

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg

Marco dos Santos Bernardes,
Sebastian Briem, Wolfram Krewitt,
Moritz Nill, Stefan Rath-Nagel,
Alfred Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Universität Stuttgart

Förderkennzeichen: BWA 99001

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Juli 2002

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Existierende Arbeiten zur Nachhaltigkeit von Energiesystemen	2
1.2.1 Die UNCED-Konferenz in Rio und der Rio-Folgeprozess	3
1.2.2 Das OECD-Aktionsprogramm “Towards Sustainable Development“	4
1.2.3 Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages	4
1.2.4 HGF-Nachhaltigkeitsansatz.....	6
1.2.5 Prognos-Studie	8
1.2.6 PSI / ETH Zürich: Projekt GaBE	8
1.2.7 Forum für Zukunftsenergien	9
1.2.8 Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg	10
1.3 Ziel des Vorhabens und Vorgehensweise	11
2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten.....	15
2.1 Konstitutive Elemente von Nachhaltigkeitskonzepten.....	15
2.1.1 Offenes Konzept.....	15
2.1.2 Normativ-ethische vs. naturwissenschaftliche Fundierung	16
2.1.3 Gestaltungsfähigkeit als Basis für weitere Entwicklung	17
2.1.4 Die drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung.....	18
2.1.5 Die wirtschaftliche Dimension nachhaltig zukunftsfähiger Entwicklung.....	19
2.1.6 Anforderungen an nachhaltig zukunftsfähige Energiesysteme	20
2.1.7 Ableitung von praktischen Orientierungs- und Handlungsregeln	22
2.2 Starke und Schwache Nachhaltigkeit	23
2.2.1 Substituierbarkeit von Natur- und Sachkapital	23
2.2.2 „Kritische Schwache“ Nachhaltigkeit	24
3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken	27
3.1 Allgemeine Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren.....	27
3.2 Behandlung der Risiken für Gesundheit und Leben	28
3.3 Auswahl der relevanten Wirkungsbereiche aus bestehenden Indikator-Systemen	29
3.4 Ein Indikatorsystem für Energietechniken	32
3.4.1 Monetarisierung.....	33

Inhaltsverzeichnis

3.4.2	Indikatoren für den Wirkungsbereich Rohstoffinanspruchnahme	34
3.4.3	Indikatoren für den Wirkungsbereich Klimabeeinflussung	35
3.4.4	Indikatoren für den Wirkungsbereich Versauerung / Eutrophierung	37
3.4.5	Indikatoren für den Wirkungsbereich Abfall	38
3.4.6	Indikatoren für den Wirkungsbereich Flächeninanspruchnahme	39
3.4.7	Indikatoren für den Wirkungsbereich Gesundheitsauswirkungen	40
3.4.8	Indikatoren für den Wirkungsbereich Gesamtwirtschaftliche Kosten	42
4	Quantifizierung von Nachhaltigkeitsindikatorwerten mit der Lebenszyklusanalyse	45
4.1	LCA gemäß ISO 14040 ff.	45
4.1.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	46
4.1.2	Sachbilanz	46
4.1.3	Wirkungsabschätzung	46
4.1.4	Auswertung	47
4.2	Auswahl von Nachhaltigkeitsindikatoren für LCA	47
4.3	Hybrid-Bilanzierung	49
4.4	Methode zur Quantifizierung der Indikatorwerte	51
4.4.1	Software BALANCE und Basisdaten	51
4.4.2	Recycling von Reststoffen im Lebensweg	52
4.4.3	Indikatorwerte für Ressourcen, Klima, Versauerung, Eutrophierung und öffentliche Gesundheit	52
4.4.4	Indikatorwerte für Abfallaufkommen	52
4.4.5	Indikatorwerte für Gesundheitsauswirkungen und Indikatorwerte für Kosten	53
5	Stromerzeugungstechnologien	55
5.1	Referenzanlagen nach dem heutigen Stand der Technik	55
5.1.1	Steinkohlekraftwerke	55
5.1.3	Biomasse-KWK-Anlage und Biomassezuführung im Steinkohlekraftwerk	56
5.1.4	Photovoltaik-Kraftwerk	57
5.1.5	Windkraftanlagen	57
5.1.6	Wasserkraftanlage	58
5.1.7	Kernkraftwerk	58
5.1.8	Übersicht der wesentlichen Parameter für die Referenzkraftwerke	58
5.2	Backup-Aufwendungen	59
5.3	Lebenszyklen zukünftiger Technologien	60
5.3.1	Weiterentwicklung der Kraftwerkstechniken	60
5.3.2	Änderungen bei den spezifischen Kraftwerksemissionen	62
5.3.3	Änderungen in vorgelagerten Prozessketten	63
5.3.4	Fortschreibung der Basisdaten und der Input-Output-Tabelle	65

Inhaltsverzeichnis

6	Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse	67
6.1	Indikatorwerte für die Stromerzeugung nach dem Stand der Technik.....	67
6.1.1	Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern	67
6.1.2	Stromerzeugung auf Basis regenerativer Energieträger	71
6.1.3	Stromerzeugung aus Kernenergie	79
6.2	Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse	81
6.2.1	Steinkohle-Dampfkraftwerk.....	81
6.2.2	Photovoltaik.....	82
6.2.3	Biomasse-Heizkraftwerk	83
7	Vergleich von Stromerzeugungstechnologien auf der Grundlage von Nachhaltigkeitsindikatoren.....	84
7.1	Vergleich der Technologien auf Basis der physischen Nachhaltigkeitsindikatoren	84
7.1.1	Wirkungsbereich Rohstoffaufwand.....	84
7.1.2	Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung und Versauerung / Eutrophierung.....	87
7.1.3	Wirkungsbereich Abfallaufkommen	88
7.1.4	Wirkungsbereich Gesundheitsauswirkungen	89
7.2	Externe Kosten	91
7.3	Einordnung der Stromerzeugungstechnologien auf Basis der Inanspruchnahme knapper Ressourcen.....	92
7.4	Bewertung des methodischen Ansatzes und Schlussempfehlungen	94
8	Zusammenfassung.....	95
	Literaturverzeichnis	100
	Anhang: Ergebnisse der LCA für 2010 und 2020	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Normal-, Grenz- und Verbotsbereich im A-W-Diagramm; Quelle /WBGU 1998/	29
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung einer Prozesskette am Beispiel der Stromerzeugung aus Steinkohle.....	46
Abbildung 4-2: Hybrid-Ansatz zur Ermittlung der Sachbilanz.....	50
Abbildung 7-1: Nachhaltigkeitsindikator Verbrauch erschöpflicher Primärenergieträger	85
Abbildung 7-2: Nachhaltigkeitsindikator Inanspruchnahme mineralischer Rohstoffe	86
Abbildung 7-3: Nachhaltigkeitsindikatoren Treibhaus-, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial	87
Abbildung 7-4: Nachhaltigkeitsindikatoren Gesundheitsrisiken.....	90
Abbildung 7-5: Externe Kosten der erfassten Wirkungsbereiche	92

Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Umweltindikatorbereiche der CSD, OECD, TA-BW, IAEA/IEA und ESL.....	31
Tabelle 3-2:	Nachhaltigkeitsindikatoren für Energietechniken: Dimension und Wirkungsbereiche.....	32
Tabelle 3-3:	Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung des Treibhauseffekts /IPCC 1995/.....	36
Tabelle 3-4:	Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Versauerung.....	37
Tabelle 3-5:	Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Eutrophierung.....	38
Tabelle 3-6:	Einteilung in Natürlichkeitsklassen.....	40
Tabelle 3-7:	Indikatorenkatalog für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energietechnologien.....	43
Tabelle 4-1:	Durch LCA zu erfassende Kategorien und Wirkungsbereiche nach /SETAC 1999/ und /UBA 1999/.....	48
Tabelle 5-1:	Übersicht der wesentlichen Parameter der ausgewählten Referenzkraftwerke.....	59
Tabelle 5-2:	Erwartete elektrische Wirkungsgrade weiterentwickelter Kraftwerke.....	62
Tabelle 5-3:	Herkunftsquellen des in Deutschland verkauften Erdgases.....	63
Tabelle 5-4:	Methangasemissionen bei Förderung, Aufbereitung und Transport russischen Erdgases nach Mitteleuropa.....	64
Tabelle 5-5:	Verwertungsquoten für Methangasemissionen im deutschen Steinkohlenbergbau nach /Den Drijer 1997/.....	65
Tabelle 6-1:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Dampfkraftwerk, Jahr 2000.....	68
Tabelle 6-2:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Kombikraftwerk, Jahr 2000.....	69
Tabelle 6-3:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Erdgas-GuD-Kraftwerk, Jahr 2000.....	70
Tabelle 6-4:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Photovoltaik-Kraftwerk, Jahr 2000.....	72
Tabelle 6-5:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter bei 5,5 m/s, Jahr 2000.....	73
Tabelle 6-6:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter bei 4,5 m/s, Jahr 2000.....	74
Tabelle 6-7:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Wasserkraftwerk, Jahr 2000.....	76
Tabelle 6-8:	Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Biomasse-Heizkraftwerk, Jahr 2000.....	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-9: Ergebnisse der Lebensweganalyse für die Biomasse-Zufeuerung, Jahr 2000	78
Tabelle 6-10: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Druckwasserreaktor, Jahr 2000	80
Tabelle 6-11: Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Steinkohle-Dampfkraftwerkes	81
Tabelle 6-12: Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Photovoltaik-Kraftwerkes.....	82
Tabelle 6-13: Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Biomasse-Heizkraftwerkes	83
Tabelle 7-1: Nachhaltigkeitsindikatoren Abfallaufkommen verschiedener Kategorien.....	89
Tabelle A-1: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Dampfkraftwerk 2010	110
Tabelle A-2: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Dampfkraftwerk 2020	110
Tabelle A-3: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Kombikraftwerk 2010	110
Tabelle A-4: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Kombikraftwerk 2020	111
Tabelle A-5: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Erdgas-GuD-Kraftwerk 2010	112
Tabelle A-6: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Erdgas-GuD-Kraftwerk 2020	112
Tabelle A-7: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Photovoltaik-Kraftwerk 2010	112
Tabelle A-8: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Photovoltaik-Kraftwerk 2020	113
Tabelle A-9: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 5,5 m/s 2010	114
Tabelle A-10: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 5,5 m/s 2020	114
Tabelle A-11: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 4,5 m/s 2010	115
Tabelle A-12: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 4,5 m/s 2020	115
Tabelle A-13: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Biomasse-HKW 2010	116
Tabelle A-14: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Biomasse-HKW 2020	116
Tabelle A-15: Ergebnisse der Lebensweganalyse für die Biomasse-Zufeuerung 2010	117
Tabelle A-16: Ergebnisse der Lebensweganalyse für die Biomasse-Zufeuerung 2020	117

1 Einleitung

1 Einleitung

Der Begriff der „Nachhaltigkeit“ bzw. der „nachhaltigen Entwicklung“ (sustainability bzw. sustainable development) ist in den letzten Jahren zunehmend in das Bewusstsein gedrungen. Vielfach wird Nachhaltigkeit mit Zukunftsfähigkeit und sozialer Gerechtigkeit in Verbindung gebracht. Doch was verbirgt sich tatsächlich hinter Begriffen, Ideen oder Konzepten, die einen Systemzustand durch die Eigenschaft „nachhaltig“ beschreiben? Lassen sich daraus konkret umsetzbare Handlungsanweisungen ableiten? Was bedeutet dies für ein zukunftsfähiges Energiesystem?

Kapitel 1 führt in die Materie und die vorliegende Untersuchung ein. Es umfasst zunächst eine allgemeine Erläuterung der Problemstellung und zeigt auf, warum es eines nachhaltigen Energiesystems bedarf. Daran schließen sich eine Vorstellung der wichtigsten Arbeiten, die sich mit der Thematik Nachhaltigkeit beschäftigt haben, die Beschreibung der Zielsetzung des Vorhabens und die Erläuterung der Vorgehensweise an.

1.1 Problemstellung

Am Beginn des dritten Jahrtausends sieht sich die Menschheit inklusive der wohlhabenden Industriegesellschaften mit einer Reihe existenzieller Herausforderungen konfrontiert, zu denen u.a. die folgenden gehören:

- Schaffung humaner Lebensbedingungen für eine weiter wachsende Weltbevölkerung,
- Vermeidung nicht tolerierbarer Umwelt- und Klimaveränderungen sowie
- Sicherung der Zukunftsfähigkeit der Wirtschafts- und Lebensräume.

Alle diese Herausforderungen haben einen direkten Bezug zur Energieversorgung,

- da die Bereitstellung von mehr Energie, präziser von mehr Arbeitsfähigkeit, die aus Energie gewonnen wird, eine notwendige Voraussetzung zur Überwindung von Hunger und Armut und zur humanen Begrenzung des Wachstums der Weltbevölkerung ist,
- da rund 50% der anthropogenen Treibhausgasemissionen aus der Energieversorgung stammen,
- da die Sicherung von Wirtschaftsstandorten ohne eine leistungsfähige Energieinfrastruktur und wettbewerbsfähige Energiepreise nicht gelingen kann.

In der Diagnose der vor der Menschheit liegenden Herausforderungen besteht weitgehende Übereinstimmung, ebenso bezüglich des dringenden Handlungsbedarfs, der sich sowohl aus einer ethisch-moralischen Verantwortung gegenüber den Menschen in der Dritten Welt und den kommenden Generationen, als auch aus Sorge um die Umwelt und Natur ergibt. Über die einzuschlagenden Wege zur Bewältigung der Herausforderungen bestehen aber zwischen verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen hierzulande kontroverse, teilweise sehr gegensätzliche Auffassungen. Mehr als am Zielkonsens fehlt es am Wegekonsens bezüglich der

1 Einleitung

zukünftigen Energieversorgung. Wo und wie lassen sich Orientierungen für Wege aus der Gefahr finden? (vgl. /Voß 2000a/, /Voß 2000b/, /Voß 2001/).

Das Leitbild einer „Nachhaltigen Entwicklung“ das mit dem Bericht der UN-Kommission für Umwelt und Entwicklung (United Nations Commission on Environment and Development, UNCED) - nach ihrer Vorsitzenden auch Brundtland-Kommission genannt - „Unsere gemeinsame Zukunft“ im Jahr 1987 Eingang in die entwicklungspolitische Diskussion gefunden hat, scheint zunächst geeignet, diese Orientierungen zu geben /Hauff 1987/.

Doch bei genauerer Prüfung ergeben sich auch hier mehr Fragen als Antworten. Denn obwohl einerseits festzustellen ist, dass das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung auch über die verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen hinweg eine breite prinzipielle Zustimmung findet, so spannen doch die Vorstellungen und Interpretationen des Leitbildes, sowohl hinsichtlich ihrer normativen bzw. theoretisch-naturwissenschaftlichen Fundierung als auch hinsichtlich ihrer abgeleiteten Handlungsziele bzw. Handlungsanweisungen - dies gilt gerade für den Energiebereich - eine große Bandbreite auf /Voß 2001/. Soll das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung nicht zur bloßen Worthülse werden, die von verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen für ihre jeweiligen Interessen instrumentalisiert wird, dann ist eine inhaltliche Konkretisierung dringend geboten. Diese ist auch unumgänglich, will man die verschiedenen Energieoptionen im Hinblick auf ihre Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung bewerten und einordnen.

Vor dem Hintergrund der Liberalisierung der Energiemärkte und der politischen Diskussion um einen Energiekonsens in Deutschland fehlen daher der Energie- und Umweltpolitik sowie der Energiewirtschaft bisher gerade auch auf lokaler und regionaler Ebene klare Vorstellungen und praktische Vorgaben für die Gestaltung eines nachhaltigen Energiesystems. Ohne konkrete Handlungsziele ist es jedoch schwierig, die Idee der nachhaltigen Entwicklung bei der Energieplanung zu berücksichtigen und in spezifische Maßnahmen umzusetzen. Die unterschiedliche Interpretation des Nachhaltigkeitskonzeptes durch verschiedene Interessengruppen führt zu möglichen Planungsunsicherheiten und Zielkonflikten.

Notwendig ist also eine Präzisierung dessen, was ein nachhaltiges Energiesystem ausmacht, die Festlegung geeigneter Messgrößen bzw. von Indikatoren, durch die Nachhaltigkeit beschrieben werden kann sowie eine daraus abgeleitete quantitative Basis für Bewertungen unterschiedlicher Optionen.

1.2 Existierende Arbeiten zur Nachhaltigkeit von Energiesystemen

Neben dem bereits erwähnten Bericht der Brundtland-Kommission gibt es eine Vielzahl weiterer Untersuchungen zur Nachhaltigkeit von Energiesystemen. Von diesen werden diejenigen, die von besonderer Bedeutung für die mit diesem Vorhaben beabsichtigte Grundlagentheorie zur Bewertung der Nachhaltigkeit sind, näher erläutert.

1 Einleitung

1.2.1 Die UNCED-Konferenz in Rio und der Rio-Folgeprozess

Die durch den Brundtland-Bericht auf übernationaler Ebene angestoßene breite und intensive Debatte über geeignete Wege der nachhaltigen Entwicklung wurde in der UNCED-Konferenz in Rio 1992 (auch bekannt unter dem Namen „Erdgipfel“) und in verschiedenen weiteren Folgekonferenzen fortgesetzt. Wenn auch die auf diesen Konferenzen getroffenen Vereinbarungen nicht unmittelbar völkerrechtlich bindenden Vertragscharakter haben, so geht von ihnen aufgrund ihrer Unterzeichnung durch 173 Vertragsstaaten doch eine große politisch verpflichtende Wirkung aus. Ergebnisse sind z.B. entwicklungs- und umweltpolitische Grundprinzipien und Strategien, wie sie in der sogenannten Rio-Deklaration festgelegt sind. Diese beziehen sich insbesondere auf die großen Themenbereiche Armutsbekämpfung, Bevölkerungspolitik, Recht auf Entwicklung und Umweltprobleme. Ein sehr ausführliches, 40 Kapitel umfassendes Aktionsprogramm für Ziele, Maßnahmen und Instrumente zur Umsetzung der Rio-Deklaration, in dem unterschiedliche Handlungsschwerpunkte für Industrie- und Entwicklungsländer definiert sind, stellt die Agenda 21 dar.

Eine besondere Konsequenz der Rio-Konferenz in institutioneller und instrumenteller Hinsicht war die Einrichtung einer Kommission auf UN-Ebene (Commission on Sustainable Development, CSD), die den Prozess der Einleitung bzw. Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung in den jeweiligen Staaten beobachten, unterstützen und evaluieren soll. Mit diesem Auftrag zielt der Ansatz der Rio-Konferenz weit über den der Brundtland-Kommission hinaus. Die Agenda 21 sieht unter anderem die gemeinsame Festlegung von Nachhaltigkeitsindikatoren für die nationale, regionale und lokale Ebene sowie die Veröffentlichung und ständige Aktualisierung dieser Informationen vor. Die CSD hat, um diese Aufgabe zu erfüllen, gemeinsam mit den Mitgliedsstaaten einen Satz von Indikatoren entwickelt, der soziale, ökologische, ökonomische und institutionelle Kriterien beinhaltet. Zur quantitativen Bestimmung jedes einzelnen Indikators hat die CSD ein einheitliches methodisches Vorgehen festgelegt, das die Politikrelevanz, die Ermittlungsmethode sowie die Datenverfügbarkeit und -quellen betrifft /CSD 1996/, /CSD 2001/.

Mit Abschluss der UNCED-Konferenzen und der Arbeiten der CSD steht zum ersten Mal ein weltweit einsetzbares Instrument für länderspezifische Bewertungen zur Verfügung. Indikatoren zeigen den Grad der nachhaltigen Entwicklung im sozialen, ökologischen, ökonomischen und institutionellen Bereich an. Schlussfolgerungen daraus zu ziehen und Rahmenbedingungen für Veränderungen zu setzen, ist Aufgabe der Politik der jeweiligen Länder. Allerdings zeigt sich schon jetzt während des noch andauernden Rio-Folgeprozesses, dass die teilweise stark differierenden Interessenlagen einzelner Länder nur schwer auf einen gemeinsamen Handlungsrahmen auszurichten sind. Ein Beispiel dafür ist das Klimaschutzrahmenprogramm und die Umsetzung des Kyoto-Protokolls zur Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen. Die mit diesem Protokoll verbundenen nationalen Reduzierungspflichten haben unter anderem große Auswirkungen auf die nationalen Energiewirtschaften und stoßen daher zum Teil auf heftigen Widerstand einzelner Regierungen. Trotz dieser erkennbaren Umset-

1 Einleitung

zungsprobleme zielt der Rio-Nachfolgeprozess weiterhin darauf ab, nachhaltige Entwicklung in den durch die Indikatoren messbaren Teilbereichen in Gang zu setzen.

1.2.2 Das OECD-Aktionsprogramm “Towards Sustainable Development“

Ähnlich wie auf UN-Ebene zielt das Aktionsprogramm der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) für nachhaltige Entwicklung auf freiwillige Vereinbarungen ihrer derzeit 29 Mitgliedsländer (bis auf wenige Ausnahmen Industrieländer), die nicht bindenden Charakter haben. Die OECD beschränkt sich darauf, Informationen über den Zustand der Umwelt in den Mitgliedsstaaten und insbesondere über kritische Entwicklungszustände zu geben, um die Regierungen zum Handeln zu veranlassen. Als Messgrößen werden auch hier verschiedene, international vergleichbare Indikatoren gewählt. Da es jedoch keinen Satz an Indikatoren gibt, der allgemein und unabhängig von der jeweiligen Sachfrage einsetzbar wäre, entwickelte die OECD einen Kern von Umwelt-Indikatoren, der rund 50 Einzelindikatoren umfasst und durch sektorale sowie allgemeine volkswirtschaftlich relevante Indikatoren ergänzt wird /OECD 1998/.

Besonders wichtig waren der OECD Indikatoren für den Energiesektor, weil die Bedeutung der nationalen Energiewirtschaften für die volkswirtschaftliche Wertschöpfung besonders groß und Energie ein bedeutender Einsatzfaktor für andere Sektoren ist. Es wurde daher zunächst ein Satz von sektoralen Indikatoren entwickelt, der Veränderungen im Energiesektor durch Referenzgrößen in der Energieintensität, im Energiemix und im Energiepreis anzeigt. Sehr bald wurde jedoch festgestellt, dass das Prinzip der nachhaltigen Entwicklung auch eine bedeutende soziale Dimension hat, die in den bisherigen Indikatoren nicht oder nicht ausreichend abgebildet wird. Dies betrifft z.B. Auswirkungen auf die Gesundheit, die Beschäftigungslage oder Einkommenseffekte. Die Einbeziehung solcher wichtigen sozialen Aspekte in die Weiterentwicklung des OECD-Ansatzes ist daher vorgesehen /OECD 2000/.

1.2.3 Enquete-Kommissionen des Deutschen Bundestages

Die Bundesrepublik Deutschland als eine der reichsten Industrienationen der Erde fühlte sich nach dem Erdgipfel von Rio 1992 und aufgrund der eigenen Erfahrungen mit äußerst kontrovers und konfliktreich geführten umweltpolitischen Debatten besonders gefordert, eine Vorreiterfunktion für eine nachhaltige Entwicklung zu übernehmen und Impulse für eine ökologisch, ökonomisch und sozial gleichermaßen vertretbare Zukunftsperspektive zu geben.

Der Deutsche Bundestag hat sich seit 1969 mit der Einrichtung von Enquete-Kommissionen eine Möglichkeit geschaffen, Zukunftsfragen von übergeordneter Bedeutung abseits von der Tagespolitik mit Hilfe externer Sachverständiger zu erörtern und politische Entscheidungen vorzubereiten. Enquete-Kommissionen haben sich in der Vergangenheit als sinnvolles Instrument der Politikberatung erwiesen. Deshalb wurde bereits in der 12. Legisla-

1 Einleitung

turperiode die Einsetzung der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ beschlossen.

Die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft“ des 12. Deutschen Bundestages hat ihre Arbeit mit der Vorlage des Berichtes „Die Industriegesellschaft gestalten - Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen“ im Jahr 1994 abgeschlossen. Hierzu gehörte die Ableitung grundlegender Regeln zum Umgang mit Stoffen, die Auseinandersetzung mit der Bedeutung des Produktionsfaktors Natur als eines Engpassfaktors für die wirtschaftliche Entwicklung sowie die Beschreibung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Kriterien für eine nachhaltig zukunftsverträgliche Entwicklung /Enquete-Kommission 1994/.

Die Arbeit wurde in der 13. Legislaturperiode mit der Einrichtung einer neuen Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“ fortgeführt. Waren die Erkenntnisse der Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestages im wesentlichen noch von ökologischen Aspekten bestimmt, deren ökonomische und soziale Konsequenzen zu berücksichtigen sind, so versuchte die Enquete-Kommission des 13. Deutschen Bundestages, der Dreidimensionalität des Leitbilds nachhaltige Entwicklung weiter gerecht zu werden und Grundregeln auch für die ökonomische und soziale Dimension aufzustellen.

Um eine nachhaltig zukunftsfähige Entwicklung zu erreichen, hat die Kommission Ziele, Instrumente und Maßnahmen in Beziehung zueinander gesetzt. Neben der Erläuterung dieser grundsätzlichen Aspekte von Nachhaltigkeit hat sich die Kommission auch mit ausgesuchten Beispielen beschäftigt, die belegen, wie die Nachhaltigkeitsstrategie konkretisiert werden kann. Exemplarisch wurden dabei die Teilbereiche Bodenversauerung, Informations- und Kommunikationstechnik sowie Bauen und Wohnen betrachtet /Enquete-Kommission 1998/.

Mit den Ergebnissen beider Enquete-Kommissionen und dem integrativen ökonomisch-ökologisch-sozial bestimmten Drei-Säulen-Ansatz lagen bereits wesentliche Grundlagen für die Nachhaltigkeitsorientierung in Deutschland vor. Um allerdings belastbare Aussagen über ein nachhaltiges Energiesystem und entsprechende Handlungsorientierungen formulieren zu können und mögliche Zielkonflikte transparent zu machen, war eine weitere Präzisierung des allgemeinen Nachhaltigkeitskonzeptes und vor allem auch eine Operationalisierung für das Energiesystem und die Energiepolitik notwendig. Diesen Auftrag erhielt die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages. Die Arbeit der Kommission ist gegenwärtig noch nicht abgeschlossen.

1 Einleitung

1.2.4 HGF-Nachhaltigkeitsansatz

Entsprechend der Notwendigkeit, zur Umsetzung von Nachhaltigkeit allen drei Dimensionen der gesellschaftlichen Wirklichkeit Rechnung zu tragen, hatte die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ als ersten Schritt zur Operationalisierung des Leitbildes nachhaltig zukunftsfähiger Entwicklung neben ökologischen auch ökonomische und soziale Grundregeln formuliert. Diese Nachhaltigkeitsregeln wurden in einem Projekt der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) zu einem „integrativen Konzept nachhaltiger Entwicklung“ aufgegriffen und ergänzt /HGF 1999/.

Aus dem integrativen Konzept des HGF-Verbundvorhabens „Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland“ ergeben sich fünf relevante Gesichtspunkte für die Beurteilung einer nachhaltigen Entwicklung, die zwar vor dem Hintergrund der internationalen Debatte nicht unbedingt neu sind, den HGF-Ansatz aber deutlich von anderen Ansätzen unterscheiden:

- I. Das HGF-Verbundvorhaben verfolgt einen mehrdimensionalen Ansatz. Im Unterschied zu anderen Konzepten (so z.B. Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages) wird jedoch Nachhaltigkeit nicht aus der Sicht der einzelnen (ökonomischen, ökologischen und sozialen) Dimensionen definiert, sondern der Versuch unternommen, ausgehend von dem Postulat der inter- und intragenerativen Gerechtigkeit, Mindestbedingungen einer nachhaltigen Entwicklung zu benennen. Diese Abkehr von einem Denken in Dimensionen führt zu einem anderen Integrationsverständnis.
- II. Ein weiterer Unterschied zu anderen mehrdimensional orientierten Studien liegt darin, dass die Operationalisierung des Leitbildes nicht von vornherein auf Deutschland beschränkt ist, sondern Nachhaltigkeit zunächst als eine globale Vision entfaltet wird. Diese globale Sicht hat zur Folge, dass der Aspekt der Bestandssicherung und der Aspekt der Entwicklung, im Sinne einer Verbesserung der Lebensbedingungen als gleichrangig betrachtet werden.
- III. Um die Notwendigkeit einer nachhaltigen Entwicklung zu begründen, kommen zwei alternative Argumentationslinien in Betracht: Eine explizit normative, die auf dem Postulat der Gerechtigkeit beruht und eine quasi „objektive“ die sich an Grenzen der Belastbarkeit und aktuellen Problemlagen orientiert. Während die Enquete-Kommission die zweite Begründungslinie in den Vordergrund stellt, geht der HGF-Ansatz von der normativen Begründung aus, bezieht die problembezogene Sichtweise aber später ein. Er stellt somit einen Versuch dar, beide Argumentationslinien miteinander zu verknüpfen.
- IV. Im Gegensatz zu dem Abschlussbericht der Enquete-Kommission wird im HGF-Konzept zwischen „Was-Regeln“ und „Wie-Regeln“ unterschieden. Die „Was-Regeln“ beinhalten die substanziellen Mindestanforderungen an eine nachhaltige Entwicklung, während die „Wie-Regeln“ die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen zur Erfüllung dieser Mindestanforderungen betreffen.

