

Forschungsbericht

**Ganzheitliche
Bilanzierung der
Energie- und
Stoffströme von
Energieversorgungs-
techniken**

T. Marheineke, W. Krewitt,
J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß

Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken

Projekt gefördert von der
Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg

T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß

August 2000

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. A. Voß

ISSN 0938-1228

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	III
Verzeichnis der Abkürzungen und Indizes.....	V
Zusammenfassung.....	VII
Abstract.....	XI
1 Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung.....	1
1.1 Definition und Bestandteile der ganzheitlichen Bilanzierung	1
1.2 Kopplung von Prozeßkettenanalyse und Input-Output-Analyse.....	2
1.3 Backup-Aufwendungen	4
1.4 Wirkungsabschätzung.....	5
1.4.1 Wirkungspotentiale.....	6
Treibhauspotential	6
Versauerungspotential	7
Eutrophierungspotential.....	7
1.4.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.....	8
Verlorene Lebenserwartung.....	8
Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit	8
1.4.3 Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt	8
Materialschäden durch säurebildende Gase.....	9
Materialschäden durch oxidierende Gase	9
Schädigung von Nutzpflanzen.....	9
1.4.4 Verbrauch endlicher Primärenergieträger.....	10
1.4.5 Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse.....	11
2 Ganzheitliche Bilanzierung von Techniken zur Stromerzeugung	13
2.1 Referenzanlagen.....	13
2.2 Sachbilanzen	17
2.2.1 Braunkohle-, steinkohle- und erdgasbefeuerte Kraftwerke	18
2.2.2 Kernkraftwerke	20
2.2.3 Photovoltaik-, Windkraft- und Wasserkraftanlagen	22
2.3 Wirkungsabschätzung.....	24
2.3.1 Wirkungspotentiale.....	24
2.3.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.....	25
2.3.3 Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt	27
2.3.4 Verbrauch endlicher Primärenergieträger.....	28
2.3.5 Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse.....	30

3 Ganzheitliche Bilanzierung von Techniken zur Nutzwärmebereitstellung.....	33
3.1 Referenzanlagen	33
3.2 Sachbilanzen.....	37
3.3 Wirkungsabschätzung	39
3.3.1 Wirkungspotentiale	39
3.3.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	40
3.3.3 Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt.....	41
3.3.4 Verbrauch endlicher Primärenergieträger	42
3.3.5 Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse	43
4 Schlußfolgerungen	45
Literaturverzeichnis.....	47
Anhang A: Sachbilanzen für Techniken zur Stromerzeugung.....	51
Anhang B: Wirkungsabschätzung für Techniken zur Stromerzeugung.....	61
Anhang C: Sachbilanzen für Techniken zur Nutzwärmebereitstellung.....	71
Anhang D: Wirkungsabschätzung für Techniken zur Nutzwärmebereitstellung.....	75
Anhang E: Zusammenstellung der Charakterisierungsfaktoren.....	85
Anhang F: Szenarien zur Ermittlung von Backup-Aufwendungen.....	91

Abbildungsverzeichnis

Abb. 0-1: Grafische Darstellung von Lebenswegen im Programmsystem <i>BALANCE</i>	VIII
Abb. 0-2: Beispielhafte Resultate für Lebensweganalysen.....	IX
Fig. 0-3: Exemplary results of a life cycle assessment.....	XII
Abb. 1-1: Bestandteile einer Ökobilanz.....	1
Abb. 1-2: Hybrid-Ansatz	3
Abb. 2-1: Wirkungspotentiale ausgewählter Stromerzeugungssysteme	24
Abb. 2-2: Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.....	26
Abb. 2-3: Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt.....	27
Abb. 2-4: Verbrauch endlicher Primärenergieträger.....	29
Abb. 3-1: Wirkungspotentiale ausgewählter Wärmebereitstellungssysteme	39
Abb. 3-2: Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.....	41
Abb. 3-3: Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt.....	42
Abb. 3-4: Verbrauch endlicher Primärenergieträger.....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: In diesem Projekt betrachtete Wirkungskategorien und -indikatoren	5
Tabelle 2-1: Referenzanlagen für die Stromerzeugung	17
Tabelle 2-2: Sachbilanzen für Stromerzeugung aus Kohle und Erdgas	19
Tabelle 2-3: Sachbilanz für die Stromerzeugung aus Kernkraft.....	21
Tabelle 2-4: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis regenerativer Energien.....	23
Tabelle 2-5: Monetäre Bewertung der ausgewählten Stromerzeugungssysteme.....	31
Tabelle 3-1: Versorgungsaufgaben für Nutzwärmebereitstellung	33
Tabelle 3-2: Referenzanlagen für die Nutzwärmebereitstellung	36
Tabelle 3-3: Ausgewählte Sachbilanzen für die Nutzwärmebereitstellung.....	38
Tabelle 3-4: Monetäre Bewertung der ausgewählten Wärmebereitstellungssysteme.....	44
Tabelle A-1: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Braunkohle.....	51
Tabelle A-2: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Steinkohle I.....	52
Tabelle A-3: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Steinkohle II.....	53
Tabelle A-4: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Erdgas.....	54
Tabelle A-5: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Kernkraft.....	55
Tabelle A-6: Sachbilanzen für Dachanlagen zur photovoltaischen Stromerzeugung.....	56
Tabelle A-7: Sachbilanzen für Photovoltaik-Kraftwerke.....	57
Tabelle A-8: Sachbilanzen für Windkraftanlagen I.....	58
Tabelle A-9: Sachbilanzen für Windkraftanlagen II.....	59
Tabelle A-10: Sachbilanzen für Wasserkraftanlagen.....	60
Tabelle B-1: Treibhauspotentiale der Stromerzeugungssysteme.....	61
Tabelle B-2: Versauerungspotentiale der Stromerzeugungssysteme.....	62
Tabelle B-3: Eutrophierungspotentiale der Stromerzeugungssysteme.....	63
Tabelle B-4: Mortalitätsrisiko der Stromerzeugungssysteme.....	64
Tabelle B-5: Morbiditätsrisiko der Stromerzeugungssysteme.....	65
Tabelle B-6: Materialschäden der Stromerzeugungssysteme.....	66

Tabelle B-7: Schädigung von Nutzpflanzen durch Stromerzeugungssysteme.....	67
Tabelle B-8: Verbrauch endlicher Energieträger durch Stormerzeugungssysteme.....	68
Tabelle B-9: Monetäre Bewertung der durch Stromerz. verursachten Auswirkungen.....	69
Tabelle C-1: Sachbilanzen für die Nutzwärmebereitstellung auf Basis von Erdgas.....	71
Tabelle C-2: Sachbilanzen für die Nutzwärmeb. auf Basis von Erdöl und Biomasse.....	72
Tabelle C-3: Sachbilanzen für die Nutzwärmeb. auf Basis von Solarstrahlung I.....	73
Tabelle C-4: Sachbilanzen für die Nutzwärmeb. auf Basis von Solarstrahlung II.....	74
Tabelle D-1: Treibhauspotentiale der Wärmebereitstellungssysteme.....	75
Tabelle D-2: Versauerungspotentiale der Wärmebereitstellungssysteme.....	76
Tabelle D-3: Eutrophierungspotentiale der Wärmebereitstellungssysteme.....	77
Tabelle D-4: Mortalitätsrisiko der Wärmebereitstellungssysteme.....	78
Tabelle D-5: Morbiditätsrisiko der Wärmebereitstellungssysteme.....	79
Tabelle D-6: Materialschäden der Wärmebereitstellungssysteme.....	80
Tabelle D-7: Schädigung von Nutzpflanzen durch Wärmebereitstellungssysteme.....	81
Tabelle D-8: Verbrauch endlicher Energieträger durch Wärmebereitstellungssysteme.....	82
Tabelle D-9: Monetäre Bewertung der durch Wärmeb. verursachten Auswirkungen.....	83
Tabelle E-1: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Treibhauspotentials.....	85
Tabelle E-2: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Versauerungspotentials.....	86
Tabelle E-3: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Eutrophierungspotentials.....	86
Tabelle E-4: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Mortalitätsrisikos (Teil 1).....	87
Tabelle E-5: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Mortalitätsrisikos (Teil 2).....	88
Tabelle E-6: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Mortalitätsrisikos (Teil 3).....	89
Tabelle E-7: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Morbiditätsrisikos.....	89
Tabelle E-8: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung der Materialschäden.....	90
Tabelle E-9: Charakterisierungsfaktoren zur B. der Schädigung von Nutzpflanzen.....	90
Tabelle E-10: Charakterisierungsfaktoren zur B. des kumulierten Energieaufwandes.....	90
Tabelle F-1: Szenarien zur Ermittlung von Backup-Aufwendungen.....	91

Verzeichnis der Abkürzungen und Indizes

Abb.	Abbildung
BK	Braunkohle
BW	Brennwertkessel
DWR	Druckwasserreaktor
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgas
el	elektrisch
EPR	European Pressurized Water Reactor
GuD	Gas- und Dampfturbinenkraftwerk
KK	Kernkraft
LCA	Life Cycle Assessment
MFH	Mehrfamilienhaus
NT	Niedertemperaturkessel
Prim	Primärenergie
PV	Photovoltaik
SK	Steinkohle
WaK	Wasserkraft
WiK	Windkraft

Zusammenfassung

Das Leitbild einer „nachhaltigen Entwicklung“ hat in den letzten Jahren seit der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio 1992 breite Zustimmung gefunden. Es steht für einen Entwicklungspfad, der weitere wirtschaftliche Entwicklung und die Nutzung von Umwelt und Natur so verknüpft, daß den kommenden Generationen keine Lebens- und Entfaltungschancen vorenthalten werden und auch innerhalb einer Generation die Nutzungsrechte für Umwelt und Natur gerecht verteilt sind.

Heute bestehen zum Teil noch stark voneinander abweichende Vorstellungen hinsichtlich konkreter Handlungsziele, die aus diesem Leitbild abgeleitet werden sollen. Es besteht jedoch Einigkeit darüber, daß die anthropogen umgesetzten Energie- und Stoffströme mit wesentlichen Auswirkungen für Mensch und Umwelt verbunden sein können und diese Auswirkungen bei der Beurteilung einer nachhaltigen Entwicklung berücksichtigt werden müssen.

Ziel des Projektes war es daher, für verschiedene relevante Techniken zur Strom- und Wärmebereitstellung die durch Stoff- und Energieströme verursachten Auswirkungen abzuschätzen und dabei nicht nur den Prozeß der Energieumwandlung zu betrachten, sondern auch die vor- und nachgelagerten Prozesse wie beispielsweise die Brennstoffbereitstellung, die Entsorgung von Reststoffen oder auch den Bau und den späteren Abriß der Anlage in die Untersuchung einzubeziehen. Die hierzu insgesamt durchgeführten Arbeiten umfassen die Entwicklung einer geeigneten Methodik für die ganzheitliche Bilanzierung, das Erstellen einer Datenbasis, die Entwicklung eines EDV-Systems für die Durchführung der Bilanzierung und schließlich die Durchführung der Bilanzierung für verschiedene Energieversorgungstechniken. Die Ergebnisse dieser Arbeitsschritte werden im folgenden kurz erläutert.

Entwicklung einer Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung

Wichtige Bestandteile der ganzheitlichen Bilanzierung sind die Sachbilanz, in der die Stoff- und Energieströme über den gesamten Lebensweg des betrachteten Energiesystems ermittelt werden, und die Wirkungsabschätzung, mit der die Auswirkungen der in der Sachbilanz ermittelten Stoff- und Energieströme abgeschätzt werden.

Im Rahmen der Sachbilanz wird im allgemeinen die Prozeßkettenanalyse verwendet, die eine detaillierte Beschreibung der Prozeßstufen des betrachteten Energiesystems ermöglicht. Aufgrund der Verflechtung innerhalb einer Volkswirtschaft und auch der verschiedenen Volkswirtschaften untereinander ist es jedoch nicht möglich, alle dem Bau, Betrieb und der Entsorgung eines Energiewandlungssystems vor- und nachgelagerten Prozeßketten zu beschreiben. In diesem Projekt wurde daher die Prozeßkettenanalyse durch eine sektorale Analyse (Input-Output-Analyse) ergänzt. Auf diese Weise ist die Erstellung von Gesamtbilanzen möglich, die alle Vorleistungen erfassen.

In der Wirkungsabschätzung werden zur Abschätzung der von den Stoff- und Energieströmen ausgehenden Wirkungen auf Mensch und Umwelt Emissionen mit ähnlicher Wirkung zu Wirkungspotentialen zusammengefaßt. In dem vorliegenden Projekt wurde darüber hinaus - soweit möglich - die Berechnung von Schäden mit dem Wirkungspfadansatz durchgeführt und eine Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse mit Hilfe des Verfahrens der monetären Bewertung vorgenommen.

Erstellen einer Datenbasis zur Bilanzierung von Energieversorgungstechniken

Zur Durchführung der ganzheitlichen Bilanzierung wurden die Prozeßketten der betrachteten Energiesysteme modelltechnisch beschrieben. Dazu wurden relevante Daten auf Prozeßebene aus der Literatur zusammengestellt und durch eigene Erhebungen ergänzt. Des weiteren wurden ökonomische und umweltrelevante Daten der verschiedenen Produktionsbereiche in Deutschland zusammengestellt und darauf aufbauend Abschätzungen für Produktionsbereiche ausländischer Volkswirtschaften vorgenommen, um die erforderliche Datengrundlage für die sektorale Analyse (Input-Output-Analyse) bereitzustellen.

Entwicklung eines Programmsystems zur Unterstützung einer ganzheitlichen Bilanzierung von Energieversorgungstechniken

Die Verwaltung der vielen Daten, die in eine ganzheitliche Bilanzierung einfließen, ist mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Deshalb wurde ein Instrumentarium entwickelt, das den Benutzer bei der Erstellung ganzheitlicher Bilanzen unterstützt und eine einfache Verwaltung aller notwendigen Daten ermöglicht. Nachstehende Abb. 0-1 zeigt beispielhaft die grafische Oberfläche, die zur Auswertung erstellter Bilanzen dient. Hier können, beginnend von der bereitgestellten Dienstleistung, die erstellten Bilanzen über die verschiedenen Prozeßstufen zurückverfolgt und in beliebiger Tiefe dargestellt werden.

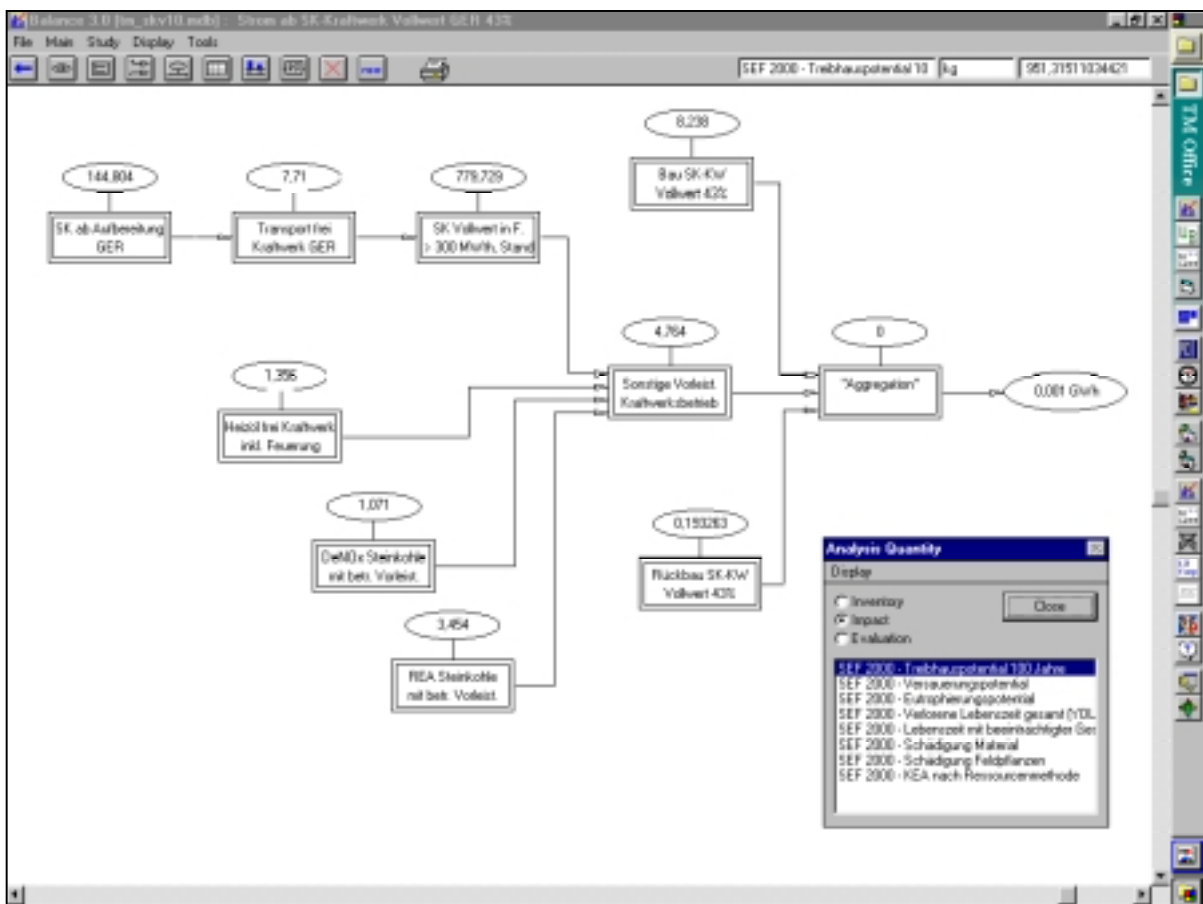


Abb. 0-1: Grafische Darstellung von Lebenswegen im Programmsystem *BALANCE*

Die in Abb. 0-1 dargestellte Bilanz einer Stromerzeugung aus Steinkohle weist außer dem Bau und Rückbau des Kraftwerkes noch die Prozeßstufen der Brennstoffbereitstellung sowie verschiedene Teilbereiche des Kraftwerksbetriebes detailliert aus. Für diese und die sonstigen Vorleistungen aus dem Kraftwerksbetrieb können nun Werte für verschiedene Bilanzgrößen, also beispielsweise Emissionen, Ressourcenverbräuche oder Wirkungspotentiale, angezeigt werden.

Erstellen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung für verschiedene Energieversorgungstechniken

Auf Basis der erarbeiteten Methodik wurden Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen für einzelne Energieversorgungstechniken durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden Technologien zur Stromerzeugung aus fossilen, nuklearen und regenerativen Energien betrachtet. Anschließend wurden mit der gleichen Methodik Systeme zur Wärmeversorgung untersucht. Die für die einzelnen Technologien erarbeiteten Bilanzergebnisse werden jeweils auf eine Einheit der erzeugten End- oder Nutzenergie bezogen.

Die Abb. 0-2 zeigt beispielhaft ausgewählte Resultate der Bilanzierung für verschiedene Stromerzeugungstechniken, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen.

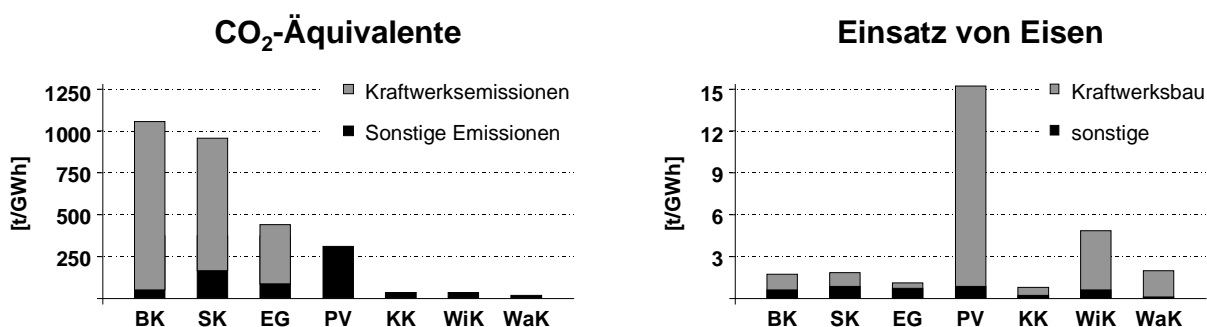


Abb. 0-2: Beispielhafte Resultate für Lebensweganalysen: Treibhausgasemissionen und Aufwand an nichtenergetischen Rohstoffen am Beispiel von Eisen für verschiedene Stromerzeugungstechniken. BK = Braunkohle, SK = Steinkohle, PV = Photovoltaik, KK = Kernkraft, WiK = Windkraft, WaK = Wasserkraft

Es zeigt sich, daß die kumulierten Treibhausgasemissionen bei den Techniken zur Nutzung fossiler Energieträger weitgehend durch die direkten Emissionen des Kraftwerksbetriebes bestimmt werden, jedoch auch vorgelagerte Emissionen wie beispielsweise die Methanemissionen aus der Kohleförderung einen nicht unerheblichen Anteil ausmachen können. Die kumulierten Treibhausgasemissionen der solaren Stromerzeugung liegen aufgrund der hohen energetischen Aufwendungen bei der Herstellung von Photovoltaikanlagen um ein Vielfaches über denen der Stromerzeugung aus Kernkraft sowie der anderen regenerativen Energieträger Wind- und Wasserkraft. Die kumulierten Materialaufwendungen - hier am Beispiel des Einsatzes von Eisen dokumentiert - resultieren zum überwiegenden Teil aus dem Bau der Anlagen zur Stromerzeugung. Ausnahmen sind die Stromerzeugung aus Steinkohle und Erdgas. Hier verursacht auch die Brennstoffbereitstellung bedingt durch den Stahleinsatz bei der Kohleförderung untertage bzw. durch den Stahleinsatz beim Pipelinebau Aufwendungen, die

in der Größenordnung der Aufwendungen für den Bau der Kraftwerke oder sogar darüber liegen.

Übersicht über durchgeführte Lebensweganalysen

Im Rahmen des Projektes wurden sowohl Techniken zur Elektrizitätserzeugung als auch Techniken zur Bereitstellung von Nutzwärme bilanziert. Gegenstand der Bilanzierung waren im Falle der Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle sowohl konventionelle Dampfkraftwerke- als auch Gas- und Dampfturbinenkraftwerke. Für die Stromerzeugung aus Erdgas wurde aufgrund des heutigen Standes der Technik ausschließlich die Gas- und Dampfturbinentechnik untersucht. Die Bilanzierung der Stromerzeugung aus Kernkraft erfolgte sowohl anhand von Kraftwerkssystemen mit direkter Endlagerung als auch anhand von Kraftwerkssystemen mit Wiederaufarbeitung. Für die Nutzung von Solarstrahlung wurden Photovoltaik-Anlagen aus verschiedenen Zellentypen untersucht. Im Falle der Nutzung von Wind- und Wasserkraft sind entsprechende, heute vorzufindende Techniken bilanziert worden. Für die Wärmebereitstellung wurden als Primärenergiequellen Erdgas, Erdöl und Biomasse unter Berücksichtigung heute üblicher Techniken wie beispielsweise Niedrigtemperatur- und Brennwertkessel sowie die Solarstrahlung mit der Technik der Solarkollektoren zur Wandlung der Energieträger in Nutzwärme untersucht.

Aufbauend auf die Erstellung der Sachbilanz, in der die Stoff- und Energieströme quantifiziert werden, wird die Wirkungsabschätzung durchgeführt. Als Resultate der Wirkungsabschätzung wurden hier der Treibhauseffekt, die Versauerung und Eutrophierung von Ökosystemen, Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Schäden in der vom Menschen geschaffenen Umwelt in Form von Materialschäden und Feldpflanzenschäden sowie der kumulierte Energieaufwand bzw. der Verbrauch endlicher Energierohstoffe ermittelt. Abschließend erfolgte eine monetäre Bewertung der in der Wirkungsabschätzung ermittelten Auswirkungen, die dann die Schadenskosten für die Wirkungskategorien menschliche Gesundheit, Materialschäden und Feldpflanzenschäden sowie Vermeidungskosten für die Wirkungskategorien Ökosystemschäden und Treibhauseffekt liefert.

Abstract

Since the United Nations Conference on Environment and sustainable Development (UNCED) in Rio 1992, the idea of sustainable development receives increasing approval. It stands for a policy which combines further economic growth and the demands on environment and nature in a way that prospects of future generations are not cut down by the activities of generations living today as well as rights to use environment and nature are fairly allocated within one generation.

Today, there are still varying opinions concerning the targets to be derived from the idea of sustainable development. But it is obvious that the energy and material flows caused by human activities have essential influence on human beings and the environment and that these impacts should be taken into consideration in case of evaluating technologies with regard to a sustainable development.

Therefore, it was goal of the project to quantify the impacts caused by different technologies of electricity and heat supply and to consider not only the process of energy transformation, but also the up- and downstream processes as fuel supply, waste disposal, the construction and dismantling of the power plant etc. The work carried out includes the development of methods for life cycle assessment, the compilation of a database, the development of an appropriate software tool for life cycle assessment and finally the assessments of various energy supply technologies itself.

Development of methods for life cycle assessment

Important steps of a life cycle assessment are the life cycle inventory analysis, which quantifies the material and energy flows of the whole life cycle, and the life cycle impact assessment, which is used to estimate the impacts of the material and energy flows quantified in the life cycle inventory analysis.

In general, a process chain analysis is used to perform the life cycle inventory analysis. This approach allows a detailed description of the process steps an energy system consists of. But because of the interactions within an economy, it is not possible to describe all up- and downstream processes related to the construction, operation, maintenance and dismantling of a power plant. Therefore, the process chain analysis is supplemented by a sectoral analysis (input/output analysis) within this project. With this approach, it is possible to establish a life cycle inventory covering all up- and downstream processes.

To estimate the impacts of material and energy flows to public health and the environment, the life cycle impact assessment aggregates emissions with similar impact profiles to impact potentials. Furthermore, the impact pathway approach is used within this project to quantify damages and health risks. Finally, a weighting of impact indicator results is performed by using the method of monetary evaluation.

Compilation of a database for the life cycle assessment of energy supply technologies

To perform the life cycle assessment, data on process level from the literature were supplemented by own investigations. In addition, economic and environmental data was collected for different economic sectors in Germany and other countries.

Development of a software tool for the life cycle assessment of energy supply technologies

Large efforts have to be made to administrate the data necessary for a life cycle assessment. This is the reason why a software tool has been developed which supports the user to perform a life cycle assessment and ensures an easy way of data handling. A graphical interface is provided for the interpretation phase of a life cycle assessment. Starting from the process supplying the final demand, the user is enabled to trace back the different process steps and display interesting parts of the considered life cycle on the screen. Life cycle inventory results as well as impact indicator results and the results of the weighting procedure can be calculated and displayed on the screen for each process stage.

Life cycle inventory analysis and life cycle impact assessment for different energy supply technologies

Within this project, energy supply systems providing electricity as well as heat supply systems were assessed. For the electricity generation from coal and lignite, steam power plants as well as combined cycle power plants with integrated coal gasification were considered. In the case of natural gas only the combined cycle technology was considered, as this technology is already available for this fuel. The assessment of electricity generation from nuclear power was performed by considering systems both with direct storage and reprocessing. The electricity generation based on solar power has been evaluated assessing systems consisting of different cell types. For electricity generation from wind and hydro power, appropriate systems describing the best available technique have been analyzed. In order to assess heat supply, the primary energy source solar power, natural gas, oil and biomass have been considered, the latter ones used by low temperature boilers and condensing boilers.

Fig. 0-3 show exemplarily selected life cycle results for different electricity supply systems with today's best available technologies.

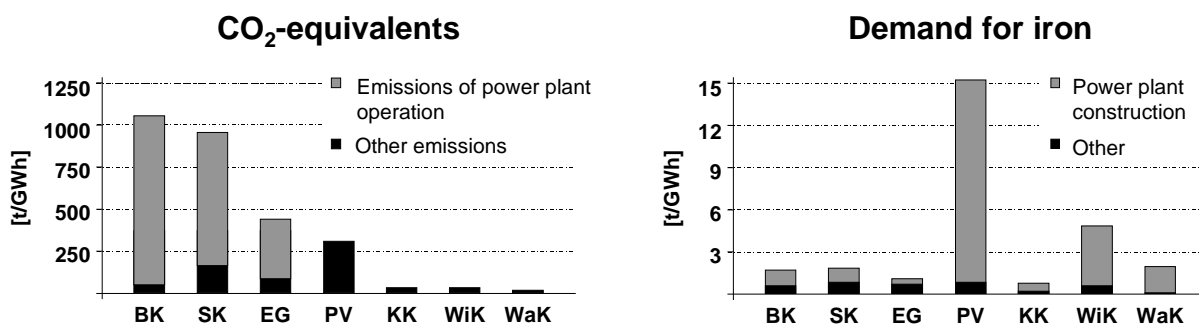


Fig. 0-3: Exemplary results of a life cycle assessment of electricity supply systems: greenhouse gas emissions and the demand of non-energetic raw materials shown by the example of iron. BK = lignite, SK = coal, PV = photovoltaics, KK = nuclear power, WiK = wind power, WaK = hydro power

The results show that the total greenhouse gas emissions of fossil systems using coal and natural gas are determined mainly by the direct emissions of the power plant operation, but

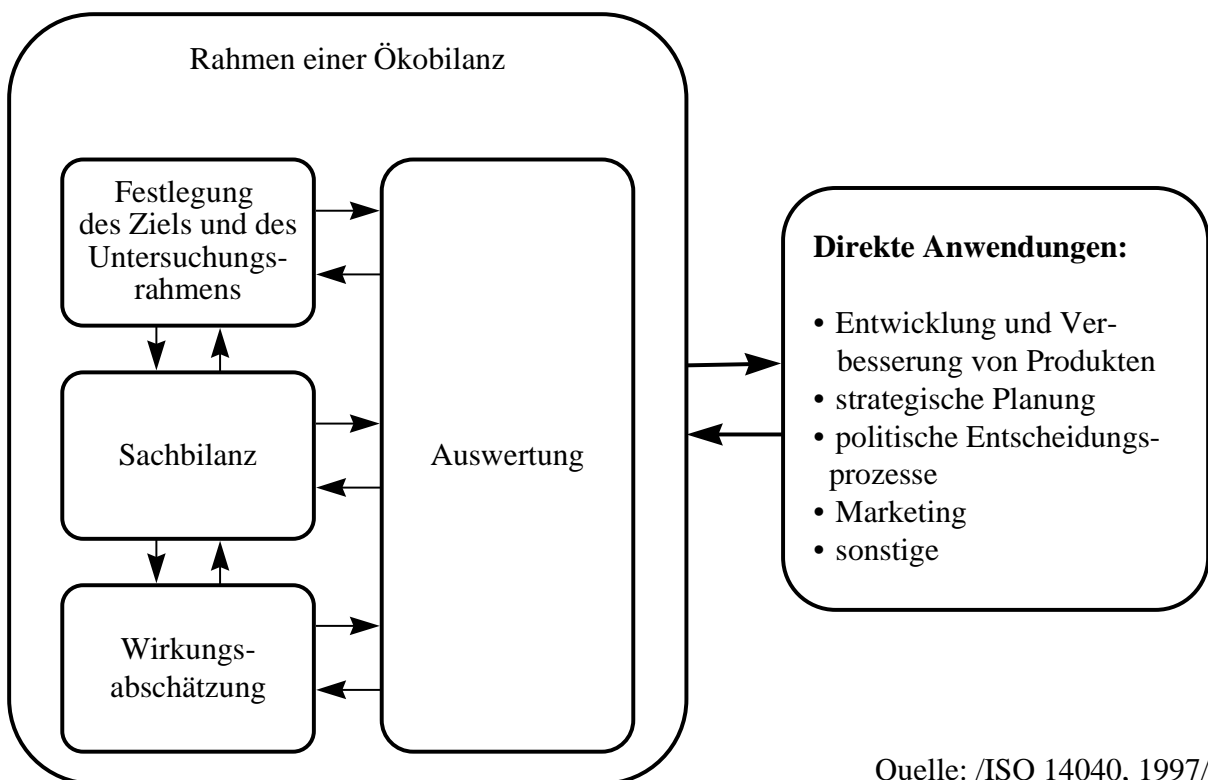
that also upstream emissions as e. g. the methane emissions caused by the coal extraction can influence the overall amount of greenhouse gas emissions. The total greenhouse gas emissions of electricity supply using solar power amount to a multiple of the greenhouse gas emissions caused by electricity generating systems based on nuclear power, wind or hydro power. The cumulated material requirements – in fig. 0-3 shown for the requirement of iron – are mainly caused by the construction of the power plant. Exeptions are the electricity generating systems using coal and natural gas. Here, the fuel supply causes a demand of iron which is of the same magnitude or is even higher as the amount of iron needed for the power plant construction. This is due to the high amount of steel needed for the coal extraction and the pipeline construction necessary for the transport of natural gas.

