie, Photovoltaikanlagen ...)

Primäres Ziel war es, über aktuelle Forschungsberichte bzw. -ergebnisse in der ExternE-Studie der Europäischen Kommission DG XII zu berichten bzw. einen Überblick über diese Ergebnisse zu geben. Die zugrunde liegende Projektintention war es, Einblicke über die Möglichkeiten und auftretenden Probleme bei einer Berücksichtigung von Externalitäten im Energiebereich zu geben.

## 9. Anhang

### 9.1 Literaturverzeichnis

#### Primärliteratur

Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Endbericht „Externe Effekte im Energiebereich“ (Literaturrecherche) von Friedrich Schneider und Elisabeth Dreer, Schriftenreihe des BMUJF, Band 22/1997

Europäische Kommission, Directorate-General XII, ExternE: Externalities of Energy, Vol. 3: Coal & Lignite, Brüssel – Luxemburg, 1995

Europäische Kommission, Directorate-General XII, ExternE: Externalities of Energy, Vol. 4: Oil & Gas, Brüssel – Luxemburg, 1995

Europäische Kommission, Directorate-General XII, ExternE: Externalities of Energy, Vol. 5: Nuclear, Brüssel – Luxemburg, 1995

Europäische Kommission, Directorate-General XII, ExternE: Externalities of Energy, Vol. 6: Wind & Hydro, Brüssel – Luxemburg, 1995

Europäische Kommission - ExternE: Externalities of Energy - Methodology Annexes, Directorate-General XII (Science, Research and Development), 1997

Friedrich R. /Krewitt W., Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung - Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen, Springer-Verlag, 1997

Fritsche U., Leuchtner J., Matthes F.C, Rausch L., Simon K.-H., Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 2.0, ÖKO-Institut Büro Darmstadt, 1992

INFRAS/PROGNOS, Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich; Synthesebericht der gleichnamigen Studie über die Berechnungen der Externalitäten der Strom- und Wärmeversorgung in Gebäuden in der Schweiz; Studie im Auftrag des Bundesamtes für Konjunkturfragen, des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des Amtes für Bundesbauten, 1994

INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS, Die vergessenen Milliarden - Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich, Verlag Haupt, 1996

Jilek W., Simetzberger A., Externe Kosten der Energieversorgung - 1. Zwischenbericht, 1995

Schweizer Amt für Bundesbauten (9/1996; AFB/GR 3), Programmbeschreibung EXCEL-Arbeitsmappen Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Loseblatt

Schweizer Bundesamt für Konjunkturfragen, Impulsprogramm RAVEL (Rationelle Energieverwendung), „Jetzt mit externen Kosten rechnen - Hinweise für erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnungen“, Loseblatt, 1997

Öko-Institut Büro Darmstadt, Umweltanalyse für Energie-, Transport- und Stoffsysteme: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.1 – Aktualisierter und erweiterter Endbericht, i. A. des HMUEB Wiesbaden, 1995, Bezug als PDF-Datei über Internet-Homepage hyperlink <http://www.oeko.de/service/gemis>

Öko-Institut Büro Darmstadt, Umweltanalyse für Energie-, Transport- und Stoffsysteme: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 3.0 – Installationsdateien mit Programm und Datenbank, Bezug über Internet-Homepage hyperlink <http://www.oeko.de/service/gemis/>, i. A. des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit, 1996

Schweizer Bundesamt für Energiewirtschaft (9/1997), Empfehlung für energetische Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit Einbezug der externen Kosten, Loseblatt

### **Sekundärliteratur**

Berg M. et al , Risikobewertung im Energiebereich, Polyprojekt Risiko und Sicherheit Dokumente Nr. 7, ETH Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich) (UB Salzburg), 1995

CEC, COSYMA: A New Package for Accident Consequence Assessment. Joint report by Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH and National Radiological Protection Board, Report EUR-13028 EN, Commission of the European Communities, Brüssel, Belgien, 1991

CEC, PAGIS: Performance Assessment of Geologic Isolation Systems for Radioactive Waste, Summary, Commission of the European Communities, CEC DIR 11775 EN, Brüssel, 1988