1 Einleitung

- V. Eng verknüpft mit dieser Unterscheidung zwischen „Was-“ und „Wie-Regeln“ ist schließlich der fünfte Aspekt: Im Gegensatz zu anderen Ansätzen wird im Nachhaltigkeitskonzept der HGF der politisch-institutionelle Bereich als vierte Dimension eingeführt. Da die Realisierungschancen einer zukunftsfähigen Entwicklung entscheidend von der gesellschaftlichen Selbstveränderung und mithin der Steuerung abhängen, kommt es darauf an, die gesellschaftlichen Institutionen selbst, die - oder mittels derer die Veränderungen hin zur Nachhaltigkeit bewirkt werden sollen - auf ihre diesbezügliche Fähigkeit zu hinterfragen. Auch hier werden Mindestanforderungen in Form von Regeln formuliert, die allerdings bewusst so abstrakt formuliert sind, dass sie unabhängig von der jeweiligen Verfasstheit eines politischen Systems oder internationaler Regime Gültigkeit beanspruchen können.

Energie wird in der HGF-Systematik als Aktivität zur Befriedigung gesellschaftlicher Bedürfnisse wie Mobilität, Bauen und Wohnen oder Ernährung und Landwirtschaft verstanden. Bei der problembezogenen Betrachtung des Energiesektors stehen im Einklang mit den Konzepten anderer Autoren insbesondere vier Aspekte, im Vordergrund:

- der Ressourcenaspekt,
- der Emissions- bzw. Senkenaspekt,
- der Risikoaspekt und
- der Verteilungsaspekt.

Der integrative, methodisch hoch entwickelte HGF-Ansatz zielt nicht darauf ab, abschließend zu beantworten, wie eine nachhaltige Entwicklung im Energiebereich erreicht werden kann. Im Zuge des erforderlichen gesellschaftlichen Diskussionsprozesses über Nachhaltigkeit im allgemeinen und die Übertragung auf den speziellen Bereich Energie ist es jedoch mit dem HGF-Ansatz möglich, ein aus heutiger Sicht als angemessen bewertetes Anforderungsprofil für Nachhaltigkeit im Energiesektor zu erarbeiten, das es erlaubt, im Sinne des intra- und intergenerativen Gerechtigkeitspostulats global hinreichende Handlungsspielräume für die Menschheit zu gewährleisten.

Zur generellen Orientierung für die im Energiesektor handelnden Akteure und ihre Handlungsstrategien sollen beispielsweise folgende spezifischen Kriterien und Leitlinien (ohne Gewichtung der aufgeführten Aspekte) dienen:

- Zugang für alle,
- dauerhafte Versorgungssicherheit,
- Ressourcenschonung, Umwelt-,
- Klima- und Gesundheitsverträglichkeit,
- Risikoarmut und Fehlertoleranz,
- soziale Verträglichkeit,
- umfassende Wirtschaftlichkeit und
- internationale Kooperation.

1 Einleitung

1.2.5 Prognos-Studie

In einer Untersuchung der Prognos AG zur Frage einer „dauerhaften und durchhaltbaren Entwicklung im Energiesektor“ in Deutschland wurden ebenfalls wichtige Aspekte der Zukunftsfähigkeit behandelt. Die Untersuchung hat allerdings den Charakter einer Grundsatzstudie, die Chancen und Grenzen bestimmter Entwicklungstrends typisiert und vor dem Hintergrund der Rahmenbedingungen sowie erforderlicher Anpassungsmaßnahmen einordnet. Die Studie bezieht kein Indikatorensystem zur Quantifizierung der Entwicklungszustände ein, sondern sie zeigt die Reaktionsmöglichkeiten des Systems auf, ermittelt Potenziale zur Veränderung des Energiesektors und gibt Einschätzungen über Zeitbedarf sowie erforderliche Anpassungen /PROGNOS 1998/.

1.2.6 PSI / ETH Zürich: Projekt GaBE

Im Rahmen des GaBE-Projekts (Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen), eines gemeinsamen Vorhabens des Paul Scherrer Instituts und der ETH Zürich, entwickeln Schweizer Wissenschaftler einen Ansatz, der eine umfassende und detaillierte Beurteilung heutiger und künftiger Energiesysteme ermöglichen soll. Projektziel ist es, den Begriff Nachhaltigkeit in ein anwendbares Handlungskonzept umzusetzen, wobei die drei Bereiche Ökologie, Ökonomie und Soziales im Entwicklungsprozess gleichermaßen zum Tragen kommen sollten.

Das von den Instituten gewählte Bewertungsraster für Energiesysteme erfüllt spezifische Anforderungen, die sich von allgemeiner formulierten Nachhaltigkeitsindikatoren, zum Beispiel jenen der UN, unterscheiden. An drei Prinzipien wird gemessen, wie weit ein Energiesystem den Anforderungen der Nachhaltigkeit entspricht:

- „Keine“ Erschöpfung von Ressourcen (im weiteren Sinn zu verstehen, umfasst auch die Gesundheit von Mensch und Natur, die Wirtschaftlichkeit und den sozialen Frieden),
- „Keine“ Produktion von nicht abbaubaren Abfällen,
- „Keine“ hohe Empfindlichkeit gegenüber dem Umfeld.

Diese drei Prinzipien werden mittels Kriterien und Indikatoren konkretisiert. Die Indikatoren sollen voneinander unabhängig und messbar sein und eine fortlaufende Überprüfung der Entwicklung erlauben. Ihre Anzahl soll so groß sein, dass eine differenzierte und umfassende Bewertung von Systemen möglich ist, und gleichzeitig so klein, dass das Bewertungssystem noch überschaubar, handhabbar und nicht zuletzt kommunizierbar ist.

In einem ersten praktischen Anwendungsbeispiel für den Umgang mit dem GaBE-Ansatz wurden für fünf Energiesysteme acht Indikatoren quantifiziert. Da der zu erwartende technische Fortschritt großen Einfluss auf das Ergebnis hat, wurden sowohl heutige als auch künftige Systeme bewertet. Dabei betrug der gewählte Zeithorizont 20 Jahre. Alle errechneten Daten basierten auf Lebenszyklusanalysen, d.h., dass auch indirekte Emissionen und Abfälle

1 Einleitung

aus Energie- und Materialaufwand, die bei Errichtung, Betrieb und Entsorgung des Systems entstehen, berücksichtigt wurden.

Für eine umfassende Beurteilung von Energiesystemen mit dem GaBE-Ansatz müssen natürlich mehr Indikatoren einbezogen werden. Je nachdem, welche Systeme bewertet werden sollen und was das Ziel der Bewertung ist, können sich auch Anzahl und Auswahl der Kriterien bzw. Indikatoren ändern. Entscheidungen über Auswahl und Gewichtung der Kriterien sollten idealerweise im Konsens mit den wichtigsten Interessengruppen und direkt Betroffenen und unter Berücksichtigung der politischen, wirtschaftlichen und sozialen Ziele getroffen werden /PSI 2000/.

1.2.7 Forum für Zukunftsenergien

Das Forum für Zukunftsenergien, das sich als Plattform für den energiepolitischen Dialog versteht, hat sich mit einer speziellen Form der Beteiligung und Moderation von in Deutschland miteinander streitenden Interessengruppen in die Diskussion um die Nachhaltigkeit von Energiesystemen eingebracht. Die Experten der Arbeitsgruppe „Strategien“ des Forums haben dabei zunächst ausgelotet, wie weit ein Konsens erreicht werden kann und welche Punkte aus welchen Gründen zur Zeit strittig bleiben. Dabei hat es sich als hilfreich erwiesen, zunächst die Kriterien oder Anforderungen zu definieren, denen zukünftige Energiesysteme genügen sollen.

Als selbstverständliches und in seiner Allgemeinheit von allen Beteiligten akzeptiertes Leitziel wurde definiert: „Energie soll ausreichend und – nach menschlichen Maßstäben – langandauernd so bereitgestellt werden, dass möglichst alle Menschen jetzt und in Zukunft die Chance für ein menschenwürdiges Leben haben, und in die Wandlungsprozesse nicht rückführbare Stoffe sollen so deponiert werden, dass die Lebensgrundlagen der Menschheit jetzt und zukünftig nicht zerstört werden.“ Ebenfalls im Einklang mit dem Leitziel wurden neun Anforderungen beschrieben, deren bestmögliche Erfüllung durch die – globalen – Energiesysteme der Zukunft angestrebt werden soll:

- Ausreichende Menge,
- Bedarfsgerechte Nutzungsqualität sowie Flexibilität,
- Versorgungssicherheit,
- Ressourcenschonung,
- Inhärente Risikoarmut und Fehlertoleranz,
- Umweltverträglichkeit,
- Internationale Verträglichkeit,
- Soziale Verträglichkeit,
- Effizienz der Energiesysteme im Sinne niedriger Kosten.

Anschließend wurden verschiedene Energiesysteme daraufhin bewertet, wie sie die Anforderungen erfüllen können. Bei dieser (qualitativen) Bewertungsfrage war in der Arbeitsgruppe

1 Einleitung

kein Konsens zu erzielen. Die divergierenden Meinungen kristallisierten sich in zwei Gruppen, die Befürworter eines regenerativ-nichtnuklearen und die Befürworter eines nuklear-regenerativen Energiesystems, was in einem entsprechenden Strategiepapier zum Ausdruck gebracht wurde.

Auf Vorschlag eines nicht an der Diskussion beteiligten Experten wurde das Ergebnis schließlich verschiedenen Persönlichkeiten aus dem Energiebereich mit der Bitte um kritische Kommentierung (Peer Review) zugeschickt. Die Reviewer würdigten das Strategiepapier durchweg als wichtigen Beitrag zur Energiediskussion. Das Ergebnis, Konsens in den Kriterien, Dissens in ihrer Anwendung, bezeichneten einige Reviewer als nicht überraschend. Kritisch wurde jedoch von einigen auch angemahnt, dass das Strategieergebnis weit hinter den Möglichkeiten, die die Arbeitsgruppe hatte, zurückgeblieben sei. Das Forum hat für sich den Schluss aus der Aktion gezogen, den Diskurs mit den verschiedenen Interessengruppen im Lande weiterzuführen und vor allem an den angemahnten Punkten weiterzuarbeiten /Eichelbrönnner et al. 1998/.

Obwohl sehr umfassend in den Anforderungen, bleibt der Ansatz des Forums im Vergleich mit anderen, selbst nach weiterer Bearbeitung, zurück, sofern er wie bisher auf eine quantitative Bewertung der Kriterien verzichtet.

1.2.8 Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg

Dem Konzept der TA-Akademie liegt ein Begriffsverständnis zugrunde, bei dem Nachhaltigkeit ein normatives Leitbild zur Verwirklichung einer gerechten Verteilung von Lebenschancen über Generationen hinweg ist. Die heutige Generation sollte nicht leichtfertig das ihr anvertraute Erbe an Ressourcen und Naturgütern konsumieren und die Probleme dieses Raubbaus an der Natur nachfolgenden Generationen überlassen. Diese Forderung entspricht auch derjenigen der meisten anderen Autoren.

Bei dem von der TA-Akademie verwendeten Konzept steht vor allem die ökologische Dimension bei der Bewertung einer nachhaltigen Entwicklung im Bundesland Baden-Württemberg im Mittelpunkt. Zusätzlich wurde das Konzept der Nachhaltigkeit um die Kategorie „Humanressourcen“ ergänzt. Als Ressource, die tendenziell unbegrenzt wachsen kann, weil sie sich beim Gebrauch nicht erschöpft und potenziell beliebig häufig verwendet werden kann, spielt Wissen in unserer Gesellschaft natürlich eine zentrale Rolle, z.B. in Strategien zur Substitution von nicht erneuerbaren Ressourcen durch weniger gefährdete Ressourcen oder Elemente des künstlichen (menschengeschaftenen) Kapitals.

In dem verwendeten Konzept wird Nachhaltigkeit vorrangig als Verteilungsgerechtigkeit zwischen den Generationen (intergenerative Gerechtigkeit) verstanden. Der Aspekt einer gerechten Verteilung innerhalb einer Generation (intragenerative Gerechtigkeit) sowie bestimmte Größen aus dem wirtschaftlichen Bereich stellen Rahmenbedingungen dar. Die Indikatoren für die Darstellung der Rahmenbedingungen sind in die Bereiche „Wirtschaft“, „Ungleichheit der Lebensbedingungen“ und „Bevölkerung und Gesundheit“ eingeteilt. Die

1 Einleitung

Auswahl der Indikatoren geht vom Indikatorenkatalog der „Commission of Sustainable Development (CSD)“ der UN aus und versucht, geeignete Größen für Baden-Württemberg auszuwählen. Die Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Ob mit einer stärkeren Ausweitung des Nachhaltigkeitsbegriffes eher eine Umsetzung von Nachhaltigkeit erreicht wird, wird von der Akademie bezweifelt. Es erscheint ihr nämlich sinnvoller, das Konzept der Nachhaltigkeit nicht mit schlecht definierbaren und widersprüchlichen Zielvorstellungen zu überfrachten, sondern es auf einen Kern zu reduzieren, der sich anhand relativ konsensfähiger Kriterien überprüfen lässt. Nur so kann nach Einschätzung der Akademie verhindert werden, dass der Begriff Nachhaltigkeit beliebig ausgelegt wird /Renn et al. 2000/.

Für die einzelnen Indikatoren wird in dem Statusbericht die Bewertung durch grüne, rote und gelbe Ampeln symbolisiert. Werden beispielsweise natürliche Ressourcen mehr geschont als früher, Umweltbelastungen und Risiken verringert, weniger Schadstoffe emittiert bzw. weniger Abfall in die Natur eingebracht, erhält der jeweilige Problembereich eine grüne Ampel. Die Entwicklung bewegt sich in diesem Fall auf das Ziel der Nachhaltigkeit zu. Im umgekehrten Falle, also wenn Ressourcen stärker genutzt oder verbraucht werden als früher, wenn Umweltbelastungen und Risiken zunehmen und mehr Schadstoffe emittiert und mehr Abfall in die Natur eingebracht wird, gibt es eine rote Ampel. Zeigt der Trend keine Änderung, zeigt die Ampel gelb. Zusätzlich geht das Niveau der Messgröße in die Bewertung mit ein.

Die Vorgehensweise bei der Bewertung von Trends und Zielgrößen der TA-Akademie ist heftig kritisiert worden, da sie teilweise als zu simpel und reduzierend empfunden wurde. Das Energiesystem wird in dem TA-Ansatz mit lediglich fünf allgemeinen Messgrößen abgebildet. Damit lässt sich kaum eine differenzierte Bewertung der Nachhaltigkeit von Energiesystem-Entwicklungen vornehmen.

1.3 Ziel des Vorhabens und Vorgehensweise

Ziel des Vorhabens ist es, eine Bewertungsgrundlage für die Entwicklung eines nachhaltigen Energiesystems für Baden-Württemberg zu schaffen (vgl. auch /Nill et al. 2000/, /Nill et al. 2001/). Eine derartige Grundlage, die auf einem umfassenden Nachhaltigkeitskonzept aufsetzt und mit geeigneten quantitativen Indikatoren den Nachhaltigkeitszustand des Energiesystems Baden-Württembergs anzeigt, gibt es bisher noch nicht. Sie liegt auch nicht für andere Bundesländer vor.

Bei der Festlegung des relevanten Indikatorensatzes wird das Vorgehen in sektoraler Hinsicht auf den Subsektor Strom beschränkt. Dies ist gerechtfertigt, weil es den Projektauftrag nicht einengt und gleichzeitig die Möglichkeit eröffnet, den methodischen Ansatz und die Instrumente für den bedeutendsten Subsektor des Energiesystems zu entwickeln. Über die Zukunft der Gestaltung des Stromsektors in Baden-Württemberg existieren wie in keinem anderen Teilsektor unterschiedliche Vorstellungen. Dies betrifft insbesondere den Primär-

1 Einleitung

energieeinsatz (nuklear, fossil, regenerativ) und die zu wählende Kraftwerkstechnik. Selbstverständlich kann der Indikatorensatz mit entsprechendem Aufwand auch so weiterentwickelt werden, dass er für die anderen Subsektoren, also für die Bereiche Wärme und Verkehr, anwendbar ist.

Der Begriff der Nachhaltigkeit wird nicht einheitlich interpretiert, wie aus der Auswertung verschiedener Arbeiten zur Nachhaltigkeit von Energiesystemen hervorgeht (vgl. auch 1.2). Nachhaltigkeit ist daher als ein offenes Konzept zu verstehen, das im konkreten Anwendungsfall präzisiert werden muss. Ein Teilziel des hier beschriebenen Vorhabens ist es, die verschiedenen Konzeptansätze gegenüberzustellen und zu bewerten (Kapitel 2).

Ein weiteres Teilziel ist die Erarbeitung und Festlegung von Indikatoren, an denen Nachhaltigkeit gemessen werden kann. Indikatoren müssen wissenschaftlichen Kriterien, wie der Transparenz des Mess- und Berechnungsverfahrens, der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und der Sensitivität gegenüber dem darzustellenden Zustand, aber auch praktischen Kriterien, wie etwa der Datenverfügbarkeit mit einem dem Ziel angemessenen Aufwand oder der internationalen Kompatibilität, genügen. In Bezug auf die Energieversorgung sollen Nachhaltigkeitsindikatoren den relativen Beitrag einzelner Optionen (z.B. verschiedener Stromerzeugungstechnologien) zu einer nachhaltig zukunftsfähigen Entwicklung vergleichbar machen. Dabei können Nachhaltigkeitsindikatoren in physischen und in monetären Einheiten angegeben werden. Im Unterschied zu den physischen Indikatoren, die einen Zustand in physikalischen Einheiten beschreiben (z.B. CO₂-Emission in g/kWh), können monetäre Indikatoren, also in Geldeinheiten bewertete Messgrößen, durch Summierung aggregiert werden. Allerdings ist dabei eine Monetarisierung vorzunehmen, für die es besondere Methoden gibt. Hervorzuheben ist auch, dass mit dem gewählten Indikatorensatz keine Festlegung auf ein bestimmtes Nachhaltigkeitskonzept vorgegeben sein soll (Kapitel 3).

Um die Nachhaltigkeit von Energietechnologien zu messen, sind Indikatorwerte über den gesamten Lebensweg des jeweiligen Stromerzeugungssystems zu betrachten. Neben den direkten Effekten bei der Energieumwandlung sind auch die vor- und nachgelagerten Prozessstufen wie Bau der Anlagen, Gewinnung und Transport der Brennstoffe sowie Rückbau der Anlagen und Entsorgung zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere deshalb wichtig, weil Stromerzeugungsanlagen, die im Betrieb z.B. praktisch emissionsfrei sind, in vorgelagerten Prozessstufen bedeutende Umwelteffekte verursachen können. Eine Methodik zur Bestimmung von Indikatorwerten, die Effekte über den gesamten Lebensweg anzeigen, ist daher besonders für den Subsektor Strom von Bedeutung. Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) ist eine solche Methodik. Im deutschen Sprachgebrauch hat sich dafür auch der Begriff „Ökobilanz“ eingebürgert. Teilziel des Vorhabens ist es, die LCA-Methodik zur Bestimmung geeigneter Indikatorwerte zu adaptieren (Kapitel 4).

Mit Hilfe der LCA-Methodik werden die Indikatorwerte für ausgewählte Stromerzeugungstechnologien quantifiziert. Berücksichtigt werden dabei fossile, nukleare und regenerative Kraftwerkstechniken. Da sich die Anlagen aufgrund des technologischen Fortschritts im

1 Einleitung

Laufe der Zeit ändern, sind sowohl Referenzanlagen, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen (Kapitel 5) als auch Weiterentwicklungen zu betrachten (Kapitel 6).

Letztes Teilziel ist der Vergleich der Stromerzeugungstechnologien auf Basis der so berechneten relativen Indikatorwerte in physischen und monetären Einheiten sowie die Einordnung der ausgewählten Anlagen im Hinblick auf das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung (Kapitel 7).

1 Einleitung

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

Dieses Kapitel ist das Ergebnis einer Analyse unterschiedlicher Nachhaltigkeitskonzepte. Ihr liegt eine umfangreiche Quellensammlung zugrunde. Falls nicht abweichend zitiert, greift die Untersuchung im wesentlichen auf Ausführungen in /IER 2000/, /Voß 2001/, /Rennings 1997/ und /HGF 1999/ zurück. Aus der Diskussion der verschiedenen Konzepte werden die wesentlichen Anforderungen für eine inhaltliche Konkretisierung des Leitbildes Nachhaltigkeit im Hinblick auf die Energieversorgung abgeleitet und die Eigenschaften für ein umfassendes Nachhaltigkeitskonzept formuliert.

2.1 Konstitutive Elemente von Nachhaltigkeitskonzepten

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Eigenschaften, die für Nachhaltigkeitskonzepte bestimmend sind.

2.1.1 Offenes Konzept

Die Idee der nachhaltigen Entwicklung ist nicht neu und hat sich aus dem Generationenkonflikt um das Naturerbe entwickelt. Ausgangspunkt der heutigen Überlegungen zu einer nachhaltigen Entwicklung ist oft die von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (so genannte Brundtland-Kommission) vorgelegte Definition, nach der nachhaltige Entwicklung eine Entwicklung ist,

„die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass zukünftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können. Nachhaltige Entwicklung erfordert, die Grundbedürfnisse aller zu befriedigen und für alle die Möglichkeit zu schaffen, ihren Wunsch nach einem besseren Leben zu befriedigen.“

Im Verständnis der Brundtland-Kommission wie der Rio-Deklarationen beinhaltet das Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“ die beiden sich intuitiv scheinbar widersprechenden Forderungen nach schonender Umweltnutzung, die die Tragekapazität und den immateriellen Wert von Umwelt und Natur auf Dauer erhält, und nach weiterer wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung. Folgt man der Definition der Brundtland-Kommission, so ist Ziel einer nachhaltigen Entwicklung, den kommenden Generationen ein Erbe zu hinterlassen, das ihnen ermöglicht, ihr Leben nach eigenen Vorstellungen und Wünschen zu gestalten und dabei auf mindestens das gleiche Potenzial an Möglichkeiten zurückgreifen zu können, wie wir es tun konnten. Oder anders ausgedrückt, nachhaltige Entwicklung meint eine Entwicklung, welche die Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen aller Menschen, der

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

heute und zukünftig lebenden, mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen in Einklang bringt.

Diese allgemeinen inhaltlichen Beschreibungen von Nachhaltigkeit, die für viele Zustimmungsfähig sind und sich als ethische Norm primär aus Gerechtigkeitsüberlegungen gegenüber heutigen und künftigen Generationen (intragenerative und intergenerative Gerechtigkeit) ableiten, sagen aber noch wenig darüber aus, worauf es bei einer nachhaltigen Entwicklung konkret, z.B. in Bezug auf die Energieversorgung, ankommt. Diese Offenheit und Unbestimmtheit lässt Spielraum für unterschiedliche Konkretisierungen und Interpretationen.

2.1.2 Normativ-ethische vs. naturwissenschaftliche Fundierung

Die Notwendigkeit einer durch bestimmte Randbedingungen gekennzeichneten nachhaltigen Entwicklung wird oft aus den Grenzen der Belastungsfähigkeit natürlicher Systeme abgeleitet. In der HGF-Studie „Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland“ wird als Alternative eine normative Begründungslinie für die Festlegung von Nachhaltigkeitszielen verfolgt, die auf dem Postulat der Gerechtigkeit beruht. Es ist jedoch zu hinterfragen, ob die beiden Argumentationslinien nicht eher als sich ergänzend anzusehen sind. Die Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung ist als solche immer ein normatives Prinzip, da die Notwendigkeit des langfristigen Überlebens der Menschheit und eine Verteilungsnorm zwischen den Generationen postuliert wird.

Kritische Bestandsgrößen des Naturkapitals können hilfreich sein, um die Grenzen, innerhalb derer eine Entwicklung möglich ist, aufzuzeigen. Der „objektive“ Charakter von Grenzwerten für Belastungsgrößen wird in diesem Zusammenhang aber oft überschätzt: zwar können für einzelne Bestandteile der Natur (z.B. für einzelne Arten oder einzelne Individuen) zum Teil kritische Belastungsgrößen naturwissenschaftlich abgeleitet werden. Es wird aber oft darüber hinweggesehen, dass sich aus solchen Grenzwerten nicht direkt Restriktionen für einen nachhaltigen Entwicklungspfad ableiten lassen, da der Verlust einzelner Individuen oder bestimmter Arten an einem bestimmten Ort nicht notwendigerweise das Überleben von Ökosystemen oder die Erhaltung lebensnotwendiger Ökosysteme in Frage stellt. Die Verwendung kritischer Bestandsgrößen zur Messung einer nachhaltigen Entwicklung setzt notwendigerweise die Bestimmung der Elemente von Natur und Umwelt voraus, deren Bestand und Funktionsfähigkeit für die heutigen und zukünftigen menschlichen Bedürfnisse als notwendig angesehen werden. Eine solche Festlegung basiert jedoch nicht auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, sondern wird von ökonomischen Ziel- und Wertvorstellungen geprägt.

Daher ist es immer notwendig, aus einem normativen Ansatz zunächst Mindestanforderungen an eine nachhaltige Entwicklung abzuleiten. So weit wie möglich sollten diese Mindestanforderungen in naturwissenschaftlich begründete kritische Bestandsgrößen des Naturkapitals übersetzt werden, um konkrete Messgrößen und Handlungsziele ableiten zu können. Dementsprechend ist der normative Ansatz, der von dem Postulat der Gerechtigkeit ausgeht,

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

und der naturwissenschaftliche Ansatz, der von Grenzen der Belastungsfähigkeit ausgeht, unbedingt als komplementär und nicht als alternativ zueinander anzusehen.

2.1.3 Gestaltungsfähigkeit als Basis für weitere Entwicklung

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik hat große Bedeutung für die Ausgestaltung einer nachhaltigen Entwicklung. Die wesentliche Aussage des zweiten Hauptsatzes beinhaltet, dass Leben, der Aufbau und die Nutzung lebenserhaltender und lebensfördernder Ordnungen und Strukturen unumgänglich mit der Entwertung von Energie, d.h. dem Verbrauch von Arbeitsfähigkeit, aber auch mit der Entwertung von Materie, einer Stoffdissipation bzw. Stoffzerstreuung verbunden ist. Dabei wird die Entropie erhöht, d.h., die Unordnung nimmt zu. Leben und die dazu notwendige Befriedigung von Bedürfnissen ist also notwendigerweise mit dem Verbrauch von arbeitsfähiger Energie und verfügbarer Materie verbunden.

Lebewesen erhalten oder erhöhen ihren Ordnungszustand durch arbeitsfähige Energie aus ihrer Umgebung, z.B. durch die Aufnahme von Nahrung. In ihrer Umgebung erzeugen sie dabei eine größere Unordnung, sie vermehren die Entropie. Das gilt analog auch für alle Ordnungszustände, die durch den Menschen geschaffen werden. Dabei sind mit Ordnungszuständen alle materiellen und energetischen Güter, wie auch immaterielle Güter und Dienstleistungen gemeint. Das Entwertungs- bzw. das Entropieprinzip und das Entwicklungsprinzip, d.h. der Aufbau von Ordnungen, sind also miteinander untrennbar verknüpft, und sie werden durch die Hauptsätze beschrieben.

Verfügbare Materie und Verfügung über arbeitsfähige Energie sind aber nur notwendige und noch keine hinreichenden Bedingungen für den Aufbau lebensnotwendiger bzw. lebensfördernder Ordnungszustände und damit für Leben überhaupt. Hinzu kommen muss noch Information oder Wissen, um dem Leben dienende Ordnungen zu schaffen. Die Nützlichkeit und den Zweck anthropogener Ordnungszustände bestimmt der Mensch. Nur Steine aufeinander zu schichten, verbraucht zwar arbeitsfähige Energie, schafft aber noch keine nützlichen, dem Leben dienenden Ordnungszustände. Zusammengefügt zu einem Haus dienen sie aber dem Leben, schützen vor Wind und Kälte und können als Schule oder Krankenhaus verwendet werden. Wissen, Information und Kreativität werden hier unter dem Begriff „Gestaltungsfähigkeit“ subsumiert. Sie ist neben der arbeitsfähigen Energie und der verfügbaren Materie die dritte notwendige Komponente zur Schaffung nützlicher, dem Leben dienender Ordnungszustände.

Die Gestaltungsfähigkeit stellt dabei eine besondere Ressource dar. Sie ist zwar zu jedem Zeitpunkt begrenzt, wird aber nicht verbraucht, sondern ist sogar vermehrbar. Wissen wächst, dies zeichnet die Ressource Gestaltungsfähigkeit gegenüber den erschöpfbaren Energie- und Rohstoffvorräten und auch dem großen, aber begrenzten Energiestrom der Sonne aus und gibt ihr eine besondere Bedeutung für die Lösung zukünftiger Probleme und die Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung.

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

Die durch Wissenszuwachs steigende Gestaltungsfähigkeit und die damit mögliche Weiterentwicklung von Technik ermöglichen es,

- lebensnotwendige Ordnungszustände mit weniger arbeitsfähiger Energie und weniger verfügbarer Materie bereitzustellen, also die Energie- und Materialintensität des Wirtschaftens zu verringern,
- die verfügbare Energiebasis durch die Nutzbarmachung neuer Energiequellen und weiterer Energievorräte zu erweitern,
- die verfügbare Materie durch die Nutzbarmachung von neuen Rohstofflagerstätten und neuen Materialien zu erhöhen,
- die Stoffentwertung verfügbarer Materie durch Recycling zu reduzieren und
- die Umweltbelastungen durch Zerstreuung von Materie und die Produktion von Stoffabfällen auch bei steigender Produktion von Gütern und Dienstleistungen zu reduzieren.

Gestaltungsfähigkeit ist somit die Basis, um die Entfaltungsspielräume für die kommende Generation zu erhalten und zu erweitern.