Besides the calculation of greenhouse gas emissions and the extraction of raw materials, results are quantified for the cumulated energy demand as well as the impact categories acidification and eutrophication of ecosystems, impacts on human health and damages on materials and plants. Finally, the monetary evaluation is used to quantify damages costs for the impact categories human health, material and plant damages, and avoidance costs für the impact categories acidification and eutrophication of ecosystems and the greenhouse effect.

1 Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung

1.1 Definition und Bestandteile der ganzheitlichen Bilanzierung

Das Verfahren der ganzheitlichen Bilanzierung, in den deutschen Normen mit dem Begriff Ökobilanz und in den internationalen Normen mit Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet, gliedert sich in die Schritte Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung.



Quelle: /ISO 14040, 1997/

Abb. 1-1: Bestandteile einer Ökobilanz

Neben der Norm /ISO14040 1997/, die die Prinzipien und die allgemeinen Anforderungen an eine Ökobilanz festlegt, liegen drei weitere internationale Normen - gegenwärtig zum Teil noch als Entwürfe - vor, in denen die einzelnen Bestandteile der Ökobilanz näher beschrieben werden: die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie die Sachbilanz in /ISO14041 1997/, die Wirkungsabschätzung in /ISO14042 1999/ und schließlich die Auswertung in /ISO14043 1998/.

Die Ökobilanz wird in /ISO14040 1997/ wie folgt definiert:

„Die Ökobilanz-Studie untersucht die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlaufe des Lebensweges eines Produktes (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“) von der Rohstoffgewinnung, über Produktion, Anwendung bis zur Beseitigung. Die allgemeinen Kategorien der zu berücksichtigenden Umweltwirkungen umfassen die Nutzung von Ressourcen, menschliche Gesundheit und ökologische Wirkungen.“

1.2 Kopplung von Prozeßkettenanalyse und Input-Output-Analyse

Die Sachbilanz ist der Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktsystems im Verlaufe seines Lebenswegs umfaßt /ISO14040 1997/.

Im allgemeinen wird das Instrument der Prozeßkettenanalyse zur Durchführung der Sachbilanz verwendet. Mit ihr läßt sich das reale Prozeßnetzwerk einer Nutzenbereitstellung prinzipiell beliebig genau beschreiben. Im allgemeinen benötigt jedoch jeder Prozeß eines derartigen Prozeßnetzwerkes wiederum mehrere Vorleistungen, die von anderen Prozessen bereitgestellt werden. Dies hat zur Folge, daß sich bei einer detaillierten Darstellung des Prozeßnetzwerkes eine große Anzahl von Prozessen und damit ein erheblicher Bilanzierungsaufwand ergibt. Dagegen stellt sich am Ende einer Bilanzierung oft heraus, daß nur ein Teil des betrachteten Prozeßnetzwerkes relevante Beiträge zu den Endergebnissen der Bilanzierung liefert. Bei der Durchführung von Prozeßkettenanalysen werden daher Abbruchkriterien definiert, mit denen die Anzahl der zu betrachtenden Prozeßschritte auf ein sachgerechtes und operationales Maß reduziert und dennoch keine wichtigen Beiträge zu den Ergebnisgrößen vernachlässigt werden sollen. Neben der generellen Schwierigkeit, diese Abbruchkriterien konsistent für alle Prozeßstufen so festzulegen, daß tatsächlich alle wesentlichen Prozeßstufen erfaßt werden, führen Abbruchkriterien dazu, daß die mittels der Prozeßkettenanalyse ermittelten Bilanzresultate die tatsächlichen Umwelteinwirkungen grundsätzlich unterschätzen.

Um diesen Nachteil der Prozeßkettenanalyse zu vermeiden, wird diese hier durch eine sektorale Analyse (Input-Output-Analyse) ergänzt. Damit können sich auf einfache Weise über den Preis einer Nutzenbereitstellung die dieser Nutzenbereitstellung anzulastenden Einwirkungen abgeschätzt werden. Die prinzipielle Vorgehensweise dieses als Hybrid-Ansatz definierten Verfahrens ist in Abb. 1-2 dargestellt:

Bei der Kombination von Prozeßkettenanalyse und Input-Output-Analyse wird zunächst die Prozeßkettenanalyse durchgeführt, die in der Regel Stoff-, Massen- und Energiebilanzen für die einzelnen Prozeßschritte beinhaltet. Anschließend wird für jeden Prozeß der Prozeßkette zusätzlich eine Kostenbilanz erstellt. Die Differenz zwischen dem Wert des bereitgestellten Nutzens einerseits sowie dem Wert der bezogenen, in der Prozeßkette quantifizierten Vorleistungen und der Nettowertschöpfung des Prozesses andererseits ergibt den Wert der nicht in der Prozeßkette erfaßten Vorleistungen, die in den jeweiligen Prozeß einfließen. Dieser Betrag wird dann zunächst in Abhängigkeit von der Art des betrachteten Prozesses sowie der Art und Menge der in der Prozeßkette bereits quantifizierten Vorleistungen auf die verschiedenen Produktionsbereiche der Input-Output-Tabelle aufgeteilt. Die Multiplikation der Teilbeträge mit spezifischen kumulierten Umwelteinwirkungen der Produktionsbereiche, die mit Hilfe der Input-Output-Analyse ermittelt wurden, liefert dann die Umweltwirkungen, die durch die Bereitstellung der nicht in der Prozeßkette erfaßten, aber für den Prozeß erforderlichen Vorleistungen verursacht werden.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Vorgehensweise findet sich in /Marheineke; Stekeler 1996/ und /Marheineke et al. 1999/.

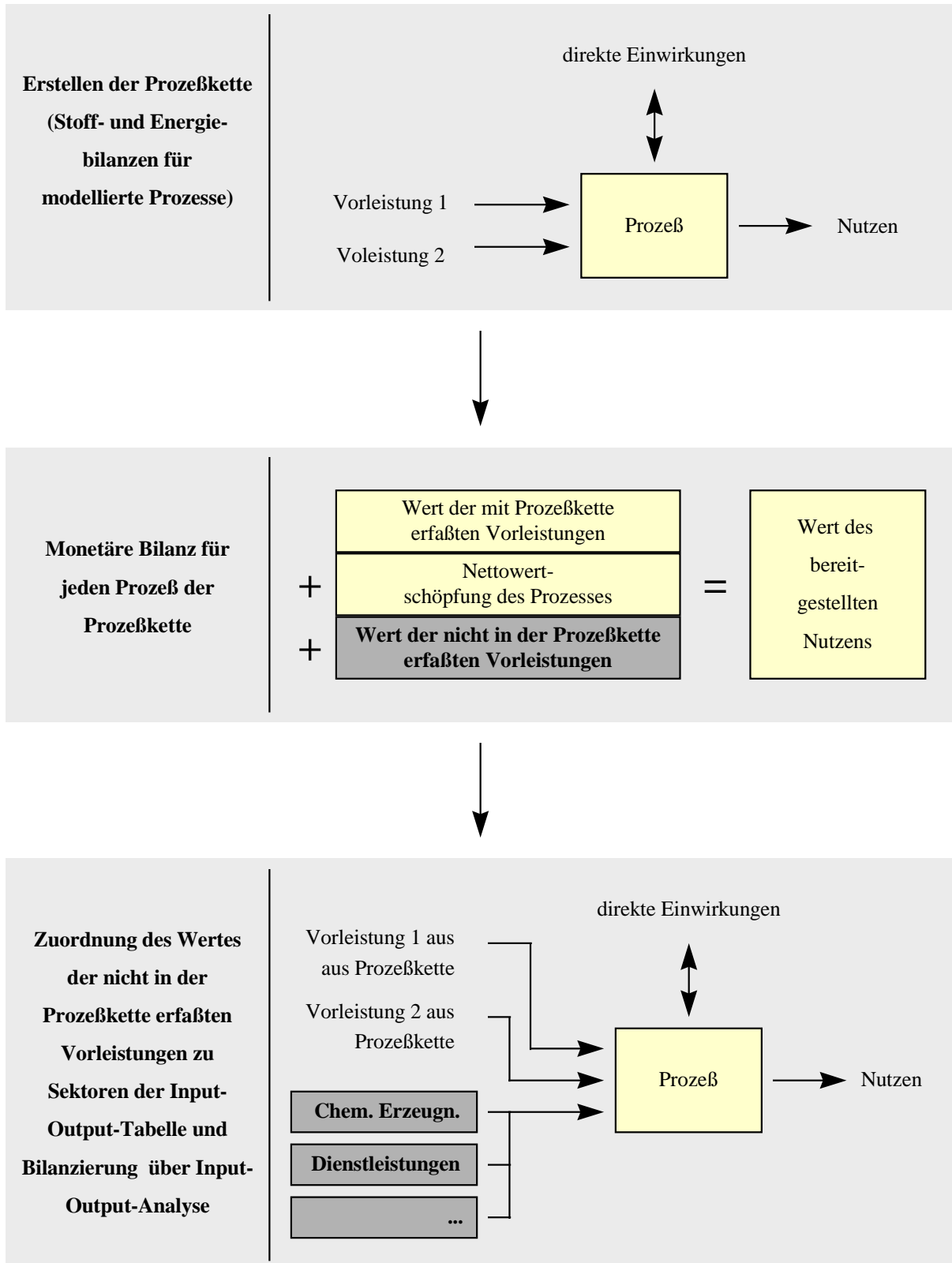


Abb. 1-2: Hybrid-Ansatz

1.3 Backup-Aufwendungen

Ein direkter Vergleich der Bilanzergebnisse verschiedener Stromerzeugungssysteme bezogen auf die erzeugte Nutzenergie ist nicht sinnvoll, da die einzelnen Primärenergien unterschiedliche Angebotscharakteristiken aufweisen. Beispielsweise ist das Primärenergieangebot an Solarstrahlung und Windkraft starken Schwankungen unterworfen, so daß Stromerzeugungssysteme, die diese Primärenergiequellen nutzen, im allgemeinen nicht entsprechend der Nachfrage nach Nutzenergie gefahren werden können. Sie benötigen Speicher oder andere Kraftwerke, um die Differenz zwischen der Nachfrage und dem Nutzenergieangebot aus regenerativen Energien auszugleichen. Werden Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien in einen bestehenden konventionellen Kraftwerkspark integriert, kann dies dazu führen, daß die zuvor allein genutzten konventionellen Kraftwerke nicht nur höhere Reservekapazitäten vorhalten müssen, sondern der Betrieb dieser Kraftwerke beispielsweise zusätzliche An- und Abfahrvorgänge und längere Betriebszeiträume im Teillastbereich aufweist. Die durch die Bereitstellung von Reserveleistung und die im allgemeinen ungünstigeren Betriebsbedingungen der konventionellen Kraftwerke verursachten zusätzlichen Umweltwirkungen werden als Backup-Aufwendungen bezeichnet, die den Systemen zu Nutzung regenerativer Anlagen anzulasten sind.

Die Backup-Aufwendungen sind für eine Technik zur Nutzung regenerativer Energien nicht immer gleich, sondern hängen ab von den Rahmenbedingungen wie beispielsweise dem Primärenergieangebot, dem vorliegenden konventionellen Kraftwerkspark und der geforderten Versorgungssicherheit ab. Zur Ermittlung der Backup-Aufwendungen, die den Stromerzeugungstechniken auf Basis der regenerativen Energien Solarstrahlung, Wind- und Wasserkraft bei Integration in einen konventionellen Kraftwerkspark angelastet werden müssen, wurde daher eine Versorgungsaufgabe mit einer Gesamtarbeitsmenge von 24500 GWh/a festgelegt, die mit einer Versorgungssicherheit eines typischen konventionellen Kraftwerksparks bereitgestellt werden soll. Es wird davon ausgegangen, daß die Versorgungsaufgabe zunächst durch einen konventionellen Kraftwerkspark, bestehend aus einem Kernkraft- und je zwei Erdgas- und Steinkohlekraftwerken mit einer installierten Nettoleistung von insgesamt 4130 MW gedeckt wird. Während das Kernkraftwerk die Grundlast bereitstellt, decken die Steinkohle- und Erdgaskraftwerke die Mittellast- und Spitzenlast ab. Bei der Integration einer regenerativen Stromerzeugungstechnik wird hier angenommen, daß die regenerative Technik 10 Prozent der Gesamtarbeitsmenge bereitstellt und dabei die Stromerzeugung aus Steinkohle substituiert. Backup-Aufwendungen ergeben sich nun aus den zwei oben bereits erwähnten Effekten:

- Da die konventionellen Kraftwerkstechniken zusätzliche Reserveleistungen bereithalten müssen, um die geringere Versorgungssicherheit der integrierten Anlage zur Nutzung einer regenerativen Energie auszugleichen, kann die installierte Leistung der Steinkohlekraftwerke im Vergleich zur der von ihnen erzeugten elektrischen Arbeit nur unterproportional gemindert werden. Entsprechend dem Anteil an der installierten Leistung der Kohlekraftwerke, der als Reserveleistung anzusehen ist, werden die aus dem Bau, der Instandhaltung und dem Rückbau des Kraftwerkes resultierenden Umweltwirkungen und Ressourceninanspruchnahmen anteilig als Backup-Aufwendungen aufgefaßt.

- Außerdem bewirkt die Integration einer Technik mit geringerer Versorgungssicherheit, daß die Kohlekraftwerke einen anderen Lastgang aufweisen. Dies führt dazu, daß beispielsweise mehr An- und Abfahrvorgänge erfolgen und die Kraftwerke häufiger im suboptimalen Teillastbereich gefahren werden. Die hierdurch verursachten zusätzlichen Umwelteinwirkungen und Umweltinanspruchnahmen werden ebenfalls als Backupaufwendungen aufgefaßt und der integrierten Technik zur Nutzung erneuerbarer Energien angerechnet.

In Anhang F finden sich Kennzahlen der in diesem Projekt zugrunde gelegten Szenarien, mit denen die Backup-Aufwendungen für verschiedene Stromerzeugungstechniken zur Nutzung regenerativer Energien ermittelt wurden.

1.4 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung gliedert sich in zwei Teilschritte. Der erste Teilschritt beinhaltet die Auswahl von Wirkungskategorien und die Berechnung von Wirkungsindikatorwerten, die den Beitrag der in der Sachbilanz quantifizierten Energie- und Stoffströme zu Wirkungskategorien beschreiben. Im zweiten Teilschritt können anschließend die Wirkungsindikatorergebnisse relativ zueinander gewichtet und über die Wirkungskategorien hinweg zusammengefaßt werden, um so zu einem Gesamturteil hinsichtlich der verschiedenen, durch den betrachteten Lebensweg verursachten Auswirkungen zu kommen /ISO14042 1999/.

Die Tabelle 1-1 listet die Wirkungskategorien und -indikatoren auf, die in diesem Projekt für die verschiedenen Energieversorgungstechniken betrachtet werden.

Tabelle 1-1: In diesem Projekt betrachtete Wirkungskategorien und -indikatoren

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator
Treibhauseffekt	Treibhauspotential
Eutrophierung von Böden und Gewässern	Eutrophierungspotential
Versauerung von Böden und Gewässern	Versauerungspotential
Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	Verlorene Lebenserwartung, Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit
Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt	Schadenskosten durch Schädigung von Materialien und Nutzpflanzen
Verbrauch endlicher Primärenergieträger	Kumulierter Energieaufwand (Ressourcenmethode)
Entnahme nichtenergetischer Rohstoffe	(Entnahme an Bauxit, Eisen, Kalk, Kupfer)

Zunächst werden entsprechend der gängigen Praxis bei Ökobilanzen der Beitrag zu den Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Eutrophierung und Versauerung mit Hilfe des Treibhaus-, Versauerungs- und des Eutrophierungspotentials quantifiziert /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/. Zusätzlich wird der Wirkungspfadansatz angewendet, um für verschiedene Wirkungskategorien eine Schadensabschätzung vorzunehmen. Damit können als Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit die verlorene Lebenserwartung und die Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit quantifiziert werden. Im Bereich der Schädigung der vom Men-

schen geschaffenen Umwelt werden die durch Luftschadstoffe verursachten Schäden an Materialien wie beispielsweise Gebäudeoberflächen und Nutzpflanzen untersucht. Der Verbrauch endlicher Primärenergieträger Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran wird durch die mit dem Heizwert gewichtete Aufsummation der endlichen Primärenergieträger beschrieben. Für den Verbrauch der nichtenergetischen Rohstoffe gibt es derzeit noch keinen allgemein akzeptierten Indikator, so daß hier beispielhaft die Ressourcenaufwendungen an Bauxit, Eisen, Kalk und Kupfer quantifiziert werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zur Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse der Ansatz der monetären Bewertung angewendet.

Im folgenden werden die einzelnen, in dieser Arbeit betrachteten Wirkungsindikatoren und deren Gewichtung mittels monetärer Bewertung näher erläutert.

1.4.1 Wirkungspotentiale

Die Methode der Wirkungspotentiale findet Anwendung, um den Beitrag der in der Sachbilanz ermittelten Schadstoffemissionen in Bezug auf die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung von Boden und Gewässern und die Eutrophierung von Böden und Gewässern zu quantifizieren. Dabei werden für jede Wirkungskategorie die in der Sachbilanz ermittelten Stoffströme mit stoffspezifischen relativen Wirkungspotentialen, die die Wirkung eines Stoffes in Relation zu einer Referenzsubstanz beschreiben, multipliziert und dann aufsummiert. Das Ergebnis ist dann das Wirkungspotential, das den Beitrag des bilanzierten Energiesystems zu der betrachteten Wirkungskategorie beschreibt /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/.

Treibhauspotential

Der Treibhauseffekt beschreibt den Beitrag anthropogener Emissionen zur dauerhaften Erwärmung der Erdatmosphäre. Die emittierten treibhausrelevanten Luftschadstoffe ändern die Absorption von Wärmestrahlung durch die Erdatmosphäre und bewirken so eine Änderung der Gleichgewichtstemperatur der Erdatmosphäre. Heute wird angenommen, daß eine dauerhafte Erwärmung der Erdatmosphäre mit einem Ansteigen des Meeresspiegels durch partielles Abtauen der Polkappen, extremeren Wetterbedingungen, also beispielsweise stärkeren saisonalen Temperaturschwankungen, und der Verschiebung von Klimazonen verbunden ist.

Das wichtigste Treibhausgas ist Kohlendioxid (CO_2), das die Referenzsubstanz zur Berechnung des Treibhauspotentials darstellt. Weitere relevante Luftschadstoffe sind Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), Schwefelhexafluorid (SF_6) und Perfluormethan (CF_4). Stoffspezifische Wirkungspotentiale zur Beschreibung des Betrages zum Treibhauseffekt werden ermittelt, indem die aus der Anreicherung eines Spurengases in der Atmosphäre resultierende Änderung der Absorptionsfähigkeit der Atmosphäre über einen festgelegten Zeitraum in Relation zu einem entsprechenden Wert für die gleiche Menge der Referenzsubstanz CO_2 gesetzt wird. In diesem Projekt werden die relativen Treibhauspotentiale für eine Zeithorizont von 100 Jahren aus /IPCC 1995/ verwendet. Eine vollständige Liste aller Treibhausgase und der zugehörigen relativen Wirkungspotentiale findet sich in Anhang E.

Versauerungspotential

Versauerung ist ein Oberbegriff für die Schadwirkung versauernd wirkender Schadstoffe und deren Oxidations- und Umwandlungsprodukte. Durch Säureeintrag und damit verbundene pH-Wert-Absenkung können sowohl terrestrische als auch aquatische Ökosysteme in Mitleidenschaft gezogen werden.

Referenzsubstanz für die Berechnung des Versauerungspotentials ist Schwefeldioxid (SO_2). Die wichtigsten versauernd wirkenden Luftschadstoffe sind neben SO_2 Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3). Weitere versauernd wirkende Luftschadstoffe sind Chlor- und Fluorwasserstoff (HCl und HF), die jedoch ersten Abschätzungen zu Folge keinen nennenswerten Beitrag zum insgesamt emittierten Versauerungseffekt liefern. Ausgangspunkt zur Ermittlung der relativen Versauerungspotentiale ist die Überlegung, daß die entscheidende Stoffeigenschaft bei der Abschätzung des Beitrags eines Schadstoffes zur Versauerung von Böden und Gewässern ihre Fähigkeit ist, Protonen abzupalten bzw. in der Atmosphäre nach Oxidation und Reaktion mit Wasser in Säuren überzugehen. Die relativen Wirkungspotentiale für versauernd wirkende Schadstoffe werden ermittelt, indem das chemische Potential eines jeden Stoffes, H^+ -Ionen zu bilden, in Relation gesetzt wird zum H^+ -Ionenbildungspotential der Referenzsubstanz SO_2 . Eine Liste der versauernd wirkenden Schadstoffe und der zugehörigen relativen Wirkungspotentiale findet sich in Anhang E.

Eutrophierungspotential

Der Effekt der Eutrophierung umfaßt den Eintrag von mineralischen Nährstoffen in Böden und Gewässer. Bei aquatischen Ökosystemen hat dies zunächst einen Anstieg der Biomasseproduktion zur Folge, kann aber später, wenn aufgrund des hohen Sauerstoffbedarfs der im Wasser enthaltenen Biomasse Sauerstoffknappheit entsteht, zu einem Absterben des Gewässers bzw. der in ihm enthaltenen Biomasse führen. Bei terrestrischen Ökosystemen führt ein verstärkter Nährstoffeintrag zu einer Verschiebung des Artengleichgewichts, die im allgemeinen mit einer Verringerung der Artenvielfalt verbunden ist.

Referenzsubstanz für die Berechnung des Eutrophierungspotentials ist Phosphat (PO_4^{3-}). Die wichtigste Luftschadstoffgruppe in Bezug auf die Wirkungskategorie Eutrophierung sind Stickoxide (NO_x), in geringerem Maß auch Ammoniak (NH_3). Die relativen Eutrophierungspotentiale der einzelnen Stoffe werden errechnet, indem deren Fähigkeit, zur Biomassebildung beizutragen, auf die Fähigkeit der Referenzsubstanz PO_4^{3-} , Biomasse zu bilden, bezogen wird. Aufgrund der Überlegung, daß das Vorkommen eines Elementes bei Vorhandensein aller anderen Elemente der begrenzende Parameter bei der Biomassebildung ist, wird als Maß für die Fähigkeit der Biomassebildung der Anteil des jeweiligen Stoffes an einer durchschnittlichen Biomassezusammensetzung $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$ angesetzt. Eine Liste der eutrophierend wirkenden Schadstoffe und der zugehörigen relativen Wirkungspotentiale findet sich in Anhang E.

1.4.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Die Abgabe von Luftschadstoffen führt im allgemeinen zu Änderungen der Schadstoffkonzentrationen in der Atmosphäre. Die daraus resultierende Änderung der Exposition der Bevölkerung mit Luftschadstoffen hat unterschiedliche gesundheitliche Auswirkungen zur Folge, die durch die beiden Wirkungsindikatoren „verlorene Lebenserwartung“ und „Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit“ beschrieben werden.

Verlorene Lebenserwartung

Das Resultat einer Erkrankung mit Todesfolge ist die Verkürzung der Lebensdauer. Als Wirkungsgröße wird daher die in einem betrachteten Bevölkerungskollektiv verursachte Änderung der Lebenszeit verwendet, die sich in verlorenen Lebensjahren angeben lässt.

Bei der Ermittlung der verlorenen Lebenserwartung werden hier folgende Wirkungspfade berücksichtigt: tödliche Krebserkrankungen durch ionisierende Strahlung, akute und chronische Mortalität durch Primär- und Sekundärpartikel, Mortalität durch Belastung mit Schwefeloxiden, akute Mortalität durch Bildung von bodennahem Ozon, tödliche Krebserkrankungen durch Abbau von stratosphärischem Ozon und tödliche Krebserkrankungen durch kanzerogen wirkende Schadstoffe. Eine Liste aller hier betrachteten Schadstoffe mit Auswirkungen auf die Lebenserwartung und der zugehörigen Charakterisierungsfaktoren findet sich in Anhang E.

Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit

Eine erhöhte Exposition mit Luftschadstoffen kann in einem Bevölkerungskollektiv eine Vielzahl unterschiedlicher nichttödlicher Krankheiten hervorrufen. Das Auftreten einer Krankheit ist verbunden mit einer Beeinträchtigung der Lebensqualität, die je nach Krankheitsbild unterschiedlich hoch sein kann. Um nicht für jedes Krankheitsbild eine eigene Kennzahl einführen zu müssen, werden die unterschiedlichen Beeinträchtigungsgrade in einen Referenzkrankheitszustand umgerechnet. Als Referenzgröße wird hier der in /ExternE 1999/ verwendete „Tag mit eingeschränkter Aktivität“ festgelegt. Andere Krankheitszustände werden anhand von Gewichtungsfaktoren, die aus der monetären Bewertung in /ExternE 1999/ abgeleitet werden, in ein Äquivalent von Tagen mit eingeschränkter Aktivität umgerechnet.

Als Wirkungspfade werden hier bei der Ermittlung der verlorenen Lebenserwartung berücksichtigt: Morbiditätsrisiko durch Primär- und Sekundärpartikel, Morbiditätsrisiko durch Belastung mit Schwefeloxiden und Morbiditätsrisiko durch Bildung von bodennahem Ozon. Eine Liste der hier betrachteten Schadstoffe und der zugehörigen Charakterisierungsfaktoren findet sich in Anhang E.

1.4.3 Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt

Luftschadstoffe können in der vom Menschen geschaffenen Umwelt Beeinträchtigungen in Form von Materialschäden und Schädigungen von Feldpflanzen verursachen.

Materialschäden durch säurebildende Gase

Säurebildende Gase entfalten ihre Wirkung, wenn sie mit der Materialfläche in Berührung kommen. Die trockene Deposition erfolgt bei SO_2 dadurch, daß das gasförmige SO_2 in Wasserfilmen auf der Materialoberfläche gelöst wird. Ein weiterer Wirkungsweg ist die nasse Deposition, bei der die saure Wirkung von Niederschlägen durch säurebildende Luftverunreinigungen erhöht wird.

Als Materialien, die durch säurebildende Gase geschädigt werden, sind vor allen Dingen anorganische, nichtmetallische Werkstoffe wie Naturstein, Beton und Ziegel-Mörtelsysteme anzusehen, bei denen die leicht wasserlöslichen Kalk- und Calzitkomponenten unter Reaktion mit den säurebildenden Stoffen Gips bilden. Der gebildete Gips weist eine höhere Wasserlöslichkeit auf als die zuvor vorliegenden Kalk- und Calzitkomponenten, so daß letztlich der natürliche, durch Regen verursachte Abtrag von Kalk und Calzit durch die Gipsbildung verstärkt wird. In geringerem Maße können auch Anstrichsysteme, bei denen die saure Deposition einen Verlust von Komponenten des Farbanstrichs und damit zu einer geringeren Lebensdauer führt, sowie nicht galvanisierter und nicht rostfreier Stahl beeinträchtigt werden.

Materialschäden durch oxidierende Gase

Oxidierende Gase können sowohl direkte als auch indirekte Wirkungen auf Materialien haben. Zu den direkten Effekten, die hauptsächlich auf organische Materialien (Kunststoffe) beschränkt sind, gehören Änderungen der Molekularstruktur des geschädigten Materials. Mit der Änderung der Molekularstruktur ist im allgemeinen eine Änderung der physikalischen Eigenschaften verbunden, die in der Regel zu einer Verminderung der Lebensdauer führt. Beim indirekten Effekt kommt es zur Oxidation in Flüssigkeitsfilmen auf der Oberfläche, beispielsweise von gelöstem SO_2 . Die daraus resultierende geringere Flüchtigkeit des SO_2 erhöht die Zeit für eine potentielle Schädigung des Materials durch das SO_2 .

Oxidierende Gase können sowohl Farbanstriche als auch Metalle schädigen. Bei letzteren ist jedoch ein Teil der Oxidationsprodukte wasserunlöslich, so daß sich schließlich Schutzschichten bilden können, die einen weiteren Abtrag des Materials verhindern.

Schädigung von Nutzpflanzen

Immissionen von Luftverunreinigungen können bei Pflanzen eine Folge von biochemischen und physiologischen Wirkungsprozessen auslösen, die schließlich zu einer Schädigung der Pflanzen führen. Nach der Schadstoffaufnahme kommt es zunächst zur Störung von Zellfunktionen und -strukturen. Der dadurch in einer Pflanze ausgelöste Reparaturmechanismus hemmt im allgemeinen Prozesse wie beispielsweise die Photosynthese, die wichtig sind für das Wachstum der Pflanze, und führt damit zu verminderten Erträgen bei Nutzpflanzen. Überschreitet die Schadstoffaufnahme die Reparaturkapazität der Pflanze, resultieren daraus weitergehende Veränderungen im Stoffwechsel der Organismen, die auch äußerlich sichtbare Schädigungen wie beispielsweise vorzeitiges Altern, Chlorosen (mangelnde Ausbildung von Blattgrün) und Nekrosen (Absterben von Zellen) zur Folge haben.

Die diskutierten Wirkungspfade werden im Hinblick auf die Schädigung einer Reihe unterschiedlicher Materialien untersucht. Für jedes betrachtete Material ergeben sich zusätzliche volkswirtschaftliche Aufwendungen in Form von Restaurationsarbeiten oder vorzeitigem Ersetzen geschädigter Materialien. Ebenso werden die Auswirkungen von Luftschadstoffemissionen auf verschiedene Nutzpflanzen untersucht, so daß sich zunächst für jeden betrachteten Pflanzentyp eine Resultatgröße ergibt, die den Ernteverlust in einer Masseneinheit beschreibt. Damit sich nicht eine zu große Zahl von Ergebnisgrößen ergibt, werden bereits hier die verschiedenen Schädigungen über Marktpreise, beispielsweise für Instandhaltungsarbeiten und das Ersetzen von Materialien und Erntegütern, zu insgesamt zwei Kenngrößen zusammengefaßt. Eine Liste der hier betrachteten Schadstoffe mit Auswirkungen auf die vom Menschen geschaffene Umwelt und der zugehörigen Charakterisierungsfaktoren findet sich in Anhang E.

1.4.4 Verbrauch endlicher Primärenergieträger

Der Begriff des kumulierten Energieaufwand wird in der VDI-Richtlinie 4600 definiert:

„Der kumulierte Energieaufwand gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, der Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung, die Nutzung und die Entsorgung des ökonomischen Gutes dar.“

Die VDI-Richtlinien legt nicht abschließend fest, wie die verschiedenen Energiequellen und Energieträger primärenergetisch zu bewerten sind. Grund hierfür ist, daß es verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für die Kenngröße des kumulierten Energieaufwandes gibt und daher „der methodischen Weiterentwicklung Möglichkeiten offen gelassen werden“ sollen.

Derzeit findet der kumulierte Energieaufwand auf zwei Arten innerhalb von Ökobilanzen Anwendung. Einerseits dient der kumulierte Energieaufwand als Screening-Größe und wird stellvertretend für alle möglichen Umweltwirkungen betrachtet. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zu Grunde, daß die Höhe der Umweltwirkungen in erster Näherung proportional zur Höhe des kumulierten Energieaufwandes ist. Dies ist jedoch eine wenig sinnvolle Annahme, da sich beispielsweise für ein Kohlekraftwerk mit Rauchgasreinigung ein höherer kumulierter Energieaufwand als für ein Kohlekraftwerk ohne Rauchgasreinigung bei sonst gleichen Betriebsparametern errechnet, obwohl die Umweltwirkungen des Kraftwerkes mit Rauchgasreinigung - auch bei Einrechnung der indirekten Aufwendungen für die Rauchgasreinigung - deutlich geringer ausfallen. Darüber hinaus weisen Systeme zur Nutzung von konventionellen Brennstoffen, Uran und regenerativen Energien sehr verschiedenartige Wirkungsaspekte auf, deren relative Gewichtung zueinander von Werthaltungen abhängt und daher nicht einer Vorgehensweise zur Berechnung des kumulierten Energieaufwandes entsprechen muß.