Cline W. R., The Economics of Global Warming. Institute for International Economics, Washington D. C. 1992

Frankhauser S., Global Warming Damage Costs: Some Monetary Estimates, CSERGE GEC Working Paper 92-29, CSERGE, University College London and University of East Anglia, 1992/93

Frankhauser S., Valuing Climate Change – The Economics of the Greenhouse, Earthscan, London, 1995

IAEA, INTERTRAN: A System for Assessing the Impact from Transporting Radioactive Material, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-287, Wien, 1983

Friedrich, R., Voss, A., External Costs of Electricity Generation. Energy Policy 21 (1993), S. 114-122

Heinz I., Klaaßen-Mielke R., Krankheitskosten durch Luftverschmutzung, Heidelberg, 1990

Hohmeyer O., Gärtner M., Die Kosten der Klimaänderung – Eine grobe Abschätzung der Größenordnungen. Bericht an die Kommission der Europäischen Gemeinschaft – DG XII, Greenpeace Österreich, Wien, 1993

ORNL, Damages and Benefits of the Nuclear Fuel Cycle: Estimation Methods, Impacts and Values Draft, Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Oak Ridge, Tenn., USA, 1993

PACE University, Environmental Costs of Electricity. Pace University for Environmental Legal Studies, USA, 1990

Pearce D.W., Bann C., Georgiou S., The Social Costs of Fuel Cycles, Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE), HMSO, London (UK), 1992

Tol R. S. L., The Damage Costs of Climate Change: Towards more comprehensive calculations. Environmental and Resource Economics 5, S. 353 - 374, 1995

UNSCEAR- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources, Effects and Risks of Ionising Radiation, United Nations, New York, USA, 1993

Wallner W., Analyse externer Effekte in der Energieversorgung, Diplomarbeit am Institut für Hochspannungstechnik, Bereich Elektrotechnik-Wirtschaft und Energieinnovation, TU Graz, 1995

Wheeler, G., Hewison, R.C., The External Costs of Accidents at a UK PWR, Intera Information Technologies, Environment Division, UK, 1994

ZEW, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH, Externe Kosten der Energieversorgung und ihre Bedeutung im Konzept einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung, Rennings, Koschl, 1995