2.1.4 Die drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung

Viele der Fragestellungen, die heute unter dem Stichwort Nachhaltigkeit behandelt werden, sind als solche nicht neu und wurden zum Teil schon seit Jahren in verschiedenen Fachdisziplinen bearbeitet. Die große Attraktivität des Leitbildes der nachhaltigen Entwicklung liegt mit Sicherheit auch darin begründet, dass Nachhaltigkeit als integratives Konzept auf die Wechselwirkungen zwischen der Umwelt und den verschiedenen Akteuren hinweist und die Berücksichtigung dieser Wechselwirkung ausdrücklich einfordert. Diese Wechselwirkungen sind jedoch letztendlich beliebig komplex, und Bemühungen zur Reduktion dieser Komplexität haben zu der weit verbreiteten Vorstellung von den drei Säulen der Nachhaltigkeit geführt, die die ökologische, ökonomische und soziale Dimension kennzeichnen.

Diese Sicht der drei verschiedenen Dimensionen hat sich jedoch als nur bedingt hilfreich erwiesen, da sie dazu geführt hat, dass für die einzelnen Dimensionen unabhängig voneinander Nachhaltigkeitsziele vorgeschlagen wurden (was dem ursprünglichen integrativen Ansatz widerspricht), und dass - teilweise verursacht durch miteinander konkurrierende Nachhaltigkeitsziele - eine Diskussion um die „Wichtigkeit“ der einzelnen Dimensionen losgetreten wurde. Der Ansatz der drei Dimensionen bietet eine gewisse Hilfestellung bei der Strukturierung der Problemfelder, aber wie bereits zuvor erwähnt, ist es nicht möglich, konkrete Nachhaltigkeitsziele für die ökologische Dimension (z.B.: welche Arten sollten wo auf jeden Fall geschützt werden?) unabhängig von ökonomischen und sozialen Randbedingungen festzulegen.

Eine scharfe Trennung zwischen den drei Dimensionen und eine Bewertung der jeweiligen Wichtigkeit ist dementsprechend nicht möglich. Allerdings ist es ein sinnvoller Ansatz, bei der Ausgestaltung eines Zielsystems für eine nachhaltige Entwicklung zunächst von Zie-

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

len für eine ökologische Nachhaltigkeit¹ auszugehen, da die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen eine notwendige Voraussetzung für wirtschaftliche Prosperität und soziale Entfaltung ist.

2.1.5 Die wirtschaftliche Dimension nachhaltig zukunftsfähiger Entwicklung

Wirtschaft ist die Gesamtheit aller Einrichtungen und Tätigkeiten zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse an Gütern und Dienstleistungen. Wirtschaftsordnungen beschreiben das Zusammenwirken der Mitglieder der Gesellschaft und der Institutionen im ökonomischen Prozess. Sie bestimmen mittelbar auch jene Prinzipien, nach denen die Nutzung knapper Ressourcen für die Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen erfolgt. Im Sinne des ökonomischen Prinzips sollte dabei der Ressourceneinsatz minimiert werden. Wirtschaftsordnungen sollten der demokratischen Willensbildung unterliegen.

Ökonomische Effizienz beinhaltet automatisch auch effiziente Ressourcennutzung, wenn alle knappen Ressourcen - z.B. über Märkte koordiniert - in die Entscheidungen der Wirtschaftssubjekte eingehen. Unter Modellbedingungen würden in einem solchen marktwirtschaftlichen System - auch im Sinne des Leitbilds einer nachhaltig zukunftsfähigen Entwicklung - knappe Ressourcen effizient genutzt und die Wohlfahrt maximiert. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass in der Realität vielfältige Marktunvollkommenheiten auftreten (wie Marktmacht, asymmetrische Informationsverteilung oder institutionelle Hemmnisse), sodass die Realisierung der dem Markt zugeschriebenen Wirkungen mehr oder weniger stark beeinträchtigt werden kann.

Die freie Nutzung von Umweltgütern führt zu Umweltschäden, zu externen Umweltkosten, die nicht dem Verursacher sondern Dritten, z.B. der Allgemeinheit oder auch zukünftigen Generationen, angelastet werden. Eine möglichst weitgehende Internalisierung der externen Umweltkosten ist eine notwendige Bedingung, um die Nutzung knapper Umweltressourcen in das Marktgeschehen zu integrieren und sie den gleichen Bewirtschaftungsregeln zu unterwerfen wie die Nutzung anderer knapper Ressourcen. Allerdings entziehen sich eine Reihe von Regelungsbereichen aus prinzipiellen und praktischen Gründen (akute Gefahrenabwehr, Hemmnisse, Marktversagen etc.) rein marktwirtschaftlichen Optimierungsprinzipien. Maßgeblich ist der staatliche Ordnungsrahmen, der neben freiwilligen Vereinbarungen auch dirigistische Maßnahmen kennt. Dabei soll das Ordnungsrecht mit dem größtmöglichen Eingriffspotenzial als letztes Instrument greifen. Marktkonformen Lösungen ist der Vorzug zu geben.

Das Ziel einer nachhaltig zukunftsfähigen Entwicklung beinhaltet auch eine hinreichende wirtschaftliche Entwicklung, um die Grundbedürfnisse und den Wunsch nach einem

¹ Hier wird der „ökologischen Dimension“ sowohl die belebte als auch die unbelebte Natur zugerechnet, sie umfasst also auch die Verfügbarkeit von Naturreserven.

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

besseren Leben einer wachsenden Weltbevölkerung zu befriedigen. In Deutschland ist sie erforderlich, um zentrale soziale und gesellschaftliche Anliegen, wie die Finanzierung der sozialen Sicherungssysteme sowie die Bewältigung der Beschäftigungsprobleme, zu erreichen. Die Erhaltung und Sicherung der Wettbewerbs- und Marktfunktionen als Bedingung für effizientes Wirtschaften ist ein Mittel zur Erreichung gesellschaftlicher Ziele, denen die Wirtschaft zu dienen hat.

2.1.6 Anforderungen an nachhaltig zukunftsfähige Energiesysteme

Aus dem allgemeinen Verständnis von Nachhaltigkeit lässt sich die Notwendigkeit der Begrenzung von ökologischen Belastungen und von Klimaänderungen wohl begründen. Schwieriger wird es schon bei der Frage, ob denn die Nutzung erschöpfbarer Energieressourcen mit dem Leitbild einer „Nachhaltigen Entwicklung“ vereinbar ist, denn Erdöl und Erdgas oder auch Kernbrennstoffe, die heute verbraucht werden, stehen zukünftigen Generationen ja nicht mehr zur Verfügung. Hieraus wird dann abgeleitet, dass nur die Nutzung „erneuerbarer Energien“ mit dem Leitbild Nachhaltigkeit vereinbar sei.

Dies ist aus zwei Gründen nicht tragfähig. Zum einen ist auch die Nutzung erneuerbarer Energie, z.B. von solarer Energie, immer mit einer Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen, z.B. nichtenergetischen Rohstoffen und Materialien verbunden, deren Vorräte begrenzt sind. Und zum zweiten würde dies bedeuten, dass nicht-erneuerbare Ressourcen überhaupt nicht, auch nicht von den zukünftigen Generationen genutzt werden dürften. Wenn also eine unveränderte Weitergabe der nicht-erneuerbaren Ressourcenbasis offensichtlich unmöglich ist, dann kommt es im Sinne des Leitbildes einer Nachhaltigen Entwicklung darauf an, den nachkommenden Generationen eine technisch-wirtschaftlich nutzbare Ressourcenbasis zu hinterlassen, die ihnen die Befriedigung ihrer Bedürfnisse mindestens entsprechend unserem heutigen Niveau erlaubt.

Die jeweils verfügbare Energie- und Rohstoffbasis wird aber wesentlich durch die verfügbare Technik bestimmt. Energie- und Rohstofflagerstätten, die zwar in der Erdkruste vorhanden sind, aber mangels entsprechender Explorations- und Fördertechniken nicht gefunden und gefördert bzw. nicht wirtschaftlich genutzt werden können, können keinen Beitrag zur Sicherung der Lebensqualität leisten. Es ist also der Stand der Technik, der aus wertlosen Ressourcen verfügbare Ressourcen macht und ihre Quantität mitbestimmt.

Für die Nutzung begrenzter Energievorräte bedeutet dies, dass ihre Nutzung mit dem Leitbild Nachhaltigkeit so lange vereinbar ist, wie es gelingt, den nachfolgenden Generationen eine mindestens gleich große technisch-wirtschaftlich nutzbare Energiebasis verfügbar zu machen. Anzumerken ist hier, dass in der Vergangenheit – trotz steigenden Verbrauchs fossiler Energieträger – die nachgewiesenen Reserven, d.h. die technisch und ökonomisch verfügbaren Energiemengen, zugenommen haben. Darüber hinaus konnten durch technisch-wissenschaftlichen Fortschritt neue Energiebasen, wie die Kernenergie oder ein Teil der erneuerbaren Energieströme, technisch-wirtschaftlich nutzbar gemacht werden.

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

Was nun die Inanspruchnahme der Senkenfunktion der Ressource Umwelt betrifft, so ist zu beachten, dass Umweltbelastungen, auch die im Zusammenhang mit unserer heutigen Energieversorgung, vorrangig durch anthropogen hervorgerufene Stoffströme, durch Stoffzerstreuung, d.h. Stofffreisetzung in die Umwelt, verursacht werden. Es ist also nicht die Nutzung der Arbeitsfähigkeit der Energie, die die Umwelt schädigt, sondern es sind vielmehr die mit dem jeweiligen Energiesystem verbundenen stofflichen Freisetzungen, wie z.B. das Schwefeldioxid oder das Kohlendioxid bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, die zu Umweltbelastungen führen. Dies wird deutlich an der Sonnenenergie, die mit ihrer zur Verfügung gestellten Arbeitsfähigkeit - der solaren Strahlung - einerseits Hauptquelle allen Lebens auf der Erde ist, andererseits aber auch der bei weitem größte Entropiegenerator ist, weil nahezu die gesamte Energie der Sonne nach ihrer Entwertung als Wärme bei Umgebungstemperatur in den Weltraum wieder abgestrahlt wird. Da ihre Energie, die Strahlung, nicht an einen stofflichen Energieträger gebunden ist, resultieren aus der Entropieerzeugung aber keine Umweltbelastungen im heutigen Sinn. Dies schließt natürlich Stofffreisetzungen und damit verbundene Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Herstellung einer Solaranlage nicht aus.

Der hier angesprochene Sachverhalt ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil er die Möglichkeit einer Entkopplung von Energieverbrauch (Verbrauch an Arbeitsfähigkeit) und Umweltbelastung beinhaltet. Ein wachsender Verbrauch an Arbeitsfähigkeit (Energie) und sinkende Umwelt- und Klimabelastungen sind somit kein Widerspruch. Die Stofffreisetzungen nicht die Energieströme müssen begrenzt werden, will man die Umwelt schützen.

Neben der Erweiterung der verfügbaren Ressourcenbasis kommt unter dem Leitbild der „Nachhaltigen Entwicklung“ natürlich auch dem haushälterischen Umgang mit Energie, oder besser gesagt mit allen knappen Ressourcen eine besondere Bedeutung zu. Effiziente Ressourcennutzung im Zusammenhang mit der Energieversorgung betrifft dabei nicht nur die Ressource Energie, da die Bereitstellung von Energiedienstleistungen immer auch den Einsatz anderer knapper Ressourcen, wie nicht energetische Rohstoffe, Kapital, Arbeit und Umwelt erfordert. Die effiziente Nutzung aller Ressourcen, die sich aus dem Leitbild Nachhaltigkeit ableitet, entspricht aber auch dem allgemeinen ökonomischen Prinzip. Aus beiden folgt, dass ein Energiesystem oder eine Energiewandlungskette zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen dann effizienter als eine andere ist, wenn sie für die Energiedienstleistung weniger Ressourcen einschließlich der Ressource Umwelt in Anspruch nimmt.

In der Ökonomie dienen Kosten und Preise als Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen. Geringere Kosten bei gleichem Nutzen bedeuten eine ökonomisch effizientere, eine ressourcenschonendere Lösung. Die Nutzung von Kosten als Maßstab für den Verbrauch knapper Ressourcen erfordert es aber, alle Ressourceninanspruchnahmen in das Kostenkalkül mit einzubeziehen. Der gesamte Ressourceneinsatz für die Bereitstellung von Energiedienstleistungen lässt sich durch die volkswirtschaftlichen oder gesamtwirtschaftlichen Kosten erfassen. Dabei handelt es sich um die privaten Kosten, die sich in den Marktpreisen nieder-

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

schlagen und die so genannten externen Kosten. Umweltschäden, z.B. durch Schadstoffemissionen, sind typische externe Effekte, die in den privaten Kosten nicht enthalten sind. Die Internalisierung externer Kosten, d.h. die Bildung gesamtwirtschaftlicher Kosten erscheint als ein geeigneter Maßstab zur Messung der Ressourceninanspruchnahme und in diesem Sinne auch für die relative Nachhaltigkeit von Energiebereitstellungssystemen.

2.1.7 Ableitung von praktischen Orientierungs- und Handlungsregeln

Soll das Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“ nicht nur ein theoretisches Gebilde, sondern ein der praktischen Anwendung dienendes Instrument sein, muss es inhaltlich konkretisiert werden. Zur inhaltlichen Konkretisierung sind von verschiedenen Stellen Orientierungs- und Handlungsregeln vorgeschlagen worden. Diese häufig auch als Managementregeln bezeichneten Grundsätze enthalten klar definierte Ge- und Verbote. Im Hinblick auf die Energieversorgung lassen sich unter Berücksichtigung der bereits erläuterten Anforderungen an ein nachhaltig zukunftsfähiges System die folgenden Orientierungs- und Handlungsregeln ableiten:

- I. Die Nutzung erneuerbarer Ressourcen darf auf Dauer nicht größer sein als ihre Regenerationsrate.
- II. Nicht-erneuerbare Energieträger und Rohstoffe sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger wirtschaftlich nutzbarer Ersatz verfügbar gemacht wird, in Form neu erschlossener Vorräte, erneuerbarer Ressourcen oder einer höheren Produktivität der Ressourcen.
- III. Stoffeinträge in die Umwelt dürfen auf Dauer die Aufnahmekapazität bzw. Assimilationsfähigkeit der natürlichen Umwelt nicht überschreiten.
- IV. Die Gefahren und Risiken der Bereitstellung von Energiedienstleistungen für die menschliche Gesundheit müssen kleiner sein als die durch sie vermiedenen natürlichen Risiken.
- V. Die Bereitstellung von Energiedienstleistungen soll zu möglichst geringen gesamtwirtschaftlichen Kosten (private plus externe Kosten) erfolgen.

Die hier aufgeführten Managementregeln entsprechen dem traditionellen Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung, wie es bereits Anfang der Neunziger Jahre von /Pearce, Turner 1991/ aufgestellt wurde, ergänzt durch die Forderung nach dem Schutz der menschlichen Gesundheit wie sie auch die Enquete-Kommission des 13. Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Entwicklung“ aufgestellt hat. Anstelle der bei der Enquete-Kommission vorkommenden Forderung nach Begrenzung der anthropogenen Einträge bzw. Eingriffe in die Natur ist hier allerdings die präzisere Forderung der Verwendung von knappen Ressourcen als Nachhaltigkeitsindikator gesetzt worden. Dieser Ansatz schließt die „knappe Ressource“ Natur und insofern Umwelteinträge und -eingriffe sowie die Belastungs- und Assimilationsfähigkeit von natürlichen Systemen vollständig ein, hat gleichzeitig aber auch einen direkten Kostenbezug.

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

2.2 Starke und Schwache Nachhaltigkeit

In diesem Abschnitt werden die beiden unterschiedlichen theoretischen Fundierungen von Nachhaltigkeitskonzepten vorgestellt, wie sie in der wissenschaftlichen Debatte anzutreffen sind. Auf den grundlegenden Unterschied hinsichtlich der Substituierbarkeit von Natur- und Sachkapital wird dabei besonders Bezug genommen. Anschließend werden Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung des Nachhaltigkeitskonzepts, das auf eine Mischform aus beiden Ansätzen zurückgreift, beschrieben.

2.2.1 Substituierbarkeit von Natur- und Sachkapital

Die Fragen der Nachhaltigkeit sind von verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen in den letzten Jahren aufgegriffen worden. Insbesondere im Bereich der Wirtschaftswissenschaften sind in den vergangenen Jahren verschiedene Konzepte der intra- und intergenerativen Nachhaltigkeit diskutiert worden, die unterschiedliche theoretische Fundierungen und Problemsichtweisen beinhalten. Ein wesentliches Element des neoklassischen Ansatzes, der so genannten "weak sustainability", ist das Substitutionsparadigma, demgemäss die Elemente des natürlichen Kapitalstocks (erneuerbare und erschöpfliche Ressourcen, assimilative und lebenserhaltende Funktionen der Natur) weitestgehend durch künstliches Kapital (man-made capital) ersetzt werden können. Um ein intergenerativ nicht sinkendes Wohlfahrtsniveau zu gewährleisten, muss deshalb der gesamte produktive Kapitalstock über die Zeit mindestens konstant bleiben, d.h., eine Abnahme des Naturkapitals muss durch eine entsprechende Zunahme des Sachkapitalstocks kompensiert werden.

Nachhaltigkeitskonzepte, die der Schule der ökologischen Ökonomie zuzurechnen sind und als "strong sustainability" bezeichnet werden, räumen den ökologisch als notwendig angesehenen Begrenzungen Vorrang vor den Präferenzen der Wirtschaftssubjekte ein. Sie postulieren eine weitgehende Komplementarität von Natur- und Sachkapital, d.h., eine Substituierbarkeit von Naturkapital durch künstliches Kapital wird in weiten Bereichen ausgeschlossen. Als Argumente werden die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen, die nicht substituierbaren Funktionen der Natur und die Unsicherheit und Irreversibilität von Auswirkungen auf ökologische Systeme angeführt. Wenn also der natürliche Kapitalstock für den Produktionsprozess nur begrenzt substituierbar ist, folgt daraus, dass das Naturkapital erhalten werden muss (Konstanz des Naturkapitals).

Diese von einigen Vertretern der ökologischen Ökonomie propagierte strenge Nachhaltigkeit erscheint bei näherer Betrachtung ebenso wenig realitätsbezogen wie die Annahme einer unbeschränkten Substitutionsmöglichkeit der Funktionen von Umwelt und Natur. Bei den Konzepten ist aber gemein, dass die verwendeten Begriffskategorien Naturkapital und künstliches bzw. Sachkapital so abstrakt und undifferenziert sind, dass sie für eine sachgerechte Operationalisierung wenig geeignet sind. Dabei suggeriert insbesondere der Begriff des Naturkapitals eine Homogenität, die den unterschiedlichen Funktionen von Natur - ihrer Res-

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

sourcenfunktion für den Wirtschaftsprozess, ihrer Assimilations- und Depositionsfunktion, ihren lebenserhaltenden Funktionen (z.B. Atemluft) und ihren immateriellen Werten - nicht Rechnung trägt. Die Frage der Substituierbarkeit bzw. Nicht-Substituierbarkeit von Naturkapital kann sinnvoll wohl nur mit Blick auf die jeweiligen Funktionen beantwortet werden.

2.2.2 „Kritische Schwache“ Nachhaltigkeit

Ansätze zur praktischen Umsetzung der Nachhaltigkeits-Idee gehen oft von einer Mischform aus, die hier als „Kritische Schwache“ Nachhaltigkeit bezeichnen. Dabei werden für einige als komplementär angesehene lebensnotwendige Naturfunktionen kritische Bestandsgrößen des Naturkapitals gefordert. Darüber hinaus wird aber von einer Substituierbarkeit der verschiedenen Komponenten des Naturkapitals ausgegangen. Dieses Verständnis einer „Kritisch Schwachen“ Nachhaltigkeit scheint auch am ehesten geeignet zu sein, um aus dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung praktische Handlungsrichtlinien für die Bewertung eines Energiesystems ableiten zu können. Das größte Problem für die praktische Umsetzung besteht allerdings darin, die kritischen Bestandsgrößen für die als nicht-substituierbar angesehenen Naturfunktionen zu bestimmen.

Auch die TA-Akademie geht in ihrem Leitbild von einer Mischform zwischen starker und schwacher Nachhaltigkeit aus. Zwischen den Elementen der natürlichen und der künstlichen Kapitalbestände bestehen zum Teil substitutive, zum Teil komplementäre Beziehungen. Ziel ist es, die wichtigsten Nutzenfunktionen zu erhalten. Wo dies nicht durch Substitution darstellbar ist, soll die natürliche Ressource erhalten werden. Eine Reduktion des Umweltverbrauchs ist allenfalls dort erforderlich, wo es sich um essenzielle Ressourcen handelt, d.h., um solche, die nicht durch künstliches Kapital ersetzt werden können (z.B. Atemluft, Trinkwasser, produktive Böden).

Eher problematisch an dem Ansatz der TA-Akademie erscheint die Orientierung an dem gegenwärtigen Wohlfahrtsniveau als Referenzmaßstab für eine nachhaltige Entwicklung. Die Formel „nicht schlechter als bisher“ mag für entwickelte Industrieländer eine sinnvolle Ausgangsbasis sein, erscheint im Hinblick auf die ärmeren Länder dieser Welt aber als nicht brauchbar. Die Autoren rechtfertigen ihren Ansatz damit, dass sie ein regionales Nachhaltigkeitskonzept entwerfen wollten, das nicht den Anspruch erhebt, global verallgemeinerungsfähig zu sein (vgl. /HGF 1999/).

Aus dem gleichen Grund dürfte die intragenerative Gerechtigkeitsformulierung der TA-Akademie problematisch sein. Denn die Forderung „nicht schlechter als bisher“ dürfte nur zu minimalen Korrekturen am Wohlstand der Industrieländer führen und würde das Wohlstandsgefälle zu den Entwicklungsländern auf Sicht eher vergrößern.

Demgegenüber werden im HGF-Ansatz, intra- und intergenerative Gerechtigkeit als gleichrangig und zusammengehörig betrachtet. Die Mindestanforderungen eines menschenwürdigen Lebens wie Erfüllung der Grundbedürfnisse, selbständige Existenzsicherung, Einräumung von Chancengleichheit im Hinblick auf Zugang zu Bildung, Information und beruf-

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

licher Tätigkeit sowie Partizipation an gesellschaftlich relevanten Entscheidungsprozessen müssten daher zunächst für die heutigen und dann für alle weiteren Generationen erfüllt sein. Im Hinblick auf die Verteilung der Umweltnutzung innerhalb der heutigen Generation fordert der HGF-Ansatz in weitgehender Übereinstimmung mit anderen (z.B. Wuppertal-Institut, Umweltbundesamt), dass in internationalen Verhandlungen die „gleichberechtigte Nutzung“ der natürlichen Ressourcen als Ausgangspunkt zu wählen ist und dabei Aspekte der „prozeduralen Gerechtigkeit“ (faire Repräsentation unterschiedlicher Parteien, Transparenz der Verfahren) zu berücksichtigen sind. In einer weiteren Regel, die sich auf das institutionelle Arrangement bezieht, wird verlangt, dass die Staaten bei der Förderung einer global nachhaltigen Entwicklung zusammenarbeiten. Dadurch soll der unterschiedlichen Ausgangsbasis von Industrie- und Entwicklungsländern Rechnung getragen werden.

2 Diskussion von Nachhaltigkeitskonzepten

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Um Nachhaltigkeit zu einem operationalisierbaren Konzept zu machen, um also Systeme hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewerten zu können, benötigt man quantitative Informationen über das jeweilige System. Nachhaltigkeitsindikatoren sind solche quantitativen Größen. Sie komprimieren und vereinfachen komplexe Informationen und bilden somit „eine Brücke zwischen detaillierten Daten und interpretierter Information“ /CSD 1996/. Nachhaltigkeitsindikatoren sollen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit überschaubare Informationen über den Zustand und die Trends des globalen Ökosystems, der natürlichen Ressourcen, der Schadstoffbelastung und der sozio-ökonomischen Variablen liefern.

Im vorliegenden Kapitel werden Indikatoren ermittelt, mit denen Energietechniken auf Nachhaltigkeit untersucht werden können. Dazu werden zunächst allgemeine Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren für Energietechniken formuliert. Welche besonderen Anforderungen sich durch die zugrunde liegende Interpretation der Nachhaltigkeit und die Berücksichtigung von Risiken auf die Nachhaltigkeitsindikatoren ergeben, wird im Anschluss daran beschrieben. Aus bestehenden Nachhaltigkeits-Indikatorsystemen werden schließlich die für Energietechniken relevanten Wirkungsbereiche ausgewählt. Im letzten Abschnitt werden die Indikatoren, mit denen die Effekte von Energietechniken auf die Wirkungsbereiche gemessen werden, vorgestellt.

3.1 Allgemeine Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren

Die Anforderungen, denen ein Indikatorensystem genügen muss, sind z.B. im Umweltgutachten 1994 des Rats der Sachverständigen für Umweltfragen /SRU 1994/ angegeben.

International war der Pressure-State-Response-Ansatz (Belastung - Zustand - Reaktion) der OECD der Ausgangspunkt für die Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatorsystemen. Belastungsindikatoren zeigen den Druck auf ein Subsystem an (z.B. CO₂-Emissionen auf das Klimasystem, Arbeitslose auf das soziale System). Zustandsindikatoren messen den Status des Subsystems zu einem gegebenen Zeitpunkt (z.B. mittlere Temperatur der Atmosphäre, Bruttosozialprodukt). Reaktionsindikatoren zeigen an, in welchem Maße die Gesellschaft auf den Druck und den Zustand reagiert hat. Hierbei sind sowohl makroskopische Anpassungen (z.B. Gesetzgebung) als auch mikroskopische Reaktionen (z.B. Verhaltensänderungen von Individuen) eingeschlossen. Der einfache, pragmatische Pressure-State-Response-Modellrahmen reduziert allerdings die komplexen Wechselwirkungen im sozio-ökonomischen und ökologischen System erheblich, sodass inzwischen verschiedene Vorschläge zur Erweiterung und Differenzierung gemacht wurden. Den Ergebnissen einer Testphase zur Erhebung von Nachhaltigkeitsindikatoren entsprechend favorisiert die Kommission für Nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (UNCSD) inzwischen einen thematisch orientierten Ansatz an Stelle des Pressure-State-Response Ansatzes.

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Zusammenfassend lassen sich ausgehend von den zuvor genannten allgemeinen Anforderungen folgende spezielle Forderungen für Indikatoren ableiten, die zur Messung der relativen Nachhaltigkeit bei Energietechnologien geeignet sind:

- die Indikatoren sollen die Belastung messen;
- die Indikatoren müssen zielgenau/zielführend sein, d.h. aus einer Änderung des Indikatorwerts muss eindeutig erkennbar sein, ob eine Entwicklung in Richtung Nachhaltigkeit geht oder nicht;
- die Anzahl an Indikatoren muss möglichst überschaubar sein;
- der Aufwand zur Erhebung und Aktualisierung der Indikatoren muss vertretbar sein;
- die festgelegten Indikatoren müssen mit einer einheitlichen, möglichst normierten Mess- bzw. Bestimmungsmethodik ermittelbar sein;
- die Indikatoren müssen für Politik und Öffentlichkeit verständlich sein und Adressatenadäquate Verdichtung von Informationen liefern.

3.2 Behandlung der Risiken für Gesundheit und Leben

Alle menschliche Aktivitäten sind mit unbeabsichtigten Nebenwirkungen verbunden. Wirtschaftliche und soziale Entwicklung sind damit notwendigerweise mit der Akzeptanz von Risiken verbunden. Daher sind bei einer Bewertung der Energienutzung Chancen und Risiken gegeneinander abzuwägen.

Unter dem Begriff Risiko werden potenzielle Schäden verstanden, deren Eintritt möglich, aber nicht sicher ist. Um Risiken näher zu charakterisieren, sind Angaben zum Ausmaß des Schadens und zur Wahrscheinlichkeit des Schadeneintritts nötig. Ein oft verwendetes Risikomaß besteht in der multiplikativen Verknüpfung von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit. Dieser Festlegung folgt auch der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) /WBGU 1998/. Dabei nimmt er eine weitere Differenzierung der Risiken sowie zusätzlich eine Einteilung in drei Risikoklassen vor, die einen Normal-, Grenz- und Verbotsbereich markieren (vergleiche Abbildung 3-1).

Die Zuordnung von Risiken zu einem Normal-, Grenz und Verbotsbereich ist intuitiv nachvollziehbar, ebenso die damit verbundene Vorstellung, dass Risiken mit einem hohen Schadensmaß, unabhängig von ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit, ebenso wie Risiken mit kleinem Schadensausmaß aber hoher Eintrittswahrscheinlichkeiten dem Verbotsbereich zuzuordnen sind. Praktisch anwendbar ist das Risikokonzept des WBGU dennoch nicht, da es nur qualitativ veranschaulicht, eine quantitative Zuordnung von Risiken zu den drei Bereichen aber nicht erlaubt.

Wir verzichten deshalb auf eine Einführung von Risikokategorien oder eine explizite Bewertung unterschiedlicher Schadensausmaße und verwenden, wie in der Versicherungswirtschaft üblich, das Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß als Risikomaßstab. Im Rahmen des Systems von Nachhaltigkeitsindikatoren für den Energiebereich

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

werden die dem jeweiligen Energiesystem bzw. den Energiebereitstellungsketten zuzuordnenden gesundheitlichen Risiken daher über den Indikator „Verlorene Lebensjahre“ (years of life loss, YOLL) erfasst. Gemessen werden die Risiken durch Schadstoffemissionen und durch ionisierende Strahlung. Dabei wird zwischen öffentlichen und beruflichen Gesundheitsrisiken unterschieden. Letztere betreffen die Gesundheitsrisiken, die im Zusammenhang mit Berufstätigkeit stehen.