Andererseits wird die Kenngröße des kumulierten Energieaufwandes verwendet, um den Verbrauch der endlichen Energieträger Braunkohle, Steinkohle, Erdöl, Erdgas und Uran zu quantifizieren. In die Berechnung des kumulierten Energieaufwandes gehen in diesem Fall alle der Umwelt entnommen Energieträgermengen ein, also auch die Entnahmen, die einer

nichtenergetischen Nutzung zugeführt werden. Die Energieträger werden dabei mit ihrem jeweiligen unteren Heizwert primärenergetisch bewertet. Die primärenergetische Bewertung der Nutzung von Uran erfolgt anhand eines Heizwertäquivalents, das die aktuelle Nutzung des Uranbrennstoffes zur Stromerzeugung wiederspiegelt. Problematisch ist hierbei, daß die unterschiedliche Knappheit der Energieträger in diese Kenngröße nicht eingeht: Die Abbaurate eines Energietägers, dessen Vorkommen schneller erschöpft sein wird und der daher wertvoller einzustufen ist, sollte im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung eher reduziert werden oder zumindest langsamer anwachsen als die Abbaurate eines Energieträgers, dessen Vorräte noch für eine längere Zeit reichen. Da knappe Güter am Markt einen höheren Preis erzielen, dürfte sich die Knappheit von Energieträgern eher im Preis einer Ressource wieder spiegeln. Ein Ansatz zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs, der sich auf den Preis einer Ressource stützt, hätte zudem den Vorteil, auch auf nichtenergetische Ressourcen anwendbar zu sein.

Da jedoch der kumulierte Energieaufwand eine häufig diskutierte Größe ist, wird in diesem Projekt dennoch der Verbrauch endlicher Energieträger betrachtet und der kumulierte Energieaufwand nach der Ressourcenmethode berechnet /Hoffmann 1996/. Die primärenergetische Bewertung der Nutzung von Uran erfolgt dabei entsprechend der Empfehlung der VDI-Richtlinie 4600, nukleare Brennstoffe mit einem Kraftwerksnutzungsgrad von 33% zu bewerten. Dies bedeutet, daß die Nettoerzeugung einer Kilowattstunde Elektrizität in einem Kernkraftwerk mit einem Primärenergieäquivalent von $3,03 \text{ kWh}_{\text{prim}}$ bewertet wird.

In die zusammenfassende Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse geht der kumulierte Energieaufwand nicht ein, da - wie oben angeführt - der Verbrauch knapper Ressourcen im Preis des Energieträgers wenigstens teilweise indirekt enthalten ist.

1.4.5 Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse

Die Gewichtung von Wirkungsindikatorergebnissen stellt einen nach /ISO14042 1999/ wahlweisen Bestandteil der ganzheitlichen Bilanzierung dar. Mit ihm werden die Resultate für die einzelnen Wirkungskategorien unter Verwendung von Gewichtungsfaktoren in eine gemeinsame Skala transformiert und so eine Beurteilung eines Wirkungsindikatorergebnisses in Relation zu den anderen Wirkungsindikatorergebnissen sowie ein quantitativer Vergleich zwischen den bilanzierten Systemalternativen ermöglicht.

Hier erfolgt die Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse anhand der monetären Bewertung. Ansätze zur monetären Bewertung von Gesundheitsrisiken und Schäden in der natürlichen und der vom Menschen geschaffenen Umwelt stammen aus der Wohlfahrts- und Umweltökonomie. In der ökonomischen Betrachtungsweise sind die natürliche Umwelt etc. knappe Güter. Deren unerwünschte Schädigung durch anthropogene Aktivitäten wird als Problem der Allokation knapper Ressourcen gesehen. Da die Nutzung von Umweltgütern wie beispielsweise sauberer Luft nichts kostet, werden sie stärker nachgefragt als dies bei korrekten Preisen der Fall wäre. Um zu einer optimalen Allokation knapper Ressourcen zu kommen, müssen die durch ein Produkt verursachten Schäden durch geeignete Instrumente wie Steuern, Abgaben oder ähnliches im Preis des Produktes berücksichtigt werden. Um dieses Ziel erreichen zu können, ist es erforderlich, die Schäden in Geldwerten auszudrücken.

Hier werden für die monetäre Bewertung der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit die in /ExternE 1999/ ermittelten Gewichtungsfaktoren verwendet. Dabei wird der An-

satz der Zahlungsbereitschaft verwendet. Dies bedeutet, daß ein Risiko mit dem Geldwert bewertet wird, den die betroffenen Personen bereit wären zu zahlen, wenn sie dadurch das Risiko vermeiden könnten. Dementsprechend wird ein verlorenes Lebensjahr mit 104760 Euro bewertet, das Äquivalent eines Tages mit eingeschränkter Aktivität mit 110 Euro. Die Schädigung von Materialien und Feldpflanzen wurde bereits bei der Berechnung von Wirkungsindikatorergebnissen in Geldeinheiten ausgedrückt, so daß hier eine weitere Umrechnung entfällt.

Die zuvor errechneten Wirkungspotentiale stellen keine Kenngrößen dar, die einen konkreten Schaden quantifizieren. So gibt das Treibhauspotential nur die Gesamtmenge der emittierten Treibhausgase in Einheiten der Referenzsubstanz Kohlendioxid an, nicht aber die aus dem Beitrag zum Treibhauseffekt resultierenden Schäden für Mensch und Umwelt. Der Standard-Preis-Ansatzes /Huetting 1991/ erlaubt es, auch für Wirkungspotentiale eine monetäre Bewertung durchzuführen. Dabei wird von Vermeidungs- oder Minderungskosten ausgegangen, die zur Erreichung eines von der Gesellschaft gesetzten Emissionsminderungszieles aufzubringen sind. Nimmt man an, daß bei der Implementierung von Minderungsmaßnahmen sukzessive immer die kostengünstigste Maßnahme eingesetzt wird, stellen die Kosten für die zuletzt eingesetzte Maßnahme, mit der das Minderungsziel erreicht wird, die marginalen Minderungskosten dar. Dieser Betrag muß beispielsweise als Abgabe auf die Emission des jeweiligen Schadstoffes oder der jeweiligen Schadstoffgruppe eingeführt werden, um über marktwirtschaftliche Mechanismen die Umsetzung aller erforderlichen Minderungsmaßnahmen auszulösen, mit denen dann das Minderungsziel erreicht wird.

Zur Ableitung von marginalen Minderungskosten für Treibhausgase wird auf /Forum 1999/ zurückgegriffen und marginale Minderungskosten von 19 Euro pro Tonne CO₂ zur monetären Bewertung des Treibhauspotentials angesetzt.

Das Eutrophierungs- und das Versauerungspotential stehen für zwei Effekte, die Ökosysteme schädigen. Auf europäischer Ebene liegt eine Vereinbarung über eine Minderung der Emission bestimmter Schadstoffe zum Schutz von Ökosystemen vor /CoEC 1997/. Hierzu können auf Basis der Studie /Amann et al. 1998/ marginale Minderungskosten in Höhe von 1480 Euro pro Tonne SO₂ und 1530 Euro pro Tonne NO_x berechnet werden. Da der Schadstoff NO_x sowohl in das Versauerungspotential als auch das Eutrophierungspotential eingeht, würde eine monetäre Bewertung der Potentiale zu einer zweifachen Bewertung des Schadstoffes NO_x für die gleiche Schädigung führen. Aus diesem Grund werden hier zur monetären Bewertung der Schädigung von Ökosystemen direkt die in der Sachbilanz ermittelten Stoffströme für SO₂ und NO_x monetär bewertet, auch wenn dabei die Beiträge anderer Schadstoffe zu den Wirkungspotentialen vernachlässigt werden.

2 Ganzheitliche Bilanzierung von Techniken zur Stromerzeugung

2.1 Referenzanlagen

Zur Bilanzierung der Stromerzeugung unter Verwendung fossiler oder nuklearer Brennstoffe werden im folgenden verschiedene Referenzanlagen großer Leistungsklassen ($> 500 \text{ MW}_{\text{el}}$) definiert, die entweder dem heutigen Stand der Technik entsprechen oder einen Stand der Technik aufweisen, der kurz- bis mittelfristig (Zeitraum 2005/2010) wirtschaftlich verfügbar sein kann. Zur Bilanzierung der Stromerzeugung auf Basis regenerativer Energien werden ebenfalls die jeweils üblichen, heute und in naher Zukunft einsetzbaren Techniken und Leistungsklassen ausgewählt.

Braunkohlegefeuerte Kraftwerke. Braunkohlegefeuerte Kraftwerke erreichen heute einen Nutzungsgrad von 40% bei der Stromerzeugung. Beispiel hierfür ist das 1997 (Block 1) in Betrieb genommene Kraftwerk Schwarze Pumpe in Spremberg, das eine einfache Zwischenüberhitzung und eine Frischdampftemperatur von ca. 540 Grad Celsius bei 250 bar aufweist. Damit entspricht das Kraftwerk Schwarze Pumpe dem in /Wehowsky et al. 1994/ definierten Braunkohlekraftwerk mit heutigem Stand der Technik, das hier als Referenzkraftwerk bilanziert wird, siehe Tabelle 2-1. Als Weiterentwicklung der konventionellen Kraftwerkstechnik wird in Anlehnung an das vorraussichtlich im Jahr 2002 in Betrieb gehende Braunkohlekraftwerk der RWE-Energie in Niederaußem ein Referenzkraftwerk mit einem Nutzungsgrad von 43% angenommen. Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung des Nutzungsgrades von Braunkohlekraftwerken stellt die Nutzung der GuD-Technik dar. Braunkohlekraftwerke mit integrierter Kohlevergasung sollen mittelfristig je nach Turbineneintrittstemperatur und Anzahl der Druckprozesse Nutzungsgrade zwischen 48 % und 50,5 % erreichen. Die zwei in /Wehowsky et al. 1994/ angeführten GuD-Kraftwerke auf Braunkohlenbasis sind als Referenzkraftwerke für den Bezugszeitraum 2005/10 definiert worden und werden ebenfalls in dieser Arbeit bilanziert.

Aufgrund des geringen Heizwertes von Braunkohlen ist der Transport von Braunkohle über große Entfernungen nicht wirtschaftlich. Die Verstromung von Braunkohle in Großkraftwerken erfolgt daher immer in der Nähe des Abbaureviers. Für die Stromerzeugung aus Braunkohle wird daher entsprechend den Gegebenheiten in Deutschland eine Tagebauförderung mit Referenzstandort Rheinland angenommen. Braunkohlekraftwerke werden im Grundlastbereich eingesetzt, so daß bei allen Anlagen ein Referenzbetriebzustand mit 6500 Volllaststunden pro Jahr betrachtet wird. Als Lebensdauer wird für alle Anlagen einheitlich ein Zeitraum von 35 Jahren angesetzt.

Steinkohlegefeuerte Kraftwerke. Bei steinkohlegefeuerten Kraftwerken mit Staubfeuerung werden im Gegensatz zu braunkohlegefeuerten Kraftwerken, die heute nur eine Zwischenüberhitzung aufweisen, zweistufige Zwischenüberhitzungen realisiert, die dann zu entsprechend höheren Wirkungsgraden führen. Beispiele sind die 1994 und 1995 in Betrieb genommenen, baugleichen Kraftwerksblöcke Staudinger V und Rostock, die einen Nutzungsgrad von 43 % aufweisen. Auch hier können höhere Dampfparameter zukünftig zu Wirkungsgradsteigerungen führen. Als Referenztechnik wird hier in Anlehnung an /Wehowsky et al. 1994/ für den Bezugszeitraum 2005/2010 eine Staubfeuerung mit einem Nutzungsgrad von

45,5 % angenommen. Anlagen mit integrierter Steinkohlevergasung sollen zukünftig je nach realisierter Turbineneintrittstemperatur und Anzahl der Druckprozesse Nutzungsgrade zwischen 46 % und 48,5 % aufweisen können. Die zwei in /Wehowsky et al. 1994/ angeführten GuD-Kraftwerke auf Steinkohlebasis sind als Referenzkraftwerke für den Bezugszeitraum 2005/2010 definiert worden und werden ebenfalls in dieser Arbeit bilanziert. Die geringeren Nutzungsgrade der GuD-Kraftwerke auf Steinkohlebasis im Vergleich zu den braunkohle-gefeuerten GuD-Kraftwerken resultieren aus der Tatsache, daß die integrierte Kohlevergasung bei der Nutzung von Braunkohle in GuD-Anlagen keine gesonderte Luftzerlegungsanlage benötigt, während die Bereitstellung von reinem Sauerstoff bei der Steinkohlevergasung mit einem vergleichsweise hohen Energieaufwand verbunden ist.

Steinkohlekraftwerke können sowohl im Mittellastbereich als auch im Grundlastbereich eingesetzt werden. Heute überwiegt der Einsatz im Mittellastbereich, so daß für das Dampfkraftwerk mit einem Nutzungsgrad von 43% ein Referenzbetriebzustand mit 5000 Volllaststunden pro Jahr angesetzt wird. Für die Anlagen mit zukünftigem Stand der Technik wird in Anlehnung an /Wehowsky et al. 1994/ ein Referenzbetriebzustand mit 7270 Volllaststunden pro Jahr angenommen. Als Lebensdauer wird für alle Anlagen einheitlich ein Zeitraum von 35 Jahren angesetzt.

In Deutschland kommt überwiegend im Inland gewonnene Steinkohle zum Einsatz, die hauptsächlich in den Revieren Saarland und Ruhrgebiet abgebaut wird. Daneben wird Steinkohle aus Polen und Südafrika sowie zu geringeren Anteilen aus Australien und den USA importiert. Da der Anteil der Importkohle in Zukunft zunehmen wird, werden in dieser Arbeit auch die unterschiedlichen Bereitstellungspfade von Steinkohlen aus dem Ausland bilanziert.

Erdgasgefeuerte Kraftwerke. Bei erdgasgefeuerten Kraftwerken ist schon heute die Anwendung der GuD-Technik Stand der Technik, so daß für die Zukunft keine nennenswerten Nutzungsgradsteigerungen mehr zu erwarten sind. Als Referenzkraftwerk wird ein GuD-Kraftwerk mit einem Nutzungsgrad von 57,6 % bilanziert, das in /Wehowsky et al. 1994/ definiert ist, und entsprechend eine Lebensdauer von 35 Jahren angenommen.

Die Erdgasversorgung in Deutschland stützt sich zum einen auf die Inlandsförderung, zum anderen auf Importe, vor allen Dingen aus den Niederlanden, Norwegen und der Gemeinschaft unabhängiger Staaten. Alle vier Bereitstellungsketten werden in dieser Arbeit bilanziert.

Kernkraftwerke. Die zuletzt in Deutschland in Betrieb genommenen Kernkraftwerke sind Druckwasserreaktoren (DWR), die eine hohe Lastwechselfähigkeit aufweisen und daher nicht nur für die Grundlastversorgung nutzbar sind, sondern auch in Tageszyklen gefahren oder zur automatischen Frequenzunterstützung genutzt werden können. Beispiele für diesen Kraftwerkstyp sind in Deutschland die Anlagen Isar-2, Emsland und Neckarwestheim-2, die in den 80er Jahren in Betrieb genommen wurden. Unter heutigen Betriebsbedingungen erreicht das letztgenannte Kraftwerk einen Abbrand von 50 000 MWd pro Tonne Uran mit einem Anreicherungsgrad von 4% U-235. Als Referenzkraftwerk für zukünftig verfügbare Technik der Stromerzeugung aus Kernkraft wird in Anlehnung an die gegenwärtig von deutschen und französischen Firmen betriebene Entwicklung des European Pressurized Water Reaktor (EPR) ein Kraftwerk angenommen, das bei einer Beladung von Brennelementen mit einem U-235-Gehalt von 4,9% einen Abbrand von 60 000 MWd pro Tonne Uran erreicht. Nach /Wehowsky et al. 1994/ soll dieser Kraftwerkstyp ab 2005 verfügbar sein. Kernkraftwerke

werden gegenwärtig im Grundlastbereich eingesetzt, so daß bei allen Anlagen ein Referenzbetriebzustand mit 7800 Volllaststunden pro Jahr betrachtet wird. Als Lebensdauer wird für beide Referenzkraftwerke ein Zeitraum von 40 Jahren angesetzt.

Da in Deutschland kein Uranbergbau mehr betrieben wird, wird die Versorgung mit Uranbrennstoff ausschließlich durch Importe gedeckt. Nach /OECD/IAEA 1988/ stammt der Hauptteil der Uranproduktion der westlichen Welt aus Nordamerika (Kanada und USA), Afrika (Republik Südafrika, Namibia und Niger) und Australien. Über die Produktion in den ehemals oder heute noch zentralwirtschaftlich organisierten Volkswirtschaften (Gemeinschaft unabhängiger Staaten, Osteuropa und Volksrepublik China) liegen derzeit keine Daten vor. Es wird davon ausgegangen, daß diese Fördergebiete ebenso wie die Förderung in Australien für die Stromerzeugung aus Kernkraft in Deutschland keine Bedeutung haben. In dieser Arbeit werden daher Bereitstellungsketten für die zwei Regionen Nordamerika und Afrika bilanziert. Für die Entsorgung stehen sowohl die direkte Endlagerung als auch die Wiederaufarbeitung in französischen und englischen Wiederaufarbeitungsanlagen zur Verfügung. Da die hier bilanzierten Referenzanlagen auch mit Mischoxid-Brennelementen (MOX-Brennelementen), die wiederaufbereiteten Uranbrennstoff enthalten, betrieben werden können, wird neben der direkten Endlagerung auch die Brennelementbereitstellung inklusive Wiederaufarbeitung betrachtet.

Anlagen zur Nutzung von Solarstrahlung. Neben der photovoltaischen Stromerzeugung ist die solarthermische Stromerzeugung eine weitere Möglichkeit zur Wandlung von Solarstrahlung in elektrische Energie. Da jedoch solarthermische Kraftwerke im Gegensatz zu photovoltaischen Anlagen nur die direkte Strahlung, nicht aber diffuse Strahlung nutzen, weist die solarthermische Stromerzeugung in Deutschland einen geringeren Nutzungsgrad und höhere Stromgestehungskosten als die photovoltaische Stromerzeugung auf. In Deutschland wird daher gegenwärtig die photovoltaische Stromerzeugung favorisiert. Aus diesem Grund wurden in diesem Projekt ausschließlich Bilanzen für Anlagen zur photovoltaischen Stromerzeugung erstellt, wobei zwischen Dachanlagen, die in der Regel kleinere Leistungseinheiten aufweisen, und Photovoltaikkraftwerken größerer Leistung unterschieden wird.

Neben der Herstellung von Solarzellen aus poly- und monokristallinem Zellenmaterial wird auch die Herstellung von Dünnschichtzellen auf Basis von amorphem Silizium bilanziert. Für alle drei Solarzellentypen wird jeweils eine Dachanlage mit einer installierten Leistung von 5 kW, die Strom in das Niederspannungsnetz einspeist, und ein Photovoltaikkraftwerk mit einer Leistung von 1 MW, das Strom an das Mittelspannungsnetz abgibt, untersucht. Dabei wird eine Lebensdauer von 25 Jahren und eine Volllaststundenzahl von 880 h/a (Dachanlagen) bzw. 935 h/a (PV-Kraftwerke) zu Grunde gelegt. Für die PV-Kraftwerke wird eine etwas höhere Volllaststundenzahl angesetzt, weil bei diesen eher eine optimale Ausrichtung vorgenommen werden kann als bei Dachanlagen.

Anlagen zur Nutzung von Windkraft. Bei der Nutzung von Windkraft zur Stromerzeugung kommen in Deutschland zunehmend Anlagen größerer Leistungsklassen zum Einsatz. Die größten, heute kommerziell betriebenen Anlagen weisen eine installierte Leistung von 1,5 MW auf. Da weiterhin auch Anlagen kleinerer Leistung installiert werden, werden hier als Referenzanlagen vier typische Anlagen mit installierten Leistungen von 270 kW, 600 kW, 1 MW und 1,5 MW betrachtet. Für alle Anlagen wird eine Bilanzierung mit einer jahresmittleren Windgeschwindigkeit von 5,5 m/s in einer Höhe von 10 m über dem Boden durchge-

führt. Um den Einfluß verschiedener, für Deutschland typischer Betriebsbedingungen zu untersuchen, werden für die Windkraftanlage mit einer installierten Leistung von 1 MW zusätzlich die jahresmittleren Windgeschwindigkeiten von 4,5 und 6,5 m/s untersucht. Als Lebensdauer wird für alle Windkraftanlagen eine Zeitspanne von 20 Jahren angenommen.

Für Offshore-Anlagen, die zukünftig auch in Deutschland von Interesse sein könnten, liegen derzeit keine Daten vor, so daß hier keine Bilanzierung darartiger Anlagen vorgenommen wird.

Anlagen zu Nutzung von Wasserkraft. Das technische Potential zur Stromerzeugung aus Wasserkraft wird in Deutschland bereits zu ca. 75% genutzt. Eine Nutzung über bereits bestehende Anlagen hinaus kann in einem geringem Umfang durch einen Anlagenneubau sowie im wesentlichen durch Reaktivierung, Modernisierung und einem Um- oder Ausbau bestehender Kraftwerke realisiert werden. Hauptgründe gegen einen weiteren Ausbau sind Umweltschutzgründe, da der Bau von Wasserkraftanlagen immer einen bedeutsamen Eingriff in das Fließwassersystem darstellt und weitreichende ökologische Folgen nach sich ziehen kann /Kaltschmitt; Wiese 1997/.

Es wird davon ausgegangen, daß in Deutschland in näherer Zukunft lediglich Anlagen kleinerer Leistung zugebaut werden. Daher werden hier ausschließlich Referenzanlagen kleinerer Leistungen von 300 kW, 500 kW, 2,2 MW und 3,1 MW bilanziert. Alle Anlagen sind Laufwasserkraftanlagen, bei denen das Krafthaus in bereits bestehende Wehre eingebaut wird. In die Bilanzen geht neben dem Betrieb des Wasserkraftwerkes lediglich der Bau und der Abriß des Krafthauses ein, nicht aber der Bau, die Instandhaltung oder der Rückbau des Wehres, bei dem davon ausgegangen wird, daß es vorrangig anderen Nutzen wie der Schifffahrt oder dem Hochwasserschutz dient. Für die Anlagen kleinerer Leistung (300 und 500 kW) wird eine jährliche Volllaststundenzahl von 4900 h/a und für Anlagen größerer Leistung (2,2 und 3,1 MW) eine jährliche Volllaststundenzahl von 5100 h/a angenommen. Allen Bilanzen wird eine Lebensdauer von 60 Jahren zu Grunde gelegt.

Zusammenfassende Auflistung der betrachteten Referenzanlagen. Die in diesem Projekt betrachteten Referenztechniken zur Stromerzeugung auf Basis fossiler und nuklearer Brennstoffe sowie regenerativer Energien sind zusammenfassend in Tabelle 2-1 aufgelistet. Da im Rahmen dieses Kapitels nicht die Ergebnisse für alle bilanzierten Anlagen dargestellt werden können, erfolgt die Diskussion der Sachbilanzergebnisse und der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung anhand eines repräsentativen Teils der erstellten Bilanzen. Die Referenzanlagen, deren Ergebnisse in diesem Kapitel diskutiert werden, sind in der Tabelle 2-1 gesondert gekennzeichnet. Detaillierte Ergebnisse für alle betrachteten Anlagen finden sich in den Anhängen A (Sachbilanzen) und B (Wirkungsabschätzung).

Tabelle 2-1: Referenzanlagen für die Stromerzeugung

Brennstoff	Ref. ^a	Technik	Installierte Leistung netto	Nutzungsgrad	Lebensdauer	Technische Verfügbarkeit
Braunkohle	X	Staubfeuerung	800,0 MW	40,1 %	35 a	heute
		Staubfeuerung	800,0 MW	43,0 %	35 a	2002
		GuD ^b mit Kohlevergasung	685,5 MW	48,0 %	35 a	2005/2010
	X	GuD ^b mit Kohlevergasung	798,5 MW	50,5 %	35 a	2005/2010
Steinkohle	X	Staubfeuerung	600,0 MW	43,0 %	35 a	heute
		Staubfeuerung	600,0 MW	45,5 %	35 a	2005/2010
		GuD ^b mit Kohlevergasung	690,0 MW	46,0 %	35 a	2005/2010
	X	GuD ^b mit Kohlevergasung	823,0 MW	48,5 %	35 a	2005/2010
Erdgas	X	GuD ^b	777,5 MW	57,6 %	35 a	heute
Uran	X	DWR ^c heute	1375 MW	-	40 a	heute
		EPR ^d	1470 MW	-	40 a	2005/10
Solarstrahlung	X ^h	PV ^e - polykristallin	5 kW / 1 MW	9,5 % ^f	25 a	heute
		PV ^e - monokristallin	5 kW / 1 MW	10,5 % ^f	25 a	heute
	X ^h	PV ^e - amorph	5 kW / 1 MW	4,5 % ^f	25 a	heute
Windkraft		5,5 m/s	270 kW	-	20 a	heute
		5,5 m/s	600 kW	-	20 a	heute
	X	5,5 m/s, 4,5 m/s, 6,5 m/s	1 MW	-	20 a	heute
		5,5 m/s	1,5 MW	-	20 a	heute
Wasserkraft		Laufwasserkraft	300 kW	95 ^g	60 a	heute
		Laufwasserkraft	500 kW	95 ^g	60 a	heute
		Laufwasserkraft	2,2 MW	96 ^g	60 a	heute
	X	Laufwasserkraft	3,1 MW	90 ^g	60 a	heute

^a X = ausgewählte Referenzanlagen für Ergebnisdiskussion in diesem Kapitel. Den in diesem Kapitel dargestellten Bilanzen liegen folgende Annahmen zugrunde: Braunkohle Inlandsförderung, Steinkohle Inlandsförderung, Erdgas Mix Deutschland, Kernkraft mit Wiederaufarbeitung, solare Einstrahlung 1100 kWh/(m²*a), Windkraft durchschnittliche Windgeschwindigkeit 5,5 m/s in 10 m Höhe ^b GuD = Gas- und Dampfturbinenkraftwerk ^c DWR = Druckwasserreaktor ^d EPR = European Pressurized Water Reactor ^e PV = Photovoltaik ^f Systemnutzungsgrad inkl. Wechselrichterwirkungsgrad ^g Turbinenwirkungsgrad ^h Als Referenzanlagen für die Ergebnisdiskussion sind die Photovoltaikkraftwerke mit der installierten Leistung von 5 kW verwendet worden

2.2 Sachbilanzen

Die im Rahmen dieses Projektes erstellten Sachbilanzen umfassen eine große Anzahl von Sachbilanzgrößen. Einen Auszug der betrachteten Sachbilanzgrößen stellen die im Anhang E aufgeführten Größen dar, die über die dort aufgelisteten Charakterisierungsfaktoren in die Berechnung von Wirkungsindikatoren eingehen. Da eine Darstellung aller Sachbilanzergebnisse aus Platzgründen nicht möglich ist, beschränkt sich die Darstellung hier auf einige ausgewählte Größen, die für die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung einschließlich der monetären Bewertung von besonderer Bedeutung sind. Zusätzlich werden hier die Entnahmen an Bauxit, Eisen, Kupfer und Kalkstein aufgeführt, um beispielhaft die Wirkungskategorie der Inanspruchnahme nichtenergetischer Rohstoffe darzustellen, die nicht im Rahmen der Wirkungsabschätzung betrachtet wird.

2.2.1 Braunkohle-, steinkohle- und erdgasbefeuerte Kraftwerke

Tabelle 2-2 zeigt beispielhaft ausgewählte Sachbilanzergebnisse für ein braunkohlebefeuertes Dampfkraftwerk mit einem Nutzungsgrad von 40%, ein braunkohlegefeuertes GuD-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung und einem Nutzungsgrad von 50,5%, ein steinkohlebefeuertes Dampfkraftwerk mit einem Nutzungsgrad von 43%, ein steinkohlebefeuertes GuD-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung und einem Nutzungsgrad von 48,5% sowie ein erdgasbefeuertes GuD-Kraftwerk mit einem Nutzungsgrad von 57,6%. Den dargestellten Bilanzen der Kohlekraftwerke liegt jeweils die Annahme der Inlandsförderung des Hauptbrennstoffes, also der Braun- und der Steinkohle zugrunde. Für die Bilanz des Erdgas-Kraftwerkes wurde angenommen, daß Erdgas entsprechend dem aktuellen Bereitstellungsmix Deutschlands bezogen wird.

Die in Tabelle 2-2 dargestellten Emissionsbilanzen für CO₂, CH₄, N₂O, Partikel, NO_x und SO₂ weisen die Beiträge des Kraftwerksbetriebes, der Brennstoffbereitstellung und der sonstigen Abschnitte der betrachteten Lebenswege an den kumulierten Emissionen des betrachteten Lebensweges aus. Die Brennstoffbereitstellung umfaßt dabei alle für die Förderung und den Transport der Kohle erforderlichen Prozesse und Vorleistungen, also nicht nur die Stromerzeugung für die Brennstoffförderung, sondern beispielsweise auch die Bereitstellung weiterer Vorleistungen einschließlich der Herstellung von Infrastrukturgütern. Die sonstigen Lebenswegabschnitte umfassen den Bau und den Abriß des Kraftwerkes sowie die Bereitstellung sonstiger Vorleistungen für den Betrieb des Kraftwerkes wie zum Beispiel die Bereitstellung von Kalk für die Rauchgasreinigung, Ammoniak für die Entstickung der Rauchgase, Heizöl für das Anfahren der Kraftwerke und die Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten während des Betriebs des Kraftwerkes.

Die direkten Emissionen aus dem Kraftwerksbetrieb liefern zwar in den meisten Fällen den größten Beitrag zu den kumulierten Emissionen, jedoch wird deutlich, daß die indirekten Emissionen einen durchaus relevanten Anteil an den kumulierten Emissionenswerten aller Schadstoffe aufweisen. Die Partikelemissionen aus der Braunkohleförderung sowie die CH₄-Emissionen aus der Steinkohleförderung und der Erdgasbereitstellung liegen sogar deutlich über den direkten Emissionen des jeweiligen Kraftwerksbetriebes. Der Vergleich der Dampfkraftwerke mit den GuD-Kraftwerken zeigt, daß die Einführung der GuD-Technik bei den kohlebefeuerten Kraftwerken die direkten Emissionen aus dem Kraftwerksbetrieb zum Teil drastisch gegenüber den Dampfkraftwerken senkt. Dies führt dazu, daß der prozentuale Anteil der indirekten Emissionen an den Gesamtemissionen wie beispielsweise bei NO_x und SO₂ deutlich zunimmt.

Neben den klassischen Schadstoffen wurden auch eine große Anzahl radioaktiver Emissionen betrachtet. Aus Darstellungsgründen wird hier die aus der Freisetzung verschiedener Nuklide resultierende Kollektivdosis als aggregierender Indikator angegeben. Bei der Steinkohle spielen das bei der Kohleförderung freigesetzte Radon sowie bei der Verbrennung der Steinkohle im Kraftwerk freigesetzte radioaktive Emissionen eine gewisse Rolle, ansonsten stammen die indirekten Emissionen beispielsweise aus dem Betrieb von Kernkraftwerken, die Elektrizität für die Vorketten bereitstellen.