## 9.2 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

### Tabellenverzeichnis

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1:  | Übersicht über die wichtigsten Wirkungspfade der betrachteten Stromerzeugungssysteme   | 15  |
| Tabelle 2:  | Methoden zur monetären Bewertung von Umweltgütern  | 19  |
| Tabelle 3:  | Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse für Großbritannien und USA zur Berechnung des Value of Statistical Life nach Pearce et al.       | 21  |
| Tabelle 4:  | Eignung der Verfahren zur Präferenzermittlung bei verschiedenen Umweltgütern   | 21  |
| Tabelle 5:  | Übersicht über die Bewertungsansätze und ihre Anwendungsmöglichkeiten pro Schadenbereich   | 22  |
| Tabelle 6:  | Schäden durch den Treibhauseffekt beim Stein- und Braunkohlebrennstoffzyklus – Effekte bei unterschiedlichen Annahmen                        | 31  |
| Tabelle 7:  | Schäden durch den Treibhauseffekt beim Stein- und Braunkohlebrennstoffzyklus – Effekte bei gleichen Annahmen                                 | 32  |
| Tabelle 8:  | Quantifizierte jährliche Schadenskosten in US \$ und in % des BSP bei einer globalen Temperaturerhöhung von 2,5 K nach Regionen              | 34  |
| Tabelle 9:  | Quantifizierte jährliche Schadenskosten in Mio. US \$ für den Benchmark Case   | 35  |
| Tabelle 10: | Übersicht über die externen Kosten durch den Stein- und Braunkohlezyklus   | 37  |
| Tabelle 11: | Treibhausgas-Schadenschätzung für den Öl- und Gaszyklus  | 46  |
| Tabelle 12: | Vergleich der Resultate bei Verwendung einer einheitlichen Berechnungsmethode  | 47  |
| Tabelle 13: | Übersicht über die externen Kosten durch den Erdöl- und Erdgaszyklus   | 48  |
| Tabelle 14: | Zusammenfassung – Externe Kosten durch fossile Brennstoffe (Schätzwerte)   | 53  |
| Tabelle 15: | Übersicht über die externen Kosten der Windenergie   | 57  |
| Tabelle 16: | Übersicht über die Schäden und Nutzen eines Wasserkraftwerkes  | 59  |
| Tabelle 17: | Die ökonomische Bewertung der Sofortmaßnahmen im Fall eines Reaktorunfall  | 69  |
| Tabelle 18: | Die monetäre Bewertung der physischen Schäden bei Normalbetrieb im Kernkraftwerk in mEURO/kWh bei einer Diskontrate von 0 %                  | 71  |
| Tabelle 19: | Die monetäre Bewertung der physischen Schäden bei Normalbetrieb im Kernkraftwerk in mEURO/kWh bei einer Diskontrate von 3 %                  | 72  |
| Tabelle 20: | Die monetäre Bewertung der physischen Schäden bei Normalbetrieb im Kernkraftwerk in mEURO/kWh bei einer Diskontrate von 10 %                 | 73  |
| Tabelle 21: | Die monetäre Bewertung der vier möglichen Schadensszenarien eines schweren Reaktorunfalls in MEURO   | 74  |
| Tabelle 22: | Ergebnisse der Unfallanalyse für vier verschiedene Szenarien inklusive der öffentlichen Gesundheitsschäden und der Kosten für Gegenmaßnahmen | 74  |
| Tabelle 23: | Vergleich von externen Kosteneinschätzungen in verschiedenen Studien   | 75  |
| Tabelle 24: | Externe Kosten der Stromerzeugung bei verschiedenen Energieträgern   | 79  |
| Tabelle 25: | Kenndaten der Prozessketten für Import-Steinkohle frei Grenze BRD (GEMIS)  | 104 |
| Tabelle 26: | Kenndaten der Prozessketten für Steinkohle frei Verbraucher in der BRD (GEMIS)   | 104 |
| Tabelle 27: | Kenndaten der Prozessketten für Rohbraunkohle (GEMIS)  | 105 |
| Tabelle 28: | Kenndaten der Prozessketten für Braunkohleprodukte (GEMIS)   | 105 |
| Tabelle 29: | Kenndaten der Prozessketten für Import-Rohöl (GEMIS)   | 106 |
| Tabelle 30: | Kenndaten der Prozessketten für Ölprodukte frei Verbraucher in der BRD (GEMIS)   | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 31: Kenndaten der Prozessketten für Import-Erdgas (GEMIS)  | 107 |
| Tabelle 32: Kenndaten der Prozessketten für Erdgas frei Verbraucher (GEMIS)  | 107 |
| Tabelle 33: Kenndaten für Prozessketten für Uran-Brennelemente frei AKW (GEMIS)  | 108 |