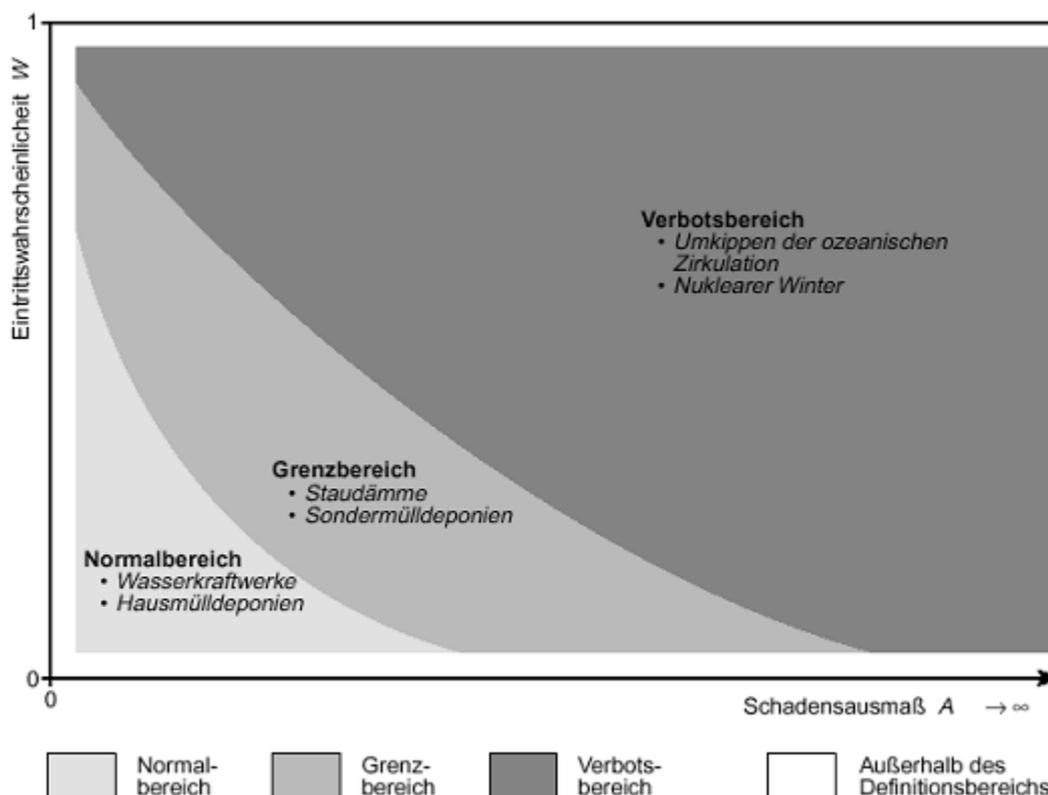


Abbildung 3-1: Normal-, Grenz- und Verbotsbereich im A-W-Diagramm; Quelle /WBGU 1998/

3.3 Auswahl der relevanten Wirkungsbereiche aus bestehenden Indikator-Systemen

Von verschiedenen Institutionen existieren Systeme von Nachhaltigkeitsindikatoren. Bei diesen sind die Indikatoren getrennt nach Wirkungsbereichen für die ökologische oder für alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit aufgeführt. Im folgenden werden die für diese Untersuchung herangezogenen Indikatorsysteme beschrieben und den von den einzelnen Institutionen vorgeschlagenen Wirkungsbereichen für die ökologische Dimension gegenübergestellt. Aus diesen Wirkungsbereichen werden diejenigen ausgewählt, die für die Beurteilung von Energietechniken relevant sind.

Die zwei wichtigsten Institutionen auf internationaler Ebene, die Indikatorsysteme verwenden, sind die Kommission für nachhaltige Entwicklung der UN /CSD 1996/ und die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung /OECD 1998/. Während

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

die CSD für alle drei Nachhaltigkeitsdimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales Indikatoren ausgearbeitet hat, konzentriert sich die OECD überwiegend auf die Ökologie. Als Modellrahmen für die Indikatorenbildung dient der Pressure-State-Response- (PSR) Ansatz.

Die Akademie für Technikfolgenabschätzung Baden-Württemberg (TA-BW) hat auf Basis des OECD-Indikatorenansatzes eine Indikatorenliste erstellt, anhand derer sie die Entwicklung in Baden-Württemberg im Hinblick auf Nachhaltigkeit untersucht /Pfister et al. 1997/, /Renn et al. 2000/.

Speziell für den Energiebereich hat die Internationale Atom-Energie-Behörde (IAEA) in Zusammenarbeit mit der International Energy Agency (IEA) ein Indikatorsystem entwickelt /IAEA, IEA 2001/. Auch hier erfolgt eine Einteilung der Indikatoren nach dem PSR-Ansatz. Das European Statistical Laboratory /ESL 2001/ beschränkt sich bei seinem Indikatorenansatz auf ökologische Belastungsgrößen.

In Tabelle 3-1 ist zusammengestellt, welche Wirkungsbereiche für die ökologische Dimension in den Indikatorlisten der CSD, OECD, TA-BW, IAEA/IEA und ESL aufgeführt sind. Die im jeweiligen Indikatorsystem behandelten Wirkungsbereiche sind dunkelgrau hinterlegt.

Für die Beurteilung von Energietechnologien sind insbesondere die Bereiche Ressourcen, Klima, Versauerung/Eutrophierung, Abfall, Fläche und Umwelttoxizität relevant. Zu berücksichtigen sind natürlich gleichfalls die Belastungen durch den Einsatz von Energietechnologien auf die Artenvielfalt, die städtische Umweltqualität, die Wasserqualität, auf Meere und Küsten und auf ländliche Gegenden. Auf eine direkte Berücksichtigung dieser Belastungen durch jeweils eigene Indikatoren wird jedoch verzichtet, da die Belastungen indirekt über die Bereiche Versauerung/Eutrophierung, Abfall und Fläche erfasst werden. Außerdem würden Indikatoren für die Artenvielfalt aufgrund der hoch-komplexen Wechselwirkungen derzeit einen nicht vertretbaren Messaufwand erforderlich machen. Der Beitrag des Energiesektors in den Bereichen Ozonschicht und Wasserressourcen wird als vernachlässigbar gering eingestuft. Biotechnologie und Fischressourcen sind Bereiche, die für Energietechniken nicht relevant sind. Auch die Berücksichtigung von Forstressourcen ist für eine Betrachtung von Energietechniken in Baden-Württemberg ebenfalls nicht relevant.

Zusätzlich zu diesen umweltbezogenen lassen sich für die Bewertung von Energietechnologien auch Indikatorbereiche angeben, die die ökonomischen und sozialen Komponenten der Nachhaltigkeit betreffen. Überprüft man die in den oben genannten Quellen aufgeführten Indikatorsysteme auf soziale und ökonomische Wirkungsbereiche, die den Anforderungen aus Abschnitt 3.1 genügen, die also insbesondere zielgenau/zielführend sind und die Belastungsindikatoren beinhalten, so erweisen sich insbesondere „Unfälle“ (IAEA/IEA) und „Energiepreise“ (OECD, IAEA/IEA) als wichtige Bewertungsgrößen. Andere in den oben genannten Quellen aufgeführte ökonomische und soziale Indikatorbereiche sind für die spezielle Situation einer Untersuchung von Energietechniken in Baden-Württemberg nicht relevant.

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Tabelle 3-1: Umweltindikatorbereiche der CSD, OECD, TA-BW, IAEA/IEA und ESL

Wirkungsbereich	CSD	OECD	TA-BW	IAEA/IEA	ESL
Ressourcen					
Klima					
Versauerung / Eutrophierung					
Abfall					
Fläche					
Ozonschicht					
Umwelttoxizität					
Wasserressourcen					
Artenvielfalt					
städtische Umweltqualität					
Wasserqualität					
Meere, Küsten					
ländliche Gegenden					
Biotechnologie					
Fischressourcen					
Forstressourcen					

Als Indikator für den Bereich „Unfälle“ führen IAEA/IEA „Unfallopfer durch Störfälle in der Brennstoffkette“ (fatalities due to accidents with breakdowns by fuel chain) an. Dem Wirkungsbereich Gesundheitsauswirkungen sind neben diesen Effekten durch Unfälle auch die Gesundheitsrisiken durch toxische Substanzen, Partikel, ionisierende Strahlung, usw. auf die menschliche Gesundheit zuzuordnen. Daraus folgt eine Einteilung des Wirkungsbereichs Gesundheitsauswirkungen in die beiden Klassen „Öffentliche Gesundheitsrisiken“ und „Berufliche Gesundheitsrisiken“.

Sowohl die OECD als auch die IAEA/IEA führen unter dem Wirkungsbereich Energiepreise nur die betriebswirtschaftlichen Kosten, also die Stromgestehungskosten als Indikator an. Für eine volkswirtschaftliche Betrachtung der Stromkosten sind neben den betriebswirtschaftlichen auch die externen Kosten zu berücksichtigen. In den nachfolgenden Analysen werden daher zusätzlich auch die externen Kosten als Aggregat der monetär quantifizierten Auswirkungen auf die genannten Wirkungsbereiche ausgewiesen. Als volkswirtschaftlich entscheidende Größe lassen sich die gesamtwirtschaftlichen Kosten als Summe aus externen und betriebswirtschaftlichen Kosten angeben. (vgl. Abschnitt 3.4.)

Die im vorangegangenen Abschnitt ausgewählten Wirkungsbereiche sind in Tabelle 3-2 zusammengetragen.

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Tabelle 3-2: Nachhaltigkeitsindikatoren für Energietechniken: Dimension und Wirkungsbereiche

Dimension	Wirkungsbereich	
ökologisch	Rohstoffinanspruchnahme	
	Klimabeeinflussung	
	Versauerung / Eutrophierung	
	Abfallaufkommen	
	Flächeninanspruchnahme	
sozial	Gesundheitsauswirkungen	Öffentliche Gesundheitsrisiken
		Berufliche Gesundheitsrisiken
ökonomisch	Kosten	Externe Kosten
		Betriebswirtschaftliche Kosten
		Gesamtwirtschaftliche Kosten

Die umweltbezogenen Wirkungsbereiche einschließlich der Rohstoffinanspruchnahme werden dabei der ökologischen Dimension zugeordnet. Gesundheitsauswirkungen werden oft ebenfalls zum ökologischen Bereich gezählt. Während der Mensch bei Belastungen in den zuvor erwähnten umweltbezogenen Bereichen jedoch nur indirekt durch eine Verschlechterung seines Lebensumfelds betroffen ist, wirken sich die (öffentlich und beruflich bedingten) Gesundheitsrisiken unmittelbar auf den Menschen aus. In dieser Untersuchung werden daher die Gesundheitsauswirkungen dem sozialen Bereich zugeordnet. Die Kosten, - externe, betriebswirtschaftliche (interne) Kosten, gesamtwirtschaftliche Kosten - werden unter der ökonomischen Dimension aufgeführt.

3.4 Ein Indikatorsystem für Energietechniken

Ein abschließender Schritt bei der Bildung eines Indikatorsystems für Energietechniken ist die Festlegung der Indikatoren für die ausgewählten Wirkungsbereiche. Wie in Abschnitt 3.2 bereits erläutert, finden dabei neben physischen auch monetäre Indikatoren Verwendung. Durch Internalisierung externer Kosten können so auch Effekte berücksichtigt werden, die sonst aus der Betrachtung ausgeklammert werden. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten entsprechen der monetär bewerteten gesamten Ressourceninanspruchnahme (ökonomische, ökologische und soziale Ressourcen) einer Volkswirtschaft. Auf welche Weise und für welche Wirkungsberei-

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

che eine Monetarisierung vorgenommen wird, ist im folgenden Teilabschnitt erläutert. Abschließend werden die Indikatoren für die einzelnen Wirkungsbereiche vorgestellt.

3.4.1 Monetarisierung

In der ökonomischen Betrachtungsweise sind die natürliche Umwelt und menschliche Gesundheit knappe Güter. Deren unerwünschte Schädigung durch anthropogene Aktivitäten ist ein Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen. Da die Nutzung von Umweltgütern, wie beispielsweise saubere Luft, in der Regel nichts kostet, werden in der alltäglichen Praxis allerdings mehr Umweltgüter nachgefragt, als dies bei korrekten Preisen der Fall wäre. Die Preise spiegeln also nicht die Knappheit der Ressource Umwelt wider, da in ihnen nicht alle umweltbeeinflussenden Effekte erfasst sind.

Sogenannte externe Effekte treten auf, wenn es zu positiven oder negativen Auswirkungen auf Individuen oder Gruppen kommt, die nicht in der jeweiligen Produktions- oder Konsumententscheidung eines Wirtschaftssubjektes berücksichtigt werden. Um zu einer optimalen Allokation knapper Ressourcen zu kommen, müssen externe Effekte internalisiert, d.h. durch geeignete Instrumente wie z.B. Steuern, Abgaben oder ähnliches im Preis berücksichtigt werden. Dazu ist es erforderlich, externe Effekte in Geldwerten auszudrücken /Krewitt, Friedrich 1998/.

Handelt es sich bei dem externen Effekt um ein am Markt gehandeltes Gut, lässt sich der Effekt durch Bestimmung des Marktpreises leicht in einen Geldwert überführen. Bei vielen Effekten - beispielsweise gesundheitlichen Beeinträchtigungen - liegt jedoch kein am Markt gehandeltes Gut vor, so dass andere Verfahren angewendet werden müssen, um externe Effekte zu monetarisieren. Methoden der monetären Bewertung von nicht am Markt gehandelten Gütern bestehen zum Beispiel in der Ermittlung von Schadenskosten oder der Bestimmung von Vermeidungs- bzw. Minderungskosten.

Die Monetarisierung mit Hilfe von Schadenskosten wird im vorliegenden Fall bei den Gesundheitsauswirkungen angewandt (vgl. /Krewitt et al. 1999/). Für die Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung und Eutrophierung / Versauerung kann der Schadenskostenansatz jedoch nicht herangezogen werden. Die Folgewirkungen des Klimawandels, die zum Teil weit in der Zukunft liegen, können nicht realistisch abgeschätzt werden, und die genauen physischen Schäden durch Eutrophierung und Versauerung sind größtenteils unbekannt. Für diese Wirkungsbereiche werden daher Vermeidungs- oder Minderungskosten anstatt der Schadenskosten zur Monetarisierung angesetzt. Damit wird angezeigt, welche Kosten zur Erreichung eines von der Gesellschaft gesetzten Minderungszieles entstehen.

Für die weiteren zuvor genannten ökologischen Wirkungsbereiche (siehe Abschnitt 3.3) können die Schäden weder eindeutig quantifiziert werden, noch existieren Minderungsziele. Bei ihnen wird daher aus praktischen Gründen auf eine Monetarisierung verzichtet. Diese Vorgehensweise hat zwei Nachteile: Sie führt zum einen dazu, dass der monetäre Wert als Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen durch die hier zu vergleichenden

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Stromerzeugungstechniken systematisch unterschätzt wird. Zum anderen werden aus methodischen Gründen Bereiche ausgeblendet, die ökologisch wichtig und damit entscheidungsrelevant erscheinen.

3.4.2 Indikatoren für den Wirkungsbereich Rohstoffinanspruchnahme

Wie in Kapitel 2, Abschnitt 2.2 erläutert, ist jede Aktivität aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik mit dem Verbrauch von Energie und Materie verbunden. Dafür stehen entsprechende energetische und sonstige (nicht-energetische) Rohstoffe zur Verfügung, deren Vorräte jedoch begrenzt und deren Vorratsbasis endlich sind. Dies schließt grundsätzlich auch die so genannten unerschöpflichen oder erneuerbaren Energiequellen ein, denn auch ihre Rohstoffbasis ist endlich. Als Vorräte werden alle mit heutiger Technik und zu wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen gewinnbaren Rohstoffe bezeichnet. Technische Weiterentwicklungen und veränderte wirtschaftliche Rahmenbedingungen verändern die Vorratslage, was in einer zeitabhängigen Analyse entsprechend Berücksichtigung finden muss.

Vorschläge, die Inanspruchnahme von Rohstoffen anhand deren Knappheit zu messen und in einem einzigen Indikator auszudrücken, finden sich in verschiedenen Literaturquellen (/Müller-Wenk 1998/, /Heijungs 1992/). Jedoch konnte sich in der Praxis bisher keiner der Vorschläge durchsetzen. Daher wird auch im folgenden von der aggregierenden Rohstoff-Indikatormethode Abstand genommen.

Zur Bildung von Indikatoren für den Wirkungsbereich Rohstoffe wird statt dessen folgendes Vorgehen angewendet: Energierohstoffe werden ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Knappheit der einzelnen Energieträger aggregiert. Dies geschieht für Kohlen, Erdgas und Erdöl auf Basis des Energieinhalts (Heizwert). Die primärenergetische Bewertung der Nutzung von Uran erfolgt entsprechend der Empfehlung der VDI-Richtlinie 4600, nukleare Brennstoffe mit einem Kraftwerksnutzungsgrad von 33% zu bewerten. Dieses Vorgehen zur Bildung eines Indikators für den Energieträgerverbrauch lehnt sich damit eng an die Definition des kumulierten Energieaufwands an. Die Messung des Indikators erfolgt in der Einheit [kWh].

Bei den sonstigen (nicht-energetischen) Rohstoffen wird keine weitere Aggregation vorgenommen. Um die Inanspruchnahme mit nur wenigen Indikatoren zu messen, ist eine Beschränkung auf die für Energietechniken wichtigsten Metallrohstoffe, Eisen- und Kupfererz sowie Bauxit, sinnvoll. Der Rohstoffaufwand wird für diese drei Metallrohstoffe separat in der Einheit [kg] erhoben.

Die monetäre Erfassung der Inanspruchnahme erschöpflicher Rohstoffe erfolgt durch die Marktpreise und findet somit Eingang in die Ermittlung der Stromgestehungskosten. Andererseits werden die limitierten Rohstoffvorräte durch den Rohstoffeinsatz zunehmend aufgezehrt. Diese stehen damit zukünftigen Generationen nicht mehr zur Verfügung und müssen später substituiert werden. Damit fallen zwar nicht heute, aber in Zukunft zusätzliche Kosten für den Rohstoffersatz an, die bei der Monetarisierung der Rohstoffinanspruchnahme zum

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

gegenwärtigen Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. Nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnisse sind diese externen Kosten der Rohstoffinanspruchnahme allerdings relativ klein im Vergleich zu den aktuellen Rohstoffpreisen /Friedrich 1993/, /Sauner 2001/. Sie bleiben daher in den nachfolgenden Analysen unberücksichtigt.

3.4.3 Indikatoren für den Wirkungsbereich Klimabeeinflussung

Der anthropogen verursachte Treibhauseffekt wird für eine Erwärmung der Erdatmosphäre verantwortlich gemacht. Die emittierten treibhausrelevanten Luftschadstoffe ändern die Absorption von Wärmestrahlung durch die Erdatmosphäre und bewirken so eine Änderung der Gleichgewichtstemperatur der Erdatmosphäre. Heute wird nach einer Untersuchung des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) davon ausgegangen, dass es zwischen 1990 und 2100 zu einem Anstieg der globalen Temperatur um 1,4°C bis 5,8°C und zu einem Anstieg des Meeresspiegels um ca. 10-90 cm kommen wird. Nach dem heutigen Kenntnisstand wird davon ausgegangen, dass verschiedene physikalische und biologische Systeme durch Klimaveränderungen bereits beeinflusst werden. Zu diesen Veränderungen gehören das Abtauen von Gletschern in vielen Weltregionen, das Auftauen von Dauerfrostböden (Permafrost), sowie späteres Zufrieren und früheres Aufbrechen von Flussvereisungen. Diese Veränderung des Klimas hat bereits vielfältige Wirkungen auf biologische Systeme. Ferner wurde die Zunahme von Extremereignissen wie Stürmen, Starkniederschläge sowie Hitze- und Dürreperioden beobachtet. Befürchtet werden weitere gravierende Schädigungen ökologischer und vom Menschen geschaffener Systeme als Folge des Klimawandels. Diese bedrohen mit hoher oder sehr hoher Wahrscheinlichkeit die natürlichen Lebensgrundlagen und die menschliche Gesundheit in einer bisher nicht erlebten Art und Weise, wie entsprechenden Szenarioanalysen zu entnehmen ist /IPCC, 2001/.

Die Berechnung eines geeigneten Indikators für den Wirkungsbereich Klimabeeinflussung, der den nachfolgenden Analysen zugrunde gelegt wird, folgt der vom IPCC gewählten Methodik. Dabei wird der Einfluss verschiedener Spurengase auf das Klima erfasst.

Mit Hilfe von Modellrechnungen bestimmt /IPCC 1995/ den aus der Emission eines Spurengases resultierenden potenziellen Einfluss auf den Treibhauseffekt. Dabei wird die Änderung der Absorptionsfähigkeit der Atmosphäre, die aus der Anreicherung eines Spurengases in der Atmosphäre resultiert, über einen vorgegebenen Zeitraum ermittelt und in Relation zu dem entsprechenden Wert für die gleiche Menge der Referenzsubstanz Kohlendioxid (CO₂) gesetzt. Da die einzelnen treibhausrelevanten Spurengase unterschiedliche Verweilzeiten in der Atmosphäre aufweisen, hängt ihr im Modell berechneter spezifischer Beitrag zum Treibhauseffekt vom Betrachtungszeitraum ab, für den das Treibhauspotenzial ermittelt wird.

Als Resultat weist /IPCC 1995/ für 25 verschiedene Stoffe relative Treibhauspotenziale aus. Die Treibhauspotenziale der vier für Energietechniken besonders relevanten Treibhausgase sind für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren in Tabelle 3-3 aufgeführt. Die

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Charakterisierungsfaktoren weiterer treibhausaktiver Gase sind der Übersichtlichkeit halber in der Tabelle nicht enthalten. Gleichwohl wird ihr Beitrag zum Indikatorwert ermittelt.

Tabelle 3-3: Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung des Treibhauseffekts /IPCC 1995/

		Charakterisierungsfaktor -bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren- [kg CO ₂ -Äquivalente / kg Schadstoff]
Kohlendioxid	CO ₂	1 ^(a)
Methan	CH ₄	21
Distickstoffdioxid	N ₂ O	310
Schwefelhexafluorid	SF ₆	23.900

^(a) Referenzsubstanz

Der physische Indikator, mit dem die Belastung im Bereich Klima gemessen wird, wird als mit dem Charakterisierungsfaktor gewichtete Summe über alle Treibhausgase gebildet. Die Einheit ist [kg CO₂-Äquivalente].

Zur Monetarisierung werden die Vermeidungskosten herangezogen, die sich aus Modellrechnungen unter den heutigen Randbedingungen in Deutschland für das Minderungsziel der Bundesregierung ergeben, einer Reduzierung der CO₂-Emissionen um 25% im Jahr 2005 gegenüber dem Jahr 1990. Die Multiplikation des physischen Indikatorwerts für das Treibhauspotenzial mit den so ermittelten marginalen Vermeidungskosten (19 €/t CO₂ /Krewitt 2001/) liefert den monetären Indikatorwert. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die gleichen Minderungskosten bezogen auf das jeweilige Treibhauspotenzial für alle Treibhausgase gelten.

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

3.4.4 Indikatoren für den Wirkungsbereich Versauerung / Eutrophierung

Versauerung ist ein Oberbegriff für die Schadwirkung durch versauernd wirkende Stoffe wie beispielsweise Schwefel- und Stickoxide und deren Umwandlungsprodukte. Durch Säureeintrag und eine damit verbundene pH-Wert-Absenkung können sowohl terrestrische als auch aquatische Ökosysteme in Mitleidenschaft gezogen werden. Zur Quantifizierung der Versauerung von Böden und Gewässern schlägt /Heijungs 1992/ die Berechnung eines Versauerungspotenzials vor. Ausgangspunkt zur Ermittlung des relativen Versauerungspotenzials ist die Überlegung, dass die entscheidende Stoffeigenschaft bei der Abschätzung des Beitrags eines Schadstoffs zur Versauerung von Gewässern und Böden seine Fähigkeit ist, Protonen abzuspalten. Die Charakterisierungsfaktoren für versauernd wirkende Stoffe werden ermittelt, indem das chemische Potenzial, H^+ -Ionen zu bilden, in Relation zum H^+ -Bildungspotenzial der Referenzsubstanz Schwefeldioxid (SO_2) gesetzt wird.

In Tabelle 3-4 sind die Charakterisierungsfaktoren aufgeführt, die zur Bildung des Indikators für Versauerung herangezogen werden. Der Indikator für Versauerung ergibt sich als mit dem Charakterisierungsfaktor gewichtete Summe über die Masse der versauernden Gase.

Tabelle 3-4: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Versauerung

		Charakterisierungsfaktor [kg SO_2 -Äquivalente / kg Schadstoff]
Schwefeldioxid	SO_x als SO_2	1 ^(a)
Stickoxid	NO_x als NO_2	0,7
Ammoniak	NH_3	1,88
Chlorwasserstoff	HCl	0,88
Fluorwasserstoff	HF	1,6
Schwefelwasserstoff	H_2S	1,88 ^(b)

^(a) Referenzsubstanz, ^(b) Berechnung nach der in /HEIJUNGS 1992/ angegebenen Berechnungsvorschrift

Der Effekt der Eutrophierung umfasst den Eintrag von Nährstoffen in Böden und Gewässer. Bei aquatischen Ökosystemen hat ein Nährstoffeintrag zunächst einen Anstieg der Biomasseproduktion zur Folge. Wenn aufgrund des hohen Sauerstoffbedarfs für die im Wasser enthaltene Biomasse Sauerstoffknappheit entsteht, kann dies zu einem Umkippen des Gewässers führen. Bei terrestrischen Ökosystemen führt ein verstärkter Nährstoffeintrag zu einer Verschiebung des Artengleichgewichts, die im Allgemeinen mit einer Verminderung der Artenvielfalt verbunden ist.

Um den Beitrag zur Eutrophierung von Böden und Gewässern zu quantifizieren, schlägt /Heijungs 1992/ die Berechnung eines Eutrophierungspotenzials vor. Die relativen Charakterisierungsfaktoren der einzelnen Stoffe werden errechnet, indem deren Fähigkeit zur

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Biomasseproduktion beizutragen, auf die Fähigkeit zu der Biomassebildung von Phosphat (PO_4^{3-}) bezogen wird. Dabei wird eine durchschnittliche Zusammensetzung der Biomasse von $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$ zugrunde gelegt. In Tabelle 3-5 sind die Charakterisierungsfaktoren für wichtige Stoffe dargestellt.

Tabelle 3-5: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Eutrophierung

		Charakterisierungsfaktor [kg PO_4^{3-} Äquivalente / kg Schadstoff]
Phosphat	PO_4^{3-}	1 ^(a)
Phosphor, unspezifiziert	P	3,06
Stickoxide	NO_x als NO_2	0,13
Ammoniak	NH_3	0,35
Stickstoff unspezifiziert	N	0,42

^(a) Referenzsubstanz

Die Monetarisierung der Auswirkungen auf den Bereich Versauerung / Eutrophierung erfolgt über die marginalen Minderungskosten in Höhe von 1480 €/t SO_2 und 1530 €/t PO_4^{3-} /Amann et al. 1998/. Diese Zahlen basieren auf dem Ziel der Europäischen Kommission die Flächen, in denen kritische Lasten überschritten sind, bis zum Jahr 2010 um 50% zu reduzieren /EC 1997/. Der Beitrag der anderen versauernden und eutrophierenden Substanzen wird vernachlässigt.

3.4.5 Indikatoren für den Wirkungsbereich Abfall

Als Abfall wird der zu beseitigende Anteil eines betrachteten Stoffstromes ausgewiesen. Der verwertbare Anteil wird nicht als Abfall betrachtet. Als verwertbar werden der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes entsprechend diejenigen Stoffe verstanden, „die als Reststoffe an weiterverarbeitende Betriebe oder den Altstoffhandel abgegeben und damit in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden“ /Statistisches Bundesamt 1997a/.

Abfallarten lassen sich aufgrund ihrer Entstehung, Lagerung und Entsorgung sehr genau unterteilen und überwachen. Für die nachfolgenden Analysen bietet sich eine Differenzierung nach Abfallklassen in Anlehnung an die Systematik des Statistischen Bundesamtes an. Dabei wird nach nicht-radioaktiven und radioaktiven Abfallarten unterschieden. Der nicht-radioaktive Abfall wird in Haus- und Produktionsabfall, Bauabfall und Sonderabfall eingeteilt. Die Einheit für die Indikatoren für nicht-radioaktiven Abfall ist [kg]. Da die Mengen, die bei der Förderung im untertägigen Bergbau als naturbelassene Stoffe anfallen und nicht wieder untertägig verfüllt werden, aus abfallrechtlichen Gründen nicht in der Abfallstatistik erfasst werden, wird das Abraummateriale aus dem Steinkohlenbergbau auch in den nachfolgen-

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

den Analysen nicht als Abfall behandelt. Der radioaktive Abfall wird in nicht-wärmeentwickelnden und wärmeentwickelnden Abfall untergliedert und in [m³] erhoben.

Die Emissionen bei der Abfallentsorgung werden quantifiziert und unter den Wirkungsbereichen Klima, Versauerung / Eutrophierung erfasst. Die Kosten der Abfallentsorgung sind in den betriebswirtschaftlichen Kosten der Stromerzeugung enthalten.

3.4.6 Indikatoren für den Wirkungsbereich Flächeninanspruchnahme

Die Inanspruchnahme von Flächen für eine bestimmte Nutzung, z.B. zum Zwecke der Stromerzeugung, entzieht diesen wichtige andere Funktionen. So können beispielsweise folgende Wirkungen des Bodens durch eine Flächeninanspruchnahme negativ beeinflusst werden /Müller-Wenk 1998a/:

- Erosionswiderstand
- Filter- und Pufferwirkung
- Transformation (Abbau organischer Stoffe)
- Beeinflussung des Grundwassers
- Abflussregulation
- Immissionsschutz
- biologische Stabilität
- biotischer Ertrag.