Tabelle 2-2: Sachbilanzen für Stromerzeugung aus Kohle und Erdgas

Bilanzgröße	Einheit	Braunkohle	Braunkohle	Steinkohle ^a	Steinkohle ^a	Erdgas ^b
		heute	2005/10	heute	2005/10	heute
		Dampfkraft- werk 40%	GuD ^c -Kraft- werk 50,5%	Dampfkraft- werk 43%	GuD ^c -Kraft- werk 48,5%	GuD ^c - Kraftwerk 57,6%
CO₂ gesamt	g/kWh	1054	829	838	740	386
Kraftwerksbetrieb		998	791	766	679	349
Brennstoffbereitstellung		39	25	55	48	32
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		17	13	17	13	5
CH₄ gesamt	mg/kWh	94	94	4716	4171	1076
Kraftwerksbetrieb		13	11	42	12	27
Brennstoffbereitstellung		46	36	4596	4075	1036
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		35	47	78	85	14
N₂O gesamt	mg/kWh	53	24	47	42	5
Kraftwerksbetrieb		50	21	42	37	1
Brennstoffbereitstellung		3	1	4	4	3
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	2	1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	263	222	64	65	37
Kraftwerksbetrieb		13	20	11	19	0
Brennstoffbereitstellung		227	178	23	21	33
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		23	24	30	26	4
NO_x gesamt	mg/kWh	830	354	696	414	351
Kraftwerksbetrieb		763	301	551	284	208
Brennstoffbereitstellung		44	23	115	102	133
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		23	30	31	28	11
SO_x gesamt	mg/kWh	401	232	351	275	125
Kraftwerksbetrieb		318	150	207	142	0
Brennstoffbereitstellung		37	25	82	73	101
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		46	57	62	60	24
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv/kWh	7	7	12	11	9
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	19	18	20	16	2
Entnahme an Eisen	mg/kWh	2102	2098	2306	1771	1205
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	8	7	2	2	1
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	20302	2283	12873	4792	6382

^a Steinkohle aus Inlandförderung ^b Mix-Deutschland: 21,9% inländische Förderung, 31,1% Niederlande, 13,8% Norwegen, 33,2% Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) ^c GuD = Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

Als weitere Beispiele für Sachbilanzerggebnisse sind in Tabelle 2-2 die kumulierten Entnahmen an Bauxit, Eisen, Kupfer und Kalkstein aufgeführt. Neben dem Bau des Kraftwerkes verursachen insbesondere bei dem Rohstoff Eisen auch die Brennstoffbereitstellung einen großen Teil der gesamten Rohstoffinanspruchnahmen. Im Gegensatz zu den anderen Rohstoffen ergeben sich bei Kalkstein deutliche Unterschiede zwischen kohlebefeuelten Dampfkraft- und GuD-Kraftwerken, die nicht auf der Änderung des Nutzungsgrades beruhen, sondern sich

aus der Tatsache ergeben, daß der Rohstoff Kalkstein in den Dampfkraftwerken für die Rauchgasreinigung eingesetzt wird.

Wie die Ergebnisse in Tabelle 2-2 zeigen, ist die Brennstoffbereitstellung ein wichtiger Teilbereich der Bilanzen kohlegefeuerter Kraftwerke. Während Braunkohlekraftwerke immer aus nahegelegenen Tagebauen beschickt werden, kann in Steinkohlekraftwerken auch Importkohle zum Einsatz kommen. Unterschiedliche Förder- und Transportbedingungen haben unterschiedlich hohe Umwelteinwirkungen zur Folge. Für das gleiche steinkohlegefeuerte Kraftwerk ergeben sich daher je nach Herkunft des Brennstoffes unterschiedliche Sachbilanz-ergebnisse. Wie die im Anhang A aufgeführten Resultate zeigen, können beispielsweise die SO₂-Emissionen aus der Steinkohlebereitstellung ein Mehrfaches der SO₂-Emissionen aus dem Kraftwerksbetrieb betragen.

2.2.2 Kernkraftwerke

Tabelle 2-3 zeigt beispielhaft ausgewählte Sachbilanzergebnisse für einen Druckwasserreaktor mit einem angenommenen Abbrand von 50.000 MWd je t Uran. Es wurde angenommen, daß das Uran für die Brennelementherstellung jeweils zur Hälfte aus Nordamerika und Afrika stammt und ein Brennstoffkreislauf einschließlich Wiederaufarbeitung vorliegt.

Die in Tabelle 2-3 dargestellten Emissionsbilanzen weisen zunächst für die nichtradioaktiven Luftschadstoffe CO₂, Partikel, NO_x und SO₂ die Beträge der Brennstoffbereitstellung und -entsorgung, des Kraftwerksbetriebes einschließlich der Bereitstellung aller sonstigen Vorleistungen für den Betrieb und die Instandhaltung des Kraftwerkes sowie den Bau und den Abriß des Kraftwerkes aus. Es zeigt sich, daß bei allen vier genannten Schadstoffen die Brennstoffkette ungefähr die Hälfte der kumulierten Emissionen verursacht, und die beiden anderen ausgewiesenen Teilbereiche der Lebenswegbilanz jeweils etwa zu einem Viertel der kumulierten Emissionen beitragen. Wie die Resultate im Anhang A zeigen, haben unterschiedliche Randbedingungen bei der Bilanzierung der Stromerzeugung aus Kernenergie - es wurde auch die direkte Endlagerung sowie eine Stromerzeugung mit verbesserten, zukünftig realisierbaren Betriebsparameterwerten betrachtet - keine wesentlichen Auswirkungen auf die Gesamtwerte für nichtradioaktive Emissionen.

Im Gegensatz zur Darstellung der Sachbilanzergebnisse für die kohle- und erdgasbefeuerten Kraftwerke im vorigen Unterkapitel sind in Tabelle 2-3 nicht die Lebenswegemissionen an CH₄ und N₂O für die Bilanz der Stromerzeugung aus Kernkraft dargestellt, sondern statt dessen zwei ausgewählte radioaktive Nuklide aufgeführt. Die Emission von C-14 in das Medium Luft stammt zu einem Viertel aus dem Betrieb des Kraftwerkes, zu fast drei Vierteln aus der Wiederaufarbeitung der ausgedienten Brennelemente. Die Summe der kumulierten C-14-Emissionen in Luft und Wasser verursachen den Hauptbetrag der ebenfalls in Tabelle 2-3 aufgeführten Kollektivdosis des gesamten Lebensweges. Weitere Nuklide, die den Gesamtwert der Kollektivdosis in relevanter Weise beeinflussen, sind die Emission von Rn-222 und Kr-85 in Luft sowie H-3 und Ru-106 in Wasser. Beispielhaft sind in Tabelle 2-3 die Emissionen an Rn-222 aufgeführt, die zu einem großen Teil aus den Abraumphalden der Uranerzaufbereitung stammen und über einen längeren Zeitraum hinweg emittiert werden. Wie in Anhang A dokumentiert, ergeben sich für die bilanzierten Referenzsysteme mit direkter Endlagerung geringere Kollektivdosen als für die Systeme mit Wiederaufarbeitung.

Tabelle 2-3: Sachbilanz für die Stromerzeugung aus Kernkraft

Bilanzgröße	Einheit	Druckwasserreaktor ^b mit Wiederaufarbeitung
CO₂ gesamt	g/kWh	17
Brennstoffkette		8
Betrieb sonst ^a		5
Bau und Abriß		4
Partikel gesamt	mg/kWh	25
Brennstoffkette		14
Betrieb sonst ^a		5
Bau und Abriß		6
NO_x gesamt	mg/kWh	48
Brennstoffkette		24
Betrieb sonst ^a		13
Bau und Abriß		10
SO_x gesamt	mg/kWh	73
Brennstoffkette		38
Betrieb sonst ^a		20
Bau und Abriß		15
Rn-222 Luft gesamt	kBq/kWh	17
Brennstoffkette		17
Betrieb sonst ^a		0
Bau und Abriß		0
C-14 Luft gesamt	Bq/kWh	31
Brennstoffkette		23
Betrieb sonst ^e		8
Bau und Abriß		0
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv/kWh	4656
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	27
Entnahme an Eisen	mg/kWh	420
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	6
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	806

^a Direkte Emissionen des Kraftwerksbetriebes und Emissionen durch die Bereitstellung sonstiger Vorleistungen für den Betrieb des Kraftwerkes ^b angenommener Abbrand 50.000 MWd/tUran

Als weitere Beispiele für Sachbilanzergebnisse sind die kumulierten Rohstoffaufwendungen an Bauxit, Eisen, Kupfer und Kalkstein in Tabelle 2-3 aufgeführt. Der Bedarf an Eisen und Kalkstein liegt bei der Stromerzeugung aus Kernkraft zum Teil deutlich unter den entsprechenden Werten der Stromerzeugung aus Braunkohle, Steinkohle oder Erdgas. Dagegen weist das nukleare Stromerzeugungssystem aufgrund der aufwendigeren Komponenten zum Bau des Kraftwerkes höhere Aufwendungen an Bauxit und Kupfer auf. Bei den nichtenergetischen Rohstoffen ändern sich die Resultate nicht wesentlich durch Annahme unterschiedlicher Randbedingungen bei der Bilanzierung der Stromerzeugung aus Kernkraft.

2.2.3 Photovoltaik-, Windkraft- und Wasserkraftanlagen

Tabelle 2-4 zeigt beispielhaft ausgewählte Sachbilanzergebnisse für eine Photovoltaik-Dachanlage mit Solarzellen aus polykristallinem Silizium, eine Photovoltaik-Dachanlage mit Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium, eine Windkraftanlage und ein Laufwasserkraftwerk. Es wurden jeweils für Deutschland typische Nutzungsverhältnisse für die regenerativen Stromerzeugungsanlagen zu Grunde gelegt.

Die in Tabelle 2-4 dargestellten Emissionsbilanzen für CO₂, CH₄, N₂O, Partikel, NO_x und SO₂ weisen den Beitrag des Baus der Anlage zu den kumulierten Emissionen einerseits und den Betrieb und den Abriß der Anlagen sowie die Backup-Aufwendungen andererseits aus. Die Teilbilanz für den Bau einer Anlage beinhaltet alle Vorleistungen bis zur schlüsselfertigen Übergabe der Anlage. Im Falle der Windkraftanlage sind das unter anderem die Prozesse zur Bereitstellung der benötigten Rohstoffe und Materialien, die Prozeßschritte zur Fertigung der Anlagenkomponenten, der Transport zum Aufstellort und die Installation der Anlage. Die betriebliche Vorleistungen umfassen zum großen Teil Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten, beispielsweise den Ersatz ausgefallener Solarpanels. Betriebsmittel wie beispielsweise Heizöl fallen in geringen Mengen beim Betrieb des Wasserkraftwerkes an.

Es zeigt sich, daß bei allen bilanzierten Anlagen der Bau der Anlage ergebnisbestimmend ist und Betrieb und Abriß der Anlagen nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Während das Angebot an Laufwasserkraft an unterschiedlichen möglichen Standorten in Deutschland ähnlich ist, variiert das Angebot an Solarenergie und Windkraft in Deutschland zum Teil deutlich. Die Bilanzresultate können daher entsprechend den zu Grunde gelegten Betriebsbedingungen von den hier vorgestellten Resultaten abweichen, wie die Ergebnisse weiterer Bilanzen im Anhang zeigen. Wichtig für die Ergebnisse der Emissionsbilanzen sind weiterhin Annahmen bezüglich der Vorketten. So liegt den in Tabelle 2-4 vorgestellten Bilanzen die Annahme zu Grunde, daß Elektrizität entsprechend dem Mix in Deutschland bezogen wird. Aufgrund des hohen Anteils fossiler Energieträger an der Stromerzeugung in Deutschland ist diese beispielsweise durch entsprechende CO₂-Emissionen gekennzeichnet, so daß die Elektrizitätsbereitstellung für die Herstellung der polykristallinen Photovoltaikanlage rund 62% der gesamten CO₂-Emissionen des Baus der Photovoltaikanlage verursacht.

Neben den klassischen Schadstoffen wurden auch eine große Zahl radioaktiver Emissionen betrachtet, die zusammengefaßt als Kollektivdosis aufgeführt sind. Sie stammen bei den Bilanzen für Stromerzeugung aus regenerativen Energien aus vor- und nachgelagerten Prozessen wie beispielsweise dem Betrieb von Kernkraftwerken, die die Elektrizität für die Vorketten bereitstellen.

Als weitere Beispiele für Sachbilanzergebnisse sind die kumulierten Rohstoffaufwendungen an Bauxit, Eisen, Kupfer und Kalkstein in Tabelle 2-4 aufgeführt. Der überwiegende Teil der Gesamtentnahmen an Rohstoffen wird durch den Bau der Anlagen verursacht, indirekte Prozesse der Vorketten wie beispielsweise die Produktion von Investitionsgütern, die für die Herstellung der Anlagenkomponenten erforderlich sind, machen nur einen kleinen Teil des Gesamtergebnisses aus.

Es wird deutlich, daß die photovoltaische Stromerzeugung im Vergleich zu Windkraftwerken und Wasserkraftwerken heute noch mit deutlich höheren Stoffströmen sowohl bei den Luftschadstoffen als auch den Ressourcenentnahmen verbunden ist.

Tabelle 2-4: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis regenerativer Energien

Bilanzgröße	Einheit	PV ^a -Anlage	PV ^a -Anlage	Windkraft	Wasserkraft
		heute	heute	heute	heute
		5 kW	5 kW	1 MW	3,1 MW
		amorph	polykristallin	5,5 m/s ^b	Laufwasser
CO₂ gesamt	g/kWh	196	334	36	28
Bau		161	297	16	11
Betrieb und Abriß		16	17	2	1
Backup		20	20	18	16
CH₄ gesamt	mg/kWh	634	908	166	123
Bau		461	732	56	31
Betrieb und Abriß		58	62	6	6
Backup		115	115	105	87
N₂O gesamt	mg/kWh	17	21	3	2
Bau		13	16	2	1
Betrieb und Abriß		3	3	0	0
Backup		1	1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	107	124	18	12
Bau		85	102	11	8
Betrieb und Abriß		15	16	2	1
Backup		7	7	6	3
NO_x gesamt	mg/kWh	321	443	49	45
Bau		254	380	26	27
Betrieb und Abriß		49	45	6	6
Backup		19	19	16	13
SO_x gesamt	mg/kWh	433	507	68	42
Bau		355	427	40	23
Betrieb und Abriß		52	53	6	5
Backup		27	27	22	15
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	678	1693	27	2
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	2753	2041	44	4
Entnahme an Eisen	mg/kWh	7278	5346	5212	2405
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	330	241	65	5
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	15240	10823	2493	6005

^a PV = Photovoltaik ^b Jahresmittlere Windgeschwindigkeit

2.3 Wirkungsabschätzung

2.3.1 Wirkungspotentiale

Die für die ausgewählten Referenzanlagen errechneten Wirkungspotentiale für die Kategorien Treibhauseffekt, Versauerung und Eutrophierung zeigt Abb. 2-1.

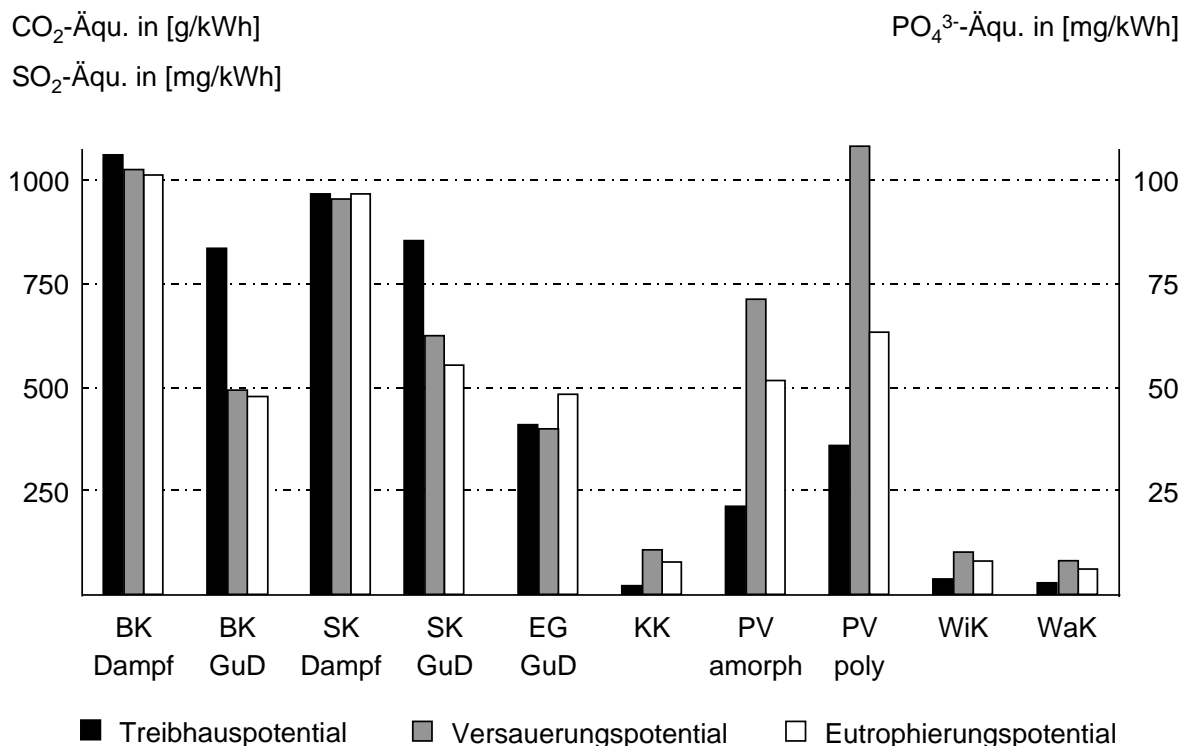


Abb. 2-1: Wirkungspotentiale ausgewählter Stromerzeugungssysteme

Es wird deutlich, daß die Stromerzeugung mit einem braunkohlegefeuerten Dampfkraftwerk nach heutigem Stand der Technik beim Treibhaus- und beim Eutrophierungspotential jeweils das höchste Wirkungspotential aller betrachteten Referenzanlagen aufweist. Lediglich beim Versauerungspotential ergeben sich für die polykristalline PV-Dachanlage höhere Emissionen. Der Einsatz der Gas- und Dampfturbinentechnik mit integrierter Kohlevergasung, wie sie für den Zeitraum um 2010 verfügbar sein soll, mindert die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung aus Braunkohle nahezu proportional zur Steigerung des Kraftwerks-Nutzungsgrades. Grund hierfür ist, daß der weitaus größte Teil der Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb des Kraftwerkes und der Brennstoffbereitstellung resultieren. Die Lebenswegemissionen versauernd und eutrophierend wirkender Luftschadstoffe werden dagegen bei Einsatz der GuD-Technik im Vergleich zur Wirkungsgradsteigerung überproportional gemindert, da der GuD-Prozeß mit integrierter Kohlevergasung Staub- und Schwefelfreiheit des Gasturbinenbrennstoffes bzw. -arbeitsmittels garantiert.

Die Wirkungspotentiale des steinkohlegefeuerten Dampfkraftwerkes liegen aufgrund des höheren Nutzungsgrades unterhalb der Resultate für das braunkohlegefeuerte Dampfkraftwerk. Auch im Falle der Steinkohle lassen sich deutliche Reduzierungen der resultierenden

Wirkungspotentiale durch den Einsatz der GuD-Technik erreichen, wobei jedoch der Reduktionen aufgrund der geringeren Nutzungsgradsteigerung - von 43% auf 48,5% bei Steinkohle im Gegensatz zur Braunkohle, wo eine Nutzungsgradsteigerung von heute 40% auf 50,5% möglich ist - geringer ausfallen.

Die Wirkungspotentiale für das erdgasgefeuerte GuD-Kraftwerk fallen deutlich geringer aus als für die bilanzierten kohlegefeuerten Kraftwerke. Dies resultiert zum einen aus dem höheren Nutzungsgrad von 57,6%, zum anderen aus der Schwefelfreiheit des Brennstoffes Erdgas. Neben den NO_x-Emissionen aus dem Kraftwerksbetrieb sind die SO₂-Emissionen der Erdgasbereitstellung aus der Gemeinschaft unabhängiger Staaten, aus der 33% des verwendeten Erdgases bezogen werden, eine weitere Hauptquelle der versauernd wirkenden Emissionen der Stromerzeugung aus Erdgas.

Eine Stromerzeugung auf Basis von Solarstrahlung ist heute noch mit vergleichsweise hohen Wirkungspotentialen gekennzeichnet. Im Falle der polykristallinen Zellen liegen die Werte für Versauerung über dem Wert für die Stromerzeugung aus Braunkohle, für Eutrophierung immerhin noch über den Werten der Stromerzeugung aus Erdgas. Geringere Wirkungspotentiale ergeben sich für die Dünnschichtzellen auf Basis amorphes Siliziums. Aber auch hier liegen die Werte für Versauerung und Eutrophierung in der Größenordnung der Stromerzeugung aus Erdgas, und das Treibhauspotential immerhin noch bei ungefähr der Hälfte des Wertes für die Stromerzeugung aus Erdgas.

Kernkraft, Windkraft und Wasserkraft sind durch die geringsten Werte für die hier betrachteten Wirkungspotentiale gekennzeichnet. Für die Kernenergie ergeben sich sowohl im Fall der Wiederaufarbeitung - der in Abb. 2-1 dargestellt ist - als auch bei direkter Endlagerung im wesentlichen die gleichen Resultate für die hier betrachteten Wirkungspotentiale. Die Ergebnisse für Windkraft hängen von den zu Grunde gelegten Betriebsbedingungen ab und weisen damit einen gewissen Schwankungsbereich auf. Im Falle der Wasserkraft hängen die Ergebnisse zu einem großen Teil von den örtlichen Gegebenheiten ab, die die Aufwendungen beim Bau des Wasserkraftwerkes beeinflussen. Im allgemeinen kann jedoch davon ausgegangen werden, daß auch bei anderen Randbedingungen die Ergebnisse für Kernkraft, Wasserkraft und Windkraft in der Größenordnung der beispielhaft in Abb. 2-1 dargestellten Ergebnisse und damit weit unterhalb der Resultate für die anderen Energieträger liegen.

Die in Abb. 2-1 aufgeführten Bilanzergebnisse beinhalten auch die Backup-Aufwendungen für die regenerativen Stromerzeugungssysteme. Diese können wie im Falle des Treibhauspotentials für die Wasserkraft bis zu 58% des Gesamtergebnisses ausmachen. Auch bei der Windkraft errechnen sich aufgrund der niedrigen Emissionen des Windenergiesystems hohe zusätzliche Beiträge durch Backup-Aufwendungen. Bei der Photovoltaik tragen die Backup-Aufwendungen dagegen aufgrund der hohen Emissionen der photovoltaischen Systeme nur zu weniger als 7% zu den ermittelten Wirkungspotentialen bei. Insgesamt verschiebt sich die Relation zwischen den betrachteten Energiesystemen jedoch nicht durch die Einbeziehung der Backup-Aufwendungen.

2.3.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Die Resultate für die Wirkungskategorie der Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, für die die beiden Wirkungsindikatoren „verlorene Lebenserwartung“ und „Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit“ ermittelt wurden, sind in Abb. 2-2 dargestellt.

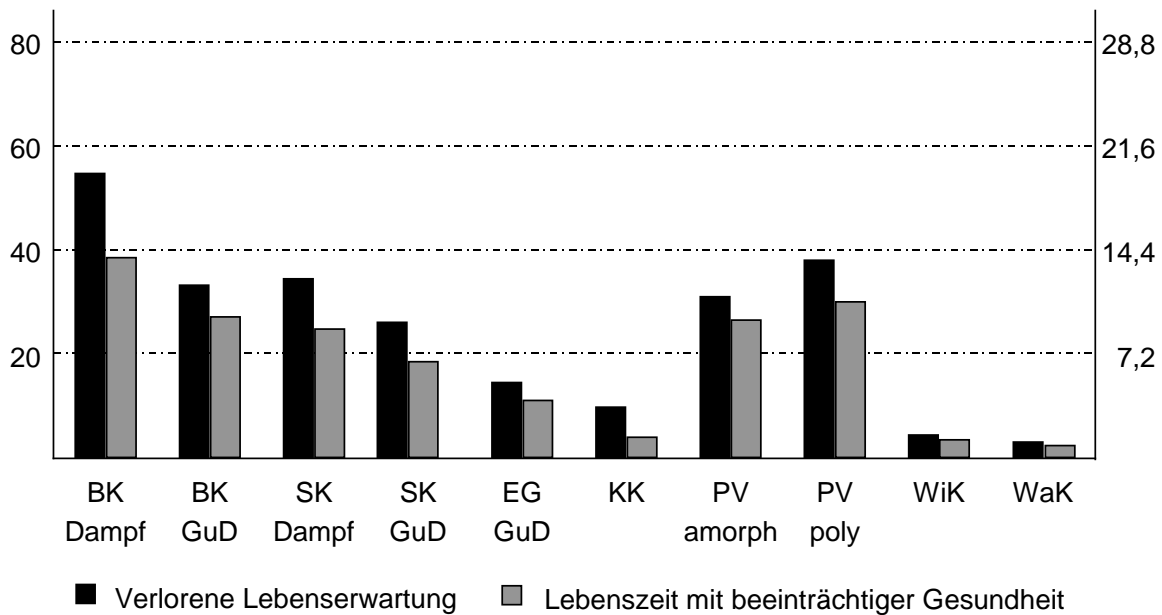
[10⁻⁹ YOLL / kWh][10⁻⁶ RAD-equ. / kWh]

Abb. 2-2: Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Die Stromerzeugung mit einem braunkohlegefeuerten Dampfkraftwerk weist nach heutigem Stand der Technik sowohl bei der verlorenen Lebenserwartung als auch der Lebenszeit mit beeinträchtiger Gesundheit die höchsten Werte auf. Der Einsatz der Gas- und Dampfturbinentechnik bei der Stromerzeugung aus Braunkohle, der eine Nutzungsgradsteigerung von 40% auf 50,5% zu Grunde gelegt wurde, reduziert die Auswirkungen deutlich.

Die Stromerzeugung aus Steinkohle weist bei Nutzung der Dampftechnik geringere Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit aus als die Stromerzeugung aus Braunkohle. Grund hierfür ist zum einen der mit 43% höhere Nutzungsgrad des steinkohlegefeuerten Dampfkraftwerkes, zum anderen die geringeren Belastungen aus der Brennstoffbereitstellung.

Die geringsten gesundheitlichen Auswirkungen bei einer Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen ergeben sich bei Nutzung des Brennstoffes Erdgas. Aufgrund seiner weitgehenden Schwefel- und Partikelfreiheit entfallen hier zwei bei den anderen fossilen Systemen besonders relevanten Schadstoffe.

Die Stromerzeugung auf Basis von Kernkraft weist Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit auf, die ungefähr bei der Hälfte der Werte für die der Stromerzeugung aus Erdgas liegen. Dabei tragen ionisierende Strahlung und Partikelbelastung zu gleichen Teilen zur verlorenen Lebenserwartung der Stromerzeugung aus Kernkraft bei.

Die Stromerzeugung auf Basis von Solarstrahlung mittels Photovoltaik ist mit gesundheitlichen Auswirkungen gekennzeichnet, die in der Größenordnung der heutigen Stromerzeugung mit einem steinkohlegefeuerten Dampfkraftwerk liegt. Hauptquellen sind hierbei die Stromerzeugung für die Herstellung der Photovoltaikanlagen und weitere vorgelagerte Prozesse wie beispielsweise die Bereitstellung von Materialien und sonstigen Vorleistungen für die Wafer-, Zellen- und Modulfertigung.

Die Stromerzeugung aus Windkraft und Wasserkraft weist die geringsten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit aus, die noch einmal unterhalb der Werte für die Stromerzeugung aus Kernkraft liegen.

Die Backup-Aufwendungen haben keinen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis. Ihr Beitrag liegt sowohl für die verlorene Lebenserwartung als auch die Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit zwischen 5% (Photovoltaik) und 3% (Wind- und Wasserkraft).

2.3.3 Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt

Abb. 2-3 zeigt die für den Bereich der vom Menschen geschaffenen Umwelt ermittelten Schäden getrennt nach Materialschäden und Schäden an Nutzpflanzen. Die Schäden sind angegeben in Euro-Cent pro kWh und betragen zwischen 0,01 und -0,022 Cent/kWh oder etwa 0,02 bis etwa -0,04 Pf/kWh.

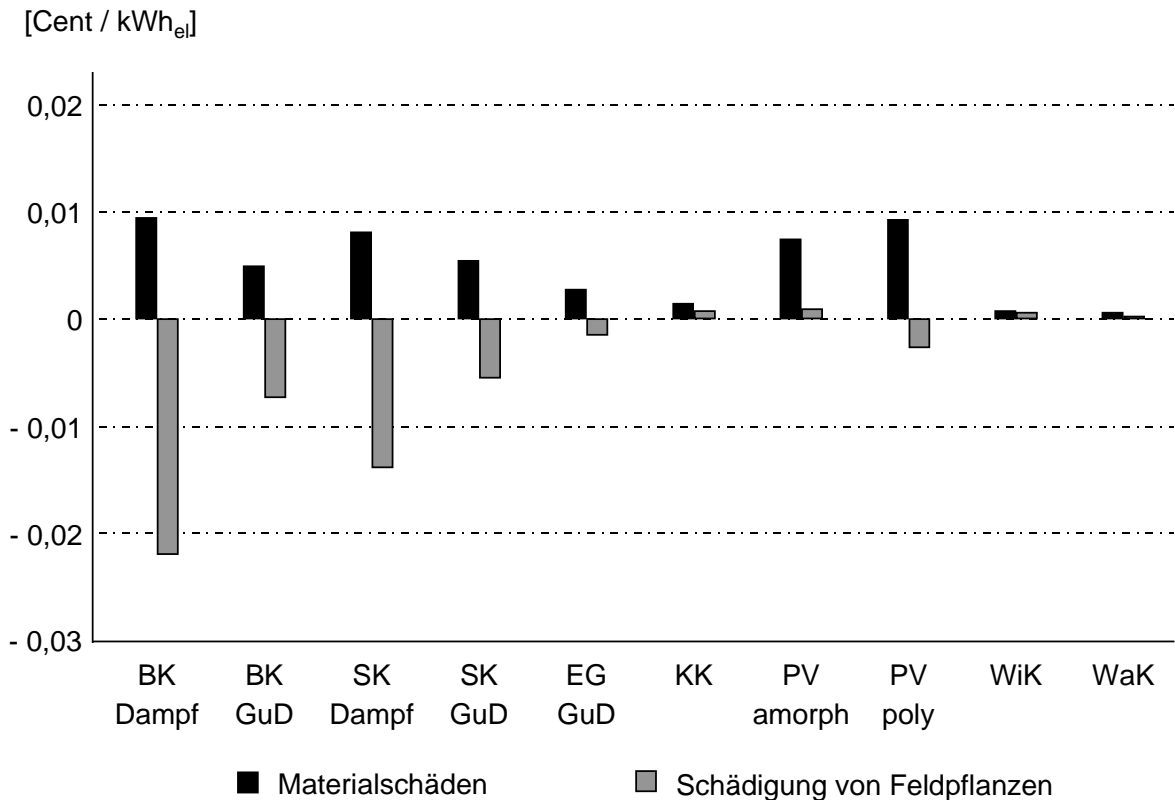


Abb. 2-3: Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt

Zunächst wird deutlich, daß sich für alle fossilen Systeme und auch das polykristalline Photovoltaiksystem, das über seinen hohen Strombedarf einen entsprechenden Anteil an Elektrizität aus fossil gefeuerten Kraftwerken bezieht, negative Schäden (d. h. zusätzliche Erträge) an Feldpflanzen ergeben.

Verantwortlich sind hierfür zum einen die SO₂-Emissionen: längerfristige Experimente mit Feldpflanzen haben ergeben, daß bei niedrigen SO₂-Konzentrationen von weniger als 15 µg/m³, wie sie heute beispielsweise in Deutschland vorliegen, eine Erhöhung des SO₂-Gehaltes eine Ertragssteigerung zur Folge hat. Erst ab einer Konzentration von mehr 15 µg/m³ sinkt der Ertrag bei einer weitergehenden Steigerung der Schwefelkonzentration

wieder ab. Wenn also die SO_2 -Konzentrationen durch die Emissionen eines Kraftwerkes zunehmen, kann es in Gebieten mit niedriger SO_2 -Konzentration zu Ertragssteigerungen kommen /Friedrich; Krewitt 1997/.