| Tabelle 34: Kenndaten der Prozessketten für liquiden Wasserstoff (GEMIS)   | 109 |
| Tabelle 35: Kenndaten der Prozessketten für Stückholz, Holz - Hackschnitzel und Holzgas (GEMIS)  | 110 |
| Tabelle 36: Kenndaten der Prozesskette für Reststroh (GEMIS)   | 110 |
| Tabelle 37: Kenndaten der Prozessketten für Biogas frei Nutzer (GEMIS)   | 111 |
| Tabelle 38: Kenndaten der Prozessketten für Holz als nachwachsender Rohstoff (GEMIS)   | 112 |
| Tabelle 39: Kenndaten der Prozesskette für Miscanthus (GEMIS)  | 113 |
| Tabelle 40: Kenndaten der Prozesskette für Rapsöl und RME (GEMIS)  | 113 |
| Tabelle 41: Kenndaten der Prozesskette für Bioäthanol (GEMIS)  | 114 |
| Tabelle 42: Kenndaten der aktualisierten Strom-Prozesskette frei Verbraucher (GEMIS)   | 115 |
| Tabelle 43: Kenndaten der Materialbereitstellung in GEMIS 2.1  | 117 |
| Tabelle 44: Kenndaten der Hilfsmaterialbereitstellung in GEMIS 2.1   | 117 |
| Tabelle 45: Prozesskette Erdöl (GEMIS)   | 119 |
| Tabelle 46: Prozesskette Erdgas (GEMIS)  | 119 |
| Tabelle 47: Prozesskette Erdgas-Transport (GEMIS)  | 119 |
| Tabelle 48: Input-Werte zur Kohle-Förderung und -Aufbereitung (GEMIS)  | 119 |
| Tabelle 49: Input-Werte für die Uran-Prozesskette (GEMIS)  | 119 |
| Tabelle 50: Input-Werte für die Errichtung großer Kraftwerke (GEMIS)   | 120 |
| Tabelle 51: Input-Werte für die Stromverteilung (GEMIS)  | 120 |
| Tabelle 52: Input-Werte für Solarzellen (GEMIS)  | 120 |
| Tabelle 53: Input-Werte für Windkraftwerke (GEMIS)   | 120 |
| Tabelle 54: Input-Werte für kleine Wasserkraftwerke (GEMIS)  | 121 |
| Tabelle 55: Input-Werte für kohlebetriebene Heizkraftwerke (GEMIS)   | 121 |
| Tabelle 56: Input-Werte für Öl- und Gas-HKW mit Gasturbinen (GEMIS)  | 121 |
| Tabelle 57: Input-Werte für Gasmotor-BHKW (GEMIS)  | 121 |
| Tabelle 58: Input-Werte für Dieselmotor-BHKW (GEMIS)   | 121 |
| Tabelle 59: Input-Werte für Wärmenetze (GEMIS)   | 122 |
| Tabelle 60: Input-Werte für Heizsysteme (inkl. Hausverteilung) GEMIS   | 122 |
| Tabelle 61: Input-Werte für Einzel-Heizsysteme (ohne Hausverteilung) GEMIS   | 122 |
| Tabelle 62: Input-Werte für Wärmepumpen (inkl. Hausverteilung) GEMIS   | 122 |
| Tabelle 63: Input-Werte für Solarkollektoren (GEMIS)   | 123 |
| Tabelle 64: Input-Werte für heutige Personenkraftwagen (GEMIS)   | 123 |
| Tabelle 65: Input-Werte für Güterverkehrsmittel (GEMIS)  | 123 |
| Tabelle 66: Übersicht über den Stand der GEMIS-Anpassung für Österreich  | 126 |
| Tabelle 67: Toxizitäts- bzw. Schädlichkeitsfaktoren von Luftschadstoffen bezogen auf Kohlenmonoxid nach Schadenbereich (INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS)                                       | 128 |
| Tabelle 68: Umlegung der externen Kosten auf die Schadstoffe: Emissionszuschläge auf die schadenrelevanten Emissionsmengen pro Schadstoffe für das Jahr 1993 (INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS) | 129 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 69: | Risikozuschläge zur Berücksichtigung der externen Risikokosten bei Kernkraftwerken und Wasserkraftwerken für das Jahr 1993 (Stromproduktionsdaten 1993) (INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS)  | 130 |
| Tabelle 70: | Energiepreiszuschläge zur Anrechnung der externen Kosten und resultierende Energiepreise inkl. externer Kosten (ohne Risikozuschläge) im Vergleich mit den aktuellen Energiepreisen (ohne externe Kosten) für 1990 bzw. 1993 (INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS) | 131 |
| Tabelle 71: | Kalkulatorische Energiepreiszuschläge in der Schweiz für 1990 (INFRAS/PROGNOS)   | 133 |
| Tabelle 72: | Rahmendaten für die Durchführung erweiterter Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei einer Mitberücksichtigung externer Kosten der Energieträger   | 134 |