Insbesondere die Bedrohung der Artenvielfalt durch Flächennutzung und Zerschneidung von wichtigen Ökosystemen wird als eines der drängendsten Umweltprobleme angesehen /Müller-Wenk 1998a/.

Will man die Auswirkungen der Flächeninanspruchnahme ermitteln, sind neben Daten zu der räumlichen Ausdehnung der genutzten Fläche auch Angaben zur Dauer und zur Art der Flächennutzung nötig. Um sowohl der großen Vielfalt verschiedener Bodenqualitäten gerecht zu werden als auch den Aufwand zur Datenerhebung in Grenzen zu halten und um eine möglichst kleine Zahl an aussagefähigen Indikatoren zu erhalten, wird im Allgemeinen eine Einteilung des Bodens in mehrere Klassen vorgenommen. Diese Klassen sollen den ökologischen Wert einer Fläche grob abbilden.

In /Giegrich, Sturm 1999/ wird eine Einteilung des Bodens in die sieben in Tabelle 3-6 aufgeführten Natürlichkeitsklassen vorgenommen, die die Intensität des menschlichen Eingriffs in den Naturraum einer Fläche darstellen. So kann z.B. bei der Flächeninanspruchnahme durch ein Kraftwerk die durch Gebäude eingenommene Fläche auf dem Kraftwerksgelände der Natürlichkeitsklasse VII zugeordnet werden. Der Eingriff in die restliche, nicht-versiegelte Fläche auf dem Kraftwerksgelände – die Wiese um die Gebäude – ist geringer, diese Fläche kann daher nach Angaben von /Schulze 2000/ der Klasse IV zugewiesen. Diese Einteilung in sieben Natürlichkeitsklassen wird auch in den Ökobilanzen des Umweltbundesamtes verwendet /Umweltbundesamt 1999/.

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Tabelle 3-6: Einteilung in Natürlichkeitsklassen

Natürlichkeits- klasse	Natürlichkeitsgrad	Nutzungsform
I	natürlich	unbeeinflusstes Ökosystem
II	naturnah	naturnahe forstwirtschaftliche oder ähnliche Nutzung
III	bedingt naturnah	bedingt naturnahe land- und forstwirtschaftliche oder ähnliche Nutzung
IV	halbnatürlich	halbnatürliche land- und forstwirtschaftliche oder ähnliche Nutzung
V	bedingt naturfern	bedingt naturferne land- und forstwirtschaftliche oder ähnliche Nutzung
VI	naturfern	naturferne land- und forstwirtschaftliche oder ähnliche Nutzung
VII	künstlich	langfristig versiegelte oder beeinträchtigte Flächen

Der vorgestellte, in methodischer Hinsicht überzeugende, Ansatz ist für die nachfolgenden Analysen allerdings nicht brauchbar, da eine Zuordnung von Natürlichkeitsklassen und konkreten Standorten für verschiedene Stromerzeugungstechniken in der Praxis an Quantifizierungsproblemen scheitert. Der physische Indikatorwert für die Flächeninanspruchnahme wird daher in dieser Untersuchung nicht ermittelt.

Die Kosten der Flächeninanspruchnahme ohne Berücksichtigung eventuell auftretender externer Effekte sind in den betriebswirtschaftlichen Kosten der Stromerzeugung enthalten.

3.4.7 Indikatoren für den Wirkungsbereich Gesundheitsauswirkungen

Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, wird bei Gesundheitsauswirkungen zwischen öffentlichen und beruflichen Gesundheitsrisiken unterschieden. Die Auswirkungen lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen, in tödliche und in nicht-tödliche Gesundheitsrisiken.

Unter dem Begriff Mortalität werden die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zusammengefasst, die eine Änderung der Lebenserwartung in einem Bevölkerungskollektiv zur Folge haben. Als physischer Indikator für tödliche Gesundheitsrisiken wird daher die in einem Bevölkerungskollektiv verursachte Änderung der Lebenszeit verwendet. Diese lässt sich in verlorenen Lebensjahren in der Einheit [years of life loss], abgekürzt [YOLL], angeben (vgl. Abschnitt 3.2).

Zusätzlich zu einer Verkürzung der Lebensdauer (Gesundheitsauswirkung Mortalität) existieren auch eine Vielzahl von unterschiedlichen nicht-tödlichen Gesundheitsrisiken (Gesundheitsauswirkung Morbidität). Das Auftreten einer Krankheit ist mit einer Beeinträchtigung der Lebensqualität verbunden, die je nach Krankheitsbild unterschiedlich ausfallen

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

kann. Zwar existieren Vorschläge, unterschiedliche Krankheitszustände gewichtet zu aggregieren und Morbidität mit einer einzigen Wirkungsgröße zu messen (siehe z.B. /Krewitt 1996/). Da diese Vorgehensweisen jedoch nicht allgemein akzeptiert sind und ohne Aggregation Morbidität mit einer sehr großen Zahl an Indikatoren zu messen wäre, nämlich für jedes unterschiedliche Krankheitsbild mit einem eigenen Indikator, wird in dieser Untersuchung auf physische Indikatoren zur Charakterisierung der Gesundheitsauswirkungen durch Morbidität verzichtet.

Bei der Bildung eines monetären Indikators für Gesundheitsauswirkungen werden jedoch sowohl Mortalität als auch Morbidität, also tödliche und nicht-tödliche Gesundheitsrisiken, berücksichtigt.

Öffentliche Gesundheitsschäden

Im Gegensatz zu den im nächsten Unterabschnitt beschriebenen beruflichen Gesundheitsschäden werden unter dem Begriff öffentliche Gesundheitsschäden diejenigen Auswirkungen verstanden, die in der gesamten Bevölkerung auftreten. Der betrachtete Personenkreis ist also nicht auf die Personen beschränkt, die beruflich mit der Stromerzeugung beschäftigt sind.

Öffentliche Gesundheitsschäden werden vor allem durch die Schadstoffbelastung der Luft verursacht. Die Abgabe von Luftschadstoffen führt zu einer Änderung der Schadstoffkonzentration in der Atmosphäre. Die daraus resultierende Änderung der Exposition der Bevölkerung durch Luftschadstoffe hat unterschiedliche Auswirkungen zur Folge. Bei der Ermittlung der verlorenen Lebenserwartung werden 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 und tödliche Krebserkrankungen durch Abbau von stratosphärischem Ozon und durch kanzerogen wirkende Schadstoffe (weiterführende Erläuterungen dazu, vgl.: /Krewitt 1996/, /Marheineke et al. 2001/).

Bei der Bildung des monetären Indikators für öffentliche Gesundheitsrisiken werden neben der Mortalität auch die Morbidität, also nicht-tödliche Gesundheitsschäden, berücksichtigt. Für die Analyse werden die folgenden Wirkungspfade betrachtet: nicht-tödliche Gesundheitsbelastungen durch Primär- und Sekundärpartikel, durch Schwefeloxide und die Bildung von bodennahem Ozon.

Eine Monetarisierung der öffentlichen Gesundheitsauswirkungen erfolgt über die Methode der Quantifizierung von Schadenskosten (vgl. Abschnitt 3.4.1).

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Berufliche Gesundheitsschäden

Unter dem Begriff berufliche Gesundheitsschäden werden die durch Berufskrankheiten und Arbeitsunfälle hervorgerufenen negativen Auswirkungen auf die Gesundheit derjenigen Personen verstanden, die beruflich mit der Stromerzeugung beschäftigt sind. Der physische Indikator wird ausgehend von Angaben in /Krewitt 1996/ erhoben, wobei die dort entnommenen Werte auf den dieser Analyse zugrunde liegenden Nutzungsgrad der verschiedenen Stromerzeugungstechniken skaliert werden

3.4.8 Indikatoren für den Wirkungsbereich Gesamtwirtschaftliche Kosten

Die Stromgestehungskosten sind im Allgemeinen rein betriebswirtschaftliche Kosten. Eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung der Kosten der Stromerzeugung schließt die Inanspruchnahme aller knappen Ressourcen, die einer Gesellschaft zur Verfügung stehen, ein. Erst auf dieser Grundlage ist eine vereinheitlichende Bewertung aller Effekte und eine Aussage hinsichtlich der relativen Nachhaltigkeit von verschiedenen Stromerzeugungstechniken oder Energiewandlungsketten möglich. Dazu sind zusätzlich zu den betriebswirtschaftlichen die externen Kosten zu berücksichtigen, die aus Effekten resultieren, die in der betriebswirtschaftlichen Kostenermittlung keine Berücksichtigung finden (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die in den nachfolgenden Analysen aufgeführten externen Kosten beziffern lediglich Risiken für die menschliche Gesundheit und ökologische Folgewirkungen durch die Emission von Treibhausgasen sowie durch versauernde und eutrophierende Gase. Andere Auswirkungen können aus methodischen Gründen derzeit noch nicht mit hinreichender Genauigkeit quantifiziert werden. Tendenziell werden die externen Kosten daher in den Analysen unterschätzt.

In Tabelle 3-7 sind die Indikatoren für alle Wirkungsbereiche, die in den nachfolgenden Analysen erfasst werden, als Übersicht zusammengestellt.

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

Tabelle 3-7: Indikatorenkatalog für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energietechnologien

Dimension	Wirkungsbereiche	Indikator	Einheit je Energieeinheit
ökologisch	Rohstoff- Inanspruchnahme	erschöpfbare Energieträger	kWh
		Aufwendungen an Kupfererz	kg
		Aufwendungen an Bauxit	kg
		Aufwendungen an Eisenerz	kg
	Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äquivalente
	Versauerung / Eutrophierung	Versauerungspotenzial	kg SO ₂ -Äquivalente
		Eutrophierungspotenzial	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalente
	Abfall	nicht-radioaktiver Haus- und Produktionsabfall	kg
		nicht-radioaktiver Bauabfall	kg
		nicht-radioaktiver Sonderabfall	kg
		rad. wärmeentwickelnder Abfall	m ³
rad. nicht-wärmeentwickelnder Abfall		m ³	
sozial	Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	YOLL
		berufliche Gesundheitsrisiken	YOLL
ökonomisch	Kosten	externe Kosten	€
		betriebswirtschaftliche Kosten	€
		gesamtwirtschaftliche Kosten	€

3 Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energietechniken

4 Quantifizierung von Nachhaltigkeitsindikatorwerten mit der Lebenszyklusanalyse

Für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energietechnologien sind Indikatorwerte über den gesamten Lebensweg des jeweiligen Stromerzeugungssystems zu quantifizieren. Neben der direkten Umweltbelastung bei der Energiewandlung sind auch die vor- und nachgelagerten Prozessstufen wie Bau der Infrastruktur, Brennstoffgewinnung, Transport und Entsorgung zu berücksichtigen. Da bei Technologien wie der Photovoltaik oder der Wasserkraft der Prozess der Stromerzeugung praktisch emissionsfrei ist, aber zum Teil signifikante Umweltbelastungen beim Bau der Anlage entstehen können, ist eine Methodik zur Ermittlung von Indikatorwerten, die den gesamten Lebensweg umfassen, gerade für die Bewertung von Energietechniken von besonderer Bedeutung. Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) stellt eine solche Methodik dar. Im deutschen Sprachgebrauch wird dafür auch häufig der Begriff „Ökobilanz“ verwendet.

In diesem Kapitel wird zunächst das allgemeine Vorgehen bei der Ausführung einer Lebenszyklusanalyse beschrieben. Anschließend wird die am IER entwickelte spezielle Methodik der Lebenszyklusanalyse, die Hybrid-Bilanzierung, vorgestellt. Es folgt eine Beschreibung der Quantifizierung der einzelnen Nachhaltigkeitsindikatoren im Rahmen dieses Projekts.

4.1 LCA gemäß ISO 14040 ff.

Mit den ISO-Normen 14040 - 14043 zur Lebenszyklusanalyse existiert ein international standardisiertes Verfahren zur Erfassung von umweltrelevanten Belastungen über den gesamten Lebensweg. Zusätzlich zu den ISO-Normen haben Veröffentlichungen von der Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) die Methodik der Lebenszyklusanalyse stark beeinflusst.

Mit Hilfe der Lebenszyklusanalyse ist es möglich, die für die Erbringung von Dienstleistungen oder die Herstellung von Produkten verursachten Rohstoffentnahmen, Stoff- und Energieflüsse abzubilden. Ziel der auf Basis einer LCA gewonnenen Informationen ist nach /Owens 1999/

- die Quantifizierung der Material- und Energieeffizienz eines Systems,
- die Identifikation von Verbesserungsmöglichkeiten,
- das Aufdecken von versteckten oder unbeachteten Bereichen im Lebensweg,
- Hilfe bei umweltpolitischen Entscheidungsprozessen.

Eine Lebenszyklusanalyse ist nach ISO 14040 in die folgenden vier Schritte untergliedert: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung.

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

geordnet (Klassifizierung). Eine Sachbilanzgröße kann dabei durchaus mehreren Wirkungskategorien zugeordnet werden. Mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren werden anschließend die einzelnen Sachbilanzgrößen innerhalb einer Wirkungskategorie zu einem Wirkungsindikator aggregiert (Charakterisierung). Das Ergebnis der Wirkungsabschätzung, eine Liste von Werten für die einzelnen Wirkungsindikatoren, ist aufgrund der Aggregation und der Zuordnung zu den Umweltwirkungen einer Interpretation direkter zugänglich.

Im Anschluss an die Schritte Klassifizierung und Charakterisierung, die in ISO 14042 als verbindlich vorgeschrieben sind, können noch weitere wahlweise Schritte (Normierung, Ordnung, Gewichtung) vorgenommen werden. Im Rahmen der Normierung bezieht man die Wirkungsindikatorenergebnisse auf bestimmte Referenzwerte. Diese können z.B. von der Gesellschaft vorgegebene Umweltziele sein. Daran kann sich die Bildung einer Rangordnung der Wirkungskategorien (Ordnung) und die Zusammenfassung von Wirkungsindikatorenergebnissen über Wirkungskategorien hinweg (Gewichtung) anschließen.

4.1.4 Auswertung

Im letzten Schritt der Lebenszyklusanalyse, der Auswertung, werden die in den vorangegangenen Schritten erarbeiteten Resultate im Hinblick auf das zugrunde gelegte Ziel ausgewertet. Es können beispielsweise verschiedene Produkte und Dienstleistungen miteinander verglichen oder ergebnisrelevante Parameter und Schwachstellen identifiziert werden. Eine weitere Möglichkeit der Auswertung besteht darin, Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um die Änderung von Randbedingungen und deren Einfluss auf das Gesamtergebnis der Bilanzierung aufzuzeigen. Den Abschluss der Auswertung bilden Schlussfolgerungen, in denen die Resultate der vorangegangenen Schritte zusammengefasst und interpretiert werden.

4.2 Auswahl von Nachhaltigkeitsindikatoren für LCA

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung zeigt eine Lebenszyklusanalyse durch Indikatoren an, welche Belastungen der Ökosysteme über den gesamten Lebensweg, bezogen auf einen bestimmten Wirkungsbereich, durch eine Aktivität auftreten. Die in einer Lebenszyklusanalyse zu betrachtenden Wirkungsbereiche, die z.B. in /SETAC 1999/ und in /UBA 1999/ vorgeschlagen werden, sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt.

Die Wirkungsindikatoren für die einzelnen Bereiche lehnen sich meist an /Heijungs 1992/, bzw. /Umweltbundesamt 1995/ an. Sie beschreiben ein aus Stoffeigenschaften abgeleitetes Schadenspotenzial. Die oft in Lebenszyklusanalysen verwendeten Wirkungskategorien sind Treibhauspotenzial, Ozonabbau- und -bildungspotenzial, Humantoxizitätspotenzial, Ökotoxizität, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial. Bei den Wirkungsbereichen Fläche und Rohstoffe existiert noch kein allgemein akzeptierter Rahmen für die Bildung eines Wirkungspotenzials. Bei ihnen wird zur Bewertung der Umweltinanspruchnahme auf verschiedene Sachbilanzgrößen zurückgegriffen.

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 4-1: Durch LCA zu erfassende Kategorien und Wirkungsbereiche nach /SETAC 1999/ und /UBA 1999/

Kategorie	SETAC	UBA
Ressourcen	- Abiotische Ressourcen - Biotische Ressourcen	Ressourcenbeanspruchung
Fläche	Flächenverbrauch	Naturraumbeanspruchung
Klima	Treibhauseffekt	Treibhauseffekt
Ozonschicht	Abbau stratosphärischen Ozons	Stratosphärischer Ozonabbau
Humantoxizität	Humantoxizität	Direkte Gesundheitsschädigung
Ökotoxizität		Direkte Schädigung von Ökosystemen
Bildung von Photooxidantien	Bildung von Photooxidantien	Photochemische Oxidantienbildung/ Sommersmog
Versauerung	Versauerung	Versauerung
Eutrophierung	Eutrophierung	- Aquatische Eutrophierung - Terrestrische Eutrophierung
Geruch	Geruch	
Lärm	Lärm	
Strahlung	Strahlung	
Unfälle	Unfälle	

Die LCA-Wirkungsindikatoren stimmen also mit den in dieser Studie verwendeten Nachhaltigkeitsindikatoren für die Bereiche Klimabeeinflussung, Versauerung und Eutrophierung überein. Bei der Quantifizierung von Indikatorwerten für diese Wirkungsbereiche kann also auf die Verfahren der Lebenszyklusanalyse zurückgegriffen werden.

In Tabelle 4-1 ist Humantoxizität explizit als Wirkungskategorie ausgewiesen. Normalerweise wird als Wirkungsindikator für Humantoxizität ein Schadenspotenzial verwendet. Wirkliche Schäden an der menschlichen Gesundheit werden damit nicht erhoben. Mit dem am IER vorhandenen Instrumentarium (EcoSense /EC 1999/) ist es möglich, die Humantoxizität stärker schadensorientiert abzubilden, als dies mit den Schadenspotenzialen der Fall ist. Dieses Vorgehen macht zum einen die Ergebnisse einer Interpretation direkter zugänglich, zum anderen besteht die Möglichkeit, die Schäden in monetären Einheiten auszudrücken. Aus diesem Grund wird für die Ermittlung von Indikatoren im Bereich der menschlichen Gesundheit das in Kapitel 3 näher beschriebene Verfahren gewählt.

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

4.3 Hybrid-Bilanzierung

Im Allgemeinen wird das Instrument der Prozesskettenanalyse zur Durchführung der Sachbilanz verwendet (vgl. Abbildung 3). Mit ihr lässt sich das reale Prozessnetzwerk einer Nutzenbereitstellung prinzipiell beliebig genau beschreiben. In der Regel 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. Neben der generellen Schwierigkeit, diese Abbruchkriterien konsistent 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. Input-Output-Tabellen werden im Rahmen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung erstellt /Statistisches Bundesamt 1997b/ und liefern die wertmäßige Verflechtung einzelner Sektoren einer Volkswirtschaft. Sie geben an, wie viele Güter – ausgedrückt in Geldeinheiten – ein Wirtschaftssektor von einem anderen Sektor beziehen muss, um selbst ein Gut produzieren zu können. Aus der Input-Output-Tabelle kann durch Matrixalgebra die kumulierte wertbezogene Vorleistungsstruktur für den Output eines bestimmten Sektors abgeleitet werden. Wird diese Vorleistungsstruktur mit den sektorspezifischen Stoffströmen /Statistisches Bundesamt 1998/ verknüpft, also z.B. dem Energieverbrauch, den Emissionen und dem Abfallaufkommen, so errechnen sich die kumulierten Stoffströme, die mit der Herstellung des Outputs in diesem Sektor verbunden sind. Durch die Verwendung von Input-Output-Tabellen können 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 Abbildung 4-2 dargestellt. (Eine detaillierte Beschreibung der Hybridbilanzierung findet sich in /Marheineke et al. 1999/ und /Marheineke et al. 2001/.)

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

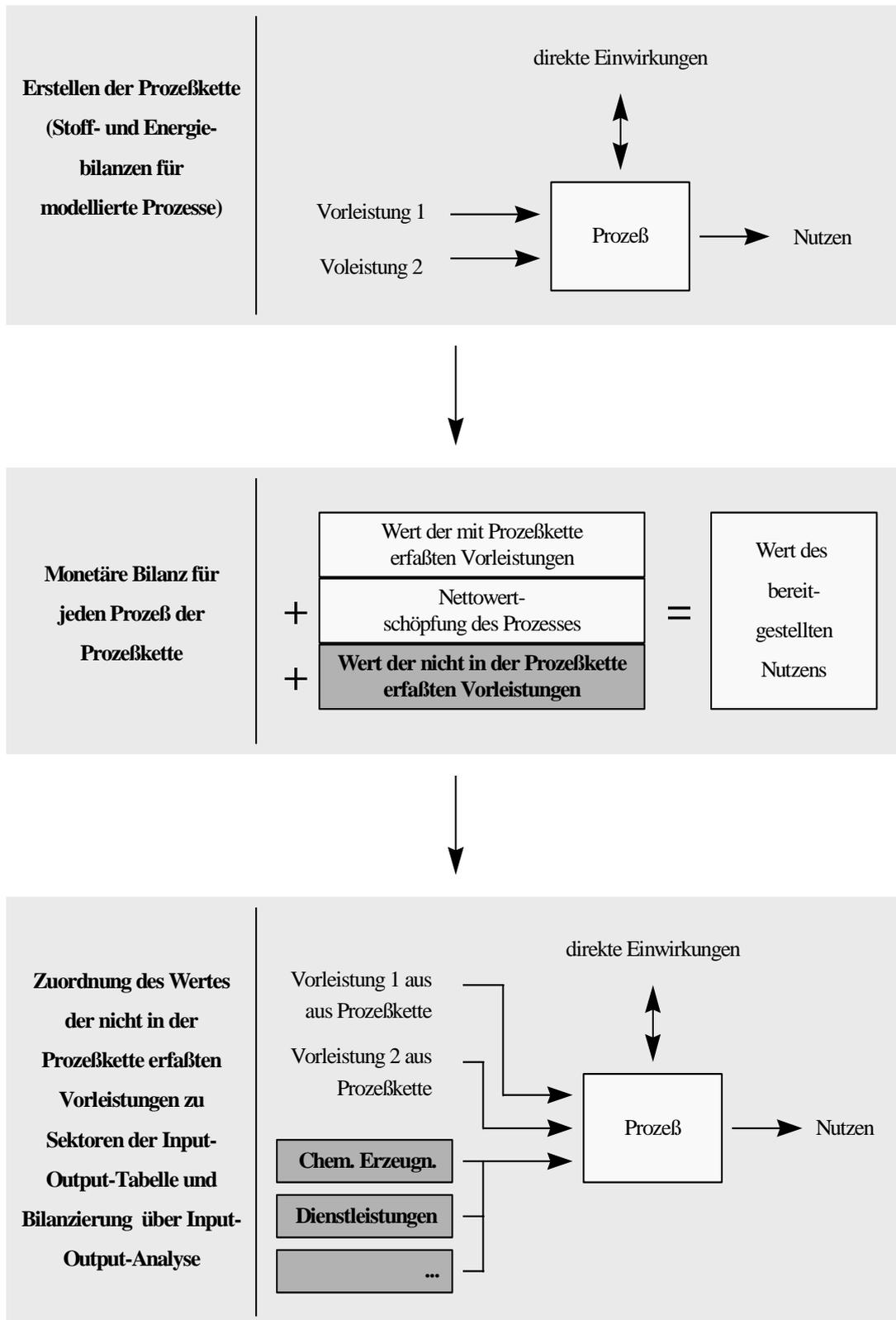


Abbildung 4-2: Hybrid-Ansatz zur Ermittlung der Sachbilanz

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

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

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.

Ein weiterer Vorteil der Hybrid-Bilanzierung liegt in der Möglichkeit, Indikatorwerte für jeden Prozess direkt mittels der Input-Output-Analyse abzuschätzen. Dadurch, dass im Rahmen der Hybridbilanzierung ein Prozess einem volkswirtschaftlichen Sektor zugeordnet und der Prozessoutput mit einem Preis versehen wird, kann der Wert für eine bestimmte Sachbilanzgröße allein mit Hilfe der Input-Output-Tabelle ermittelt werden.

4.4 Methode zur Quantifizierung der Indikatorwerte

Im vorliegenden Unterabschnitt wird beschrieben, wie die in Kapitel 3 ausgewählten Nachhaltigkeitsindikatoren über den gesamten Lebensweg erhoben werden.

4.4.1 Software BALANCE und Basisdaten

Die im Rahmen dieses Projekts eingesetzte Software *BALANCE* zur Hybridbilanzierung wurde von /Marheineke et al. 2001/ entwickelt. Sie enthält u.a. eine Abbildung der Input-Output-Tabelle Deutschlands für das Jahr 1993 /Statistisches Bundesamt 1997b/. Die sektorspezifischen Stoffströme für Energieträger, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, NO_x, SO_x, Methan, NMVOC, Distickstoffoxid und Partikel beziehen sich ebenfalls auf das Jahr 1993 und stammen aus /Statistisches Bundesamt 1998/.

Zusätzlich zu den Input-Output-Daten existiert für das Programm eine umfangreiche Liste von Basisdaten und Lebenszyklusuntersuchungen, die auf am IER bearbeiteten Projekten und Dissertationen /Marheineke et al. 2001/, /Heinz 2001/, /Hartmann 2001/, /Marheineke et al. 2000/ und den Ökoinventaren für Energiesysteme der ETH Zürich /Frischknecht et al. 1996/ aufbauen. Diese Daten umfassen neben unterschiedlichen Strom- und Wärmebereitstellungstechniken auch Transportprozesse, Bereitstellung von Materialien (Metalle, Beton, Kunststoffe, ...), Entsorgungsprozesse, Bereitstellung von Energieträgern usw.

Für vorgelagerte Ketten im Lebensweg einer Energietechnologie, die sich nicht in Deutschland oder Europa befinden, werden die sektorspezifischen Stoffströme der Input-Output-Analyse und die spezifischen Stoffströme der Basisdaten an die landestypischen Wer-

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

te angepasst. Dies geschieht durch Multiplikation der spezifischen Stoffströme mit einem Faktor, der den Quotienten aus Primärenergieverbrauch und Bruttosozialprodukt des jeweiligen Landes bezogen auf den deutschen Quotienten aus Primärenergieverbrauch und Bruttosozialprodukt darstellt. (vgl. dazu auch: /Marheineke et al. 2001/)

Da die Input-Output-Daten und teilweise auch die Basisdaten nicht den aktuellen technologischen Stand widerspiegeln, werden sie erforderlichenfalls auf den heutigen Stand fortgeschrieben. (vgl.dazu auch: Kapitel 5, Abschnitt 5.3)

4.4.2 Recycling von Reststoffen im Lebensweg

Lebenszyklusbilanzen sind mit dem Problem konfrontiert, dass bei vielen Prozessen innerhalb des Lebenswegs Reststoffe anfallen, die weiterverwendet werden. Solchen verwendbaren Reststoffen (Primärmetall ersetzender Schrott; Abfall, der in einer Müllverbrennungsanlage zur Stromerzeugung dient) lassen sich Gutschriften zuordnen. Im Rahmen dieses Projekts wird allerdings auf das Gewähren von Gutschriften für weiterverwendbare Reststoffe verzichtet. Die Umweltbelastungen durch den Recyclingprozess werden jedoch dem aus dem Reststoff hergestellten Sekundärprodukt angelastet. Eine Ausnahme von dieser Regel stellt die Entsorgung des in Kraftwerksgebäuden eingesetzten Betons dar. Aus Beton-Bauschutt werden durch Zerkleinerung, Sieben und Sortieren in großem Umfang wieder Baugrundstoffe hergestellt. Da hier die Betonverwertung hauptsächlich aus Gründen der Abfallvermeidung - und nicht der Gewinnung von Sekundärprodukten - vorgenommen wird, wird der Energieaufwand für den Verwertungsprozess dem Kraftwerksrückbau angelastet.

4.4.3 Indikatorwerte für Ressourcen, Klima, Versauerung, Eutrophierung und öffentliche Gesundheit

Auf Basis der in *BALANCE* verwendeten Sachbilanzgrößen (Input-Output-Daten, Basisdaten) können Indikatorwerte für Rohstoffinanspruchnahme, Klimabeeinflussung, Versauerung, und Eutrophierung über die Hybridbilanzierung ermittelt werden. Einzelne Sachbilanzgrößen werden über die in Kapitel 3, Abschnitt 3.5 vorgestellten Charakterisierungsfaktoren zu Wirkungsindikatoren zusammengefasst. Externe Kosten werden über Minderungs- oder Schadenskosten in Geldeinheiten ermittelt.

4.4.4 Indikatorwerte für Abfallaufkommen

Bei der Quantifizierung der Indikatorwerte für den Wirkungsbereich Abfallaufkommen kann nicht auf die Basisdaten von *BALANCE* zurückgegriffen werden. Für die vorliegende Untersuchung wird das Abfallaufkommen daher, soweit möglich, direkt ermittelt. Für vorgelagerte Ketten erfolgt eine Abschätzung der Abfallströme mittels der Input-Output-Tabellen.

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

Sektorspezifische Angaben zum nicht-radioaktiven Gesamtabfallaufkommen, also Abfall zur Beseitigung und Abfall zur Verwertung, sind für das Jahr 1995 mit folgender Einteilung der Abfallkategorien /Statistisches Bundesamt 1999/ entnommen:

- A: Abfallaufkommen insgesamt (einschl. bauschuttähnlicher Massenabfälle),
- B: Nicht-überwachungsbedürftiger Abfall des Produzierenden Gewerbes,
- C: Abfallaufkommen insgesamt (ohne bauschuttähnlicher Massenabfälle),
- D: Besonders überwachungsbedürftiger Abfall des Produzierenden Gewerbes.