Ein weiterer Grund für die negativen Feldpflanzenschäden sind die Stickoxidemissionen. Wenn aufgrund einer vorliegenden Hintergrundbelastung und entsprechenden UV-Einstrahlungsverhältnissen bereits bodennahes Ozon gebildet wird, kann in bestimmten Fällen eine Erhöhung der Stickoxidkonzentrationen dazu führen, daß die Bildung von bodennahem Ozon reduziert wird. Zu diesem Resultat kommen beispielsweise in /EMEP 1997/ veröffentlichte Modellrechnungen. Dort wurde ausgehend von heute vorliegenden Emissionen untersucht, wie sich eine Reduktion der Stickoxidemissionen in einem EU-Land auf die Ozonkonzentrationen in Europa auswirkt. Während bei den meisten Ländern eine Reduktion der Stickoxid-Emissionen auch zu einer Minderung der mittleren Ozonkonzentration in Europa führte, resultierte aus einer Minderung der Stickoxidemissionen in Deutschland und Belgien eine Zunahme der mittleren Ozonkonzentration in Europa. Ein ähnliches Ergebnis liefern auch die für dieses Projekt durchgeführten Emissionsrechnungen: Eine Erhöhung der NO_x -Emissionen in Deutschland ergibt insgesamt eine Minderung der mittleren Ozonkonzentration in Europa, was zu einer Reduktion der Feldpflanzenschäden durch bodennahes Ozon und damit zu negativen Feldpflanzenschäden durch Stickoxide führt.

Des weiteren zeigt sich, daß auch in den Fällen, in denen positive Feldpflanzenschäden auftreten, diese niedriger sind als die verursachten Materialschäden. Insgesamt kann festgehalten werden, daß die hier quantifizierten Schäden in der vom Menschen geschaffenen Umwelt weniger als 0,02 Cent / kWh betragen.

2.3.4 Verbrauch endlicher Primärenergieträger

Die nach der Ressourcenmethode berechneten kumulierten Energieaufwendungen an erschöpflichen Energieträgern der ausgewählten Referenzanlagen zeigt Abb. 2-4. Bei den fossilen Stromerzeugungssystemen auf der Basis von Braunkohle, Steinkohle und Erdgas sowie bei dem nuklearen Stromerzeugungssystem ist der Brennstoffeinsatz im Kraftwerk gesondert ausgewiesen. Für die Stromerzeugungssysteme auf Basis regenerativer Energien ist der Anteil der Backup-Aufwendungen an den kumulierten Energieaufwendungen kenntlich gemacht.

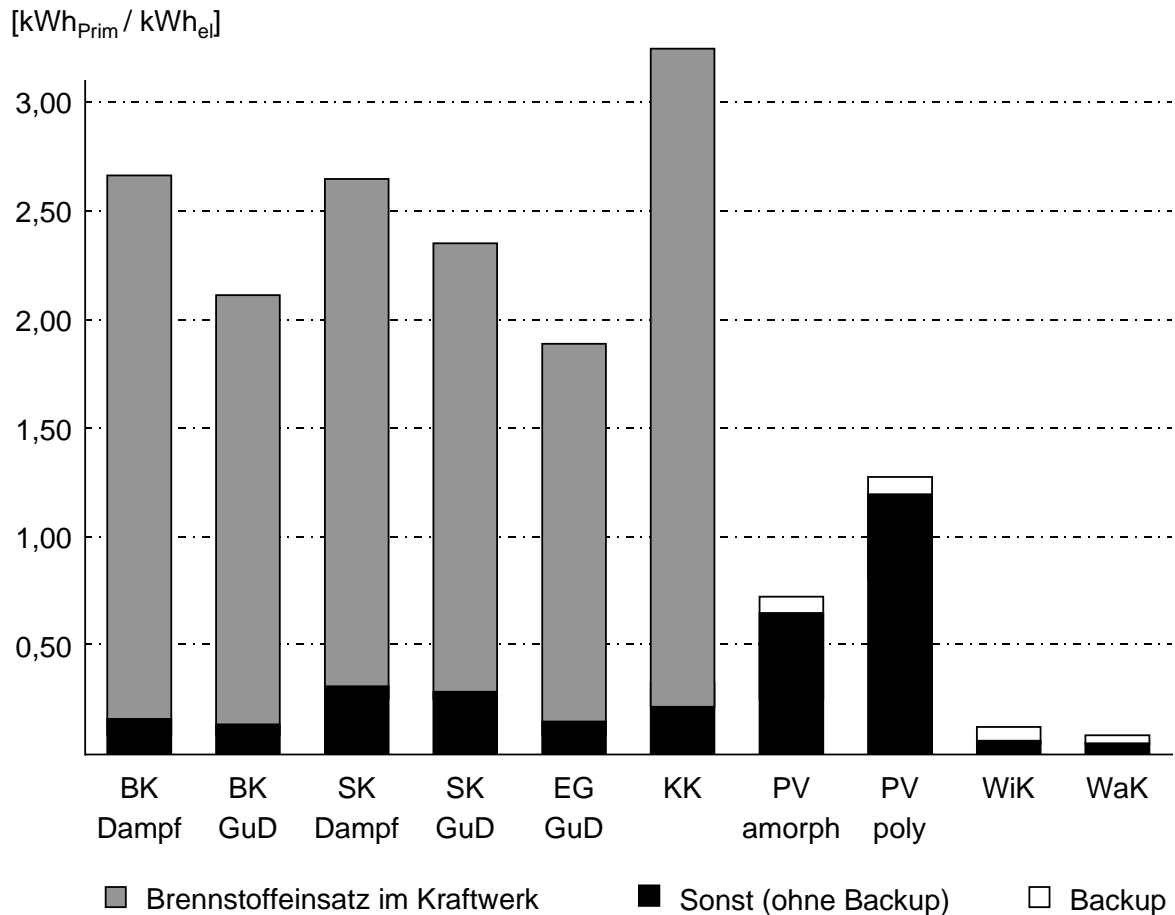


Abb. 2-4: Verbrauch endlicher Primärenergieträger

Der Anteil des Brennstoffeinsatzes im Kraftwerk beträgt im Falle der fossilen Stromerzeugungssysteme zwischen 85% und 95% der kumulierten Energieaufwendungen. Daß die indirekten Verbände endlicher Energieträger jedoch nicht vernachlässigbar sind, zeigt beispielsweise das Ergebnis für das steinkohlegefeuerte Dampfkraftwerk. Dies weist trotz des höheren Nutzungsgrades - 43% im Falle des Steinkohledampfkraftwerkes und 40% für das entsprechende Braunkohlekraftwerk - nahezu den gleichen kumulierten Energieaufwand auf wie das braunkohlegefeuerte Dampfkraftwerk. Grund hierfür ist, daß die Bereitstellung von Steinkohle frei Kraftwerk durch höhere Verbräuche endlicher Energieträger gekennzeichnet ist als die Bereitstellung von Braunkohle frei Kraftwerk. Die Bereitstellung sonstiger Vorleistungen für den Kraftwerksbetrieb sowie der Kraftwerksbau und -rückbau sind nur von untergeordneter Bedeutung.

Das Stromerzeugungssystem auf Basis von Erdgas weist deutlich geringere Energieaufwendungen als die bilanzierten stein- und braunkohlegefeuerten Systeme auf. Der Hauptgrund hierfür liegt in dem mit 57,6% vergleichsweise hohen Nutzungsgrad des erdgasgefeuerten Kraftwerkes, der in gleichem Maße den direkten Brennstoffeinsatz im Kraftwerk und die indirekten energetischen Aufwendungen der Brennstoffbereitstellung beeinflusst.

Für das nukleare Stromerzeugungssystem ergeben sich die höchsten kumulierten Energieaufwendungen. Die primärenergetische Bewertung von nuklearen Brennstoffen erfolgte hier entsprechend dem Vorschlag der VDI-Richtlinie 4600 mit einem Kraftwerksnutzungsgrad von 33%. Die indirekten Energieaufwendungen resultieren zum einen aus den Prozessen der

Uranbrennstoffbereitstellung und den diesen vor- und nachgelagerten indirekten Prozessen, zum anderen aus der Bereitstellung sonstiger Vorleistungen für den Betrieb des Kraftwerkes sowie dem Bau und Rückbau des Kraftwerkes.

Bei den Stromerzeugungssystemen auf Basis regenerativer Energieträger sind die Photovoltaik-Anlagen durch die höchsten Verbräuche an energetischen Rohstoffen gekennzeichnet. Der kumulierte Energieaufwand der photovoltaischen Stromerzeugung beträgt das vier- bis achtfache der entsprechenden Werte für die Stromerzeugung aus Windkraft oder Wasserkraft. Ursache ist hierfür die aufwendige Herstellung der Photovoltaik-Anlagen. Betrieb und Rückbau der Anlagen spielt bei den Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien nahezu keine Rolle. Die primärenergetischen Backup-Aufwendungen ändern die Relation der Ergebnisse sowohl innerhalb der regenerativen Anlagen als auch zwischen regenerativen Anlagen einerseits und denen der fossilen und nuklearen Anlagen andererseits nicht.

2.3.5 Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse

Die Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse erfolgt - wie bereits in Kapitel 1.4.5 erläutert - anhand der monetären Bewertung. Dabei werden die Ergebniswerte für die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Eutrophierung von Böden und Gewässern, Versauerung von Böden und Gewässern und die hier ermittelten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit in Geldwerte umgerechnet. Die für die Wirkungskategorie der Schäden in der vom Menschen geschaffenen Umwelt errechneten Kenngrößen - Materialschäden und Feldpflanzenschäden - sind bereits in monetären Einheiten angegeben.

Tabelle 2-5 führt die Resultate der monetären Bewertung getrennt nach Schadens- und Vermeidungskosten auf. Schadenskosten können für Wirkungskategorien immer dann angegeben werden, wenn die Auswirkungen innerhalb dieser Wirkungskategorien anhand von Schadensgrößen quantifiziert werden. Dies ist hier sowohl bei den Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit als auch bei den Materialschäden und den Feldpflanzenschäden der Fall. Für die Schädigung von Ökosystemen, die durch Versauerung und Eutrophierung beeinträchtigt werden, und den Treibhauseffekt wurden im Rahmen der Wirkungsabschätzung keine Schadensgrößen, sondern nur Wirkungspotentiale berechnet. Die monetäre Bewertung muß daher mit Hilfe von Vermeidungskosten erfolgen. Wie in Kapitel 1.4.5 dargestellt, können für einen Schadstoff oder ein Schadstoffgruppe aus einem von der Gesellschaft beschlossenen Minderungsziel die erforderlichen Minderungs- oder Vermeidungskosten der zuletzt einzusetzenden Maßnahme ermittelt werden. Diese Kosten werden dann zur monetären Bewertung des betreffenden Schadstoffes oder der betreffenden Schadstoffgruppe angesetzt.

Die in Tabelle 2-5 gezeigten Ergebnisse machen deutlich, daß im Falle der Schadenskosten die monetär bewerteten Gesundheitsschäden klar dominieren. Materialschäden sowie Schäden an Feldpflanzen sind vernachlässigbar gering, wobei die in der Regel negativen Feldpflanzenschäden etwaige Materialschäden sogar noch kompensieren.

Bei den Vermeidungskosten liegen die monetären Werte für den Treibhauseffekt im Falle der fossilen Kraftwerke eine Größenordnung über den monetären Werten, die sich für die Schädigung von Ökosystemen ergeben. Bei der Kernenergie liegt der Wert für den Treibhauseffekt doppelt so hoch wie der Wert für die Schädigung von Ökosystemen, während bei den regenerativen Anlagen das Verhältnis der beiden Größen ungefähr vier beträgt.

Tabelle 2-5: Monetäre Bewertung der ausgewählten Stromerzeugungssysteme

Cent/kWh	BK ^a	BK ^a	SK ^a	SK ^a	EG ^a	KK ^a	PV ^a	PV ^a	WiK ^a	WaK ^a
	Dampf	GuD	Dampf	GuD	GuD		amorph	poly		
Schadenskosten										
Gesundheit	0,72	0,45	0,46	0,34	0,22	0,12	0,43	0,53	0,07	0,05
Material	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
Feldpflanzen	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	-0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00
Vermeidungskosten (nach Standard-Preis-Ansatz)										
Ökosysteme	0,19	0,09	0,16	0,10	0,07	0,02	0,11	0,14	0,02	0,01
Treibhauseffekt	2,04	1,59	1,81	1,60	0,78	0,04	0,41	0,68	0,08	0,06

^a BK = Braunkohle, SK = Steinkohle, EG = Erdgas, KK = Kernkraft, PV = Photovoltaik, WiK = Windkraft, WaK = Wasserkraft

Die in Tabelle 2-5 dargestellten Resultate der monetären Bewertung gelten zunächst nur für die bilanzierten Referenzenergiesysteme. Zwar wurden die hier bilanzierten Referenzenergiesysteme so ausgewählt, daß sie als typisch für in Deutschland vorzufindende Situationen gelten können. Bei der Verwendung der Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, daß andere Rahmenbedingungen wie beispielsweise ein verstärkter Bezug von Steinkohle aus dem Ausland oder andere Betriebsbedingungen für eine Windkraftanlage einen durchaus relevanten Einfluß auf das Gesamtergebnis der Bilanzierung haben können. Im Anhang sind daher die Resultate einer Reihe weiterer Bilanzen aufgeführt, bei denen geänderte Rahmenbedingungen sowohl für die Brennstoffkette, die Betriebsbedingungen der bilanzierten Anlage als auch geänderten technischen Daten wie beispielsweise ein anderer Nutzungsgrad der Stromerzeugungsanlagen berücksichtigt wurden.

Darüber hinaus ist anzumerken, daß in diesem Projekt die Wirkungsabschätzung entsprechend der heute üblichen Vorgehensweise im Rahmen von Ökobilanzen anhand von Gewichtungsfaktoren durchgeführt wurde, die die durchschnittlichen Schädigungen durch eine Einheit Schadstoff beschreiben. Diese Gewichtungsfaktoren wurden aus Szenariorechnungen gewonnen, bei denen für das Gebiet Deutschlands eine prozentuale Steigerung der Schadstoffemissionen angenommen und die daraus resultierenden Schädigungen in Europa ermittelt wurden. Aus diesem Grund fanden standortbezogene Randbedingungen keine Berücksichtigung, so daß die in diesem Kapitel vorgestellten Resultate sowohl bei den Wirkungsindikatorergebnissen als auch bei den Resultaten der monetären Bewertung von denen anderer Studien, in denen standortabhängige Untersuchungen wie beispielsweise in /Friedrich; Krewitt 1997/ durchgeführt wurden, abweichen können.

3 Ganzheitliche Bilanzierung von Techniken zur Nutzwärmebereitstellung

3.1 Referenzanlagen

Zunächst werden typische Versorgungsfälle definiert, anhand derer die hier betrachteten Techniken zur Bereitstellung von Nutzwärme miteinander verglichen werden. Als Versorgungsaufgaben im Bereich der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung werden drei Einfamilienhäuser (EFH) mit unterschiedlichem Wärmebedarf sowie ein Mehrfamilienhaus (MFH) ausgewählt. Die Versorgungsaufgaben sind entsprechend Tabelle 3-1 durch den Bedarf für Brauchwasser und Raumheizung gekennzeichnet.

Das betrachtete Mehrfamilienhaus und das Einfamilienhaus des Typs „II“ repräsentieren den heutigen Standard der Wärmedämmung und den daraus resultierendem Nutzwärmebedarf eines neu gebauten Einfamilienhauses. Die mit „I“ und „III“ bezeichneten Einfamilienhausertypen werden zusätzlich untersucht, um den Einfluß unterschiedlicher Standards der Wärmedämmung bei Gebäuden gegenüberstellen zu können. „I“ steht dabei für ein Niedrigenergiehaus, „III“ für ein älteres, heute bereits bestehendes Einfamilienhaus.

Tabelle 3-1: Versorgungsaufgaben für Nutzwärmebereitstellung

System	EFH-I ^a	EFH-II ^b	EFH-III ^c	MFH ^d
Brauchwasser in GJ/a	10,7	10,7	10,7	64,1
Heizwärme in GJ/a	22	45	108	432
Gebäudeheizlast in kW	5	8	18	60

^a EFH-I: Einfamilienhaus in Niedrigenergiebauweise ^a EFH-II: Einfamilienhaus mit heutigem Standard der Wärmedämmung ^a EFH-III: Einfamilienhaus mit älterem Standard der Wärmedämmung ^a MFH: Mehrfamilienhaus mit heutigem Standard der Wärmedämmung

Als Systemgrenzen gelten die jeweiligen Einspeisestellen in das Hausverteilungsnetz für Brauchwasser und die Raumheizung (beispielsweise Ausgang Speicher des Brauchwassers und Ausgang des Heizkessels). Die Errichtung und Instandhaltung des Wärmeverteilsystems in den Gebäuden, die Verluste der Wärmeverteilung sowie der Strom der Heizungsumwälzpumpen und der gegebenenfalls vorhandenen Brauchwasserzirkulationspumpen gehen nicht in die Bilanzierung ein, da sie für alle betrachteten Techniken als gleich unterstellt werden.

Die in Tabelle 3-1 definierten Versorgungsaufgaben können durch Nutzung unterschiedlicher fossiler oder regenerativer Primärenergien gedeckt werden. Um die damit jeweils verbundenen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu quantifizieren, werden typische Referenzanlagen, die nachfolgend beschrieben werden, bilanziert.

Erdgasgefeuertes Wärmebereitstellungssystem. Bei erdgasgefeuerten Wärmebereitstellungssystemen kommen heute sowohl Niedertemperaturkessel als auch Brennwertkessel zum Einsatz.

Bei älteren Heizungsanlagen ist es üblich, die Kesselwassertemperatur auf 80 oder 90 Grad Celsius zu halten und die jeweilige Vorlauftemperatur durch Beimischung des Rücklaufes auf die erforderliche Temperatur zu bringen. Um Abwärmeverluste zu verringern, werden heute statt dessen Niedertemperaturkessel eingesetzt. Diese Kessel werden mit niedrigerer oder

auch gleitender Temperatur (abhängig von der Außentemperatur) gefahren. Die Kesselwassertemperaturen können dabei z. B. auf 40 Grad Celsius oder auch bis auf Raumtemperatur abgesenkt werden. Als Referenzsystem wird hier ein Niedertemperaturkessel in Verbindung mit einem atmosphärischem Gasbrenner betrachtet, bei dem die Luft im Gegensatz zu Gebläsebrennern ausschließlich über Selbstansaugung zugeführt wird. Für den bilanzierten Niedertemperaturkessel in Verbindung mit dem atmosphärischem Brenner wird hier ein Systemnutzungsgrad von 93% im Versorgungsfall EFH-II angenommen.

Die beste Brennstoffausnutzung ergibt sich bei Nutzung der Brennwertkessel-Technik. Bei diesen Kesseln wird im Gegensatz zu den Niedertemperaturkesseln zusätzlich die Verdampfungswärme des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes genutzt. Dazu wird die Abgastemperatur unter die Taupunkttemperatur von ca. 55 Grad Celsius gesenkt. Die freiwerdende Kondensationswärme wird dann zum Vorwärmen des Rücklaufwassers genutzt. Die Brennwertkesseltechnik wird hier - da sie den aktuellen Stand der Technik darstellt - für alle in Tabelle 3-1 festgelegten Versorgungsfälle untersucht. Als Brenner wird dabei ein Gebläsebrenner angenommen, bei dem die Verbrennungsluft über ein Gebläse zugeführt wird, das es erlaubt, den Brenner im Gegensatz zum atmosphärischen Brenner mit geringerem Luftüberschuß zu fahren. Für die Versorgungsfälle EFH-III und MFH ergeben sich Systemnutzungsgrade von 101% bzw. 100%, bei den Versorgungsfällen EFH-I und EFH-II lediglich Systemnutzungsgrade von 95% und 98% aufgrund des höheren Anteils des Brauchwasserwärmebedarfs, dessen Nutzungsgrad aufgrund der Speicherverluste niedriger ist als der der Raumwärmebereitstellung.

Heizölgefeuerte Wärmebereitstellungssysteme. Der neben Erdgas heute am meisten genutzte Brennstoff zur Nutzwärmebereitstellung ist Heizöl. Prinzipiell kann Heizöl genauso wie Erdgas sowohl mit der Technik der Niedertemperaturkessel als auch der Brennwerttechnik genutzt werden. Ein Nachteil von Heizöl gegenüber Erdgas besteht darin, daß Heizöl schweflige Anteile enthält, wodurch auch im aus dem Abgas auskondensierten Wasser saure Bestandteile enthalten sind. Daraus resultieren zum einen besondere Anforderungen unter anderem an die Schornsteinwerkstoffe, zum anderem muß Kondensat aus Ölfeuerungen beispielsweise durch Zugabe von Natronlauge neutralisiert werden, bevor es in die Kanalisation abgelassen werden kann, was zu höheren Kosten führt. Des weiteren enthält das Abgas von Heizölfeuerungen aufgrund des geringen Wasserstoffgehaltes des Brennstoffes weniger Wasserdampf als Erdgasfeuerungen, so daß entsprechend weniger Wärme durch Kondensation gewonnen werden kann. Aus diesen Gründen wird die Brennwerttechnik gegenwärtig kaum bei der Nutzwärmebereitstellung aus Heizöl eingesetzt. Da darüber hinaus Heizölsysteme aufgrund der höheren Investitionskosten (Heizöltank) nur bei größeren Leistungen wirtschaftlich sind, wird hier lediglich ein heizölgefeuerter Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner für die beiden Versorgungsfälle EFH-III und MFH untersucht.

Biomassegefeuerte Wärmebereitstellungssysteme. Energetisch nutzbare Biomassen fallen in vielen Bereichen der Volkswirtschaft in Form von Rückständen, Nebenprodukten oder Abfällen an. Ein wichtiger Bereich ist dabei neben der Produktion von gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen die Gewinnung biogener Festbrennstoffe. Sie können beispielsweise aus Waldrest- und Schwachhölzern der land- und forstwirtschaftlichen Pflanzenproduktion, aus Industrie- und Sägeresthölzern der Holzproduktion oder aber auch aus eigens zur Energiege-

winnung angepflanzten holzartigen Biomassen gewonnen werden. Biogene Festbrennstoffe kommen vor allem als Hackschnitzel oder Pellets zum Einsatz. Beispielhaft für die Nutzwärmeversorgung mit biogenen Festbrennstoffen werden hier eine Pellet-Feuerung für den Versorgungsfall EFH-II und zwei Hackschnitzelfeuerungen für die Versorgungsfälle EFH-III und MFH mit den in Tabelle 3-1 angegebenen Systemnutzungsgraden untersucht.

Solarthermische Wärmebereitstellungssysteme. Solarthermische Anlagen nutzen die Solarstrahlung und wandeln sie in Wärme um, die über ein flüssiges Transportmedium hin zum Abnehmer, beispielsweise einer Brauchwassererwärmung, transportiert wird. Aufgrund des schwankenden Solarstrahlungsangebots können solarthermische Anlagen nur in Verbindung mit Zusatzfeuerungen verwendet werden, um eine gegebene Versorgungsaufgabe zu decken. Hier werden alle zuvor untersuchten Systeme in Verbindung mit einer Solaranlage untersucht, um die Einbindung solarthermischer Anlagen zu untersuchen. Bei den Versorgungsfällen EFH-I und EFH-II wird angenommen, daß die solarthermische Anlage sowohl die Raumwärme- als auch die Warmwasserbereitstellung unterstützt. Damit ergibt sich je nach Versorgungsfall ein solarer Deckungsgrad von 48% (EFH-I) bzw. 34% (EFH-II).

Da jedoch die solarthermische Wärmebereitstellung mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden ist, beschränkt sich ihr Einsatz oft auf die alleinige Unterstützung der Warmwasserbereitstellung. Dies wurde hier exemplarisch für die Versorgungsfälle EFH-III und MFH angenommen, wodurch sich solare Deckungsgrade für den Gesamtwärmebedarf für Heizung und Warmwasserbereitstellung von 6,1% (EFH-III) und 8,4% (MFH) ergeben.

Tabelle 3-2: Referenzanlagen für die Nutzwärmebereitstellung

Brennstoff	Ref. ^a	Technik	Installierte Leistung netto	Untersuchter Versorgungsfall	Systemnutzungsgrad	Technische Verfügbarkeit
Erdgas		Niedertemperaturkessel mit atmosphär. Brenner	9 kW	EFH-II	93%	heute
		Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	5 kW	EFH-I	95%	heute
	X ^a	Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	8 kW	EFH-II	98%	heute
		Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	18 kW	EFH-III	101%	heute
	X ^a	Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	60 kW	MFH	100%	heute
Erdöl		Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	20 kW	EFH-III	91%	heute
	X ^a	Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	67 kW	MFH	90%	heute
Biomasse		Feuerung mit Pellets	9 kW	EFH-II	76%	heute
		Holzhackschnitzelfeuerung	20 kW	EFH-III	78%	heute
	X ^a	Holzhackschnitzelfeuerung	60 kW	MFH	78%	heute
Solarstrahlung		Zusatzfeuerung Gas-Niedertemperaturkessel mit atm. Brenner	9 kW	EFH-II	34% ^{b c}	heute
		Zusatzfeuerung Gas-Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	5 kW	EFH-I	48% ^{b c}	heute
	X ^a	Zusatzfeuerung Gas-Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	8 kW	EFH-II	34% ^{b c}	heute
		Zusatzfeuerung Gas-Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	18 kW	EFH-III	6,1% ^{b d}	heute
		Zusatzfeuerung Gas-Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	60 kW	MFH	8,4% ^{b d}	heute
		Zusatzfeuerung Heizöl-Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	20 kW	EFH-III	6,1% ^{b d}	heute
		Zusatzfeuerung Heizöl-Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	67 kW	MFH	8,4% ^{b d}	heute
		Zusatzfeuerung mit Pellets	9 kW	EFH-II	34% ^{b c}	heute
		Zusatzfeuerung mit Hackschnitzeln	20 kW	EFH-III	6,1% ^{b d}	heute
		Zusatzfeuerung mit Hackschnitzeln	60 kW	MFH	8,4% ^{b d}	heute

^a X = ausgewählte Referenzanlagen für die Ergebnisdiskussion in diesem Kapitel. Den in diesem Kapitel dargestellten Bilanzen liegen folgende Annahmen zugrunde: Erdgas Mix Deutschland, Rohölbezug Mix Deutschland für Heizölherstellung ^b Solarer Deckungsgrad ^c Solare Wärmeerzeugung unterstützt sowohl Warmwasserbereitstellung als auch Raumwärmebedarfsdeckung ^d Solare Wärmeerzeugung wird lediglich für Warmwasserbereitstellung genutzt.

3.2 Sachbilanzen

Die Darstellung der Sachbilanzergebnisse erfolgt anhand der fünf in Tabelle 3-1 ausgewählten Referenzsysteme. Diese beziehen sich entweder auf Versorgungsfall EFH-II oder den Versorgungsfall MFH, so daß hier sowohl für das Einfamilienhaus als auch das Mehrfamilienhaus Referenzsysteme verglichen werden, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Bei der Erstellung der Sachbilanzen wurden eine Vielzahl von Stoff- und Energieströmen betrachtet. Einen Auszug der betrachteten Sachbilanzgrößen stellen die im Anhang E aufgeführten Größen dar, die über die dort aufgelisteten Charakterisierungsfaktoren in die Berechnung von Wirkungsindikatoren eingehen. Da eine Darstellung aller Sachbilanzergebnisse aus Platzgründen nicht möglich ist, beschränkt sich die Darstellung hier auf einige ausgewählte Größen, die für die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung einschließlich der monetären Bewertung von besonderer Bedeutung sind. Zusätzlich werden hier die Entnahmen an Bauxit, Eisen, Kupfer und Kalkstein aufgeführt, um beispielhaft die Wirkungskategorie der Inanspruchnahme nichtenergetischer Rohstoffe darzustellen, die nicht im Rahmen der Wirkungsabschätzung betrachtet wird.

Als Referenzsysteme, die dem Versorgungsfall EFH-II genügen, werden der erdgasbefeuerte Brennwertkessel und die solarthermische Wärmeversorgung mit Gas-Brennwertkessel als Zusatzfeuerung diskutiert. Für den Versorgungsfall MFH werden hier exemplarisch die drei Referenzsysteme mit erdgasbefeuertem Brennwertkessel, heizölbefeuertem Niedertemperaturkessel und mit Hackschnitzelfeuerung betrachtet.

Die Wärmeversorgung mittels Gas-Brennwertkessel weist bei allen in Tabelle 3-2 aufgeführten Luftschadstoffen mit Ausnahme von CO₂ höhere Emissionen in den vorgelagerten Prozessen als bei dem Betrieb der Anlage auf. Dabei liegen die Emissionen aus der Brennstoffbereitstellung, die die Förderung, die Aufbereitung und den Transport des Erdgases umfaßt, in der gleichen Größenordnung wie die sonstigen indirekten Emissionen, die zum überwiegenden Teil durch die Herstellung und Installation der Anlage verursacht werden.

Die Verwendung einer solarthermischen Anlage in Verbindung mit einem Gas-Brennwertkessel als Zusatzfeuerung führt gegenüber einer reinen Wärmeversorgung mit Erdgas entsprechend dem solaren Deckungsgrad, der in dem hier betrachteten Versorgungsfall EFH-II 34% beträgt, zu geringeren Emissionen aus dem Betrieb und der Brennstoffbereitstellung. Andererseits nehmen jedoch aufgrund der zusätzlichen baulichen Aufwendungen für die solarthermische Anlage die sonstigen indirekten Emissionen zu, so daß sich im Falle der Schadstoffe Partikel, NO_x und SO₂ höhere kumulierte Emissionen als beim erdgasbefeuerten System ohne solarthermische Anlage ergeben.

Beim erdgasbefeuerten System ergeben sich - bezogen auf eine Einheit bereitgestellter Nutzenergie - für den Versorgungsfall MFH geringere Emissionen als beim Versorgungsfall EFH-II. Ein Grund hierfür ist, daß im Versorgungsfall EFH-II ein höherer Teil des Brennstoffeinsatzes auf die Warmwasserbereitstellung entfällt. Diese weist aufgrund des notwendigen Warmwasserspeichers und dessen Wärmeverlusten einen geringeren Nutzungsgrad als die Raumwärmebereitstellung auf und führt so bei dem Versorgungsfall EFH-II zu einem geringeren Systemnutzungsgrad des Gesamtsystems.

Tabelle 3-3: Ausgewählte Sachbilanzen für die Nutzwärmebereitstellung

Bilanzgröße	Einheit	Gas ^a -BW ^b	Solar +	Gas ^a -BW ^b	Heizöl-NT ^c	Hackgut-
		EFH-II	Gas ^a -BW ^b EFH-II	MFH	MFH	NT ^c MFH
CO₂ gesamt	g/MJ	78	64	69	102	15
Anlagenbetrieb		56	37	55	82	0
Brennstoffbereitstellung		8	5	8	13	9
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		14	22	6	6	6
CH₄ gesamt	mg/MJ	385	289	358	135	43
Anlagenbetrieb		1	0	1	1	13
Brennstoffbereitstellung		346	228	340	116	13
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		38	60	18	18	17
N₂O gesamt	mg/MJ	3	3	3	2	5
Anlagenbetrieb		1	1	1	1	4
Brennstoffbereitstellung		1	1	1	1	0
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	2	1	1	0
Partikel gesamt	mg/MJ	20	26	15	17	101
Anlagenbetrieb		0	0	0	1	77
Brennstoffbereitstellung		9	6	9	10	16
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		11	20	6	7	7
NO_x gesamt	mg/MJ	84	79	71	124	312
Anlagenbetrieb		31	20	30	39	194
Brennstoffbereitstellung		29	19	29	72	107
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		24	40	12	13	11
SO_x gesamt	mg/MJ	64	85	46	147	41
Anlagenbetrieb		0	0	0	52	9
Brennstoffbereitstellung		27	18	27	73	15
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		36	67	20	22	17
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /MJ	59	86	14	14	17
Entnahme an Bauxit	mg/MJ	19	52	7	24	5
Entnahme an Eisen	mg/MJ	385	660	253	321	545
Entnahme an Kupfer	mg/MJ	13	96	4	7	3
Entnahme an Kalkstein	mg/MJ	2696	2716	1863	747	859

^a zugrunde gelegter Erdgasmix für Deutschland: 21,9% inländische Förderung, 31,1% Niederlande, 13,8% Norwegen, 33,2% Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) ^b BW = Brennwärtekessel ^c NT = Niedertemperaturkessel

Das heizölbefeuerte System mit Versorgungsfall MFH liefert zum Teil beträchtlich höhere kumulierte Emissionen als das entsprechende erdgasbefeuerte System. Eine Ausnahme stellen hierbei die CH₄-Emissionen dar, die in der Bereitstellungskette für Erdgas deutlich höher als bei Heizöl ausfallen. Bei allen anderen Emissionen ergeben sich jedoch nicht nur bei der Brennstoffbereitstellung, sondern aufgrund der Brennstoffzusammensetzung auch bei den direkten Emissionen höhere Werte für das heizölbefeuerte System. Die Emissionen durch bauliche und sonstige Vorleistungen unterscheiden sich dagegen kaum.