### Abbildungsverzeichnis

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| Abb. 1:  | Der Wirkungspfadansatz in der ExternE-Studie   | 14  |
| Abb. 2:  | Struktur des EcoSense-Modells  | 17  |
| Abb. 3:  | Prozessstufen der Stromerzeugung aus Steinkohle  | 25  |
| Abb. 4:  | Prozessstufen der Stromerzeugung aus Braunkohle  | 26  |
| Abb. 5:  | Schadenfunktion zur Bewertung der Externalitäten im Stein- und Braunkohlezyklus  | 27  |
| Abb. 6:  | Impact-Pathway für Treibhausgasemissionen  | 33  |
| Abb. 7:  | Prozessstufen der Stromerzeugung aus Erdöl   | 42  |
| Abb. 8:  | Prozessstufen der Stromerzeugung aus Erdgas  | 43  |
| Abb. 9:  | Schadenfunktionsansatz für Lärm durch den Betrieb von Windenergieanlagen   | 54  |
| Abb. 10: | Schadenfunktionsansatz bei Emissionen von Radionukliden in die Atmosphäre  | 61  |
| Abb. 11: | Vorgehensweise bei der Unfallfolgenabschätzung (Modell COSYMA)   | 68  |
| Abb. 12: | Darstellung der Erdölprozesskette ohne Materialvorleistungen und Hilfsmaterialien in GEMIS   | 101 |
| Abb. 13: | Darstellung der direkten und indirekten Umwelteffekte von Energieprozessen in GEMIS 2.1 bei Berücksichtigung der Materialvorleistungen | 103 |
| Abb. 14: | Grundprinzip in der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in Energiesysteme (Modell AFB)                                | 132 |
| Abb. 15: | Grundprinzip in der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen (Modell AFB)   | 135 |

### 9.3 Quellenverzeichnis

- (1)** Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung – Externe Kosten von Stromerzeugungssystemen, S. 31: Mit Hilfe von Dosis-Wirkungsbeziehungen wird versucht, die jeweilige Änderung am Zustand eines Rezeptors in Abhängigkeit von der Dosis zu beschreiben. Dosis-Wirkungs-Beziehungen sind exakte mathematische Beschreibungen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Aufgrund der Komplexität der dabei ablaufenden biochemischen und physiologischen Wirkungsprozesse, die i.d.R. nicht in Prozessmodellen beschrieben werden können, erfolgt zwischen der Schadstoffbelastung und der dabei hervorgerufenen Wirkung eine Auswertung statistischer Zusammenhänge. Dabei wird oft nicht die tatsächlich vom Rezeptor aufgenommene Dosis, sondern auf die Exposition (Konzentration x Zeit) als Schadstoffbelastungsmaß zurückgegriffen. In dieser Literaturstudie werden im Folgenden beide Begriffe synonym verwendet.
- (2)** In Anlehnung an: Mag. Wolfgang Wallner (1995), „Analyse externer Effekte in der Energieversorgung“, Diplomarbeit am Institut für Hochspannungstechnik, Bereich Elektrotechnik-Wirtschaft und Energieinnovation, TU Graz, S. 18f.
- (3)** Quelle: Dr. E. Dreer (1997), „Externe Effekte im Energiebereich“, S. 122
- (4)** Näheres siehe in: ExternE (1997) - Methodology Annexes, S. 1ff.
- (5)** Quelle: INFRAS/PROGNOS-Studie (1994), „Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich“, S. 36
- (6)** Quelle: ExternE-Studie, Vol. 1
- (7)** Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung“, S. 54f.
- (8)** Quelle: Friedrich/Krewitt (1997), „Umwelt- und Gesundheitsschäden durch die Stromerzeugung“, S. 37ff.
- (9)** Der Kohletransport zum Kraftwerk Lauffen erfolgt zu zwei Drittel per Schiff und zu einem Drittel mit der Bahn. Der Kalk sowie Abfallstoffe werden von Lastwagen an- und abtransportiert. Im Kraftwerk West Burton 'B' erfolgt der Transport der Kohle, des Kalks sowie der Abfallstoffe per Bahn
- (10)** Die Schäden werden in Milli EURO (mEURO) pro Kilowattstunde angegeben
- (11)** VSL (Value of Statistical Life), wobei in der EU von einem Wert von 2,6 MEURO ausgegangen wird
- (12)** Die geringeren Werte in UK sind primär auf die höhere Förderungsproduktivität englischer Kraftwerke zurückzuführen, die in UK rund 1070 t je Person bzw. in Deutschland 510 t/Person ausmacht
- (13)** ExternE (1995), Vol. 3, S. 172 und S. 181
- (14)** ExternE (1995), Vol. 1, S. 159
- (15)** ExternE (1995), Vol. 3, S. 228
- (16)** ExternE (1995), Vol. 1, S. 160
- (17)** ExternE (1995), Vol. 3, S. 19
- (18)** ExternE (1995), Vol. 3, S. 20
- (19)** ExternE (1995), Vol. 1, S. 161
- (20)** ExternE (1995), Vol. 4, S. 120
- (21)** ExternE (1995), Vol. 4, S. 138
- (22)** ExternE (1995), Vol. 4, S. xxiii
- (23)** ExternE (1995), Vol. 4, S. xxiii
- (24)** ExternE (1995), Vol. 4, S. 82
- (25)** ExternE (1995), Vol. 6, S. XVI
- (26)** Nähere Ausführungen siehe: ExternE (1995), Vol. 5, S. 54ff.
- (27)** ExternE (1995), Vol. 5, S. 53
- (28)** ExternE (1995), Vol. 5, S. 65ff.
- (29)** Details siehe in: ExternE (1995), Vol. 5, S. 234
- (30)** ExternE (1995), Vol. 5, S. 273
- (31)** LLW: Low Level Waste
- (32)** HLW: High Level Waste