Daraus berechnet sich das Gesamtabfallaufkommen (Abfall zur Verwertung und Abfall zur Beseitigung) differenziert nach:

- Haus- und Produktionsabfall (= C-D),
- Bauabfall (= A-C),
- Sonderabfall (= D).

Um nur den Abfall zur Beseitigung zu bilanzieren, werden Beseitigungsquoten, differenziert nach Abfalltyp für die einzelnen Wirtschaftsbereiche nach /Statistisches Bundesamt 1997a/ (mit Daten aus dem Jahr 1993) abgeleitet und mit dem Gesamtabfallaufkommen multipliziert.

Der Abfall durch die Stromerzeugung aus Kernreaktoren wird dem Sektor 3 (Elektrizität, Dampf, Warmwasser) der Input-Output-Tabelle zugeordnet. Die Menge an radioaktivem Abfall, der im Mittel pro Jahr durch die deutschen Kernreaktoren erzeugt wird, basiert auf Angaben des /Infokreis Kernenergie 2000/. Es wird bei der zukünftigen Kernenergienutzung in Deutschland von der direkten Endlagerung abgebrannter Kernbrennstoffe ausgegangen. Auf die Behandlung der (zeitlich verzögert zurückfließenden) Mengen von noch vorhandenem zu beseitigenden oder wiederverwendbaren radioaktiven Stoffen aus der Wiederaufarbeitung, die bis zum Jahre 2005 beendet wird, wird verzichtet.

Der jährliche Anfall an radioaktivem Abfall aus Medizin und Forschung wird aus /Bundesamt für Strahlenschutz 1999/ ermittelt und den Sektoren 53 (Dienstleistung der Wissenschaft ...) und 56 (Dienstleistungen der Gebietskörperschaften) zugeordnet.

4.4.5 Indikatorwerte für Gesundheitsauswirkungen und Indikatorwerte für Kosten

Die Indikatorwerte für Gesundheitsauswirkungen (öffentliche und berufliche Gesundheitsrisiken) und die Indikatorwerte für Kosten (direkte Kosten bzw. Stromgestehungskosten, indirekte Kosten bzw. externe Kosten) werden nicht über die LCA ermittelt, sondern aus Literaturquellen /Krewitt 1996/, /Krewitt 2001/ entnommen oder über eigene Berechnungen erhoben.

4 Werte für Nachhaltigkeitsindikatoren mit der Lebenszyklusanalyse

5 Stromerzeugungstechnologien

Das vorliegende Kapitel behandelt exemplarisch einige Stromerzeugungstechnologien, für die die zuvor beschriebenen Lebenszyklusanalysen durchgeführt und die Werte für die angegebenen Indikatoren berechnet werden. Es werden sowohl Kraftwerke, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen als auch weiter entwickelte Anlagen betrachtet.

5.1 Referenzanlagen nach dem heutigen Stand der Technik

Energieträger, die in Baden-Württemberg im größeren Umfang zur Stromerzeugung eingesetzt werden, sind Steinkohle, Erdgas und Kernbrennstoffe. Regenerative Energiequellen, die eine besondere Bedeutung haben oder erlangen können, sind Biomasse, Wind- und Wasserkraft sowie Solarstrahlung. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf diese Energieträger und -quellen und beschreiben deren Nutzungstechniken.

5.1.1 Steinkohlekraftwerke

Die Stromerzeugung aus Steinkohle erfolgt heute vorwiegend in Kraftwerken mit Staubfeuerung. Als Referenztechnik wird ein Steinkohle-Dampfkraftwerk mit einer Leistung von 700 MW_{el} und einem Jahresnutzungsgrad von 45% betrachtet. Die Lebensdauer wird mit 35 Jahren angenommen.

Steinkohlekraftwerke können sowohl im Mittellast- als auch im Grundlastbereich eingesetzt werden. Obwohl bei Steinkohle-Kondensationskraftwerken heute der Einsatz im Mittellastbereich überwiegt, wird für die hiesige Untersuchung zum Zweck der Vergleichbarkeit mit anderen Stromerzeugungstechniken der Einsatz im Grundlastbereich mit 7500 Stunden pro Jahr unterstellt.

Wie bei erdgasbefeuerten Kraftwerken existieren auch für die Steinkohleverstromung Kraftwerkskonzepte, die zur Wirkungsgradsteigerung den kombinierten Einsatz von Gas- und Dampfturbinen vorsehen. Bei diesen sogenannten Kohle-Kombikraftwerken existieren mehrere Kraftwerkskonzepte, mit denen höchste Wirkungsgrade erreicht werden können (siehe z.B. /BMWi 1999/): Kohlekombikraftwerk (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle), Kohlekombikraftwerk mit Druckwirbelschichtfeuerung (DWSF) der zweiten Generation, Kohlekombikraftwerk mit Druckkohlenstaubfeuerung (DKSF).

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde neben dem herkömmlichen Kohle-Dampfkraftwerk ein IGCC-Kombikraftwerk untersucht. Mit der Technik der integrierten Kohlevergasung sind nicht nur höhere Wirkungsgrade als bei herkömmlichen Kohlekraftwerken, sondern auch Emissionswerte erreichbar, die deutlich unter den gesetzlichen Vorschriften liegen. Die IGCC-Kraftwerkstechnik befindet sich im Entwicklungsstadium. Auf der Grundlage der bereits errichteten und betriebenen Prototypen werden gegenwärtig fortge-

5 Stromerzeugungstechnologien

schrittene und höhereffiziente Kraftwerke dieses Typs entwickelt. Das als Referenzkraftwerk betrachtete IGCC-Kraftwerk hat eine Leistung von 823 MW_{el} und einen Jahresnutzungsgrad nach dem heutigen Stand der Technik von 47% /BMWi 1999/. Für die Lebensdauer und die Volllaststundenzahl des Kraftwerks werden ebenfalls 35 Jahre und 7500 Stunden pro Jahr angenommen.

5.1.2 Erdgas-GuD-Kraftwerk

Bei erdgasbefeuerten Kraftwerken ist der kombinierte Einsatz von Dampf- und Gasturbinen Stand der Technik. Reine Gasturbinen- oder gasbefeuerte Dampfkraftwerke haben aufgrund ihres relativ niedrigen Wirkungsgrades nur noch eine geringe Bedeutung für die Stromerzeugung. Als Referenzkraftwerk wird ein Erdgas-Kombikraftwerk mit abhitzebefeuertem Kessel (Gas- und Dampfturbinen- (GuD-) Kraftwerk) mit einer Leistung von 777,5 MW_{el} und einem Jahresnutzungsgrad von 57,5% nach dem heutigen Stand der Technik betrachtet. Für die Lebensdauer und die Volllaststundenzahl werden wie bei den Steinkohlekraftwerken 35 Jahre und 7500 Stunden pro Jahr unterstellt.

Für das zur Verstromung eingesetzte Erdgas wird der deutsche Erdgasmix angesetzt. Demnach stammen 21% des in Deutschland verfügbaren Erdgasaufkommens aus heimischer Förderung. Die Importe setzen sich folgendermaßen zusammen: Niederland 21%, Russland 35%, Norwegen 20% und Dänemark und Großbritannien zusammen 5% /Ruhrgas 2001/.

5.1.3 Biomasse-KWK-Anlage und Biomassezuführung im Steinkohlekraftwerk

Als Referenzkraftwerke für die Verstromung von biogenen Festbrennstoffen werden zwei Kraftwerkstypen betrachtet: Ein biomassebefeuertes Gegendruck-Dampfkraftwerk mit einer zirkulierenden Wirbelschicht für den Betrieb in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und die Zuführung von Biomasse in einem Steinkohlenkraftwerk mit Kondensationsbetrieb.

Für die KWK-Anlage wird eine elektrische Leistung von 20 MW gewählt. Dies entspricht der maximalen Leistung eines Biomassekraftwerkes, für das nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) die Stromeinspeisungsvergütung gewährt wird. Der elektrische Nutzungsgrad der KWK-Anlage beträgt 24%, die Stromkennzahl (der Quotient aus produziertem Strom und ausgekoppelter Wärme) 0,38. Für die Lebensdauer und die Volllaststunden werden wegen der Vergleichbarkeit mit anderen Kraftwerken gleichfalls 35 Jahre und 7500 Stunden pro Jahr angenommen.

Für das KWK-Kraftwerk folgt aus der Annahme der Benutzungsstunden, dass sich in unmittelbarer Umgebung zu dem Kraftwerk ein Verbraucher befindet, der die erzeugte Wärme ganzjährig abnimmt.

Die KWK-Anlage verfügt über einen Gewebe- oder Elektrofilter zur Reduktion der Staubemissionen. Für die Einhaltung der Schwefel- und Stickoxidgrenzwerte sind keine Ab-

5 Stromerzeugungstechnologien

gasreinigungssysteme erforderlich, da die geringen Verbrennungstemperaturen im Wirbelbett zu niedrigen Stickoxid-Emissionen führen und die Schwefeloxidemissionen durch Primärmaßnahmen (dem Wirbelbett beigefügter Kalkstein zur Schwefeleinbindung) reduziert werden. Die Aufteilung der durch den Kraftwerksbetrieb und den Brennstoffeinsatz verursachten Umweltbelastungen auf die zwei Outputs Strom und Wärme wird nach dem Exergiegehalt der erzeugten Einheiten Strom und Wärme vorgenommen. In den Analysen werden allerdings nur die an dieser Stelle interessierenden Ergebnisse für die Stromerzeugung betrachtet.

Bei dem Steinkohlekraftwerk mit Biomasse-Zuführung wird im folgenden nur auf den zugeführten Anteil Bezug genommen. Der Leistungsanteil der zugeführten Biomasse beträgt 30 MW_{el}. Der Stromerzeugungs-Wirkungsgrad der zugeführten Biomasse liegt aufgrund des niedrigeren Energiegehaltes von Biomasse im Vergleich zu Steinkohle unter dem des Steinkohlekraftwerkes und beträgt 42%. Das Kraftwerk ist aufgrund des Steinkohleeinsatzes mit einer aufwendigen Rauchgasreinigungsanlage ausgestattet, bestehend aus einem Elektro-Staubfilter, einer katalytischen Rauchgasentstickungsanlage und einer nassen Rauchgaswäsche zur Entschwefelung. Die Abgasreinigung wird auch bei Biomassezuführung betrieben, so dass die gleichen spezifischen Emissionen wie im reinen Steinkohlenbetrieb anfallen. Die Lebensdauer und die Volllastbenutzungstunden betragen wie beim Steinkohlekraftwerk 35 Jahre und 7500 Stunden pro Jahr.

Als Bioenergieträger wird ausschließlich Waldrestholz betrachtet. Dem Waldrestholz werden aufkommensseitig keine Kosten und Umweltbelastungen angerechnet. Allerdings fallen diesbezügliche Aufwendungen für das Sammeln und den Transport der Biomasse zum Kraftwerk an.

5.1.4 Photovoltaik-Kraftwerk

Als Referenzanlage für die Nutzung von Solarstrahlung zur Stromgewinnung wird eine auf einem Hausdach angebrachte 5 kW-Photovoltaikanlage mit multi-kristallinen Silizium-Solarzellen gewählt. Die Lebensdauer der Anlage wird mit 25 Jahre abgeschätzt. Für die Volllaststundenzahl wird ein typischer Wert von 880 Stunden pro Jahr angesetzt. Der Modulwirkungsgrad beträgt 14,7%. Mit einem Wechselrichterwirkungsgrad von 92% ergibt sich ein Systemwirkungsgrad von 13,5%.

5.1.5 Windkraftanlagen

Als Referenz-Windkraftwerk wird ein auf dem Festland installierter Windkonverter mit Stahlrohrturm und Getriebe und einer Leistung von 1,5 MW gewählt. Die Bilanz bezieht sich auf zwei verschiedene Standorte mit über das Jahr gemittelten Windgeschwindigkeiten von 5,5 m/s bzw. 4,5 m/s in 10 m Höhe. Die Lebensdauer der Anlage wird mit 20 Jahren und die technische Verfügbarkeit mit 97 % abgeschätzt. Die Volllaststundenzahl beträgt bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5,5 m/s 2450 h/a und bei 4,5 m/s 1680 h/a.

5 Stromerzeugungstechnologien

5.1.6 Wasserkraftanlage

Die Bilanz für die Stromerzeugung aus Wasserkraft bezieht sich auf eine Laufwasser-Anlage mit einer Leistung von 3,1 MW. Bei dieser Anlage ist das Krafthaus in ein bereits bestehendes Wehr eingebaut. Es wird davon ausgegangen, dass das Wehr vorrangig aus Gründen der Schifffahrt und des Hochwasserschutzes errichtet wurde. In die Bilanz gehen daher Bau, Rückbau und Betrieb des Wasserkraftwerks, nicht hingegen Bau, Rückbau und Betrieb des Wehres ein. Es wird eine jährliche Volllaststundenzahl von 5100 h und eine Lebensdauer der Anlage von 60 Jahren angenommen. Die technische Verfügbarkeit wird mit 99% abgeschätzt.

5.1.7 Kernkraftwerk

Die zuletzt in Deutschland in Betrieb genommenen Kernkraftwerke sind Druckwasserreaktoren (DWR). Sie zeichnen sich durch eine hohe Lastwechselfähigkeit aus und sind daher nicht nur für die Grundlastversorgung nutzbar, sondern können auch in Tageszyklen gefahren oder zur automatischen Frequenzunterstützung genutzt werden. Für die Analysen wird ein DWR mit einer Leistung von 1375 MW_{el} betrachtet. Zur direkten Vergleichbarkeit mit den anderen Kraftwerken wird eine Volllaststundenzahl von 7500 Stunden pro Jahr angesetzt. Die Lebensdauer des Kraftwerks beträgt 40 Jahre. Unter heutigen Betriebsbedingungen erreicht ein solcher DWR bei einem Brennstoff-Anreicherungsgrad von 4% U-235 einen Kernbrennstoff-Abbrand von 50.000 MWd/t Uran.

Für die Brennstoffversorgung werden Uranimporte, die aus Gründen der Datenverfügbarkeit auf zwei ausgewählte Regionen, Nordamerika und Afrika, beschränkt sind, bilanziert. Als Entsorgungsweg für die abgebrannten Brennelemente wird ausschließlich die direkte Endlagerung betrachtet.

5.1.8 Übersicht der wesentlichen Parameter für die Referenzkraftwerke

Tabelle 5-1 enthält eine Übersicht der erläuterten technischen Parameter sowie der Stromgestehungskosten /IER, 2002/ für die ausgewählten Referenzkraftwerke.

5 Stromerzeugungstechnologien

Tabelle 5-1: Übersicht der wesentlichen Parameter der ausgewählten Referenzkraftwerke

Energieträger	Kraftwerkstyp	Leistung [MW _{el}]	Lebens- dauer [a]	Volllast- stunden [h/a]	Nutzungs- grad [%]	Strom- gestehungs- kosten [€-ct/kWh]
Steinkohle	Kondensations-KW	700	35	7.500	45,0	2,9
	IGCC-KW	823	35	7.500	47,0	4,1
Erdgas	GuD	777,5	35	7.500	57,5	3,2
Biomasse	KWK-Anlage	20	35	7.500	24,0	6,8
	Zufuierung	30 ^a	35	7.500	42,0	
Solarstrahlung	multi-Si	0,005	25	880	13,5	78,0
Windkraft	4,5 m/s	1,5	20	1.680		8,0
	5,5 m/s	1,5	20	2.450		5,5
Wasserkraft	Laufwasser	3,1	20	5.100		6,9
Kernenergie	DWR	1375	40	7.500	33,0	2,8

^aLeistungsanteil der zugefeuerten Biomasse

5.2 Backup-Aufwendungen

Das Angebot an Solarstrahlung und Windkraft ist Schwankungen unterworfen, wodurch Stromerzeugungssysteme, die diese Primärenergiequellen nutzen, häufig nicht entsprechend der Nachfrage nach Nutzenergie gefahren werden können. Sie benötigen Speicher oder andere Kraftwerke, um die Differenz zwischen der aktuellen Nachfrage und dem aktuellen Nutzenergieangebot, das aus regenerativen Energiequellen gedeckt werden kann, auszugleichen.

Werden Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien in einen bestehenden konventionellen Kraftwerkspark integriert, führt dies dazu, dass die zuvor genutzten konventionellen Kraftwerke nicht nur höhere Reservekapazitäten vorhalten müssen, sondern dass der Betrieb dieser Kraftwerke beispielsweise zusätzliche An- und Abfahrvorgänge und längere Betriebszeiträume im Teillastbereich zur Folge hat. Die durch die Bereitstellung der notwendigen Re-

5 Stromerzeugungstechnologien

serveleistung und durch ungünstigere Betriebsbedingungen verursachten zusätzlichen Erfordernisse bei den konventionellen Kraftwerken werden als Backup-Aufwendungen bezeichnet, die den Systemen zur Nutzung regenerativer Anlagen anzulasten sind. Beispielsweise ergeben sich für die Photovoltaik bei einem Durchdringungsanteil von 5% im deutschen Kraftwerkspark zusätzliche Aufwendungen in der Größenordnung von ebenfalls 5%. Bei Wind- und Wasserkraft liegen die Backup-Aufwendungen in der gleichen Größenordnung wie die unmittelbaren Aufwendungen. (Weitergehende Ausführungen zu den erforderlichen Backup-Aufwendungen bei der Stromerzeugung aus Solarstrahlung, Wasser- und Windenergie, vgl.: /Marheineke et al. 2001/ und /Hartmann 2001/.)

In der vorliegenden Studie wird allerdings aus methodischen Gründen auf eine Berücksichtigung der Backup-Aufwendungen für die Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen verzichtet. Denn eine Bestimmung der Aufwendungen, die den notwendigen Ausgleich für die schwankenden Angebotscharakteristiken von Wind- und Solarenergiequellen berücksichtigt, kann nur vor dem Hintergrund eines bestimmten Versorgungssystems erfolgen. Die Berücksichtigung von Backup-Aufwendungen würde die ermittelten Indikatorwerte damit einer ganz bestimmten Versorgungsstruktur zuordnen. Eine derartige Betrachtung des gesamten Energiesystems würde jedoch dem hier vorliegenden Untersuchungsrahmen nicht gerecht.

5.3 Lebenszyklen zukünftiger Technologien

In eine längerfristige Beurteilungsperspektive, wie sie mit der Ermittlung von Nachhaltigkeitsindikatoren gegeben ist, müssen auch zeitabhängige Änderungen einfließen. In diesem Abschnitt werden erwartete Weiterentwicklungen der Kraftwerkstechnik und Veränderungen des Produktionssystems, die sich auf die Lebenszyklusanalysen auswirken, beschrieben.

5.3.1 Weiterentwicklung der Kraftwerkstechniken

Steinkohlekraftwerke

Ein wichtiges Ziel bei der Weiterentwicklung der Steinkohle-Kraftwerkstechniken besteht in der Verbesserung der elektrischen Wirkungsgrade. Zur Erreichung dieses Ziels werden zwei Wege beschritten: Zum einen wird der thermodynamisch erreichbare Wirkungsgrad durch eine Vergrößerung des nutzbaren Temperaturgefälles gesteigert; zum anderen wird versucht, den realen Kreisprozess dem idealen Carnot-Kreisprozess durch geeignete Maßnahmen anzunähern. Durch eine Anhebung der Dampfparameter, den Einsatz von neuen hochwarmfeste Werkstoffen und die Verwendung innovativer Regelungstechnik sind für ein Steinkohle-Dampfkraftwerk in Zukunft Wirkungsgrade über 50% zu erwarten. Das Potenzial beim Wirkungsgrad von Kombikraftwerken mit integrierter Vergasung nach dem Jahr 2010 reicht bis ca. 55% /BMWi 1999/. Auf Basis dieser Angaben und eigener Abschätzungen werden für die

5 Stromerzeugungstechnologien

im Jahre 2010 und 2020 zu erwartenden Wirkungsgrade der beiden Steinkohle-Kraftwerkstypen die in Tabelle 5-2 gezeigten Werte abgeschätzt.

Erdgas-GuD-Kraftwerk

Bei Erdgas-GuD-Kraftwerken ist eine Steigerung des Wirkungsgrades von derzeit 57,5% auf 62,0% zu erwarten. Die Steigerung wird insbesondere durch höhere Turbineneintrittstemperaturen erreicht, die aufgrund von Fortschritten im Turbinenbau möglich werden (siehe Tabelle 5-2).

Biomasse-Kraftwerk

Die Weiterentwicklung von Kraft-Wärme-gekoppelten Biomassekraftwerken ist durch zwei Tendenzen gekennzeichnet: durch die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades und durch die Erhöhung der Stromkennzahl wird die Stromerzeugung je Primärenergieeinheit zunehmen. Es wird damit ein Anstieg des elektrischen Wirkungsgrades von derzeit 24% auf 30% sowie der Stromkennzahl von heute 0,38 auf 0,51 abgeschätzt (siehe Tabelle 5-2).

Bei der Verstromung von Biomasse durch Zufeuerung in einem konventionellen Steinkohlekraftwerk ist ebenfalls mit steigenden Wirkungsgraden zu rechnen. Allerdings ist im Vergleich zu Steinkohle-Dampfkraftwerken mit einem durch den Biomasse-Brennstoff verursachten Abschlag im Wirkungsgrad zu rechnen.

Photovoltaik-Kraftwerk

Lebenszyklusuntersuchungen zur Stromerzeugung in Solarzellen werden durch den Energieverbrauch bei der Herstellung der Solarmodule dominiert, wobei wiederum ein großer Teil dieses Energiebedarfs auf die Verwendung des hochreinen Siliziums entfällt. Damit hat neben der Entwicklung des Modulwirkungsgrades auch die Entwicklung des Siliziumbedarfs bei der Wafer-Herstellung einen großen Einfluss auf die Bilanzergebnisse zukünftiger Solarkraftwerke.

Der Siliziumbedarf für die Herstellung von herkömmlichen PV-Modulen hängt vom Verlust beim Gießen der multi-kristallinen Silizium-Blöcke, vom Verlust beim Sägen der Wafer aus dem Silizium-Block und von der Dicke der Wafer ab. /Lauinger et al. 2000/ nehmen an, dass durch Senken der Wafer-Dicke von derzeit 330 μm auf 200 μm (mittelfristig) bzw. auf 100 μm (langfristig) und durch Fortschritte beim Gießen und Sägen, der Siliziumbedarf auf 60% (mittelfristig) bzw. auf 35% (langfristig) des heutigen Siliziumbedarfs zur Modul-Herstellung sinkt. Diese Abnahme des Siliziumbedarfs wird auch den nachfolgenden Bilanzen zugrunde gelegt, wobei „mittelfristig“ mit 2010 und „langfristig“ mit 2020 identifiziert wird.

5 Stromerzeugungstechnologien

Die Angaben zu zukünftigen Wirkungsgraden von Solarmodulen streuen stark. Während /Maycock 2000/ im Jahr 2010 von einem Wirkungsgrad multi-kristalliner PV-Module von 20% ausgeht, liegen die Schätzungen von /Willeke 2001/ für das Jahr 2010 zwischen 13 und 14%. /Alsema 2000/ nimmt für die Wirkungsgrade von Modulen aus multi-kristallinem Silizium für 2010 15% und für 2020 20% an, bei einem momentanen (2000) Wirkungsgrad von 13 %. Mittelfristig sehen /Lauinger et al. 2000/ einen Wirkungsgrad von 15,5% und langfristig von 16,5% für multi-kristalline PV-Module. Einen Wirkungsgrad von 17% im Jahr 2010 hält /Woditsch 2000/ für eine recht konservative Annahme. Auf Basis dieser Angaben und unter der Annahme eines konstanten Wechselrichterwirkungsgrads von 92% werden den Bilanzen zukünftiger PV-Anlagen die in Tabelle 5-2 angegebenen Systemwirkungsgrade (Modulwirkungsgrad mal Wechselrichterwirkungsgrad) zugrundegelegt.

Erwartete elektrische Wirkungsgrade weiterentwickelter Kraftwerke

Tabelle 5-2: Erwartete elektrische Wirkungsgrade weiterentwickelter Kraftwerke

Energieträger	Kraftwerkstyp	Elektrischer Wirkungsgrad [%]		
		2000	2010	2020
Steinkohle	Kondensations-KW	45	47	49
	ICCG-KW	47	50	52
Erdgas	GuD	57,5	58,5	62,0
Biomasse	KWK-Anlage	24	27	30
	Zuheizung	42	44	46
Solarstrahlung	multi-Si	13,5	14,3	15,2

5.3.2 Änderungen bei den spezifischen Kraftwerksemissionen

Die den fossilen Referenzkraftwerken zugrunde liegenden spezifischen Emissionen entsprechen einem sehr fortschrittlichen technischen Stand. Eine weitere Abnahme der spezifischen Emissionen im der Untersuchung zugrunde liegenden Zeithorizont bis 2020 wird daher nicht unterstellt (vgl. auch: /Hildebrand 2001/). Das gleiche gilt auch für spezifische Emissionen

5 Stromerzeugungstechnologien

bei der Zufeuerung von Biomasse in einem Steinkohlenkraftwerk. Die für die Verstromung von Biomasse in einer KWK-Anlage geltenden Grenzwerte der TA-Luft werden zur Zeit überarbeitet. Nach /Weiss 2001/ ist für den Einsatz von Holz als Brennstoff jedoch mit keiner Verschärfung zu rechnen.

Aus den genannten Gründen wird von konstanten spezifischen Emissionsfaktoren für alle Kraftwerkstypen ausgegangen. Änderungen in den spezifischen Emissionen vorgelagerter Ketten werden jedoch berücksichtigt, wie in Abschnitt 5.3.3 ausgeführt ist.

5.3.3 Änderungen in vorgelagerten Prozessketten

Für Erdgas- und Steinkohle-Kraftwerke können Änderungen in vorgelagerten Prozessketten, die von der Primärenergiebeschaffungsseite herrühren, einen maßgebenden Einfluss auf die Ergebnisse von Lebenszyklusanalysen haben. Bei den regenerativen Kraftwerkstechniken ist die Primärenergiequelle nicht relevant, bei der Kernenergie ist nicht mit bedeutenden Änderungen der Kernbrennstoffimportwege zu rechnen, so dass sich die folgenden Ausführungen auf die Primärenergien Erdgas und Steinkohle beschränken.

Erdgas

Das in Deutschland eingesetzte Erdgas stammt aus inländischer Förderung und fünf verschiedenen Importquellen. In Tabelle 5-3 ist der heutige und der erwartete zukünftige (2010) Erdgasmix aufgeführt /Ruhrgas 2001/. Demnach wird der Anteil russischen Erdgases am deutschen Erdgasmix von heute 35% auf 31% in 2010 abnehmen. Für das Jahr 2020 existieren keine Abschätzungen. Die relativen Anteile des Jahres 2010 werden in den Analysen daher auch für das Jahr 2020 fortgeschrieben.

Tabelle 5-3: Herkunftsquellen des in Deutschland verkauften Erdgases

in [%]	Norwegen (inkl. DK/GB)	Russland	Niederlande	Deutschland
1999	25	35	19	21
2010	34	31	21	14

5 Stromerzeugungstechnologien

Förderung und Aufbereitung von Erdgas aus russischen Quellen sowie Erdgastransport von Russland nach Deutschland sind mit erheblichen Emissionen an Methan und mit einem relativ großen Energiebedarf in den Kompressorstationen verbunden. Nach Angaben von /Dedikov et al. 1999/ beträgt der Methangasverlust bei Förderung, Aufbereitung und Transport 1% der transportierten Menge. Für diese Emissionen besteht ein Reduktionspotenzial von 30% in 10-15 Jahren /Schöttker 2000/. Die auf Basis dieser Angaben abgeschätzten Methangasverluste durch russisches Erdgas sind in Tabelle 5-4 angegeben.

Tabelle 5-4: Methangasemissionen bei Förderung, Aufbereitung und Transport russischen Erdgases nach Mitteleuropa

	2000	2010	2020
Methangasemissionen in % der transportierten Menge	1	0,85	0,7

Für den Energiebedarf der Verdichterstationen existiert nach /Ruhrgas, Gazprom/ ein Minderungspotenzial von rund 4% durch eine optimierte Fahrweise der Verdichterstationen. Es wird angenommen, dass dieses Minderungspotenzial bis 2010 ausgeschöpft wird. Danach wird der Energiebedarf als konstant unterstellt.

Bezüglich Gasförderung und -transport werden Verbesserungen bei den Methangasemissionen und beim Energiebedarf in den Analysen lediglich auf Russland bezogen. Bei den Förder- und Importbedingungen für Erdgas aus britischen, dänischen, deutschen, norwegischen und niederländischen Quellen werden dagegen keine Änderungen erwartet.

Steinkohle

Die Grubengas- (Methangas-) Emissionen aus dem Steinkohlenbergbau tragen maßgeblich zum Treibhauspotenzial der Stromerzeugung aus Steinkohle bei. Zur Zeit werden nach /Den Drijer 1997/ 31,3% der frei werdenden Menge verwertet. Im Rahmen der Vermeidung von klimarelevanten Emissionen ist in Zukunft mit einer Erhöhung der Verwertungsquote und damit mit einem Rückgang der Grubengasemissionen zu rechnen. /Den Drijer 1997/ nennt ein zusätzliches mittelfristiges Minderungspotenzial von 30% und ein zusätzliches längerfristiges Minderungspotential von 50%, bezogen auf die Gesamtemission. Auf Basis dieser Angaben werden die in Tabelle 5-5 angegebenen Verwertungsquoten für das aus deutschen Steinkohlenbergbaubetrieben emittierte Grubengas angenommen. Unberücksichtigt bei den Grubengasemissionen aus dem Steinkohlenbergbau bleiben die Emissionen, die nach Beendigung des Bergbaubetriebes entweichen. Die vermiedenen Methangasemissionen gehen in die Ermittlung des Klimaindikatoren ein.