Bei der Wärmeversorgung mit Hackschnitzelfeuerung entstehen keine fossilen CO₂-Emissionen während des Betriebs der Anlage, jedoch vergleichsweise hohe Emissionen an Partikeln und Stickoxiden.

Die radioaktiven Emissionen stammen bei allen Systemen aus vorgelagerten Ketten, hauptsächlich der Stromerzeugung mit Kernenergie und variieren entsprechend dem Elektrizitätseinsatz in den Vorketten und beim Betrieb der Wärmebereitstellungsanlage.

Die Inanspruchnahme nichtenergetischer Rohstoffe wird im wesentlichen durch die baulichen Aufwendungen für die Anlage sowie der Infrastruktur für die Brennstoffbereitstellung bestimmt.

3.3 Wirkungsabschätzung

3.3.1 Wirkungspotentiale

Wie bei den Stromerzeugungssystemen wurden für die Referenzanlagen zur Nutzwärmebereitstellung das Treibhauspotential, das Versauerungspotential und das Eutrophierungspotential berechnet. Abb. 3-1 zeigt die entsprechenden Resultate für die ausgewählten Referenzsysteme.

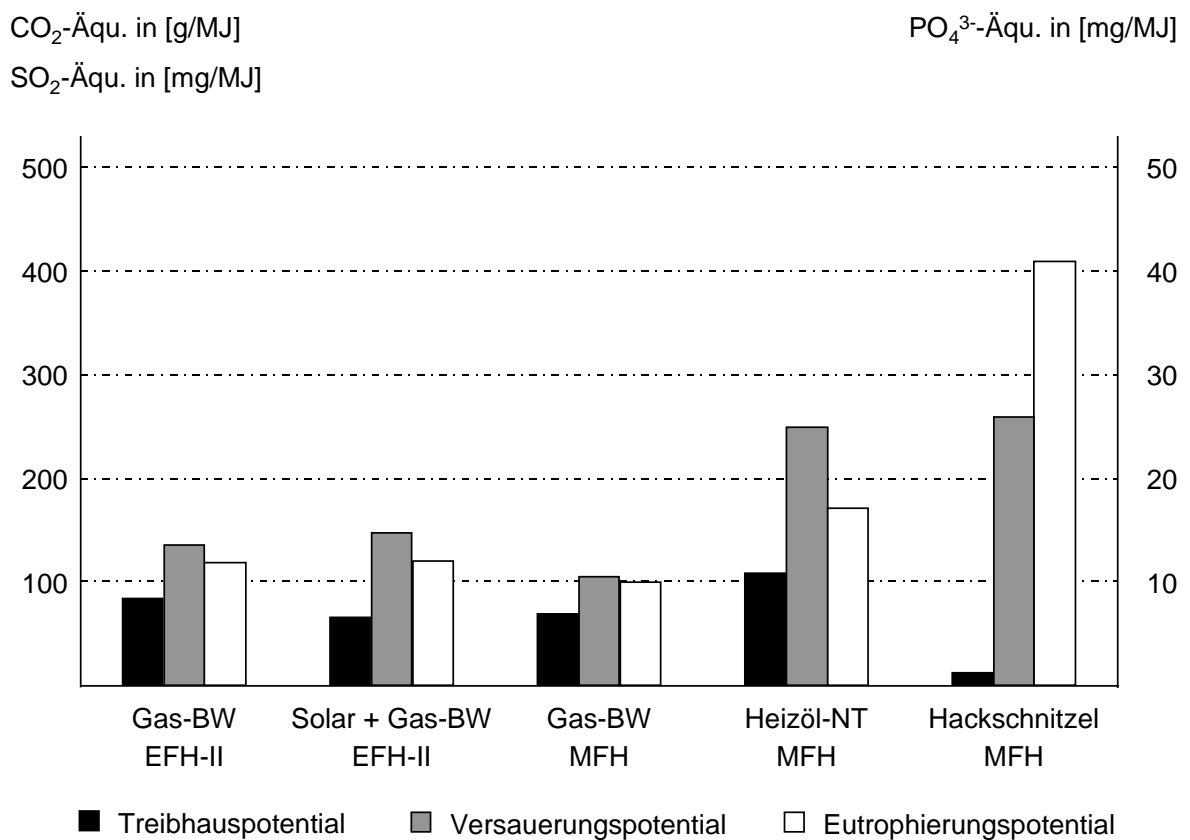


Abb. 3-1: Wirkungspotentiale ausgewählter Wärmebereitstellungssysteme

Die Abb. 3-1 zeigt links die Resultate der beiden hier betrachteten Referenzsysteme für den Versorgungsfall EFH-II. Der Vergleich macht deutlich, daß eine Unterstützung des Gas-Brennwertkessels mittels Solaranlage zwar zu einem geringeren Treibhauspotential führt, die Werte für das Versauerungs- und auch das Eutrophierungspotential sich dagegen trotz Brennstoffeinsparung während des Betriebs der Anlage erhöhen. Grund hierfür sind die zusätzlichen Aufwendungen für den Bau und die Installation der Solaranlage, die beispielsweise zusätzliche indirekte Energieaufwendungen und damit verbundene SO_2 - und NO_x -Emissionen verursachen.

Im Vergleich zum Versorgungsfall EFH-II entfällt beim Versorgungsfall MFH ein geringerer Anteil der Wärmeversorgung auf die Warmwasserbereitstellung, die wegen des Wärmeverlustes des Warmwasserspeichers einen geringeren Nutzungsgrad als die Raumwärmebereitstellung aufweist. Dadurch ergibt sich für das Gesamtsystem im Versorgungsfall MFH ein höherer Nutzungsgrad des Gesamtsystems, der zu niedrigerem Brennstoffeinsatz und damit zu niedrigeren Emissionen aus dem Betrieb und der Brennstoffbereitstellung führt. Der Vergleich des heizölbefeuerten Systems mit dem gasbefeuerten System ergibt bei allen Wirkungspotentialen höhere Werte für die Heizölföuerung. Die Ursache ist hierfür zum einen der geringere Nutzungsgrad des Systems auf Basis von Heizöl. Zum anderen ist die Bereitstellung von Heizöl durch wesentlich höhere SO_2 - und NO_x -Emissionen gekennzeichnet, aus denen die entsprechend hohen Resultate für das Versauerungs- und das Eutrophierungspotential resultieren.

Das Referenzsystem auf der Basis von Hackschnitzeln weist aufgrund der guten CO_2 -Emissionsbilanz das mit Abstand niedrigste Treibhauspotential auf. Für das Versauerungs- und das Eutrophierungspotential ergeben sich jedoch aufgrund der hohen NO_x -Emissionen der Hackschnitzelföuerung höhere Werte als für alle anderen hier betrachteten Referenzanlagen.

3.3.2 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Hauptursache der hier betrachteten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sind die Luftschadstoffe SO_2 , NO_x und Staub. Wie bei den Bilanzen für die Stromerzeugung werden hier die beiden Kenngrößen verlorene Lebenserwartung und Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit quantifiziert. Die Resultate für die ausgewählten Referenzanlagen der Nutzwärmebereitstellung zeigt Abb. 3-2.

Die Wärmebereitstellung aus einer solarthermischen Anlage in Verbindung mit einer Zusatzföuerung auf Basis von Erdgas ist mit höheren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit verbunden als eine alleinige Wärmebereitstellung mit Erdgas. Wie bei den Wirkungspotentialen sind auch hier die erhöhten indirekten Emissionen aufgrund der zusätzlichen Aufwendungen für den Bau der solarthermischen Anlage der Grund. Der höhere Systemnutzungsgrad im Versorgungsfall MFH reduziert bei gleicher Referenztechnik die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit gegenüber dem Versorgungsfall EFH-II.

Wie schon bei den Wirkungspotentialen erwähnt, weist eine Heizölföuerung höhere indirekten Emissionen an SO_2 und NO_x aus der Brennstoffbereitstellung, aber auch höhere direkte SO_2 -Emissionen beim Betrieb der Anlage auf. Dadurch kommt es zu den deutlich höheren Werten sowohl für die verlorene Lebenserwartung als auch für die Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit beim Wärmebereitstellungssystem auf Basis von Heizöl.

Die absolut höchsten Werte für Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit ergeben sich jedoch für das mit Holzhackschnitzeln befeuerte System aufgrund der hohen direkten Partikel- und NO_x -Emissionen aus dem Betrieb der Anlage.

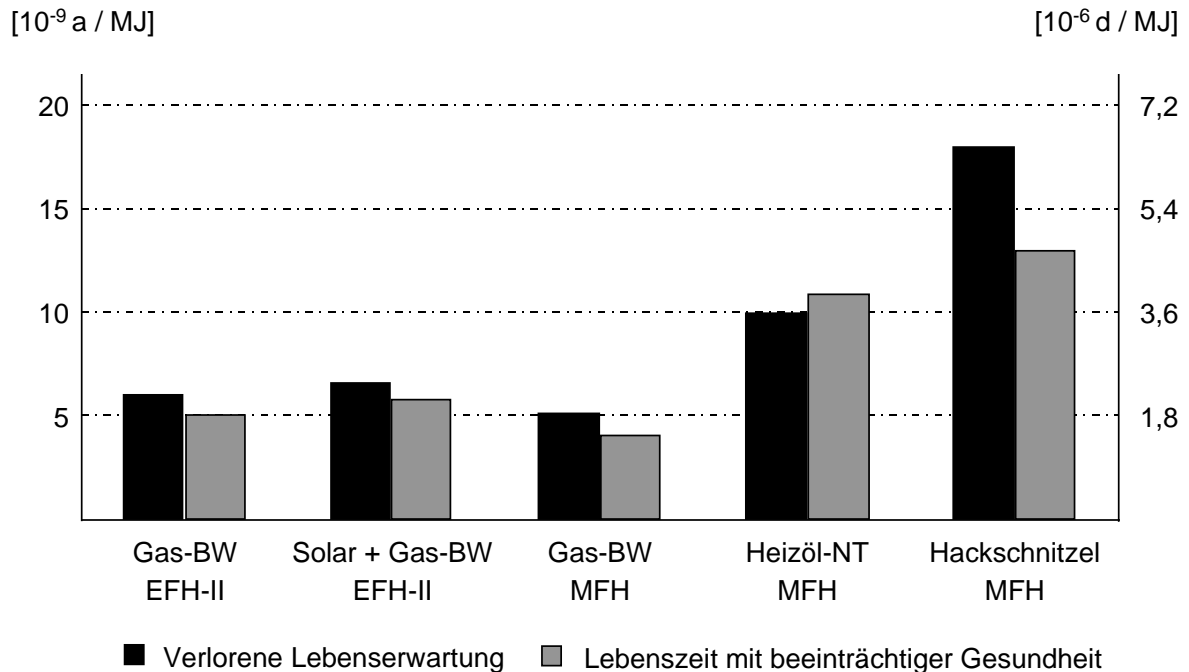


Abb. 3-2: Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

3.3.3 Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt

Die Abb. 3-3 zeigt die von den betrachteten Referenzsystemen verursachten Schäden an Materialien und Nutzpflanzen. Der Vergleich des Erdgas-Brennwertkessel-Systems mit dem kombinierten solarthermischen und erdgasbefeuerten System ergibt für letzteres etwas höhere Werte, da die zusätzlichen Aufwendungen für den Bau der solarthermischen Anlage zu zusätzlichen Schäden an Materialien und Nutzpflanzen führen, die höher sind als die Reduktion von Schäden aus der Brennstoffbereitstellung durch verringerten Brennstoffeinsatz.

Die für den Versorgungsfall MFH ermittelten Schäden liegen leicht unter denen des Versorgungsfalles EFH-II, wenn man die gleiche Referenztechnik - in diesem Fall Erdgas - zugrunde legt. Für den Vergleich zwischen heizöl- und erdgasbefeuertem System ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den zuvor betrachteten Wirkungskategorien: aufgrund der höheren NMVOC-Emissionen aus der Heizölbereitstellung, die die Bildung von bodennahem Ozon und daraus folgend die Schädigung von Nutzpflanzen begünstigen, kommt es zu entsprechend höheren Schäden in der vom Menschen geschaffenen Umwelt durch das heizölbefeuerte System.

Das hackschnitzelbefeuerte System verursacht Materialschäden, die in etwa den Materialschäden der Heizölfeuerung entsprechen. Aufgrund der hohen NO_x -Emissionen, die ozonmindernd wirken können und damit die Schädigung von Nutzpflanzen ozonbelasteten Ge-

bieten herabsetzen (siehe Erläuterungen im Kapitel 2.3.3), ergeben sich für die Holzhack-schnitzelfeuerung negative Schäden an Nutzpflanzen.

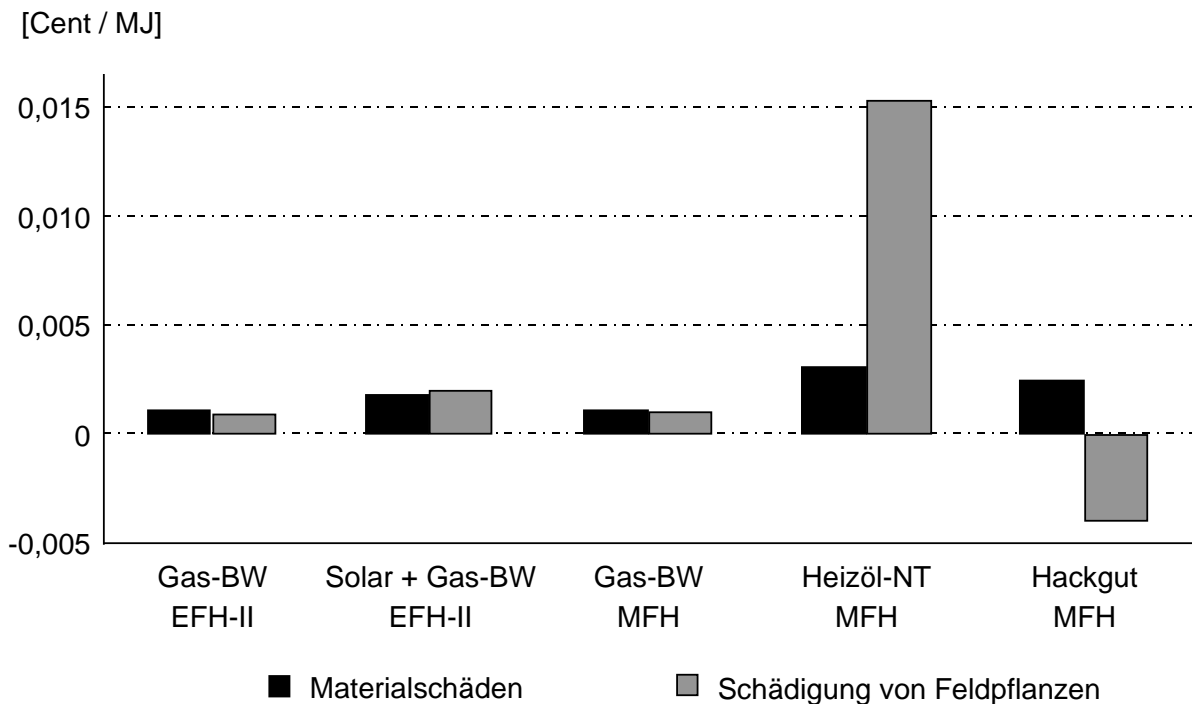


Abb. 3-3: Schädigung der vom Menschen geschaffenen Umwelt

3.3.4 Verbrauch endlicher Primärenergieträger

Der nach der Ressourcenmethode berechnete kumulierte Energieaufwand beschreibt hier den Verbrauch endlicher Energierohstoffe, wobei die fossilen Energieträger jeweils mit ihrem unteren Heizwert primärenergetisch bewertet werden. Die primärenergetische Nutzung von Uran, das hier über vorgelagerte Prozesse der Stromerzeugung in die Bilanzen eingeht, erfolgt entsprechend dem Vorschlag in der VDI-Richtlinie 4600, nukleare Brennstoffe mit einem Kraftwerksnutzungsgrad von 33% zu bewerten.

Abb. 3-4 zeigt die Resultate für die hier betrachteten Referenzsysteme zur Nutzwärmebereitstellung und verdeutlicht, daß alle Systeme relevante indirekte Energieträgerverbräuche aufweisen.

Beim System mit gasbefeuertem Brennwertkessel betragen die indirekten Energieaufwendungen ungefähr ein Viertel des direkten Brennstoffeinsatzes beim Betrieb des Brennwertkessels. Wird eine solarthermische Anlage integriert, steigen die indirekten energetischen Aufwendungen an, da der Bau der solarthermischen Anlage höhere Energieaufwendungen erfordert als durch den geringeren Erdgasbedarf bei der Brennstoffbereitstellung eingespart werden kann. Allerdings sinkt auch der direkte Energieträgerverbrauch entsprechend des solaren Deckungsgrades von 38%, so daß die kumulierten Energieaufwendungen der solarthermischen Wärmebereitstellung mit Erdgaszusatzfeuerung insgesamt unter denen einer alleinigen Nutzwärmebereitstellung auf Basis von Erdgas liegen.

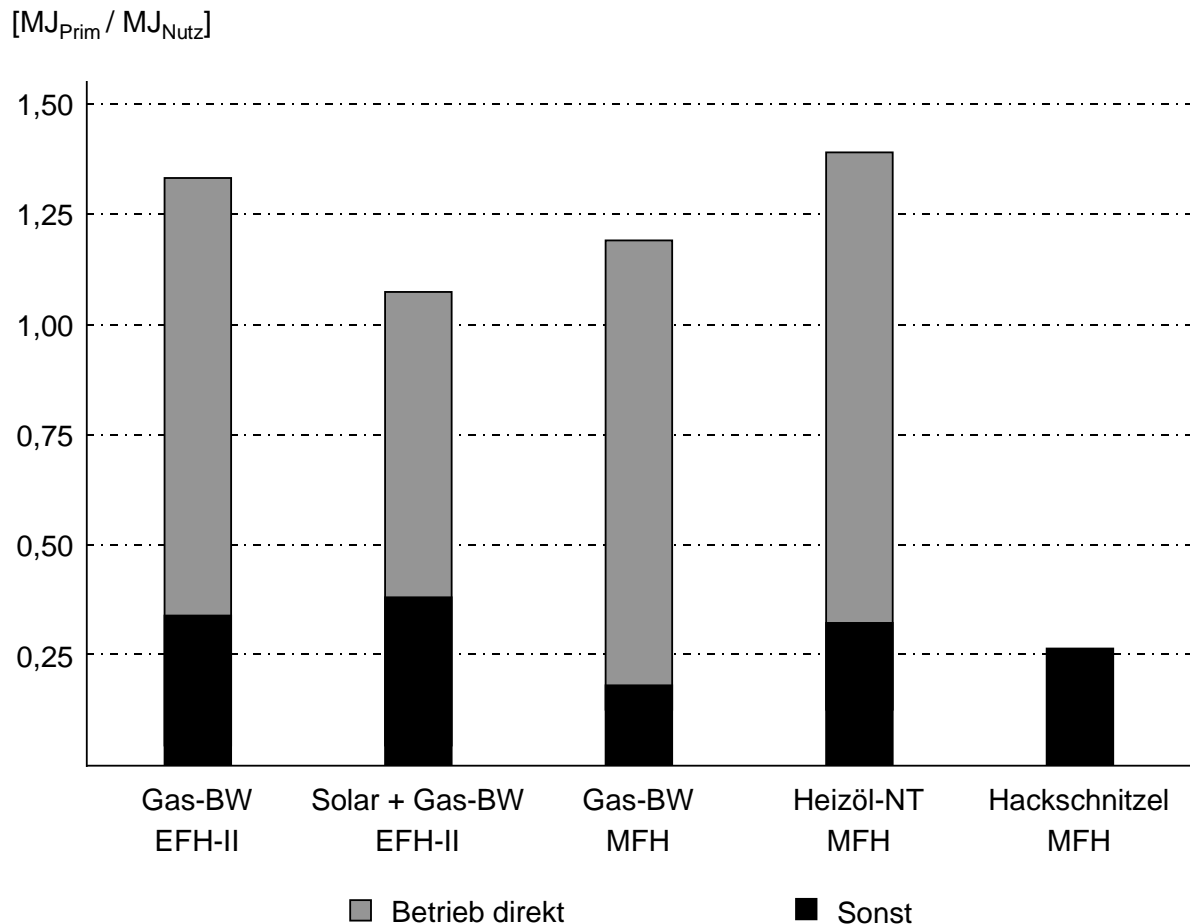


Abb. 3-4: Verbrauch endlicher Primärenergieträger

Da bei der Nutzung von Heizöl heute im Gegensatz zu einer erdgasbefeuerten Wärmebereitstellung, bei der in der Regel die Brennwertechnik zum Einsatz kommt, nur mit der Technik der Niedertemperaturkessel gearbeitet wird, die einen niedrigeren Nutzungsgrad aufweist, ergeben sich daraus für das heizölbasierte System höhere kumulierte Energieaufwendungen. Am günstigsten schneidet das System auf Basis von Holzhackschnitzeln ab, bei dem lediglich indirekte Aufwendungen an nichterneuerbaren Energierohstoffen auftreten.

3.3.5 Gewichtung der Wirkungsindikatorergebnisse

Die Gewichtung der in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Wirkungsindikatorergebnisse erfolgt anhand der monetären Bewertung entsprechend der in Kapitel 2.3.5 dargestellten Vorgehensweise.

Die Ergebnisse zeigen, daß sich für die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit wesentlich höhere monetäre Bewertungen in monetären Einheiten ergeben als für die Kategorien Materialschäden oder Schäden an Nutzpflanzen. Die monetär bewerteten Schäden an Ökosystemen liegt bei allen in Tabelle 3-4 aufgeführten Systemen bei ungefähr einem Viertel des jeweiligen Wertes für die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Die monetäre Bewertung des Beitrags zum Treibhauseffekt liefert dagegen Werte, die für alle Systeme in

der Größenordnung der monetär bewerteten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und zum Teil deutlich darüber liegen.

Die Integration einer solarthermischen Wärmeengewinnung erhöht die monetär bewerteten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, verringert aber den Wert für den Treibhauseffekt. Die höchsten Werte bei den Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit weist das mit Holzhackschnitzeln betriebene System aus, für das sich auf der anderen Seite der niedrigste Wert bezüglich des Treibhauseffektes ergibt.

Tabelle 3-4: Monetäre Bewertung der ausgewählten Wärmebereitstellungssysteme

Cent/MJ	Gas-BW EFH-II	Solar - Gas-BW EFH-II	Gas-BW MFH	Heizöl-NT MFH	Hackschnitzel MFH
Schadenskosten					
Gesundheit	0,081	0,096	0,063	0,145	0,225
Material	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002
Feldpflanzen	0,001	0,002	0,001	0,016	- 0,004
Vermeidungskosten (nach Standard-Preis-Ansatz)					
Ökosysteme	0,022	0,025	0,018	0,035	0,054
Treibhauseffekt	0,167	0,136	0,147	0,201	0,034

4 Schlußfolgerungen

Das Instrument der ganzheitlichen Bilanzierung ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Unterstützung umweltrelevanter Entscheidungen. Für die Sachbilanzierung - also die systematische Quantifizierung der Umwelteinwirkungen eines Energiesystems und seiner vor- und nachgelagerten Prozesse - wurde im Rahmen dieses Projektes ein Verfahren erarbeitet, das es erlaubt, das bisher allein angewendete Verfahren der Prozeßkettenanalyse durch eine sektorale Analyse (Input-Output-Analyse) zu ergänzen. Dadurch ist es nun möglich, vollständige Sachbilanzen zu erstellen und auch die Umweltwirkungen von vor- und nachgelagerten Prozessen, die beispielsweise aufgrund von Datenmangel nicht in der Prozeßkette berücksichtigt werden können, zu erfassen. Da die Vorgehensweise auf Daten aufbaut, die alle Produktionsbereiche einer Volkswirtschaft erfassen, ist sichergestellt, daß die Methode auf Prozeßketten für beliebige Produkte und Dienstleistungen anwendbar ist. Darüber hinaus handelt es sich um Daten, die in regelmäßigen Abständen von statistischen Ämtern zur Verfügung gestellt werden und damit in der Regel kostengünstig zugänglich sind. Dies gewährleistet die zukünftige Anwendbarkeit des Verfahrens und ein einfaches Aktualisieren von Bilanzen.

Im Bereich der Wirkungsabschätzung kann die Berechnung von Schadenspotentialen für globale Umweltprobleme als ausreichend angesehen werden. Bei Umweltproblemfeldern, die einen regionalen Bezug aufweisen wie beispielsweise Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, sollte jedoch - entgegen der heute noch häufig anzutreffenden Praxis bei Lebensweganalysen - eine mehr schadensorientierte Betrachtung erfolgen. Die in diesem Projekt praktizierte Verwendung von Charakterisierungsfaktoren, die durchschnittliche Schäden je emittierter Einheit eines Schadstoffes beschreiben, stellen einen ersten Schritt in diese Richtung dar. Zukünftige Bemühungen sollten darauf abzielen, auch standortspezifische Untersuchungen im Rahmen von Lebensweganalysen zu ermöglichen.

Im Rahmen von Lebensweganalysen kann die monetäre Bewertung als ein geeignetes Instrument zur Aggregation sowohl innerhalb einzelner Schadenskategorien als auch zwischen Schadenskategorien angesehen werden. Auf der Grundlage empirisch ermittelter Präferenzen zur Berechnung von Umweltschadenskosten oder auf der Grundlage gesellschaftlicher Zielvorgaben zur Berechnung von Vermeidungskosten nach dem Standard-Preis-Ansatz können inzwischen für wichtige Schadenskategorien Wertansätze ermittelt werden.

Die in diesem Projekt erstellten Wirkungsabschätzungen ergeben Wirkungspotentiale für den Treibhauseffekt, die Versauerung und die Eutrophierung von Böden und Gewässern, Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Schäden in der vom Menschen geschaffenen Umwelt in Form von Materialschäden und Schäden an Nutzpflanzen sowie die Inanspruchnahme endlicher Energieträger. Stoff- und Energieströme, die diese Größen in allen Bilanzen sowohl für die Stromerzeugung als auch die Wärmebereitstellung wesentlich beeinflussen, sind vor allen Dingen die Luftschadstoffe CO_2 , CH_4 , SO_2 , NO_x und Partikel sowie im Falle des kumulierten Energieaufwandes die Ressourcenverbräuche an Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Uran. Bei der Stromerzeugung aus Kernkraft spielt die Emission von ionisierender Strahlung in Form von Radon-Emissionen aus den Deponien der Uranförderung und der Uranaufbereitung sowie C-14-Emissionen aus dem Betrieb des Kraftwerkes aufgrund ihrer möglichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit noch eine gewisse Rolle.

Wesentliche Teilbereiche der erstellten Lebensweganalyse sind bei den fossilen Systemen der Stromerzeugung und auch der Wärmebereitstellung die Prozesse der Brennstoffbereit-

stellung und des Betriebes der Anlagen. Prozesse für den Bau und den Rückbau der Anlagen oder die Bereitstellung sonstiger Vorleistungen für den Betrieb oder die Instandhaltung der Anlage sind von geringerer Bedeutung. Im Falle der Stromerzeugung aus Kernkraft ergeben sich ungefähr gleiche Anteile an den Auswirkungen für die Brennstoffkette einerseits sowie für den sonstigen Betrieb und Bau einschließlich Rückbau des Kraftwerkes andererseits. Bei den Systemen zur Nutzung regenerativer Energien dominiert die Herstellung der Komponenten einschließlich der Errichtung der Anlage die Bilanzergebnisse. Auswirkungen aus dem Betrieb und dem Rückbau der Anlagen sind bei Systemen zur Nutzung regenerativer Energien in der Regel nicht ergebnisrelevant.

Insgesamt zeigt sich, daß die Stromerzeugungssysteme mit Dampfkraftwerken, die Braun- oder Steinkohle verwenden, trotz des heute erreichten Standards der Rauchgasreinigung insgesamt durch höhere Umweltwirkungen als andere Systeme gekennzeichnet sind. Zukünftig lassen sich jedoch durch Steigerung des Nutzungsgrades und Einführung der Gas- und Dampfturbinentechnik, die nochmals geringere bezogene Emissionen aufweist, weiterhin spürbare Senkungen der Umwelteinwirkungen erreichen. Die photovoltaische Stromerzeugung ist heute noch durch Umwelteinwirkungen gekennzeichnet, die deutlich über den Auswirkungen einer Stromerzeugung aus Kernkraft, Windkraft und Wasserkraft liegen. Bei einigen Wirkungskategorien werden sogar höhere Werte als für die konventionellen Stromerzeugungssysteme auf Basis fossiler Brennstoffe erreicht. Die Ausschöpfung vorhandenen Optimierungspotentials bei der Herstellung von Photovoltaik-Anlagen kann dazu beitragen, nicht nur die Kosten einer solaren Stromerzeugung, sondern gleichzeitig die damit der Herstellung verbundenen Umweltwirkungen zu verringern. Der Brennstoff Erdgas wird schon heute unter Verwendung der GuD-Technik verstromt, so daß dieser Brennstoff derzeit den umweltfreundlichsten fossilen Energieträger darstellt. Die günstigsten Resultate liefern die Bilanzen für die Stromerzeugung aus Kernkraft, Windkraft und Wasserkraft.

Für die Wärmebereitstellung wurden Systeme zur Nutzung von Erdgas, Heizöl, Biomasse sowie eine Kombination dieser Systeme mit einer solarthermischen Anlage betrachtet. Der Einsatz von Erdgas weist in allen betrachteten Fällen geringere Umweltwirkungen auf als der Einsatz von Heizöl. Die Nutzung von Biomasse in Form von Hackschnitzeln oder Pellets liefert deutlich günstigere Werte bei der Emission von Treibhausgasen, ist jedoch durch hohe kumulierte Partikel- und NO_x -Emissionen gekennzeichnet. Diese führen bei den Wirkungsindikatoren Versauerungs- und Eutrophierungspotential und auch den Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu den höchsten Resultaten aller Wärmebereitstellungssysteme. Die Kopplung der Heizungssysteme mit einer solarthermischen Wärmeerzeugung ergibt nicht immer eine Verringerung der kumulierten Emissionen und der damit verbundenen Umweltauswirkungen. So übertreffen beispielsweise bei einem Einfamilienhaus mit Niedrigenergiebauweise die Umweltauswirkungen auf Ökosysteme und menschliche Gesundheit, die durch den Bau der solarthermischen Anlage verursacht werden, die durch die Brennstoffeinsparung vermiedenen Umweltwirkungen. Die Treibhausgasemissionen und der Einsatz endlicher Energieträger verringert sich jedoch bei allen fossilen Wärmebereitstellungssystemen durch die Integration einer solarthermischen Anlage.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen nur einen Ausschnitt aus den insgesamt erarbeiteten Daten. Mit den Resultaten dieses Projektes liegt somit einerseits ein Instrumentarium, andererseits auch eine umfangreiche Datenbasis vor, die als Grundlage zur Bewertung von Energiesystemen verwendet werden kann.