- (33)** ExternE (1995), Vol. 5, S. 70
- (34)** ExternE (1995), Vol. 5, S. 314ff.
- (35)** Weltmarktpreise (Quelle: FAO, 1993 bzw. EUROSTAT 1993 für Roggenpreis): Weizen 96 EURO/t, Gerste 54 EURO/t, Hafer 56 EURO/t, Roggen 156 EURO/t
- (36)** Entnommen aus: INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS (1996), „Die vergessenen Milliarden – Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich“
- (37)** Entnommen aus: „Externe Effekte im Energiebereich“ (Literaturrecherche) von Friedrich Schneider u. Elisabeth Dreer, Schriftenreihe des BMUJF, Band 22/1997
- (38)** Nicht berücksichtigt wurden die nicht energiebezogenen externen Kosten des Verkehrs wie externe Unfallkosten, Lärmkosten, Staukosten usw.
- (39)** AOX = Maß für die Konzentration organischer Halogenverbindungen, die v.a. in Bleichrückständen von Zellstoff produzierenden Betrieben vorkommen
- (40)** CO<sub>2</sub>-Äquivalent: Umrechnung sämtlicher Treibhausgasemissionen gemäß ihrem globalen Erwärmungspotential (GWP) in CO<sub>2</sub>-Emissionen (mit GWP CO<sub>2</sub> = 1)
- (41)** GEMIS 3.0, S. Z1
- (42)** LCP: Least Cost Planning
- (43)** Auszug aus dem Protokoll des Regierungsrates des Kantons Zürich (KR-Nr. 108/1997), Loseblatt

## 9.4 Abkürzungen, chemische Symbole und Einheiten

### Abkürzungen

|           |  |
|-----------|--|
| a         | Jahr   |
| AFB       | Amt für Bundesbauten (Schweiz)   |
| BFE       | Bundesamt für Energie (Schweiz)  |
| BHKW      | Block-Heizkraftwerk  |
| BKF       | Bundesamt für Konjunkturfragen (Schweiz)   |
| BM        | Bundesministerium  |
| BSP       | Brutto-Sozialprodukt   |
| cap       | capita (je Person)   |
| CC        | Combined Cycle (Gas-Kombikraftwerk)  |
| CEPN      | Centre d'étude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire       |
| COPD      | Chronic Obstructive Pulmonary Disease (chronische Lungenkrankheit)               |
| CORINAIR  | CORINE (Coordination d'information environnementale) air emissions inventory     |
| COSYMA    | A new package for Accident Consequence Assessment                                |
| CVM       | Contingent Valuation Method (kontingente Bewertungsmethode)                      |
| d         | day  |
| DG XII    | Directorate-General XII (European Commission: Science, Research and Development) |
| DICE      | Dynamic Integrated Climate Economy Model   |
| DR        | Diskontrate  |
| EC        | European Commission  |
| EURO      | European Currency Unit   |
| EMZ       | Emissionszuschläge   |
| ERV       | Emergency Room Visits  |
| FUND      | Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution                  |
| GDP       | Gross Domestic Product   |
| GhK       | Gesamthochschule Kassel (D)  |
| GEMIS     | Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme                                     |
| GT        | Gasturbine   |
| GuD       | Gas- und Dampfturbine  |
| GWP       | Global Warming Potential   |
| HCA       | Human Capital Approach   |
| HLW       | High Level Waste (stark verstrahlter radioaktiver Müll)                          |
| HPA       | Hedonistische Preisanalyse   |
| IKARUS    | Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien                                    |
| IMAGE     | Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect                                 |
| INTERTRAN | System for Assessing the Impact from Transporting Radioactive Material           |
| IPCC      | Intergovernmental Panel on Climate Change  |
| ISO       | International Standardisation Organization                                       |
| KEPZ      | kalkulatorische Energiepreiszuschläge  |