5 Stromerzeugungstechnologien

Tabelle 5-5: Verwertungsquoten für Methangasemissionen im deutschen Steinkohlenbergbau nach /Den Drijer 1997/

	2000	2010	2020
Verwertungsquote in [%]	31,3	61,3	81,3

5.3.4 Fortschreibung der Basisdaten und der Input-Output-Tabelle

In den Bilanzen der Stromerzeugungstechnologien wird auf wichtige Basisprozesse und, – über die eingesetzte Methode der Hybrid-Bilanzierung, auf die sektorspezifischen Umweltaufwendungen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) zurückgegriffen.

Diese wichtigen Basisprozesse, die durch die so genannten Basisdaten quantitativ beschrieben sind, geben die kumulierten Umweltaufwendungen für die Herstellung von wichtigen Materialien (Stahl, Beton, ...) und die Bereitstellung von Dienstleistungen (Transportprozesse, ...) an. Sie basieren auf früheren Arbeiten am IER und auf Angaben aus /Frischknecht et al. 1996/ und beziehen sich auf einen technischen Stand der 90er-Jahre in Europa.

Um auch für die Bilanzen zukünftiger Systeme auf die Basisdaten zurückgreifen zu können, müssen diese partiell in die Zukunft fortgeschrieben werden. Fortschreibungen, die für die Jahre 2010 und 2020 vorgenommen werden, legen Angaben aus /Energy in Europe 1996/ und /Energy in Europe 1999/ zugrunde. Bei der Berechnung von zukünftigen Basisdaten werden dabei folgende Änderungen berücksichtigt:

- Der spezifische Energiebedarf für die Herstellung der einzelnen Produkte und Dienstleistungen,
- der eingesetzte Strom-Mix mit den dazugehörigen Emissionen und
- die spezifischen Emissionen der Nutzwärmebereitstellung.

Für die Ermittlung der zukünftigen sektorspezifischen Umwelteinwirkungen wird das folgende Vorgehen gewählt:

- Die zugrundeliegende Input-Output-Tabelle wird in unveränderte Form weiterverwendet, strukturelle Änderungen in der Volkswirtschaft werden somit nicht abgebildet.
- Die direkten sektorspezifischen Emissionen und der direkte Energieträgerverbrauch werden unter Zuhilfenahme von Daten aus /PROGNOS, EW1 1999/ bis 2020 fortgeschrieben.
- Die verbrennungsbedingten Emissionen von 2005 bis 2020 des Energiesektors und der Industrie sowie der Energieträgereinsatz im Energiesektor werden auf die entsprechenden Daten von 1993 normiert. Die Werte für 2000 werden interpoliert.
- Mit den so ermittelten Faktoren werden die 1993-er Daten der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) multipliziert und von 2000 nach 2020 extrapoliert. Die Erhöhung der Effizienz beim Stromverbrauch in den einzelnen Wirtschaftsbereichen wird aufgrund der festgehaltenen volkswirtschaftlichen Struktur dabei nicht abgebildet.

5 Stromerzeugungstechnologien

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Das vorliegende Kapitel gibt die Werte der zuvor erläuterten Nachhaltigkeitsindikatoren, die sich aus der Lebenszyklusanalyse ergeben, wieder. Im ersten Abschnitt werden die Bilanzergebnisse für Kraftwerke nach dem heutigen Stand der Technik gezeigt. Im zweiten Abschnitt werden Einflüsse auf die Indikatorwerte diskutiert, die durch die erwartete technologische Weiterentwicklung und Änderungen des zugrunde liegenden Produktionssystems während des Betrachtungszeitraums bis zum Jahr 2020 verursacht werden.

6.1 Indikatorwerte für die Stromerzeugung nach dem Stand der Technik

Die in diesem Abschnitt enthaltenen Tabellen fassen Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die ausgewählten Kraftwerkstechniken auf fossiler, regenerativer und nuklearer Energieträgerbasis nach dem heutigen Stand der Technik (Jahr 2000) zusammen. Die Berechnungen der Indikatorwerte, die in den Ergebnistabellen jeweils auf 1 kWh elektrischer Energie bezogene Größen darstellen, wurden nach dem in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren mit der Software *BALANCE* berechnet. Für die Wirkungsbereiche Rohstoffinanspruchnahme, Klimabeeinflussung, Versauerung / Eutrophierung, Abfallaufkommen und Gesundheitsauswirkungen sind in den Tabellen die berechneten Werte der zuvor beschriebenen physischen Indikatoren aufgeführt. Zusätzlich sind auch die betriebswirtschaftlichen und die über eine Monetarisierung ermittelten externen Kosten ausgewiesen. Die externen Kosten werden in dieser Untersuchung auf monetarisierte Umweltauswirkungen für die Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung, Versauerung / Eutrophierung und Gesundheitsauswirkungen beschränkt (zur Methode der Monetarisierung, vgl.: Kapitel 3, Abschnitt 3.4.1).

6.1.1 Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern

Für die fossilen Referenzkraftwerke nach dem Stand der Technik werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse anhand von Indikatorwerten der betrachteten Wirkungsbereiche wiedergegeben.

Steinkohle

Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 geben die Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen für die beiden Steinkohlekraftwerke wieder.

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Dampfkraftwerk, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-ct/kWh
		Bezug	Wert	Einheit	
Rohstoff- Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	2,48	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	7,6	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	30,1	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	1700	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,874	kg CO ₂ -Äqu.	1,661
		Betrieb	0,745	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,129	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophie- rung	Versauerungspotenzial	gesamt	0,792	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,137
		Betrieb	0,618	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,174	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	88	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	68	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Sonstiges	20	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Pro- duktionsabfall	gesamt	2259	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	9372	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	313	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentwickelnd	gesamt	13	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	227	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	27,5	10 ⁻⁹ YOLL	0,357
		Betrieb	21,2	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	6,3	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheits- risiken	gesamt	8,8	10 ⁻⁹ YOLL	-
Summe		36,3	10 ⁻⁹ YOLL		
Kosten	externe				2,155
	betriebswirtschaftliche				2,889
	gesamtwirtschaftliche				5,044

Die monetären Indikatoren werden in den Tabellen mit drei Nachkommastellen ausgewiesen, obwohl durch die Datengrundlage und die Methodik diese Genauigkeit nicht erreicht wird. Die gewählte Darstellung soll keine übertriebene Datengenauigkeit vortäuschen sondern folgt aus den Rechnungen und dient ausschließlich der Transparenz bei der Summenbildung für die Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Kosten.

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 6-2: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Kombikraftwerk, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator je kWh			monetärer Wert
		Bezug	Wert	Einheit	€-ct/kWh
Rohstoff-Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	2,39	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	7,6	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	30,3	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	1742	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,835	kg CO ₂ -Äqu.	1,587
		Betrieb	0,713	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,122	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerungspotenzial	gesamt	0,561	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,093
		Betrieb	0,402	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,159	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	55	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	38	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Sonstiges	17	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Produktionsabfall	gesamt	2111	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	10265	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	277	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentwickelnd	gesamt	14	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	244	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	gesamt	19,4	10 ⁻⁹ YOLL	0,254
		Betrieb	13,2	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	6,2	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheitsrisiken	gesamt	8,8	10 ⁻⁹ YOLL	-
Summe		28,2	10 ⁻⁹ YOLL		
Kosten	externe				1,934
	betriebswirtschaftliche				4,106
	gesamtwirtschaftliche				6,040

Die beiden Steinkohle-Referenzkraftwerke weisen grundsätzlich ähnliche Werte für die Ressourceninanspruchnahme, Klimabeeinflussung und andere Indikatoren auf. Die bei dem Kombikraftwerkssystem ermittelten in der Tendenz etwas geringeren Schädigungspotenziale sind im wesentlichen Folge des gegenüber dem Dampfkraftprozess höheren Wirkungsgrades. Die Mengen von Haus- und Produktionsabfällen und Bauabfall durch den Kraftwerksbetrieb und den Kraftwerksabriss liegt im Vergleich zu denen durch vorgelagerte

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Prozessketten (Bergbau, Transport) im unteren Prozentbereich. Die Grubengasemissionen tragen nur geringfügig zum Treibhauspotenzial bei.

Erdgas

Tabelle 6-3 gibt die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für das Erdgas-GuD-Kraftwerk wieder.

Tabelle 6-3: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Erdgas-GuD-Kraftwerk, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator je kWh			monetärer Wert
		Bezug	Wert	Einheit	€-ct/kWh
Rohstoff- Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	2,06	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	0,6	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	1,62	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	1240	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,421	kg CO ₂ -Äqu.	0,799
		Betrieb	0,349	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,072	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophie- rung	Versauerungspotenzial	gesamt	0,326	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,060
		Betrieb	0,146	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,180	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	46	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	27	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	19	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Produktionsabfall	gesamt	2239	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	18013	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	303	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentwickelnd	gesamt	11	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	201	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	gesamt	11,3	10 ⁻⁹ YOLL	0,146
		Betrieb	5,5	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	5,8	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheitsrisiken	gesamt	0,6	10 ⁻⁹ YOLL	-
	Summe		11,9	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	externe				1,005
	betriebswirtschaftliche				3,185
	gesamtwirtschaftliche				4,190

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Im Vergleich zu Kohlekraftwerken sind Erdgas-GuD-Systeme durch einen erheblich geringeren apparativen Aufwand gekennzeichnet, der sich in dem geringeren Ressourcenverbrauch ausdrückt. Brennstoff- und wirkungsgradbedingt liegen die spezifischen Emissionen bei dem erdgasgefeuerten System deutlich unterhalb der Werte für die Kohlekraftwerke. Der Abfallanfall durch den Kraftwerksbetrieb und den Rückbau des Kraftwerks liegt im Promillebereich im Vergleich zum Gesamtaufkommen. Methangasemissionen durch Leckagen bei der Gasverteilung, beim Gastransport, bei der Gasaufbereitung und Gasförderung liefern einen Beitrag von 3,4% des gesamten Treibhauspotenzials. Das russische Erdgas hat davon einen Anteil von 70%, wovon der größte Teil (80%) durch den Ferntransport verursacht wird.

6.1.2 Stromerzeugung auf Basis regenerativer Energieträger

Für die Referenzkraftwerke auf Basis regenerativer Energieträger werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse anhand von Indikatorwerten der betrachteten Wirkungsbereiche auf dem derzeitigen Stand der Technik wiedergegeben.

Photovoltaik

Tabelle 6-4 gibt die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für das Photovoltaik-Kraftwerk wieder. Die Nutzung der Solarstrahlung als Energiequelle mit vergleichsweise geringer Leistungsdichte führt zu einem spezifisch sehr viel größeren Ressourcenbedarf als bei fossilgefeuerten Systemen. Die ermittelten Emissionen der photovoltaischen Stromerzeugung resultieren vollständig aus den Herstellungsprozessen, der Betrieb ist emissionsfrei. Der Anfall an Haus- und Produktionsabfall wird durch die Herstellung der PV-Paneele dominiert (85%). Beim Sonderabfallaufkommen beträgt der Anteil der PV-Paneele-Produktion 55%. Der Rest verteilt sich auf sonstige vorgelagerte Ketten. Das Abfallaufkommen durch den Rückbau trägt nur im Promillebereich zum gesamten Haus- und Produktions-Abfallaufkommen bei. Zum Verbrauch erschöpflicher Energieträger trägt die Panelherstellung zu über 75% bei, wobei ein Drittel auf die Siliziumherstellung entfällt.

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Photovoltaik-Kraftwerk, Jahr 2000

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert	
	Bezug	Wert	Einheit	€-ct/kWh	
Rohstoff-Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	1,1	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	294	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	2288	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	5396	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,226	kg CO ₂ -Äqu.	0,429
		Betrieb	0	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,226	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerungspotenzial	gesamt	1,373	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,186
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	1,373	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	76	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Sonstiges	76	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Produktionsabfall	gesamt	5396	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	11678	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	1660	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentwickelnd	gesamt	24	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	485	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	gesamt	46,2	10 ⁻⁹ YOLL	0,632
		Betrieb	0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	46,2	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheitsrisiken	gesamt	18,6	10 ⁻⁹ YOLL	-
Summe		64,8	10 ⁻⁹ YOLL		
Kosten	externe				1,247
	betriebswirtschaftliche				78,044
	gesamtwirtschaftliche				79,291

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Windkraft

Tabelle 6-5 und Tabelle 6-6 geben die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die beiden Windkraft-Konverter wieder.

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter bei 5,5 m/s, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator je kWh			monetärer Wert
		Bezug	Wert	Einheit	€/ct/kWh
Rohstoff- Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	0,08	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	52	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	35	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	3066	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,018	kg CO ₂ -Äqu.	0,035
		Betrieb	0	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,018	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerungspotenzial	gesamt	0,084	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,013
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,084	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	6	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Sonstiges	6	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Produktionsabfall	gesamt	937	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	3189	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	83	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentwickelnd	gesamt	6	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	91	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	gesamt	3,5	10 ⁻⁹ YOLL	0,049
		Betrieb	0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	3,5	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheitsrisiken	gesamt	1,9	10 ⁻⁹ YOLL	-
Summe		5,4	10 ⁻⁹ YOLL		
Kosten	externe				0,097
	betriebswirtschaftliche				5,455
	gesamtwirtschaftliche				5,552

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 6-6: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter bei 4,5 m/s, Jahr 2000

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert	
	Bezug	Wert	Einheit	€-ct/kWh	
Rohstoff- Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	0,11	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	75	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	51	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	4471	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,027	kg CO ₂ -Äqu.	0,051
		Betrieb	0	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,027	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophie- rung	Versauerungspotenzial	gesamt	0,122	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,019
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,122	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	9	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Sonstiges	9	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Pro- duktionsabfall	gesamt	914	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	4650	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	121	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentwickelnd	gesamt	8	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	132	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	5,1	10 ⁻⁹ YOLL	0,071
		Betrieb	0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	5,1	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheits- risiken	gesamt	2,7	10 ⁻⁹ YOLL	-
Summe		7,8	10 ⁻⁹ YOLL		
Kosten	externe				0,141
	betriebswirtschaftliche				7,950
	gesamtwirtschaftliche				8,091

Der Vergleich der Daten für die zwei betrachteten Windenergiekonverter zeigt den erheblichen Einfluss der Standortwahl, der sich über die verschiedenen mittleren Windgeschwindigkeiten unmittelbar auf die Volllaststunden, den Energieertrag und damit die Größe der Indikatoren auswirkt. Die Werte der Systeme Windenergiekonverter und Photovoltaikanlage weisen bezüglich sämtlicher Indikatoren deutliche Vorteile der Windkraftanlagen auch unabhängig von dem jeweiligen Standortparameter aus.

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Ein Drittel des Anfalls an Haus- und Produktionsabfall entfallen auf den Rückbau des Konverters. Beim Bauabfall beträgt dieser Anteil 53%. Der Rest verteilt sich auf vorgelagerte Ketten. Die Hauptbeiträge zum Energieträgerverbrauch, Treibhaus-, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial entfallen mit ungefähr 90% auf den Bau des Konverters. Die zwei betrachteten Referenzsysteme unterscheiden sich in der absoluten Höhe der Indikatorbeiträge. Die Aussagen bezüglich des relativen Anteils der Vorleistungskette an den jeweiligen Bilanzergebnissen sind jedoch für beide Systeme gültig.

Wasserkraft

Die auf der folgenden Seite abgebildete Tabelle 6-7 zeigt die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für das Laufwasser-Kraftwerk. Die Werte der Indikatoren für das Wasserkraftwerk liegen in ähnlicher Größenordnung wie bei den Windkraftkonvertern. Der spezifische Ressourcenverbrauch ist im Vergleich zu den WKA jedoch deutlich niedriger. Das Aufkommen an Haus- und Produktionsabfall wird durch vorgelagerte Prozessketten dominiert. Der Kraftwerksrückbau trägt nur mit 6% bei. Rund 80% des Beitrags zum Energieträgerverbrauch, zum Treibhaus-, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial werden durch den Bau des Kraftwerks verursacht.

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 6-7: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Wasserkraftwerk, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator je kWh			monetärer Wert		
		Bezug	Wert	Einheit	€-Cent/kWh		
Rohstoffverbrauch	Energieträger	gesamt	0,05	kWh	-		
	Kupfererz	gesamt	5	10 ⁻⁶ kg	-		
	Bauxit	gesamt	7	10 ⁻⁶ kg	-		
	Eisenerz	gesamt	2057	10 ⁻⁶ kg	-		
Treibhauspotenzial		gesamt	0,014	kg CO ₂ -Äqu.	0,027		
		Betrieb	0	kg CO ₂ -Äqu.			
		Sonstiges	0,014	kg CO ₂ -Äqu.			
Versauerung/ Eutrophierung		gesamt	0,066	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,011		
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.			
		Sonstiges	0,066	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.			
		gesamt	7	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Eutrophierungspotenzial		Sonstiges	7	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
		n-rad. Haus- und Produktionsabfall		gesamt	203	10 ⁻⁶ kg	-
				n-rad. Bauabfall		gesamt	6293
n-rad. Sonderabfall		gesamt	22			10 ⁻⁶ kg	-
		rad. wärmeentwickelnd		gesamt	1	10 ⁻¹² m ³	-
rad. nicht-wärmeentw.				gesamt	20	10 ⁻¹² m ³	-
		Gesundheitsauswirkungen		gesamt	2,9	10 ⁻⁹ YOLL	0,040
Betrieb	0			10 ⁻⁹ YOLL			
Sonstiges	2,9			10 ⁻⁹ YOLL			
berufliche Gesundheitsrisiken				gesamt	2,7	10 ⁻⁹ YOLL	-
		Summe	5,6	10 ⁻⁹ YOLL			
Kosten		externe			0,078		
		betriebswirtschaftliche			6,887		
		gesamtwirtschaftliche			6,965		

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Biomasse

Tabelle 6-8 und Tabelle 6-9 geben die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die beiden Biomasse-Systeme wieder.

Tabelle 6-8: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Biomasse-Heizkraftwerk, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator je kWh			monetärer Wert
		Bezug	Wert	Einheit	€-ct/kWh
Rohstoff- Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	0,17	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	4	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	18	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	934	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,056	kg CO ₂ -Äqu.	0,107
		Betrieb	0,013	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,043	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerungspotenzial	gesamt	1,020	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,198
		Betrieb	0,789	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,231	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	153	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	119	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Sonstiges	34	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Produktionsabfall	gesamt	3510	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	8899	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	310	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentwickelnd	gesamt	19	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	357	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	gesamt	36,1	10 ⁻⁹ YOLL	0,455
		Betrieb	28	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	8,1	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheitsrisiken	gesamt	-	10 ⁻⁹ YOLL	-
Summe		36,1	10 ⁻⁹ YOLL		
Kosten	externe				0,760
	betriebswirtschaftliche				6,800
	gesamtwirtschaftliche				7,560

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 6-9: Ergebnisse der Lebensweganalyse für die Biomasse-Zufuhr, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-ct/kWh
		Bezug	Wert	Einheit	
Rohstoff- Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	0,12	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	5	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	23	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	985	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,044	kg CO ₂ -Äqu.	0,084
		Betrieb	0,014	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,03	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophie- rung	Versauerungspotenzial	gesamt	0,864	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,151
		Betrieb	0,675	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,189	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	104	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	77	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Pro- duktionsabfall n-rad. Bauabfall n-rad. Sonderabfall rad. wärmeentwickelnd rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	1640	10 ⁻⁶ kg	-
		gesamt	3833	10 ⁻⁶ kg	-
		gesamt	138	10 ⁻⁶ kg	-
		gesamt	8	10 ⁻¹² m ³	-
		gesamt	156	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	28,7	10 ⁻⁹ YOLL	0,369
		Betrieb	21,7	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	7	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheits- risiken	gesamt	-	10 ⁻⁹ YOLL	-
	Summe		28,7	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	externe				0,604
	betriebswirtschaftliche				-
	gesamtwirtschaftliche				-

Das Versauerungspotenzial der energetischen Biomassenutzung liegt in der Größenordnung derer der fossilgefeuerten Systeme und überschreitet damit die entsprechenden Indikatorwerte der anderen regenerativen Systeme um ganzzahlige Faktoren.

Der Anfall an Asche, bei der eine Verwertung von 90% unterstellt wird, hat einen Anteil von 10% bzw. 20% (KWK, Zufuhr) am Gesamtaufkommen von Haus- und Produkti-

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

onsabfall. Beim Bauabfall liegt der Beitrag durch den Kraftwerksrückbau bei 2% bzw. bei 1% (KWK, Zufeuerung) des Gesamtaufkommens.

Der Beitrag zum Klimapotenzial aus dem direkten Kraftwerksbetrieb wird durch die Methanemissionen verursacht. Direkte Kohlendioxidemissionen aus Biomasseverfeuerung werden nicht bilanziert, da die Biomassenutzung dem CO₂-Haushalt genau soviel Kohlendioxid zuführt, wie es ihm bei der Entstehung der Biomasse zuvor entzogen hat.

Bei beiden Kraftwerkstypen verursachen die direkten Emissionen drei Viertel der versauernden und eutrophierenden Emissionen und der öffentlichen Gesundheitsrisiken. Durch die bei Steinkohlekraftwerken übliche Rauchgasreinigung liegen die Emissionen bei der Zufeuerung von Biomasse allerdings deutlich niedriger als beim reinen Biomasse-Betrieb in der KWK-Anlage.

6.1.3 Stromerzeugung aus Kernenergie

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für den Druckwasserreaktor sind in Tabelle 6-10 wiedergegeben.

Treibhaus-, Versauerungs- und Eutrophierungspotenziale sind in der Umweltbilanz eines Kernkraftwerkes aufgrund der Emissionen aus den Vorleistungsketten vorhanden. Diese sind allerdings im Vergleich zu den Werten der anderen betrachteten Systemen gering. Neben den nicht-radioaktiven Abfällen, die mit dem Kraftwerksbau und -betrieb verbunden sind, treten bei der nuklearen Stromerzeugung auch radioaktive Abfälle in Mengen auf, die naturgemäß die Abfallmengen radioaktiver Stoffe der fossilbefeuerten Systeme und regenerativen Kraftwerke um Größenordnungen überschreiten. In den Bilanzen ist berücksichtigt, dass die Entsorgung der abgebrannten Brennelemente über die direkte Endlagerung erfolgt.

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

Tabelle 6-10: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Druckwasserreaktor, Jahr 2000

Wirkungsbereich		physischer Indikator in kWh			monetärer Wert
		Bezug	Wert	Einheit	€-ct/kWh
Rohstoff- Inanspruchnahme	Energieträger	gesamt	3,2	kWh	-
	Kupfererz	gesamt	6	10 ⁻⁶ kg	-
	Bauxit	gesamt	28	10 ⁻⁶ kg	-
	Eisenerz	gesamt	454	10 ⁻⁶ kg	-
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	gesamt	0,02	kg CO ₂ -Äqu.	0,037
		Betrieb	0	kg CO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,02	kg CO ₂ -Äqu.	
Versauerung/ Eutrophie- rung	Versauerungspotenzial	gesamt	0,079	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,012
		Betrieb	0	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,079	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierungspotenzial	gesamt	6	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Sonstiges	6	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.			
Abfallaufkommen	n-rad. Haus- und Pro- duktionsabfall	gesamt	906	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Bauabfall	gesamt	11344	10 ⁻⁶ kg	-
	n-rad. Sonderabfall	gesamt	125	10 ⁻⁶ kg	-
	rad. wärmeentw.	gesamt	54560	10 ⁻¹² m ³	-
	rad. nicht-wärmeentw.	gesamt	50511	10 ⁻¹² m ³	-
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	4,2	10 ⁻⁹ YOLL	0,054
		Betrieb	0,8	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	3,4	10 ⁻⁹ YOLL	
	berufliche Gesundheits- risiken	gesamt	0,24	10 ⁻⁹ YOLL	-
Summe		4,44	10 ⁻⁹ YOLL		
Kosten	externe				0,103
	betriebswirtschaftliche				2,761
	gesamtwirtschaftliche				2,864

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

6.2 Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse

Anhand von drei Fällen für die Stromerzeugung auf fossiler und regenerativer Energieträgerbasis werden im folgenden die Auswirkungen der in Kapitel 5, Abschnitt 5.3 erläuterten Weiterentwicklung in der Kraftwerkstechnik und der Änderungen im Produktionssystem auf den jeweiligen Wirkungsbereich exemplarisch aufgezeigt. Die vollständige Darstellung für alle Kraftwerkstechniken ist im Anhang enthalten.

6.2.1 Steinkohle-Dampfkraftwerk

Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Steinkohle-Dampfkraftwerkes zeigt Tabelle 6-11.

Tabelle 6-11: Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Steinkohle-Dampfkraftwerkes

Wirkungsbereich	Teilbereich	Physischer Indikator je kWh	2000	2010	2020
Rohstoff-Inanspruchnahme	Energieträger	kWh	2,48	2,35	2,23
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äqu.	0,874	0,759	0,756
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerungspotenzial	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,792	0,746	0,708
	Eutrophierungspotenzial	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	88	83	79
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	10 ⁻⁹ YOLL	27,5	25,8	24,4
Kosten	Externe Kosten [€-ct/kWh]		2,155	1,997	1,874

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgradsteigerung des Kraftwerkes einschließlich der dem Kraftwerk vorgelagerten Ketten der Brennstoffgewinnung und des Brennstofftransportes sowie der Anlagenherstellung ergibt sich eine Verminderung des Verbrauches an Steinkohle je kWh Strom im Zeitverlauf. Durch die verbesserte Energieträgernutzung gehen auch die umwelt- und klimabelastenden Emissionen aus dem Kraftwerksbetrieb entsprechend zurück. Gleichzeitig kommen die Verbesserungen in den vor- und nachgelagerten Prozessstufen zum Tragen.

Technologische Weiterentwicklungen in der Nutzung der Steinkohle in modernen Dampfkraftwerken schlagen sich auch in einer Verringerung der Indikatorwerte der Wir-

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

kungsbereiche Eutrophierung / Versauerung, öffentlichen Gesundheit und der Klimaeffekte nieder. Dadurch reduzieren sich auch die externen Kosten.

6.2.2 Photovoltaik

Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Photovoltaik-Kraftwerkes zeigt Tabelle 6-12.

Tabelle 6-12: Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Photovoltaik-Kraftwerkes

Wirkungsbereich	Teilbereich	Physischer Indikator je kWh	2000	2010	2020
Rohstoff-Inanspruchnahme	Energieträger	kWh	1,1	0,92	0,79
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äqu.	0,226	0,191	0,169
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerungspotenzial	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	1,373	0,956	0,755
	Eutrophierungspotenzial	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	76	61	53
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	10 ⁻⁹ YOLL	46,2	32,7	26,4
Kosten	Externe Kosten [€-ct/kWh]		1,247	0,940	0,785

Bis zum Jahre 2020 ist mit einer Abnahme des Energieträgereinsatzes, der CO₂-Emissionen, der Versauerungs- und Eutrophierungspotenziale sowie mit einer Reduzierung der öffentlichen Gesundheitsrisiken zu rechnen. Die Effekte tragen zu einer entsprechenden Reduzierung der externen Kosten bei.

6 Ergebnisse zu den Nachhaltigkeitsindikatoren aus der Lebenszyklusanalyse

6.2.3 Biomasse-Heizkraftwerk

Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Biomasse-Heizkraftwerkes zeigt Tabelle 6-13.

Tabelle 6-13: Auswirkungen von technologischer Weiterentwicklung und Änderungen im Produktionssystem auf die Bilanzergebnisse des Biomasse-Heizkraftwerkes

Wirkungsbereich	Teilbereich	Physischer Indikator je kWh	2000	2010	2020
Rohstoff-Inanspruchnahme	Energieträger	kWh	0,17	0,15	0,13
Klimabeeinflussung	Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äqu.	0,056	0,048	0,042
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerungspotenzial	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	1,020	0,929	0,862
	Eutrophierungspotenzial	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	153	140	130
Gesundheitsauswirkungen	öffentliche Gesundheitsrisiken	10 ⁻⁹ YOLL	36,1	32,8	30,4
Kosten	Externe Kosten [€-ct/kWh]		0,760	0,683	0,628

Beim Biomasse-Heizkraftwerk kommt es bis zum Jahre 2020 zu einer deutlichen Verringerung des Energieträgereinsatzes sowie zu einer Reduzierung der Versauerungs- und Eutrophierungspotenziale. Die ohnehin sehr niedrigen Treibhauspotenziale, die überwiegend der Vorkette anzulasten sind, gehen ebenfalls nochmals deutlich zurück. Auch die öffentlichen Gesundheitsrisiken nehmen im Zeitverlauf ab. Die Effekte tragen zu einer entsprechenden Reduzierung der externen Kosten bei.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien auf der Grundlage von Nachhaltigkeitsindikatoren

Auf der Grundlage quantifizierter physischer und monetärer Indikatoren wird in diesem Kapitel gezeigt, wie sich die Stromerzeugungstechnologien bezüglich ihrer relativen Nachhaltigkeit einordnen lassen.

7.1 Vergleich der Technologien auf Basis der physischen Nachhaltigkeitsindikatoren

In diesem Abschnitt werden die Stromerzeugungstechnologien auf Basis der physischen Nachhaltigkeitsindikatoren gegenübergestellt. Dabei geht es in einem ersten Schritt um die relative Bewertung der Stromerzeugungstechnologien bei getrennter Betrachtung von Indikatoren. In einem zweiten Schritt werden die Stromerzeugungstechnologien unter Berücksichtigung der gesamten physischen Indikatoren eingeordnet.

7.1.1 Wirkungsbereich Rohstoffaufwand

Die kumulierten Energieaufwendungen an erschöpflichen Energieträgern der ausgewählten Referenzanlagen zeigt Abbildung 7-1. Bei den fossilen Stromerzeugungssystemen auf der Basis von Steinkohle und Erdgas sowie bei dem nuklearen Stromerzeugungssystem wird der Brennstoffeinsatz im Kraftwerk mit erfasst.