Literaturverzeichnis

/Amann et al. 1998/

Amann, M., et al.: Emission Reduction Scenarios to Control Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone in Europe. Report prepared for the 22nd Meeting of the UN/ECE Task Force on Integrated Assessment Modelling. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, 1998

/CoEC 1997/

Communication to the Council and the European Parliament on a Community Strategy to combat acidification. Commission of the European Communities (CoEC), Brussels, 1997

/EMEP 1997/

Simpson, D., Olendrzynski, K., Semb, A., Stoeren, E., Unger, S.: Photochemical oxidant modelling in Europe: multi-annual modelling and source receptor relationships. Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long range transmission of air pollutants in Europe (emep) and Meteorological Synthesizing Centre-West (MSC-W), Oslo, Norway. EMEP/MSC-W Report 3/97, Juli 1997

/ExternE 1999/

ExternE: Externalities of Fuel Cycles. European Commission, DG XII, Science, Research and Development, JOULE. ExternE Project, Report No 7 Methodology 2nd Edition, 1999

/Forum 1999/

Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Analysen in Deutschland (Hrsg.): Energiemodelle zum Klimaschutz in Deutschland. Physika-Verlag, Heidelberg, 1999

/Friedrich; Krewitt 1997/

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

/Goedkoop et al. 1997/

Goedkoop, M., et al.: The Eco-Indicator 97 - Proposal for the methodology. Version 1, PRe Consultants (NL), 1997

/Heijungs et al. 1992/

Heijungs, R., et al.: Environmental life cycle assessment of products - a guide of practice, Centre of Environmental Science (CML), Leiden (NL), 1992

/Hoffmann 1996/

Hoffmann, C.: Bereitstellungsnutzungsgrade elektrischer Energie. Elektrizitätswirtschaft, Jg. 94 (1995) Heft 11, München 1995

/Hueting 1991/

Hueting, R.: Correcting national income for environmental losses. A practical solution for a theoretical dilemma. In: Ecological economics: the science and management of sustainability, New York, 194 - 213, 1991

/IPCC 1995/

Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, Volume 3. Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), 1995

/ISO14040 1997/

ISO14040: Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Deutsche Fassung EN ISO 14040, Juni 1997, 1997

/ISO14041 1997/

ISO14041: Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Deutsche Fassung EN ISO 14041, Oktober 1998

/ISO14042 1999/

ISO14042: Ökobilanz - Wirkungsabschätzung. DIN prEN ISO 14042, Februar 1999

/ISO14043 1998/

ISO14043: Ökobilanz - Auswertung. Deutsche Fassung prEN ISO 14043, Dezember 1998

/Kaltschmitt; Wiese 1997/

Kaltschmitt, M., Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer Verlag, Berlin, 1997

/Krewitt 1996/

Krewitt, W.: Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme. Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 1996

/Marheineke; Stekeler 1996/

Marheineke, T., Stekeler, J.: Ein Hybrid-Ansatz zur ganzheitlichen Bilanzierung - Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel einer konkreten Transportaufgabe im Verkehr. In: VDI-Bericht 1307, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996

/Marheineke et al. 1999/

Marheineke, T., Friedrich, R., Krewitt, W.: Application of a Hybrid-Approach to the Life Cycle Inventory Analysis of a Freight Transport Task. SAE 1998 Transactions - Journal of Passenger Cars. Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale PA, USA, 1999

/Marheineke 2000/

Marheineke, T.: Ermittlung von Charakterisierungsfaktoren für kanzerogene Stoffe. Arbeitspapier, Institut für Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2000

/OECD/IAEA 1988/

Uranium - Resources, production and demand, OECD Nuclear Energy and the International Atomic Energy Agency (IAEA), Paris, 1988

/Seidel 1996/

Seidel, H. J.: Umweltmedizin. Fakten und Informationen für einen verantwortungsvollen Umgang mit Umwelt und menschlicher Gesundheit, 1996

/UBA 1995/

Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung, Texte 23/95 des Umweltbundesamtes (UBA), Berlin, 1995

/UNSCEAR 1993/

Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, 1993

/Wehowsky et al. 1994/

Wehowsky, P., et al.: Strom- und wärmeerzeugende Anlagen auf fossiler und nuklearer Grundlage. Bericht 4-06(1) des Teilprojektes 4 "Umwandlungssektor" des Entwicklungsvorhabens "Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien" (IKARUS) des Forschungszentrums Jülich im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, 1994

Anhang A: Sachbilanzen für Techniken zur Stromerzeugung

Tabelle A-1: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Braunkohle

Bilanzgröße	Einheit	Dampfkraft-	Dampfkraft-	GuD ^a -Kraft-	GuD ^a -Kraft-
		werk	werk	werk	werk
		40%	43%	48%	50,5%
CO₂ gesamt	g/kWh	1054	980	873	829
Kraftwerksbetrieb		998	928	833	791
Brennstoffbereitstellung		39	34	28	25
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		17	18	12	13
CH₄ gesamt	mg/kWh	94	94	97	94
Kraftwerksbetrieb		13	12	12	11
Brennstoffbereitstellung		46	42	38	36
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		35	40	47	47
N₂O gesamt	mg/kWh	53	49	25	24
Kraftwerksbetrieb		50	46	23	21
Brennstoffbereitstellung		3	2	1	1
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	1	2	2
Partikel gesamt	mg/kWh	263	247	233	222
Kraftwerksbetrieb		13	12	20	20
Brennstoffbereitstellung		227	210	188	178
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		23	25	24	24
NO_x gesamt	mg/kWh	830	775	354	354
Kraftwerksbetrieb		763	710	300	301
Brennstoffbereitstellung		44	39	24	23
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		23	26	30	30
SO_x gesamt	mg/kWh	401	380	235	232
Kraftwerksbetrieb		318	296	150	150
Brennstoffbereitstellung		37	34	27	25
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		46	50	58	57
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	7	7	8	7
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	19	19	19	18
Entnahme an Eisen	mg/kWh	2102	2132	2163	2098
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	8	8	7	7
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	20302	19120	2386	2283

^a GuD = Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

Tabelle A-2: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Steinkohle aus deutscher Förderung

Bilanzgröße	Einheit	Dampfkraft-	Dampfkraft-	GuD ^a -Kraft-	GuDa-Kraft-
		werk	werk	werk	werk
		43%	45,5%	46%	48,5%
CO₂ gesamt	g/kWh	838	790	780	740
Kraftwerksbetrieb		766	724	716	679
Brennstoffbereitstellung		55	52	51	48
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		17	15	13	13
CH₄ gesamt	mg/kWh	4716	4453	4392	4171
Kraftwerksbetrieb		42	39	13	12
Brennstoffbereitstellung		4596	4344	4297	4075
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		78	70	82	85
N₂O gesamt	mg/kWh	47	44	44	42
Kraftwerksbetrieb		42	39	39	37
Brennstoffbereitstellung		4	4	4	4
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	64	56	68	65
Kraftwerksbetrieb		11	10	20	19
Brennstoffbereitstellung		23	22	22	21
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		30	25	27	26
NO_x gesamt	mg/kWh	696	656	435	414
Kraftwerksbetrieb		551	520	300	284
Brennstoffbereitstellung		115	109	108	102
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		31	27	28	28
SO_x gesamt	mg/kWh	351	326	287	275
Kraftwerksbetrieb		207	195	150	142
Brennstoffbereitstellung		82	78	77	73
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		62	53	60	60
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	12	10	11	11
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	20	16	17	16
Entnahme an Eisen	mg/kWh	2306	1745	1791	1771
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	2	2	2	2
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	12873	11912	4953	4792

^a GuD = Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

Tabelle A-3: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Steinkohle aus ausländischer Förderung

Bilanzgröße	Einheit	Dampfkraft-	Dampfkraft-	Dampfkraft-	Dampfkraft-
		werk 43%	werk 43%	werk 43%	werk 43%
		RSA	POL	AUS	USA
CO₂ gesamt	g/kWh	880	897	888	859
Kraftwerksbetrieb		766	766	766	766
Brennstoffbereitstellung		97	114	105	76,1
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		17	17	17	17
CH₄ gesamt	mg/kWh	4680	6355	1203	1192
Kraftwerksbetrieb		42	42	42	42
Brennstoffbereitstellung		4461	6235	1083	1072
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		78	78	78	78
N₂O gesamt	mg/kWh	46	51	45	46
Kraftwerksbetrieb		42	42	42	42
Brennstoffbereitstellung		3	8	3	4
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	164	197	145	120
Kraftwerksbetrieb		11	11	11	11
Brennstoffbereitstellung		123	155	104	79
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		30	30	30	30
NO_x gesamt	mg/kWh	1294	993	1529	1006
Kraftwerksbetrieb		551	551	551	551
Brennstoffbereitstellung		712	411	948	424
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		31	31	31	31
SO_x gesamt	mg/kWh	1395	912	1762	931
Kraftwerksbetrieb		207	207	207	207
Brennstoffbereitstellung		1127	644	1494	662
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		62	62	62	62
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	24	45	24	31
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	24	20	26	22
Entnahme an Eisen	mg/kWh	4038	3176	4541	3588
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	4	2	4	3
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	11810	15317	12551	12147

Tabelle A-4: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Erdgas

Bilanzgröße	Einheit	Erdgas Westeuropa ^a	Erdgas GUS ^b	Erdgas Mix GER ^b
		GuD ^c -Kraftwerk 57,6%	GuD ^c -Kraftwerk 57,6%	GuD ^c -Kraftwerk 57,6%
CO₂ gesamt	g/kWh	370	417	386
Kraftwerksbetrieb		349	349	349
Brennstoffbereitstellung		17	64	32
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		5	5	5
CH₄ gesamt	mg/kWh	379	2480	1076
Kraftwerksbetrieb		27	27	27
Brennstoffbereitstellung		338	2439	1036
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		14	14	14
N₂O gesamt	mg/kWh	2	9	5
Kraftwerksbetrieb		1	1	1
Brennstoffbereitstellung		1	8	3
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	19	75	37
Kraftwerksbetrieb		0	0	0
Brennstoffbereitstellung		14	71	33
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		4	4	4
NO_x gesamt	mg/kWh	279	497	351
Kraftwerksbetrieb		208	208	208
Brennstoffbereitstellung		60	279	133
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		11	11	11
SO_x gesamt	mg/kWh	80	215	125
Kraftwerksbetrieb		0	0	0
Brennstoffbereitstellung		56	190	101
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		24	24	24
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	5	17	9
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	2	2	2
Entnahme an Eisen	mg/kWh	967	1684	1205
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	1	1	1
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	1842	15516	6382

^a Mix aus deutscher, niederländischer und norwegischer Förderung, gewichtet entsprechend der Importsituation in Deutschland ohne GUS (siehe Fußnote ^b) ^b zugrunde gelegter Erdgasmix für Deutschland: 21,9% inländische Förderung, 31,1% Niederlande, 13,8% Norwegen, 33,2% Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS)

^c GuD = Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

Tabelle A-5: Sachbilanzen für die Stromerzeugung auf Basis von Kernkraft

Bilanzgröße	Einheit	DWR ^a	DWR ^a	EPR ^b	EPR ^b
		mit WAA ^c	direkte Endl.	mit WAA ^c	direkte Endl.
CO₂ gesamt	g/kWh	17	16	17	16
Brennstoffkette		8	7	8	6
Betrieb sonst ^d		5	5	5	5
Bau und Abriß		4	4	5	5
Partikel gesamt	mg/kWh	25	26	25	25
Brennstoffkette		14	15	14	14
Betrieb sonst ^d		5	5	5	5
Bau und Abriß		6	6	7	7
NO_x gesamt	mg/kWh	48	45	47	44
Brennstoffkette		24	21	22	19
Betrieb sonst ^d		13	14	12	12
Bau und Abriß		10	10	12	12
SO_x gesamt	mg/kWh	73	67	72	66
Brennstoffkette		38	32	35	30
Betrieb sonst ^d		20	20	18	18
Bau und Abriß		15	15	18	18
Rn-222 Luft gesamt	kBq/kWh	17	21	16	19
Brennstoffkette		17	21	16	19
Betrieb sonst ^d		0	0	0	0
Bau und Abriß		0	0	0	0
C-14 Luft gesamt	Bq/kWh	31	8	28	8
Brennstoffkette		23	0	21	0
Betrieb sonst ^d		8	8	8	8
Bau und Abriß		0	0	0	0
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	4656	1280	4224	1195
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	27	27	30	30
Entnahme an Eisen	mg/kWh	420	445	480	492
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	6	6	7	7
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	806	776	904	874

^a DWR = Druckwasserreaktor. Zugrunde gelegter Abbrand 50.000 MWd/tUran ^b EPR = European Pressurized Water Reactor. Zugrunde gelegter Abbrand 60.000 MWd/tUran ^c WAA = Wiederaufarbeitung ^d direkte Emissionen des Kraftwerksbetriebes und Emissionen durch die Bereitstellung sonstiger Vorleistungen für den Betrieb und die Instandsetzung des Kraftwerkes

Tabelle A-6: Sachbilanzen für Dachanlagen zur photovoltaischen Stromerzeugung

Bilanzgröße	Einheit	5 kW polykristallin	5 kW monokristallin	5 kW amorph
CO₂ gesamt	g/kWh	334	241	196
Bau		297	204	161
Betrieb und Abriß		17	17	16
Backup		20	20	20
CH₄ gesamt	mg/kWh	908	725	634
Bau		732	546	461
Betrieb und Abriß		62	64	58
Backup		115	115	115
N₂O gesamt	mg/kWh	21	19	17
Bau		16	15	13
Betrieb und Abriß		3	3	3
Backup		1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	124	141	107
Bau		102	117	85
Betrieb und Abriß		16	16	15
Backup		7	7	7
NO_x gesamt	mg/kWh	443	399	321
Bau		380	335	254
Betrieb und Abriß		45	45	49
Backup		19	19	19
SO_x gesamt	mg/kWh	507	476	433
Bau		427	393	355
Betrieb und Abriß		53	56	52
Backup		27	27	27
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	1693	945	678
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	2041	4623	2753
Entnahme an Eisen	mg/kWh	5346	3686	7278
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	241	206	330
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	10823	12133	15240

Tabelle A-7: Sachbilanzen für Photovoltaik-Kraftwerke

Bilanzgröße	Einheit	1 MW polykristallin	1 MW monokristallin	1 MW amorph
CO₂ gesamt	g/kWh	319	220	198
Bau		288	189	168
Betrieb und Abriß		11	10	10
Backup		20	20	20
CH₄ gesamt	mg/kWh	883	684	659
Bau		732	533	509
Betrieb und Abriß		36	36	35
Backup		115	115	115
N₂O gesamt	mg/kWh	19	16	16
Bau		16	13	13
Betrieb und Abriß		2	2	2
Backup		1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	118	117	105
Bau		101	100	88
Betrieb und Abriß		10	10	10
Backup		7	7	7
NO_x gesamt	mg/kWh	408	345	298
Bau		358	296	243
Betrieb und Abriß		32	31	36
Backup		19	19	19
SO_x gesamt	mg/kWh	494	440	437
Bau		436	381	379
Betrieb und Abriß		31	32	31
Backup		27	27	27
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	1586	883	634
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	389	305	237
Entnahme an Eisen	mg/kWh	15332	11983	24247
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	363	304	507
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	11069	11594	17137

Tabelle A-8: Sachbilanzen für Windkraftanlagen (verschiedene Leistungsgrößen, Windgeschwindigkeit 5,5 m/s)

Bilanzgröße	Einheit	270 kW	600 kW	1 MW	1,5 MW
		5,5 m/s	5,5 m/s	5,5 m/s	5,5 m/s
CO₂ gesamt	g/kWh	43	38	36	33
Bau		22	17	16	13
Betrieb und Abriß		3	2	2	2
Backup		18	18	18	18
CH₄ gesamt	mg/kWh	187	169	166	160
Bau		74	59	56	49
Betrieb und Abriß		10	7	6	5
Backup		104	104	105	105
N₂O gesamt	mg/kWh	4	3	3	3
Bau		2	2	2	2
Betrieb und Abriß		1	0	0	0
Backup		1	1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	23	19	18	17
Bau		15	12	11	10
Betrieb und Abriß		3	2	2	2
Backup		5	5	6	6
NO_x gesamt	mg/kWh	66	55	49	46
Bau		37	31	26	25
Betrieb und Abriß		13	8	6	5
Backup		16	16	16	17
SO_x gesamt	mg/kWh	89	71	68	65
Bau		56	42	40	37
Betrieb und Abriß		11	7	6	5
Backup		22	22	22	23
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	30	25	27	18
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	83	53	44	32
Entnahme an Eisen	mg/kWh	7033	5156	5212	3679
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	131	71	65	51
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	4851	4198	2493	1998

Tabelle A-9: Sachbilanzen für Windkraftanlagen (Leistungsgröße 1 MW, verschiedene Windgeschwindigkeiten)

Bilanzgröße	Einheit	1 MW 4,5 m/s	1 MW 5,5 m/s	1 MW 6,5 m/s
CO₂ gesamt	g/kWh	57	36	29
Bau		34	16	11
Betrieb und Abriß		4	2	1
Backup		20	18	16
CH₄ gesamt	mg/kWh	245	166	136
Bau		120	56	40
Betrieb und Abriß		12	6	4
Backup		118	105	91
N₂O gesamt	mg/kWh	6	3	3
Bau		4	2	1
Betrieb und Abriß		1	0	0
Backup		1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	34	18	13
Bau		24	11	8
Betrieb und Abriß		4	2	1
Backup		7	6	4
NO_x gesamt	mg/kWh	87	49	37
Bau		56	26	19
Betrieb und Abriß		13	6	4
Backup		18	16	14
SO_x gesamt	mg/kWh	123	68	49
Bau		85	40	28
Betrieb und Abriß		12	6	4
Backup		26	22	17
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	58	27	19
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	95	44	32
Entnahme an Eisen	mg/kWh	11143	5212	3731
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	140	65	47
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	5330	2493	1784

Tabelle A-10: Sachbilanzen für Wasserkraftanlagen

Bilanzgröße	Einheit	300 kW	500 kW	2,2 MW	3,1 MW
		Laufwasser	Laufwasser	Laufwasser	Laufwasser
CO₂ gesamt	g/kWh	31	32	25	28
Bau		14	15	8	11
Betrieb und Abriß		2	2	1	1
Backup		16	16	16	16
CH₄ gesamt	mg/kWh	131	135	112	123
Bau		38	43	22	31
Betrieb und Abriß		8	7	4	6
Backup		85	85	87	87
N₂O gesamt	mg/kWh	2	2	2	2
Bau		1	1	1	1
Betrieb und Abriß		1	0	0	0
Backup		1	1	1	1
Partikel gesamt	mg/kWh	14	16	10	12
Bau		9	11	7	8
Betrieb und Abriß		2	2	1	1
Backup		3	3	3	3
NO_x gesamt	mg/kWh	55	56	40	45
Bau		33	36	24	27
Betrieb und Abriß		9	8	4	6
Backup		12	12	13	13
SO_x gesamt	mg/kWh	50	55	35	42
Bau		29	35	18	23
Betrieb und Abriß		7	7	3	5
Backup		14	14	15	15
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /kWh	8	4	2	2
Entnahme an Bauxit	mg/kWh	11	9	4	4
Entnahme an Eisen	mg/kWh	2580	2683	1563	2405
Entnahme an Kupfer	mg/kWh	14	10	5	5
Entnahme an Kalkstein	mg/kWh	6473	6930	4214	6005

Anhang B: Wirkungsabschätzung für Techniken zur Stromerzeugung

Tabelle B-1: Treibhauspotentiale der Stromerzeugungssysteme

CO ₂ -Äquivalente in g/kWh	Betrieb	Sonst	Backup ^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	1013	59	-	1072
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	939	57	-	997
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	840	43	-	883
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	798	41	-	838
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	780	171	-	951
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	737	161	-	898
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	728	158	-	886
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	691	151	-	841
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	780	213	-	993
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	780	266	-	1047
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	780	148	-	928
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	780	119	-	899
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	350	29	-	379
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	350	124	-	473
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	350	61	-	410
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	0	20	-	20
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	0	18	-	18
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	0	19	-	19
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	0	18	-	18
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	193	23	216
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	337	23	360
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	240	23	263
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	195	23	217
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	322	23	344
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	218	23	241
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	28	21	48
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	22	21	42
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	20	21	41
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	17	21	38
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	42	22	64
1 MW, 6,5 m/s (heute)	0	14	19	33
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0	17	18	35
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0	18	18	36
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0	10	18	28
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0	14	18	31

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-2: Versauerungspotentiale der Stromerzeugungssysteme

SO₂-Äquivalente in mg/kWh	Betrieb	Sonst	Backup^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	903	140	-	1043
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	840	140	-	980
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	365	132	-	496
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	365	129	-	494
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	646	276	-	923
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	611	255	-	865
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	410	248	-	658
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	389	240	-	629
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	646	1745	-	2391
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	646	1071	-	1717
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	646	2267	-	2913
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	646	1071	-	1718
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	146	138	-	284
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	146	449	-	595
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	146	241	-	387
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	0	115	-	115
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	0	106	-	106
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	0	113	-	113
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	0	104	-	104
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	667	43	720
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	1137	43	1180
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	912	43	955
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	657	43	700
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	1071	43	1114
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	818	43	860
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	111	36	147
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	83	36	119
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	75	37	111
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	70	37	107
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	160	42	201
1 MW, 6,5 m/s (heute)	0	54	28	82
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0	72	25	97
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0	79	25	104
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0	44	26	69
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0	55	26	81

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-3: Eutrophierungspotentiale der Stromerzeugungssysteme

PO₄³⁻-Äquivalente in mg/kWh	Betrieb	Sonst	Backup^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	99	10	-	109
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	92	10	-	102
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	39	9	-	48
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	39	8	-	47
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	72	24	-	95
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	68	22	-	90
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	39	20	-	59
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	37	19	-	56
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	72	101	-	172
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	72	64	-	136
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	72	131	-	203
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	72	64	-	135
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	27	10	-	37
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	27	43	-	70
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	27	21	-	48
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	0	8	-	8
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	0	7	-	7
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	0	8	-	8
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	0	7	-	7
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	49	3	51
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	63	3	66
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	60	3	63
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	44	3	47
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	57	3	60
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	51	3	54
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	8	2	10
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	6	2	9
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	5	2	8
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	5	2	7
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	11	3	14
1 MW, 6,5 m/s (heute)		4	2	6
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0	7	2	8
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0	7	2	9
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0	4	2	6
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0	5	2	7

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-4: Mortalitätsrisiko der Stromerzeugungssysteme

Verlorene Lebenserwartung in 10 ⁻⁹ a/kWh	Betrieb	Sonst	Backup ^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	32	22	-	54
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	30	20	-	50
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	14	20	-	34
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	14	19	-	33
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	22	13	-	35
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	21	12	-	33
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	14	12	-	26
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	14	11	-	25
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	22	71	-	93
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	22	49	-	71
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	22	88	-	110
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	22	44	-	67
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	6	6	-	11
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	6	21	-	26
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	6	11	-	16
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	1	8	-	9
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	1	6	-	6
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	1	8	-	9
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	1	5	-	6
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	30	2	32
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	37	2	39
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	36	2	38
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	29	2	31
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	35	2	37
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	31	2	33
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	5	2	7
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	4	2	5
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	4	2	5
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	3	2	5
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	7	2	9
1 MW, 6,5 m/s (heute)	0	2	1	4
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0	3	1	4
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0	4	1	5
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0	2	1	3
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0	2	1	4

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-5: Morbiditätsrisiko der Stromerzeugungssysteme

Beeinträchtigte Lebenserwartung 10⁻⁹ a/kWh	Betrieb	Sonst	Backup ^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	19	20	-	39
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	17	20	-	37
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	9	18	-	27
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	9	17	-	26
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	13	11	-	24
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	12	10	-	22
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	9	10	-	19
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	9	10	-	19
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	13	58	-	71
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	13	41	-	54
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	13	71	-	84
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	13	37	-	50
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	2	5	-	8
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	2	18	-	21
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	2	10	-	12
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	0	5	-	5
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	0	5	-	5
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	0	5	-	5
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	0	5	-	5
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	24	2	26
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	29	2	30
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	29	2	31
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	24	2	25
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	27	2	29
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	26	2	27
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	4	1	6
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	3	1	4
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	3	1	4
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	3	1	4
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	6	2	8
1 MW, 6,5 m/s (heute)	0	2	1	3
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0	3	1	4
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0	3	1	4
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0	2	1	3
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0	2	1	3

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-6: Materialschäden durch Stromerzeugungssysteme

Materialschäden in 10 ⁻³ Cent/kWh	Betrieb	Sonst	Backup ^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	8	1	-	9
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	7	1	-	9
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	3	1	-	5
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	3	1	-	5
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	6	3	-	8
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	5	2	-	8
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	3	2	-	6
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	3	2	-	6
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	6	19	-	24
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	6	11	-	17
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	6	24	-	30
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	6	11	-	17
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	1	1	-	3
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	1	4	-	5
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	1	2	-	3
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	0	1	-	1
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	0	1	-	1
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	0	1	-	1
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	0	1	-	1
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	7	0	7
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	8	0	9
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	8	0	8
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	7	0	7
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	8	0	8
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	7	0	7
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	2
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	1
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	1
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	1
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	2	0	2
1 MW, 6,5 m/s (heute)	0	1	0	1
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0	1	0	1
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0	1	0	1
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0	0	0	1
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0	1	0	1

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-7: Schädigung von Nutzpflanzen durch Stromerzeugungssysteme

Schädigung von Feldpflanzen in 10 ⁻³ Cent/kWh	Betrieb	Sonst	Backup ^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	-24	1	-	-23
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	-22	1	-	-21
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	-9	1	-	-7
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	-9	1	-	-7
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	-17	2	-	-14
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	-16	2	-	-14
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	-8	2	-	-6
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	-8	2	-	-6
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	-17	-3	-	-20
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	-17	0	-	-17
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	-17	-3	-	-20
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	-17	1	-	-16
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	-6	2	-	-4
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	-6	8	-	2
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	-6	4	-	-2
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	0	1	-	1
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	0	1	-	1
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	0	1	-	1
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	0	1	-	1
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	1	-1	1
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	-4	-1	-4
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	1	-1	1
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	1	-1	1
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	-4	-1	-4
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	2	-1	2
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	1
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	1
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	1
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	1	0	1
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	2	0	2
1 MW, 6,5 m/s (heute)	0	1	0	1
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0	1	0	1
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0	1	0	0
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0	0	0	0
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0	0	0	0

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-8: Verbrauch endlicher Energieträger durch Stromerzeugungssysteme

Verbrauch in kWh _{Prim} /kWh _{el}	Betrieb	Sonst	Backup ^a	Gesamt
Braunkohle				
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	2,50	0,17	-	2,67
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	2,33	0,16	-	2,49
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	2,08	0,15	-	2,23
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	1,98	0,14	-	2,12
Steinkohle				
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	2,33	0,29	-	2,62
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	2,20	0,27	-	2,47
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	2,17	0,28	-	2,45
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	2,06	0,27	-	2,33
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	2,33	0,50	-	2,83
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	2,33	0,53	-	2,86
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	2,33	0,55	-	2,88
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	2,33	0,43	-	2,76
Erdgas				
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	1,74	0,10	-	1,84
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	1,74	0,27	-	2,01
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-GER (heute)	1,74	0,16	-	1,90
Uran				
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	3,03	0,20	-	3,23
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	3,03	0,22	-	3,25
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	3,03	0,10	-	3,13
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	3,03	0,09	-	3,12
Solarstrahlung				
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	0	0,67	0,07	0,75
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	0	1,24	0,07	1,31
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	0	0,86	0,07	0,93
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	0	0,67	0,07	0,75
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	0	1,17	0,07	1,25
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	0	0,78	0,07	0,85
Windkraft				
270 kW, 5,5 m/s (heute)	0	0,10	0,07	0,16
600 kW, 5,5 m/s (heute)	0	0,07	0,07	0,14
1 MW, 5,5 m/s (heute)	0	0,07	0,07	0,14
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	0	0,06	0,07	0,13
1 MW, 4,5 m/s (heute)	0	0,15	0,07	0,22
1 MW, 6,5 m/s (heute)	0	0,05	0,06	0,11
Wasserkraft				
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	0,00	0,05	0,05	0,10
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	0,00	0,05	0,05	0,10
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	0,00	0,03	0,05	0,08
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	0,00	0,04	0,05	0,09

^a bei einer Durchdringung von 10%

Tabelle B-9: Monetäre Bewertung der durch Stromerzeugungssysteme verursachten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt

Monetäre Bewertung in 10 ⁻³ Cent/kWh	Schadenskosten			Vermeidungskosten	
	menschl. Gesund.	Material	Nutzpflanzen	Öko-systeme	Treibhaus-effekt
Braunkohle					
Dampfkraftwerk 40%, BK Rheinland (heute)	716	9	-23	187	2037
Dampfkraftwerk 43%, BK Rheinland (2002)	673	9	-21	176	1895
GuD-Kraftwerk 48%, BK Rheinland (2005/10)	456	5	-7	91	1677
GuD-Kraftwerk 50,5%, BK Rheinland (2005/10)	445	5	-7	90	1593
Steinkohle					
Dampfkraftwerk 43%, SK GER (heute)	461	8	-14	159	1808
Dampfkraftwerk 45,5%, SK GER (2005/10)	428	8	-14	149	1706
GuD-Kraftwerk 46%, SK GER (2005/10)	351	6	-6	109	1684
GuD-Kraftwerk 48,5%, SK GER (2005/10)	336	6	-6	104	1598
Dampfkraftwerk 43%, SK RSA (heute)	1253	24	-20	404	1887
Dampfkraftwerk 43%, SK POL (heute)	958	17	-17	287	1989
Dampfkraftwerk 43%, SK AUS (heute)	1487	30	-20	495	1763
Dampfkraftwerk 43%, SK USA (heute)	894	17	-16	292	1708
Erdgas					
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas WEU (heute)	150	3	-4	55	719
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas GUS (heute)	354	5	2	108	899
GuD-Kraftwerk 57,6%, Erdgas Mix-D (heute)	218	3	-2	72	779
Uran					
DWR mit Wiederaufarbeitung (heute)	115	1	1	18	37
DWR mit direkter Endlagerung (heute)	85	1	1	17	34
EPR mit Wiederaufarbeitung (2005/10)	110	1	1	18	37
EPR mit direkter Endlagerung (2005/10)	83	1	1	17	34
Solarstrahlung					
PV-Dachanlage 5 kW, amorph (heute)	434	7	1	113	410
PV-Dachanlage 5 kW, polykristallin (heute)	530	9	-4	143	684
PV-Dachanlage 5 kW, monokristallin (heute)	521	8	1	132	500
PV-Kraftwerk 1 MW, amorph (heute)	422	7	1	110	413
PV-Kraftwerk 1 MW, polykristallin (heute)	502	8	-4	136	654
PV-Kraftwerk 1 MW, monokristallin (heute)	457	7	2	118	457
Windkraft					
270 kW, 5,5 m/s (heute)	90	2	1	23	92
600 kW, 5,5 m/s (heute)	73	1	1	19	81
1 MW, 5,5 m/s (heute)	68	1	1	18	77
1,5 MW, 5,5 m/s (heute)	64	1	1	17	72
1 MW, 4,5 m/s (heute)	124	2	2	32	122
1 MW, 6,5 m/s (heute)	49	1	1	13	62
Wasserkraft					
Laufwasserkraft 300 kW (heute)	58	1	1	16	66
Laufwasserkraft 500 kW (heute)	62	1	0	17	68
Laufwasserkraft 2,2 MW (heute)	41	1	0	11	53
Laufwasserkraft 3,1 MW (heute)	48	1	0	13	60