|       |  |
|-------|--|
| LCP   | Least Cost Planning  |
| LLW   | Low Level Waste (gering verstrahlter radioaktiver Müll)  |
| MEURO | Million EURO   |
| mEURO | Milli EURO   |
| NA    | not available  |
| NQ    | not quantified   |
| NRPB  | National Radiological Protection Board   |
| OECD  | Organization of Petroleum Exporting Countries  |
| ÖKO   | Öko-Institut Darmstadt (D)   |
| PAGIS | Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste                   |
| PD    | Permanent Disability (dauernde Invalidität)  |
| PM10  | Particulate Matter < 10 µm diameter (Durchmesser)  |
| PMF   | Progressive Massive Fibrosis   |
| RAD   | Restricted Activity Days   |
| TSP   | Total Suspended Particulates (Staub- und Rußpartikel)  |
| UBA   | Umweltbundesamt  |
| UPCTE | Union zur Koordinierung von Stromerzeugung und Stromtransport in den west-europäischen Ländern |
| VSL   | Value of Statistical Life  |
| WDL   | Working Days Lost (verlorene Arbeitstage)  |
| WKK   | Wärmeleistungswerk   |
| WTA   | Willingness to accept  |
| WTP   | Willingness to pay   |
| YOLL  | Years of Life Lost   |
| yr    | year   |

### chemische Symbole

|                  |  |
|------------------|--|
| AOX              | Maß für die Konzentration organischer Halogenverbindungen        |
| BSB <sub>5</sub> | biologischer Sauerstoffbedarf [gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ] |
| CSB              | chemischer Sauerstoffbedarf [gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]   |
| C                | Kohlenstoff  |
| CFCI             | Chlorfluorkohlenstoff  |
| CH <sub>4</sub>  | Methan   |
| CO               | Kohlenmonoxid  |
| CO <sub>2</sub>  | Kohlendioxid   |
| FKW              | Fluorkohlenwasserstoffe  |
| FCKW             | Fluorchlorkohlenwasserstoffe                                     |
| H                | Wasserstoff  |
| H <sub>2</sub> O | Wasser   |
| N                | Stickstoff   |
| N <sub>2</sub> O | Distickstoffmonoxid  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| NH <sub>3</sub> | Ammoniak                                 |
| NMVOG           | flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe |
| NO <sub>2</sub> | Stickstoffdioxid                         |
| NO <sub>x</sub> | Stickoxide                               |
| O <sub>3</sub>  | Ozon                                     |
| P               | Phosphor                                 |
| SO <sub>2</sub> | Schwefeldioxid                           |
| VOC             | flüchtige Kohlenwasserstoffe             |

### Einheiten

|                   |                                       |
|-------------------|---------------------------------------|
| GWh               | Gigawatt-Stunde (10 <sup>6</sup> kWh) |
| kWh               | Kilowatt-Stunde                       |
| MW <sub>el</sub>  | Megawatt-elektrisch                   |
| MWh               | Megawatt-Stunde (10 <sup>3</sup> kWh) |
| MWh <sub>el</sub> | Megawatt-Stunde elektrisch            |
| TWh               | Terawatt-Stunde (10 <sup>9</sup> kWh) |