Anhang C: Sachbilanzen für Techniken zur Nutzwärmebereitstellung

Tabelle C-1: Sachbilanzen für die Nutzwärmebereitstellung auf Basis von Erdgas

Bilanzgröße	Einheit	Gas ^a -NT ^b	Gas ^a -BW ^c	Gas ^a -BW ^c	Gas ^a -BW ^c	Gas ^a -BW ^c
		EFH-II	EFH-I	EFH-II	EFH-III	MFH
CO₂ gesamt	g/MJ	81	88	78	71	69
Anlagenbetrieb		63	58	56	54	55
Erdgasbereitstellung		9	8	8	8	8
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		9	22	14	9	6
CH₄ gesamt	mg/MJ	414	418	385	362	358
Anlagenbetrieb		1	1	1	1	1
Erdgasbereitstellung		386	359	346	336	340
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		27	59	38	26	18
N₂O gesamt	mg/MJ	3	4	3	3	3
Anlagenbetrieb		1	1	1	1	1
Erdgasbereitstellung		1	1	1	1	1
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	2	1	1	1
Partikel gesamt	mg/MJ	20	27	20	17	15
Anlagenbetrieb		0	0	0	0	0
Erdgasbereitstellung		10	10	9	9	9
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		10	17	11	8	6
NO_x gesamt	mg/MJ	85	98	84	75	71
Anlagenbetrieb		34	32	31	30	30
Erdgasbereitstellung		33	30	29	28	29
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		18	36	24	17	12
SO_x gesamt	mg/MJ	65	82	64	52	46
Anlagenbetrieb		0	0	0	0	0
Erdgasbereitstellung		31	28	27	27	27
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		35	54	36	26	20
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /MJ	25	91	59	31	14
Entnahme an Bauxit	mg/MJ	28	32	19	11	7
Entnahme an Eisen	mg/MJ	477	536	385	286	253
Entnahme an Kupfer	mg/MJ	14	22	13	7	4
Entnahme an Kalkstein	mg/MJ	2689	3536	2696	2208	1863

^a zugrunde gelegter Erdgasmix für Deutschland: 21,9% inländische Förderung, 31,1% Niederlande, 13,8% Norwegen, 33,2% Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) ^b NT = Niedertemperaturkessel ^c BW = Brennwertkessel

Tabelle C-2: Sachbilanzen für die Nutzwärmebereitstellung auf Basis von Erdöl und Biomasse

Bilanzgröße	Einheit	Heizöl-NT ^a	Heizöl-NT ^a	Pellets	Hackgut	Hackgut
		EFH-III	MFH	EFH-II	EFH-III	MFH
CO₂ gesamt	g/MJ	104	102	30	22	15
Anlagenbetrieb		82	82	0	0	0
Brennstoffbereitstellung		13	13	9	9	9
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		9	6	21	13	6
CH₄ gesamt	mg/MJ	142	135	97	65	43
Anlagenbetrieb		1	1	13	13	13
Brennstoffbereitstellung		115	116	23	13	13
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		26	18	61	39	17
N₂O gesamt	mg/MJ	2	2	6	5	5
Anlagenbetrieb		1	1	4	4	4
Brennstoffbereitstellung		1	1	1	0	0
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	1	1	1	0
Partikel gesamt	mg/MJ	19	17	110	111	101
Anlagenbetrieb		1	1	79	77	77
Brennstoffbereitstellung		10	10	6	16	16
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		9	7	25	18	7
NO_x gesamt	mg/MJ	128	124	265	323	312
Anlagenbetrieb		39	39	197	192	194
Brennstoffbereitstellung		71	72	31	106	107
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		19	13	38	25	11
SO_x gesamt	mg/MJ	153	147	88	62	41
Anlagenbetrieb		52	52	9	9	9
Brennstoffbereitstellung		72	73	21	15	15
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		30	22	58	39	17
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /MJ	29	14	89	31	17
Entnahme an Bauxit	mg/MJ	31	24	7	9	5
Entnahme an Eisen	mg/MJ	360	321	1425	1319	545
Entnahme an Kupfer	mg/MJ	10	7	7	4	3
Entnahme an Kalkstein	mg/MJ	1374	747	2694	2035	859

^a NT = Niedertemperaturkessel

Tabelle C-3: Sachbilanzen für die Nutzwärmebereitstellung auf Basis von Solarstrahlung und Erdgaszusatzfeuerung

Bilanzgröße	Einheit	Solar +	Solar +	Solar +	Solar +	Solar +
		Gas ^a -NT ^b EFH-II	Gas ^a -BW ^c EFH-I	Gas ^a -BW ^c EFH-II	Gas ^a -BW EFH-III	Gas ^a -BW ^c MFH
CO₂ gesamt	g/MJ	66	62	64	68	60
Anlagenbetrieb		41	30	37	51	49
Erdgasbereitstellung		6	4	5	7	7
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		19	27	22	10	4
CH₄ gesamt	mg/MJ	307	259	289	340	315
Anlagenbetrieb		0	0	0	1	1
Erdgasbereitstellung		255	187	228	314	304
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		52	72	60	26	11
N₂O gesamt	mg/MJ	3	3	3	3	2
Anlagenbetrieb		1	1	1	1	1
Erdgasbereitstellung		1	1	1	1	1
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		2	2	2	1	0
Partikel gesamt	mg/MJ	25	27	26	16	12
Anlagenbetrieb		0	0	0	0	0
Erdgasbereitstellung		7	5	6	8	8
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		19	22	20	8	4
NO_x gesamt	mg/MJ	79	77	79	71	60
Anlagenbetrieb		23	17	20	28	27
Erdgasbereitstellung		22	16	19	27	26
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		35	45	40	17	7
SO_x gesamt	mg/MJ	86	92	85	58	36
Anlagenbetrieb		0	0	0	0	0
Erdgasbereitstellung		20	15	18	25	24
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		66	77	67	33	12
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /MJ	64	133	86	42	18
Entnahme an Bauxit	mg/MJ	62	82	52	26	11
Entnahme an Eisen	mg/MJ	744	966	660	328	263
Entnahme an Kupfer	mg/MJ	96	160	96	21	18
Entnahme an Kalkstein	mg/MJ	2648	2903	2716	2108	1592

^a zugrunde gelegter Erdgasmix für Deutschland: 21,9% inländische Förderung, 31,1% Niederlande, 13,8% Norwegen, 33,2% Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) ^b NT = Niedertemperaturkessel ^c BW = Brennwertkessel

Tabelle C-4: Sachbilanzen für die Nutzwärmebereitstellung auf Basis von Solarstrahlung und Zusatzfeuerung mit Heizöl oder Biomasse

Bilanzgröße	Einheit	Solar +	Solar +	Solar +	Solar +	Solar +
		Heizöl-NT ^a EFH-III	Heizöl-NT ^a MFH	Pellets EFH-II	Hackgut EFH-III	Hackgut MFH
CO₂ gesamt	g/MJ	99	90	34	23	15
Anlagenbetrieb		76	74	0	0	0
Brennstoffbereitstellung		12	12	6	8	8
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		10	4	28	15	7
CH₄ gesamt	mg/MJ	135	116	106	76	43
Anlagenbetrieb		1	1	9	12	12
Brennstoffbereitstellung		107	104	16	21	12
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		27	11	82	43	20
N₂O gesamt	mg/MJ	2	2	6	6	4
Anlagenbetrieb		1	1	3	4	4
Brennstoffbereitstellung		0	0	1	1	0
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		1	0	2	1	0
Partikel gesamt	mg/MJ	18	13	91	97	93
Anlagenbetrieb		1	1	52	71	70
Brennstoffbereitstellung		9	9	4	6	15
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		8	4	35	20	9
NO_x gesamt	mg/MJ	121	108	204	233	283
Anlagenbetrieb		36	35	130	177	174
Brennstoffbereitstellung		66	64	20	28	96
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		19	8	54	28	13
SO_x gesamt	mg/MJ	153	126	111	80	43
Anlagenbetrieb		49	47	6	8	8
Brennstoffbereitstellung		67	65	14	19	13
Sonst. Vorl., Bau u. Abriß		37	14	91	52	22
Ionisierende Strahlung	10⁻¹² PersSv /MJ	42	19	97	68	20
Entnahme an Bauxit	mg/MJ	45	27	41	23	10
Entnahme an Eisen	mg/MJ	400	328	1841	1350	599
Entnahme an Kupfer	mg/MJ	25	21	95	21	19
Entnahme an Kalkstein	mg/MJ	1350	598	3179	2362	935

^a NT = Niedertemperaturkessel

Anhang D: Wirkungsabschätzung für Techniken zur Nutzwärmebereitstellung

Tabelle D-1: Treibhauspotentiale der Wärmebereitstellungssysteme

CO ₂ -Äquivalente in g/MJ	Versorgungsfall	Betrieb	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	63	28	91
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	58	40	99
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	56	31	88
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	55	25	80
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	55	22	77
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	82	26	108
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	83	23	106
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	2	33	34
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	2	24	25
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	2	16	18
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	42	32	74
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	30	38	68
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	37	35	72
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	51	25	76
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	50	18	68
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	77	26	103
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	74	19	93
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	1	37	38
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	1	25	26
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	1	16	18

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-2: Versauerungspotentiale der Wärmebereitstellungssysteme

SO₂-Äquivalente in mg/MJ	Versorgungsfall	Betrieb	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	24	108	132
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	22	138	160
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	21	109	130
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	21	90	111
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	21	81	102
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	86	167	253
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	87	156	243
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	151	145	296
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	148	149	297
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	149	116	265
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	16	135	150
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	12	143	155
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	14	135	149
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	19	95	114
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	19	64	82
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	80	167	247
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	78	131	209
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	100	173	273
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	137	125	261
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	134	114	247

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-3: Eutrophierungspotentiale der Wärmebereitstellungssysteme

PO₄³⁻-Äquivalente in mg/MJ	Versorgungsfall	Betrieb	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	4	8	12
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	4	10	14
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	4	8	12
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	4	7	11
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	4	6	10
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	5	12	17
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	5	11	17
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	26	11	37
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	25	18	43
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	25	16	41
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	3	9	12
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	2	9	11
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	3	9	12
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	4	7	10
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	4	5	9
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	5	11	16
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	5	10	14
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	17	12	29
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	23	10	33
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	23	15	37

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-4: Mortalitätsrisiko der Wärmebereitstellungssysteme

Verlorene Lebenserwartung in 10 ⁻⁹ a/MJ	Versorgungsfall	Betrieb	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	1	5	6
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	1	7	7
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	1	5	6
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	1	4	5
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	1	4	5
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	3	7	10
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	3	7	10
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	11	7	18
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	11	8	18
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	11	6	17
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	1	6	7
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	0	7	7
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	1	6	7
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	1	4	5
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	1	3	4
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	3	7	10
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	3	6	8
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	7	8	16
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	10	6	16
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	10	6	15

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-5: Morbiditätsrisiko der Wärmebereitstellungssysteme

Beeinträchtigte Lebenserwartung in 10⁻⁹ a/MJ	Versorgungsfall	Betrieb	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	0	5	5
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	0	6	6
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	0	5	5
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	0	4	4
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	0	4	4
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	2	9	11
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	2	9	11
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	8	6	14
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	8	6	14
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	8	5	13
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	0	6	6
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	0	6	6
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	0	6	6
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	0	4	4
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	0	3	3
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	2	9	11
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	2	8	9
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	5	7	13
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	7	5	12
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	7	5	12

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-6: Materialschäden der Wärmebereitstellungssysteme

Materialschäden in 10 ⁻³ Cent/MJ	Versorgungsfall	Betrieb	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	0	1	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	0	1	2
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	0	1	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	0	1	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	0	1	1
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	1	2	3
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	1	2	3
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	1	1	3
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	1	1	3
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	1	1	2
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	0	1	2
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	0	1	2
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	0	1	2
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	0	1	1
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	0	1	1
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	1	2	3
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	1	1	2
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	1	2	3
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	1	1	2
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	1	1	2

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-7: Schädigung von Nutzpflanzen durch Wärmebereitstellungssysteme

Schädigung von Nutzpflanzen in 10 ⁻³ Cent/MJ	Versorgungsfall	Betrieb	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	-1	2	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	-1	2	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	-1	2	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	-1	2	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	-1	2	1
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	-1	17	16
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	-1	16	16
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	-4	0	-3
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	-3	0	-4
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	-4	0	-4
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	-1	3	2
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	-1	3	3
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	-1	3	2
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	-1	2	1
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	-1	2	1
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	-1	16	15
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	-1	15	14
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	-2	1	-1
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	-3	1	-3
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	-3	0	-3

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-8: Verbrauch endlicher Primärenergieträger durch Wärmebereitstellungssysteme

Verbrauch in MJ _{Prim} /MJ	Versorgungsfall	Betrieb direkt	Sonst	Gesamt
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	1,08	0,34	1,42
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	1,05	0,44	1,49
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	1,02	0,32	1,34
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	0,99	0,25	1,24
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	1,00	0,21	1,21
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	1,10	0,34	1,44
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	1,11	0,31	1,42
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	0	0,39	0,39
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	0	0,31	0,31
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	0	0,21	0,21
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	0,71	0,39	1,10
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	0,55	0,45	1,00
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	0,67	0,39	1,06
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	0,93	0,25	1,18
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	0,92	0,16	1,08
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	1,03	0,35	1,38
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	1,02	0,24	1,26
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	0	0,45	0,45
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	0	0,30	0,30
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	0	0,22	0,22

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-9: Monetäre Bewertung der durch Wärmebereitstellungssysteme verursachten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (1)

Monetäre Bewertung in 10 ⁻³ Cent/MJ	Versorgungsfall	Schadenskosten		
		Menschl. Gesundheit	Material	Nutzpflanzen
Erdgas				
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	83	1	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	102	2	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	81	1	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	69	1	1
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	63	1	1
Erdöl				
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	152	3	16
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	145	3	16
Biomasse				
Pellet-Feuerung	EFH-II	241	3	-3
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	249	3	-4
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	225	2	-4
Solarstrahlung				
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	96	2	2
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	101	2	3
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	96	2	2
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	70	1	1
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	51	1	1
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	148	3	15
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	124	2	14
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	214	3	-1
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	213	2	-3
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	208	2	-3

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Tabelle D-10: Monetäre Bewertung der durch Wärmebereitstellungssysteme verursachten Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (2)

Monetäre Bewertung in 10 ⁻³ Cent/MJ	Versorgungsfall	Vermeidungskosten	
		Ökosysteme	Treibhauseffekt
Erdgas			
Niedertemperaturkessel mit atmosph. Brenner	EFH-II	23	173
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-I	27	187
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-II	22	167
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	19	152
Brennwertkessel mit Gebläsebrenner	MFH	18	147
Erdöl			
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	EFH-III	42	205
Niedertemperaturkessel mit Gebläsebrenner	MFH	41	201
Biomasse			
Pellet-Feuerung	EFH-II	54	65
Hackschnitzel-Feuerung	EFH-III	59	48
Hackschnitzel-Feuerung	MFH	54	34
Solarstrahlung			
Zusatzf. Gas-NT ^a mit atmosph. Brenner	EFH-II	25	140
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-I	25	130
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-II	25	136
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	EFH-III	19	145
Zusatzf. Gas-BW ^b mit Gebläsebrenner	MFH	15	129
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	EFH-III	41	195
Zusatzf. Heizöl-NT ^a mit Gebläsebrenner	MFH	35	177
Zusatzfeuerung mit Pellets	EFH-II	48	73
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	EFH-III	47	50
Zusatzfeuerung mit Hackschnitzel	MFH	50	34

^a NT = Niedertemperaturkessel ^b BW = Brennwertkessel

Anhang E: Zusammenstellung der Charakterisierungsfaktoren

Tabelle E-1: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Treibhauspotentials bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren /IPCC 1995/

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakter.faktor in kgCO ₂ -Äqu. / Einheit
CO ₂ Kohlendioxid	kg	1 ^a
CH ₄ Methan	kg	21
N ₂ O Distickstoffoxid	kg	310
SF ₆ Schwefelhexafluorid	kg	23 900
<i>Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW)</i>		
H-FKW 23 (CHF ₃)	kg	11 700
H-FKW 32 (CH ₂ F ₂)	kg	650
H-FKW 41 (CH ₃ F)	kg	150
H-FKW 43-10mee (C ₅ H ₂ F ₁₀)	kg	1 300
H-FKW 125 (C ₂ HF ₅)	kg	2 800
H-FKW 134 (C ₂ H ₂ F ₄)	kg	1 000
H-FKW 134a (CH ₂ FCF ₃)	kg	1 300
H-FKW 152a (C ₂ H ₄ F ₂)	kg	140
H-FKW 143 (C ₂ H ₃ F ₃)	kg	300
H-FKW 143a (C ₂ H ₃ F ₃)	kg	3 800
H-FKW 227ea (C ₃ HF ₇)	kg	2 900
H-FKW 236fa (C ₃ H ₂ F ₆)	kg	6 300
H-FKW 245ca (C ₃ H ₃ F ₅)	kg	560
<i>Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW)</i>		
FKW Perfluormethan (CF ₄)	kg	6 500
FKW Perfluorethan (C ₂ F ₆)	kg	9 200
FKW Perfluorpropan (C ₃ F ₈)	kg	7 000
FKW Perfluorbutan (C ₄ F ₁₀)	kg	7 000
FKW Perfluorpentan (C ₅ F ₁₂)	kg	7 500
FKW Perfluorhexan (C ₆ F ₁₄)	kg	7 400
FKW Perfluorcyclobutan (c-C ₄ F ₈)	kg	8 700
<i>Wasserstoffhaltige Chlorkohlenwasserstoffe (H-CKW)</i>		
H-CKW Chloroform (CHCl ₃)	kg	5
H-CKW Methylenchlorid (CH ₂ Cl ₂)	kg	9
<i>Halone</i>		
Halon Trifluorjodmethan (CF ₃ I)	kg	1

^a Referenzsubstanz

Tabelle E-2: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Versauerungspotentials

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakter.faktor in kgSO ₂ -Äqu. / Einheit
SO _x als SO ₂ Schwefeloxide	kg	1 ^a
NO _x als NO ₂ Stickoxide	kg	0,70 ^b
NH ₃ Ammoniak	kg	1,88 ^b
HCl Salzsäure	kg	0,88 ^b
HF Fluorwasserstoff	kg	1,6 ^b
H ₂ S Schwefelwasserstoff	kg	1,88 ^c

^a Referenzsubstanz ^b Relatives Versauerungspotential nach /Heijungs et al. 1992/ ^c eigene Berechnung nach der in /Heijungs et al. 1992/ angegebenen Berechnungsvorschrift

Tabelle E-3: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung der Eutrophierungspotentials

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakter.faktor in kgPO ₄ ³⁻ -Äqu. / Einheit
PO ₄ ³⁻ Phosphat	kg	1 ^a
P Phosphor unspezifiziert	kg	3,06 ^b
NO _x als NO ₂ Stickoxide	kg	0,13 ^b
NH ₃ Ammoniak	kg	0,35 ^b
N Stickstoff unspezifiziert	kg	0,42 ^b
CSB chemischer Sauerstoffbedarf ^c	kgO ₂	0,0222 ^b

^a Referenzsubstanz ^b Relatives Eutrophierungspotential nach /Heijungs et al. 1992/ ^c Mit dem chemischen Sauerstoffbedarf, einem Parameter zur Quantifizierung der Einleitung organischer Verbindungen in Gewässer, wird hier der Eintrag von Kohlenstoff in Gewässer erfaßt und der potentielle Beitrag zur Eutrophierung berücksichtigt.

Tabelle E-4: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Mortalitätsrisikos (Teil 1)

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakt.faktor in a ^a / Einheit
<i>Öffentliches Mortalitätsrisiko durch ionisierende Strahlung</i>		
C-14 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	66,3 * 10 ⁻⁹
C-14 in Wasser, Durchschnitt Welt ^b	kBq	66,3 * 10 ⁻⁹
Cs-137 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	8,6 * 10 ⁻⁹
Cs-137 in Wasser, Durchschnitt Welt ^b	kBq	62,4 * 10 ⁻¹²
H-3 Tritium in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,9 * 10 ⁻¹²
H-3 Tritium in Wasser, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,9 * 10 ⁻¹²
I-129 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	3,1 * 10 ⁻⁹
I-129 in Wasser, Durchschnitt Welt ^b	kBq	3,1 * 10 ⁻⁹
I-131 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,3 * 10 ⁻⁹
Iod als I-131 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,3 * 10 ⁻⁹
Kr-85 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	6,0 * 10 ⁻¹⁵
Kr-85 in Wasser, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,2 * 10 ⁻¹²
Aerosole radioaktiv in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	4,2 * 10 ⁻¹²
Pb-210 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,8 * 10 ⁻⁹
Po-210 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,8 * 10 ⁻⁹
Ra-226 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	0,5 * 10 ⁻⁹
Rn-222 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	11,7 * 10 ⁻¹²
Ru-106 in Wasser, Durchschnitt Welt ^b	kBq	54,6 * 10 ⁻¹²
Sr-90 in Wasser, Durchschnitt Welt ^b	kBq	9,4 * 10 ⁻¹²
Th-230 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	23,4 * 10 ⁻⁹
U-234 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	6,2 * 10 ⁻⁹
U-238 in Luft, Durchschnitt Welt ^b	kBq	5,5 * 10 ⁻⁹
<i>Öffentliches Mortalitätsrisiko durch Primär- und Sekundärpartikel</i>		
Partikel PM 10 in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	68,6 * 10 ⁻⁶
SO _x als SO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	31,7 * 10 ⁻⁶
NO _x als NO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	27,8 * 10 ⁻⁶
<i>Öffentliches Mortalitätsrisiko durch Schwefeloxide direkt</i>		
SO _x als SO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	2,0 * 10 ⁻⁶
<i>Öffentliches Mortalitätsrisiko durch Bildung von bodennahem Ozon</i>		
NO _x als NO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	- 1,50 * 10 ⁻⁶
NM VOC unspezifiziert in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	1,62 * 10 ⁻⁶
CH ₄ Methan in Luft, Durchschnitt Deutschland ^d	kg	0,03 * 10 ⁻⁶
Formaldehyd in Luft, Durchschnitt Deutschland ^d	kg	1,62 * 10 ⁻⁶
Benzol in Luft, Durchschnitt Deutschland ^d	kg	2,93 * 10 ⁻⁶
Benzo(a)pyren in Luft, Durchschnitt Deutschland ^d	kg	2,93 * 10 ⁻⁶
PAH in Luft, Durchschnitt Deutschland ^d	kg	2,93 * 10 ⁻⁶

^a auch: YOLL = years of life lost ^b Quelle: /UNSCEAR 1993/ ^c Quelle: /Krewitt 2000/ ^d Umrechnung des Wertes für NMVOC über Ozonbildungspotentiale nach /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/

Tabelle E-5: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Mortalitätsrisikos (Teil 2)

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakt.faktor in a ^a / Einheit
<i>Öffentliches Mortalitätsrisiko durch Abbau stratosphärischen Ozons</i>		
FCKW 11 (CFCl ₃) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	22,5 * 10 ⁻⁶
FCKW 12 (CF ₂ Cl ₂) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	22,5 * 10 ⁻⁶
FCKW 113 (C ₂ F ₃ Cl ₃) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	24,0 * 10 ⁻⁶
FCKW 114 (C ₂ F ₄ Cl ₂) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	18,0 * 10 ⁻⁶
FCKW 115 (C ₂ F ₅ Cl) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	11,2 * 10 ⁻⁶
H-FCKW 22 (CHF ₂ Cl) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	1,2 * 10 ⁻⁶
H-FCKW 123 (CHCl ₂ CF ₃) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	0,5 * 10 ⁻⁶
H-FCKW 124 (CHFClCF ₃) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	0,5 * 10 ⁻⁶
H-FCKW 141b (CH ₃ CFCl ₂) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	2,5 * 10 ⁻⁶
H-FCKW 142b (CH ₃ CF ₂ Cl) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	1,5 * 10 ⁻⁶
H-FCKW 225ca (-) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	0,6 * 10 ⁻⁶
H-FCKW 225cb (-) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	0,7 * 10 ⁻⁶
CKW 10 (CCl ₄) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	16,2 * 10 ⁻⁶
H-CKW 140a (CH ₃ CCl ₃) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	2,7 * 10 ⁻⁶
Halon 1003 (CH ₃ Br) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	13,5 * 10 ⁻⁶
Halon 1201 (CF ₂ Br) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	31,5 * 10 ⁻⁶
Halon 1202 (CF ₂ Br ₂) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	28,1 * 10 ⁻⁶
Halon 1211 (CF ₂ BrCl) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	89,9 * 10 ⁻⁶
Halon 1301 (CF ₃ Br) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	359,4 * 10 ⁻⁶
Halon 2311 (C ₂ F ₃ ClBr) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	3,2 * 10 ⁻⁶
Halon 2401 (C ₂ F ₄ Br) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	5,6 * 10 ⁻⁶
Halon 2402 (C ₂ F ₄ Br ₂) in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	157,3 * 10 ⁻⁶
Halogenierte KW un spezifiziert in Luft, Durchschnitt Europa ^{b c}	kg	179,7 * 10 ⁻⁶

^a auch: YOLL = years of life lost ^b /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/ geben für ozonschichtgefährdende Stoffe relative Ozonabbaupotentiale in R11-Äquivalenten an. Nach /Goedkoop und Spriensma 1997/ verursacht der Abbau der stratosphärischen Ozonschicht in Europa 750 tödliche Krebsfälle pro Jahr. Mit 15,6 YOLL je tödlicher Krebserkrankung /Krewitt 1996/, einer jährlichen Emission von 460 GgR11-Äquivalenten in Europa und den relativen Ozonabbaupotentiale errechnen sich die angeführten Charakterisierungsfaktoren.

^c Als relatives Ozonabbaupotential wurde der Mittelwert von 8,0 aller in /Heijungs et al. 1992/ aufgeführten relativen Ozonabbaupotentiale angesetzt

Tabelle E-6: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Mortalitätsrisikos (Teil 3)

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakt.faktor in a ^a / Einheit
<i>Öffentliches Mortalitätsrisiko durch Kanzerogene</i>		
As Arsen in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	673,0 * 10 ⁻⁶
Asbest in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	3,4 * 10 ⁻⁶
Benzol in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	1,5 * 10 ⁻⁶
Cd Cadmium in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	2020,0 * 10 ⁻⁶
Dieselrußpartikel in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	11,8 * 10 ⁻⁶
PAH in Luft, Durchschnitt Europa ^b	kg	11780,0 * 10 ⁻⁶
Dioxine und Furane in Luft, Durchschnitt Europa ^b	ngTCDD- Äqu. ^c	0,236* 10 ⁻¹²

^a auch: YOLL = years of life lost ^b Berechnung der Charakterisierungsfaktoren auf Basis von Unit Risk-Faktoren in /Seidel 1996/ für die hier aufgeführten Stoffe und der Annahme, daß die Verteilung und Verweilzeit der Stoffe in der Atmosphäre der der Partikel in /Krewitt 2000/ entsprechen. Erläuterungen siehe /Marheineke 2000/ ^c TCDD-Äquivalente: 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin (2,3,7,8-TCDD) ist Leitsubstanz der polychlorierten Dibenzo-p-Dioxine (PCDD). Die Toxizität des 2,3,7,8-TCDD wird mit 1,0 angesetzt und die Konzentration der anderen „Dioxine“ (PCDDs) und auch der „Furane“ (polychlorierte Dibenzofurane - PCDF) je nach ihrer Toxizität mit (niedrigeren) Faktoren multipliziert und hinzuaddiert (siehe beispielsweise /Seidel 1996/)

Tabelle E-7: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des Morbiditätsrisikos

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakt.faktor in d ^a / Einheit
<i>Öffentliches Morbiditätsrisiko durch Primär- und Sekundärpartikel</i>		
Partikel PM 10 in Luft, Durchschnitt Deutschland ^b	kg	0,024200
SO _x als SO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^b	kg	0,010970
NO _x als NO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^b	kg	0,008966
<i>Öffentliches Morbiditätsrisiko durch Schwefeloxide direkt</i>		
SO _x als SO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^b	kg	0,000030
<i>Öffentliches Morbiditätsrisiko durch Bildung von bodennahem Ozon</i>		
NO _x als NO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland ^b	kg	- 0,005316
NMVOC unspezifiziert in Luft, Durchschnitt Deutschland ^b	kg	0,006300
CH ₄ Methan in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	0,000011
Formaldehyd in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	0,006376
Benzol in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	0,011525
Benzo(a)pyren in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	0,011525
PAH in Luft, Durchschnitt Deutschland ^c	kg	0,011525

^a Krankheitszustand entsprechend dem in /ExternE 1999/ verwendeten Tag mit eingeschränkter Aktivität (auch: RAD = Restricted Activity Day) ^b Quelle: /Krewitt 2000/ ^c Umrechnung des Wertes für NMVOC über Ozonbildungspotentiale nach /Heijungs et al. 1992/, /UBA 1995/

Tabelle E-8: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung der Materialschäden

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakt.faktor in Cent / Einheit
NO _x als SO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland	kg	0,053
SO _x als SO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland	kg	0,123

Tabelle E-9: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung der Schädigung von Nutzpflanzen

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakt.faktor in Cent / Einheit
<i>Schädigung durch Schwefeleintrag</i> SO _x als SO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland	kg	0,058
<i>Schädigung von Feldpflanzen durch Ozonbildung</i> NO _x als NO ₂ in Luft, Durchschnitt Deutschland	kg	- 0,348
NMVOc un spezifiziert in Luft, Durchschnitt Deutschland	kg	0,834

Tabelle E-10: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands^a

Sachbilanzgröße	Einheit	Charakt.faktor in MJ / Einheit
Erdgas	MJ	1
Erdölgas	MJ	1
Rohbraunkohle	MJ	1
Rohöl	MJ	1
Rohsteinkohle	MJ	1
Elektrizität netto produziert in KKW	kWh	10,908

^a nach der Ressourcenmethode

Anhang F: Szenarien zur Ermittlung von Backup-Aufwendungen

Tabelle F-1: Szenarien zur Ermittlung von Backup-Aufwendungen^a

System (kleine Anlagen ^b)	Photovoltaik	Windenergie	Wasserkraft
vom regen. System erzeugte Arbeit in GWh/a	2450	2450	2450
vom konv. Backup-System erz. Arbeit in GWh/a	22050	22050	22050
Installierte regenerative Leistung in MW	2784	1140	500
Leistungskredit ^c in %	2,46	17,58	50,0
Minderung des konv. Systems in MW	69	200	250
Installierte konventionelle Leistung ^d in MW	4061	3930	3880
System (große Anlagen ^b)	Photovoltaik	Windenergie	Wasserkraft
vom regen. System erzeugte Arbeit in GWh/a	2450	2450	2450
vom konv. Backup-System erz. Arbeit in GWh/a	22050	22050	22050
Installierte regenerative Leistung in MW	2620	1000	480
Leistungskredit ^c in %	2,61	18,07	50,0
Minderung des konv. Systems in MW	68	181	240
Installierte konventionelle Leistung ^d in MW	4062	3949	3890
System (große Anlagen ^b)	Wind 1 MW 4,5 m/s	Wind 1 MW 5,5 m/s	Wind 1 MW 6,5 m/s
vom regen. System erzeugte Arbeit in GWh/a	2450	2450	2450
vom konv. Backup-System erz. Arbeit in GWh/a	22050	22050	22050
Installierte regenerative Leistung in MW	2127	1000	714
Leistungskredit ^c in %	3,84	18,07	34,58
Minderung des konv. Systems in MW	82	181	247
Installierte konventionelle Leistung ^d in MW	4048	3949	3883

^a Bei einer Durchdringung von 10%, d. h. das regenerative System erzeugt 10% der vom Gesamtsystem erzeugten Arbeit

^b Als „kleine Anlagen“ werden Anlagen mit einer installierten Leistung weniger als 1 MW eingestuft. Anlagen mit einer installierten Leistung von 1 MW oder mehr gelten als „große Anlagen“.

^c Der Leistungskredit gibt an, um welchen Anteil der zugebauten regenerativen Leistung die installierte konventionelle Kraftwerksleistung bei gleichbleibender Versorgungssicherheit zurückgebaut werden kann.

^d Die installierte Leistung des ursprünglichen konventionellen Systems beträgt 4130 MW