Die höchsten kumulierten Energieaufwendungen ergeben sich für das Kernkraftwerk. Die primärenergetische Bewertung von nuklearen Brennstoffen erfolgte in der vorliegenden Untersuchung entsprechend dem Vorschlag der VDI-Richtlinie 4600 mit einem Kraftwerkswirkungsgrad 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 sowie aus dem Bau und Rückbau des Kraftwerks.

Der Anteil des Brennstoffeinsatzes im Kraftwerk beträgt im Falle der fossilen Stromerzeugungssysteme zwischen 85% und 95% der kumulierten Energieaufwendungen. Der größte Anteil der indirekten Verbräuche endlicher Energieträger entfällt auf die Gewinnungs- und Transportstufe. Dabei spielen die Förderbedingungen für die Steinkohlegewinnung und der Ferntransport von Erdgas aus den zum Teil sehr weit entfernten Förderregionen, z. B. Sibirien, eine große Rolle. Die Bereitstellung sonstiger Vorleistungen für den Kraftwerksbetrieb sowie der Kraftwerksbau und -rückbau sind nur von untergeordneter Bedeutung.

Das Erdgas-GuD-Kraftwerk weist geringere Energieaufwendungen als die bilanzierten steinkohlegefeuerten Kraftwerke auf. Der Hauptgrund für die Differenz liegt in dem mit 57,5% höheren Wirkungsgrad des erdgasgefeuerten Kraftwerkes, der in gleichem Maße den

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

direkten Brennstoffeinsatz im Kraftwerk und die indirekten energetischen Aufwendungen der Brennstoffbereitstellung beeinflusst.

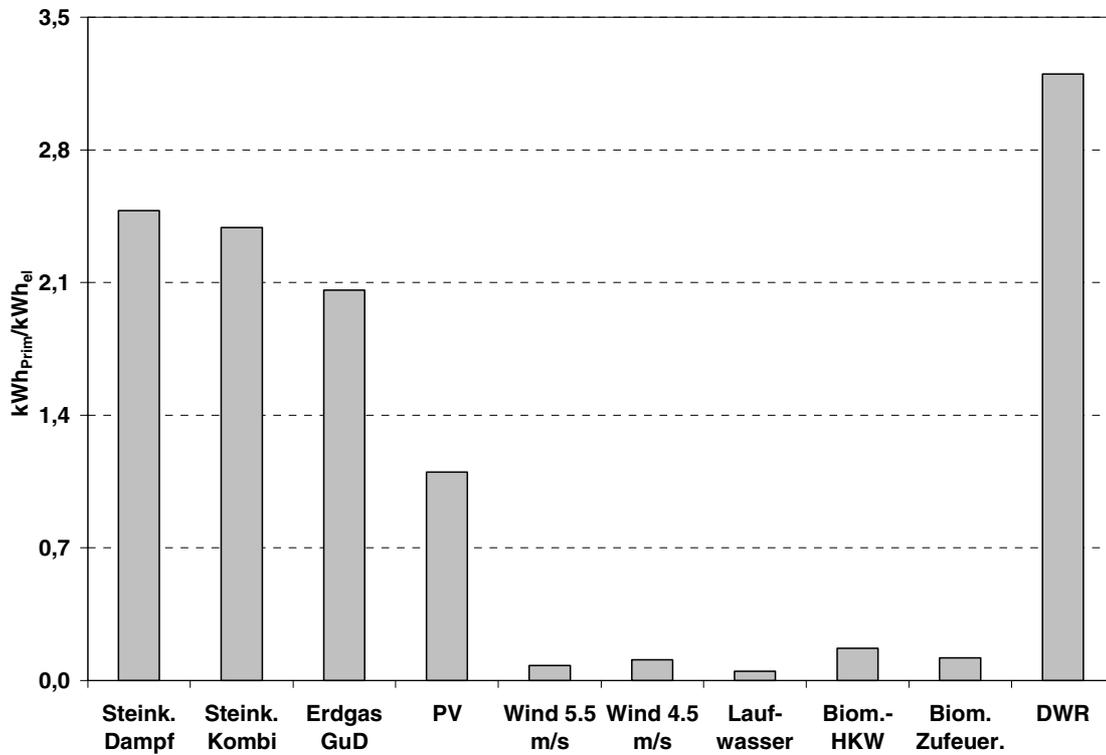


Abbildung 7-1: Nachhaltigkeitsindikator Verbrauch erschöpflicher Primärenergieträger

Bei den Stromerzeugungssystemen auf Basis regenerativer Energieträger sind die Photovoltaik-Anlagen durch die vergleichsweise höchsten Verbräuche an energetischen Rohstoffen gekennzeichnet. Der kumulierte Energieaufwand der photovoltaischen Stromerzeugung beträgt das Zehn- bzw. Zwanzigfache der entsprechenden Werte für die Stromerzeugung aus Windkraft oder Wasserkraft. Ursache hierfür ist die aufwendige Herstellung der Photovoltaik-Module. Betrieb und Rückbau der Anlagen spielen bei den Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien nahezu keine Rolle.

Abbildung 7-2 zeigt die Rohstoffintensität der betrachteten Stromerzeugungssysteme für ausgewählte Materialien. Erfasst ist der jeweilige Rohstoffaufwand für den Bau des Kraftwerks sowie für alle Prozessschritte zur Bereitstellung des Brennstoffs. Aufgeführt ist allerdings nur ein kleiner Teil der mineralischen Rohstoffe, die zum Bau und Betrieb der Kraftwerke notwendig sind.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

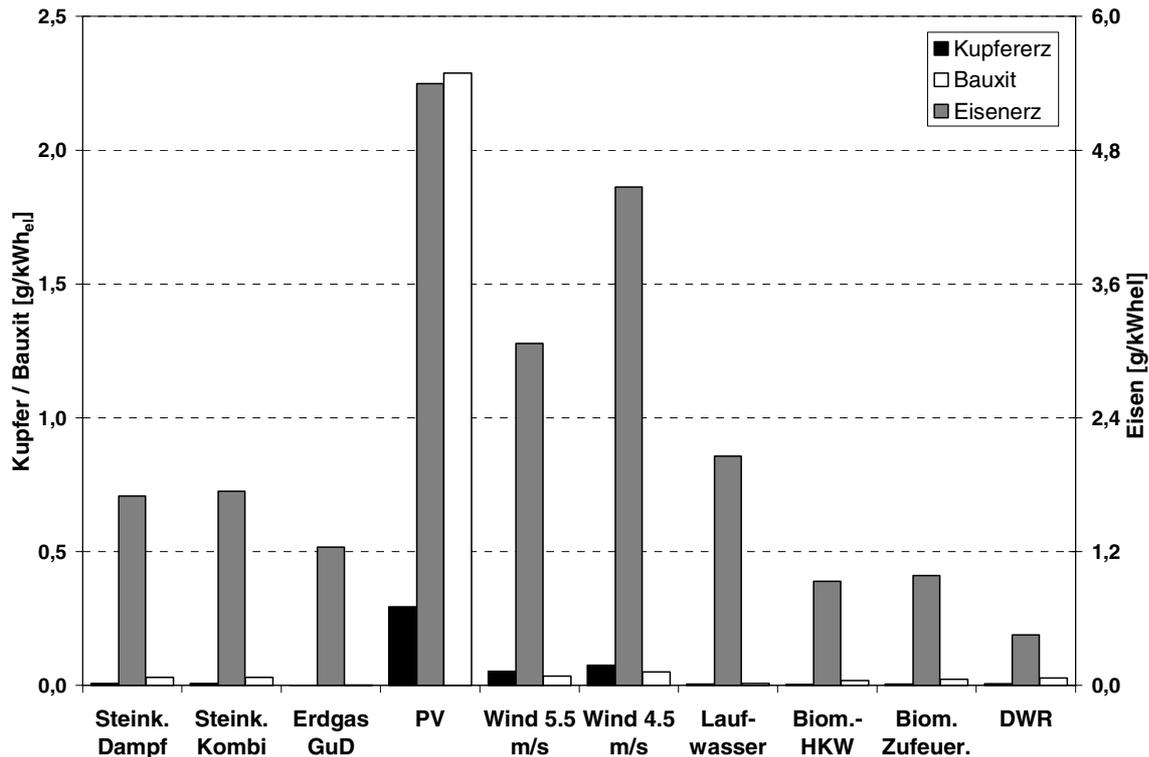


Abbildung 7-2: Nachhaltigkeitsindikator Inanspruchnahme mineralischer Rohstoffe

Diese begrenzte Materialbilanz lässt bereits erkennen, dass die geringe Energiedichte der solaren Strahlung und die Umwandlung der Solarstrahlung in Strom durch Photovoltaikanlagen über vergleichsweise große Energiesammlungsflächen zu einem relativ hohen Materialeinsatz an Kupfer, Bauxit und Eisen führt. Bei photovoltaischer Stromerzeugung beträgt der Kupfereinsatz rund das Vierzigfache, der Bauxiteinsatz etwa das Siebzigfache und der Eiseneinsatz ca. das Drei- bis Zehnfache verglichen mit fossiler oder nuklearer Stromerzeugung je kWh. Auch bei Wind-Konvertern ist der Einsatz an Kupfer und Bauxit im Vergleich mit fossilen und Kernkraftwerken verhältnismäßig groß, während der Anteil von Eisen in gleicher Größenordnung wie bei einem Kernkraftwerk ist.

Bei den fossilen Kraftwerken ist aufgrund der großen Massenströme in der Förder-, Transport- und Verbrennungsstufe ein relativ hoher Eisenanteil in den entsprechenden Infrastruktureinrichtungen der Bergbau-, Transport- und Kraftwerksanlagen notwendig. So beträgt der für die Erzeugung einer kWh Strom notwendige Eisenanteil bei Steinkohlekraftwerken etwa das Dreifache und bei Erdgaskraftwerken rund das Zweifache im Vergleich mit Kernkraftwerken.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

7.1.2 Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung und Versauerung / Eutrophierung

Abbildung 7-3 veranschaulicht die für die ausgewählten Referenzkraftwerke ermittelten physischen Indikatorwerte für die Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung, Versauerung und Eutrophierung.

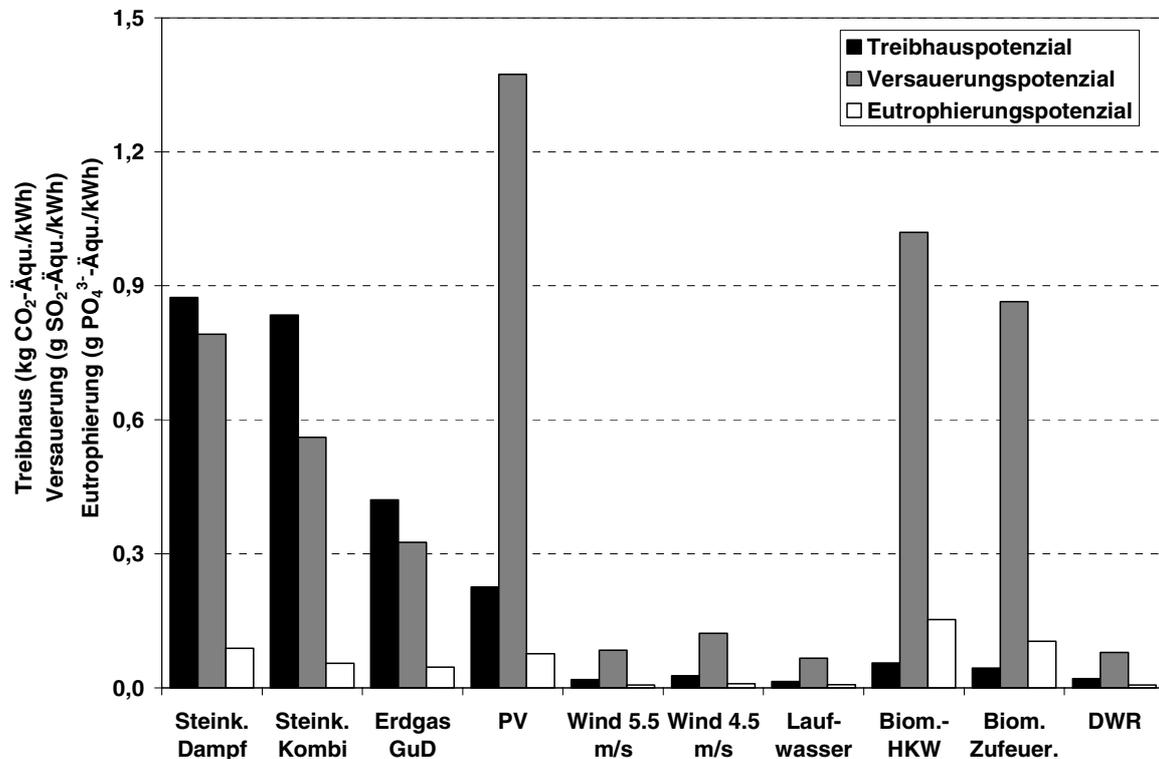


Abbildung 7-3: Nachhaltigkeitsindikatoren Treibhaus-, Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial

Die Stromerzeugung auf Steinkohlebasis verursacht die bei weitem größten Treibhauspotenziale. Die CO₂-Emissionen je kWh sind bei einem steinkohlegefeuerten Dampfkraftwerk sowohl mit heutigem Stand der Technik als auch mit weiterentwickelter Technik mehr als vierzigfach so hoch wie bei einem Kern-, Laufwasser- oder Windkraftwerk der höheren Windgeschwindigkeitsklasse. Auch bezüglich des Versauerungspotenzials ist der Stromerzeugung auf Steinkohlebasis trotz Brennstoffentschwefelung ein relativ hoher Beitrag anzulasten. Der Einsatz der Gas- und Dampfturbinentechnik mit integrierter Kohlevergasung mindert die klimabeeinflussenden Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung aus Steinkohle zwar. Die Steinkohle-Stromerzeugung bleibt dennoch freilich der mit Abstand relativ größte Verursacher von Treibhauspotenzialen.

Bei dem erdgasgefeuerten GuD-Kraftwerk fallen die Indikatorwerte der Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung, Versauerung und Eutrophierung deutlich geringer aus als für die steinkohlegefeuerten Kraftwerke. Dies resultiert zum einen aus dem höheren Kraftwerksnutzungsgrad, zum anderen aus der weitgehenden Schwefeldfreiheit des Brennstoffes Erdgas.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

Die photovoltaische Stromerzeugung ist durch die höchsten Effekte hinsichtlich der Versauerung und vergleichsweise hohe Effekte hinsichtlich der Klimabeeinflussung und Eutrophierung gekennzeichnet. Im Falle der als Referenzanlage betrachteten Hausdach-Photovoltaikanlage mit multi-kristallinen Zellen liegt das Versauerungspotenzial bei fast dem doppelten Beitrag der Stromerzeugung aus Steinkohle, für Eutrophierung immerhin noch deutlich über den Werten der Erdgas-Stromerzeugung.

Wind- und Wasserkraftwerke haben unter allen Referenzkraftwerken die geringsten Effekte in den Wirkungsbereichen Klimabeeinflussung, Versauerung und Eutrophierung. Dabei hängen die Effekte bei der Windkraft von den zu Grunde gelegten standortabhängigen mittleren Windgeschwindigkeiten ab.

Mit den Biomasse-Heizkraftwerken ist sowohl ein sehr hohes Versauerungs- als auch das höchste Eutrophierungspotenzial aller Referenzkraftwerke verbunden. Die für diesen Effekt verantwortlichen Emissionen sind zum größten Teil dem Brennstoff Waldrestholz zuzurechnen. Wegen des relativ geringen elektrischen Wirkungsgrades von 24% sind die spezifischen Emissionen je kWh Strom beim reinen Biomasse-Heizkraftwerk besonders hoch. Beim Kernkraftwerk sind die klimabeeinflussenden, versauernden und eutrophierenden Emissionen gering. Sie entstehen nicht durch den Prozess der nuklearen Stromerzeugung, sondern folgen aus den Vorleistungsketten für den Kraftwerksbau und die Brennstoffherstellung.

7.1.3 Wirkungsbereich Abfallaufkommen

Tabelle 7-1 gibt das Abfallaufkommen an, das bei Bau, Betrieb und Rückbau der Referenzkraftwerke sowie bei Herstellung, Transport und Entsorgung der Brennstoffe entsteht.

Das bei weitem größte Abfallaufkommen je erzeugter kWh Strom im nicht-radioaktiven Bereich entfällt auf die Kategorie Bauabfälle. Den verhältnismäßig größten Bauabfall gibt es bei den fossilen Kraftwerkstechniken sowie beim Druckwasserreaktor und der Photovoltaikanlage. Im Falle der Erdgas-GuD-Anlagen schlägt der Bauabfall für das umfangreiche Ferntransportnetz am stärksten zu Buche.

In der Kategorie Sonderabfälle gibt es bei den Photovoltaikanlagen das größte Aufkommen. Dies ist eine Folge des relativ aufwendigen Produktionsverfahrens für multi-kristalline Solarzellen, bei dem eine Menge umweltrelevanter Produktionsstoffe eingesetzt wird.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

Tabelle 7-1: Nachhaltigkeitsindikatoren Abfallaufkommen verschiedener Kategorien

Kraftwerk	Nicht-radioaktive Abfälle [10 ⁻⁶ kg/kWh]			Radioaktive Abfälle [10 ⁻¹² m ³ /kWh]	
	Haus- und Produktions-abfall	Bauabfall	Sonderabfall	wärme-entwickelnd	nicht-wärme-entwickelnd
Steinkohle-Dampf-KW	2259	9372	313	13	227
Steinkohle-Kombi-KW	2111	10265	277	14	244
Erdgas-GuD-KW	2239	18013	303	11	201
Photovoltaik-KW	5396	11678	1660	24	485
Wind-KW 5,5 m/s	937	3189	83	6	91
Wind-KW 4,5 m/s	914	4650	121	8	132
Laufwasser-KW	203	6293	22	1	20
Biomasse-HKW	3510	8899	310	19	357
Biomasse-Zufeuerung	1640	3833	138	8	156
DWR	906	11344	125	54560	50511

Bei den radioaktiven Abfällen des Kernkraftwerkes gibt es nahezu gleich große Mengen wärme- und nicht-wärmeentwickelnder Stoffe.

7.1.4 Wirkungsbereich Gesundheitsauswirkungen

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse für die ausgewählten Referenzkraftwerke in der Kategorie Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, ausgedrückt in verlorenen Lebensjahren je erzeugter Einheit Strom, sind in Abbildung 7-4 dargestellt. Aufgetragen sind in der Darstellung die Einflüsse auf die Gesundheit aus dem Anlagenbetrieb und dem sonstigen Bereich, d.h. den vor- und nachgelagerten Prozessstufen der Kraftwerke.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

Unter den verglichenen Anlagen ist die photovoltaische Stromerzeugung mit den relativ größten gesundheitlichen Auswirkungen gekennzeichnet, wobei diese allein dem Bereich Anlagenherstellung zuzurechnen sind, da der Betrieb emissionsfrei erfolgt. Ursachen für die Gesundheitsrisiken sind im wesentlichen die Bereitstellung von Materialien und sonstigen Vorleistungen für die Wafer-, Zellen- und Modulfertigung.

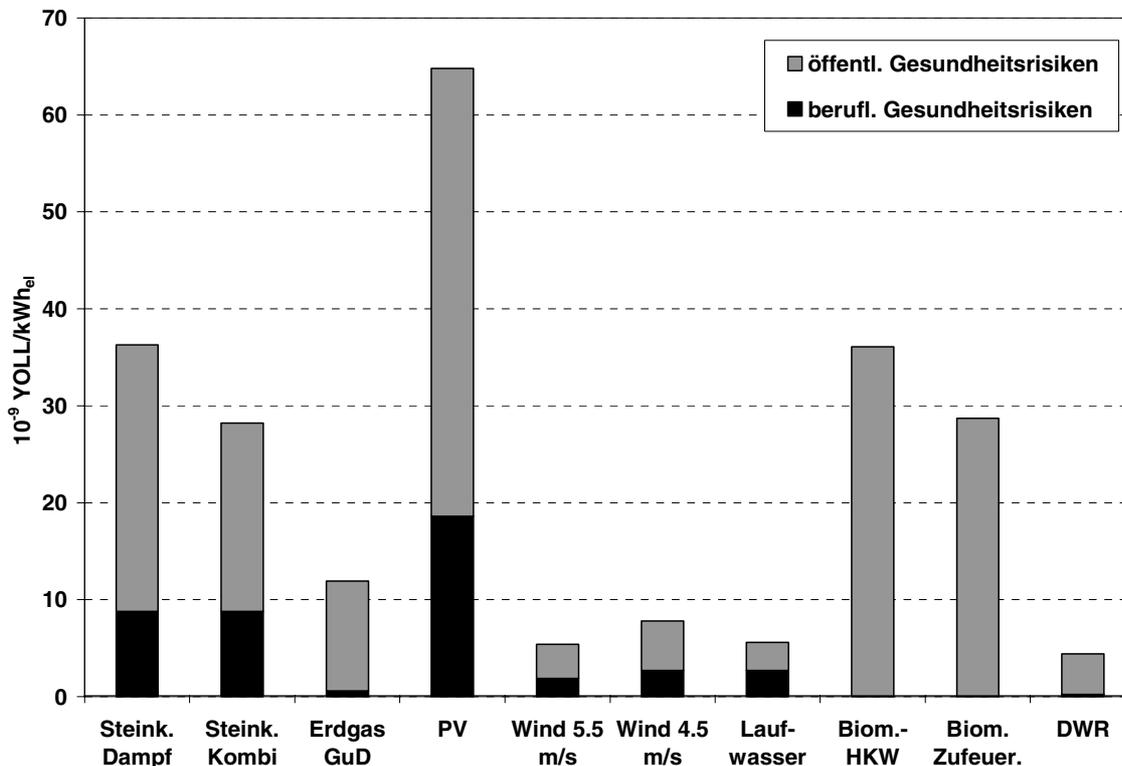


Abbildung 7-4: Nachhaltigkeitsindikatoren Gesundheitsrisiken

Auch bei den Biomasse-Heizkraftwerken und den fossilen Kraftwerken treten Gesundheitsrisiken auf, allerdings sind diese sehr viel kleiner als bei einem Photovoltaikkraftwerk und differieren bezüglich des Anteils der öffentlichen bzw. beruflichen Risiken untereinander. Es dominieren bei den Biomasse-Heizkraftwerken und den Steinkohlekraftwerken die Gesundheitsrisiken durch den Kraftwerksbetrieb. Dies erklärt sich aus den relativ großen Massenströmen, die mit dem Betrieb dieser Anlagen verbunden sind. Die Einflüsse aus den vor- und nachgelagerten Prozessstufen machen bei ihnen weniger als ein Drittel der gesamten Auswirkungen aus. Das Heizkraftwerk mit Biomasse-Zufueerung ist hinsichtlich der Gesundheitsrisiken mit dem Steinkohle-Dampfkraftwerk vergleichbar. 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 relevante Schadstoffe.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

In derselben Größenordnung wie bei den Kernkraftwerken bewegen sich die Gesundheitsauswirkungen der Stromerzeugung bei einem Wind- oder Wasserkraftwerk. Die Indikatorenwerte liegen bei weniger als der Hälfte der Werte für die Stromerzeugung aus Erdgas.

7.2 Externe Kosten

Durch eine Monetarisierung werden die klima-, umwelt- und gesundheitsrelevanten Effekte der ausgewählten Stromerzeugungstechnologien in Geldeinheiten bewertet. Diese Internalisierung der in betriebswirtschaftlicher Betrachtungsweise üblicherweise nicht erfassten Effekte kommt in dem monetären Indikator „externe Kosten“ zum Ausdruck. Aufgrund der zuvor erwähnten Quantifizierungsproblematik gibt es bei der Bemessung der externen Effekte in Geldwerten allerdings eine gewisse Unsicherheit (zur Methodik der Monetarisierung, vgl.: Kapitel 3, Abschnitt 3.4.1). In der vorliegenden Untersuchung erfolgt eine Beschränkung der Monetarisierung auf die Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung, Versauerung/Eutrophierung und öffentliche Gesundheitsrisiken. Diese aus methodischen Gründen notwendige Beschränkung führt zu einer systematischen Unterschätzung der externen Kosten, was bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Abbildung 7-5 veranschaulicht die externen Kosten der erfassten Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung, Versauerung/Eutrophierung und öffentliche Gesundheitsrisiken für die Referenzkraftwerke.

Bei den beiden Steinkohlekraftwerken sind die externen Kosten relativ am größten, bei den Windkraftwerken, dem Laufwasserkraftwerk und dem Kernkraftwerk am geringsten. Der größte Anteil an den externen Kosten der Steinkohleverstromung ist den Klimaeffekten zuzuschreiben. Das Erdgas-GuD-Kraftwerk hat wegen des höheren Wirkungsgrades und des geringeren Kohlenstoffanteils im Brennstoff ein geringeres Treibhauspotenzial als die Steinkohlekraftwerke und somit auch geringere externe Kosten.

Höhere externe Kosten als das Erdgas-GuD-Kraftwerk verursacht das Photovoltaik-Kraftwerk, wobei die klima- und gesundheitsrelevanten Effekte etwa mit gleichen Beiträgen und die Versauerungs- und Eutrophierungseffekte nur mit einem geringen Beitrag beteiligt sind. Die externen Kosten des Biomasse-Heizkraftwerkes und der Biomasse-Zufeuerung sind nicht nur geringer als diejenigen des Photovoltaik-, sondern auch des Erdgas-GuD-Kraftwerkes, wobei der Anteil der Gesundheitsrisiken bei beiden Biomasse-Nutzungssystemen dominierend ist.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

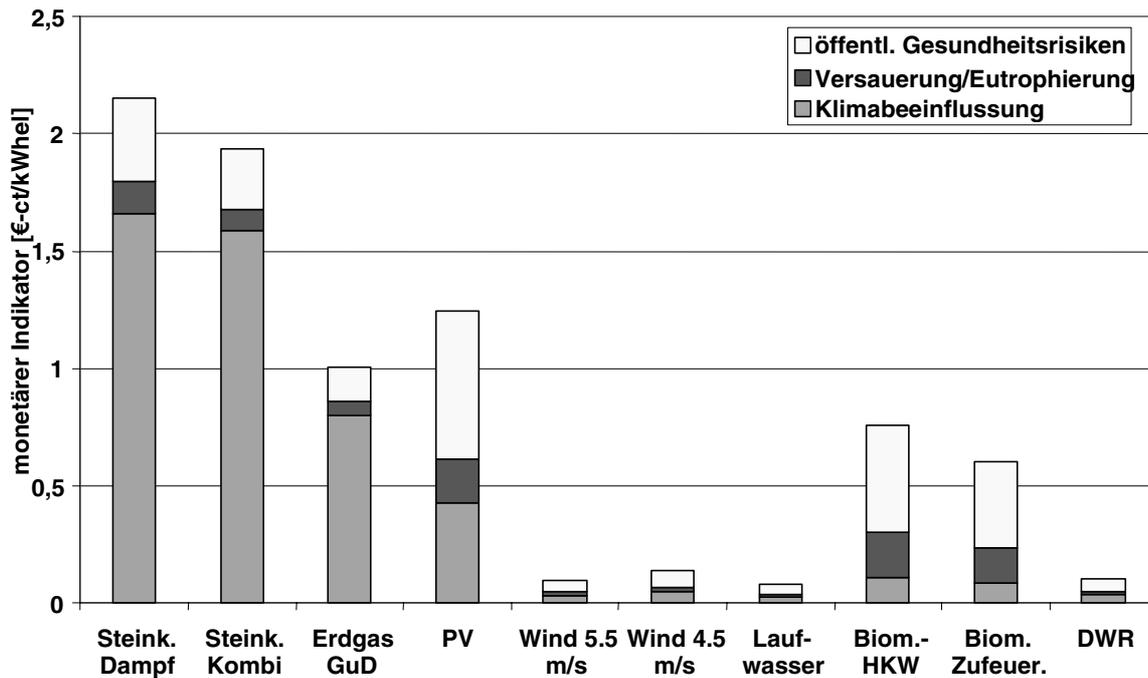


Abbildung 7-5: Externe Kosten der erfassten Wirkungsbereiche

7.3 Einordnung der Stromerzeugungstechnologien auf Basis der Inanspruchnahme knapper Ressourcen

Kosten sind ein Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen. Ein hoher Ressourcenaufwand, der durch hohe Energie- und Rohstoffintensitäten sowie starke Klimabeeinflussungen, Umweltbelastungen sowie große gesundheitliche Risiken gekennzeichnet ist, schlägt sich daher auch in entsprechend hohen direkten und indirekten Kosten nieder. Als direkte Kosten werden die betriebswirtschaftlich erfassten Kosten, in diesem Fall die spezifischen Stromgestehungskosten der verschiedenen Referenzkraftwerke, bezeichnet. Die indirekten Kosten sind die in der einzelwirtschaftlichen Betrachtungsweise üblicherweise nicht erfassten externen Kosten.

In Abbildung 7-6 sind die berechneten betriebswirtschaftlichen und externen Kosten für die Referenzkraftwerke ausgewiesen.

Kernkraftwerke haben unter Berücksichtigung der klima-, umwelt- und gesundheitsrelevanten Auswirkungen die im Vergleich niedrigsten gesamtwirtschaftlichen Kosten zur Folge. Unter allen ausgewählten Kraftwerkstechnologien nehmen Kernkraftwerke die knappen volkswirtschaftlichen Ressourcen damit am geringsten in Anspruch.

Die photovoltaische Stromerzeugung zeichnet sich nicht nur durch die höchsten betriebswirtschaftlichen Kosten aller verglichenen Systeme, sondern auch durch vergleichsweise hohe externe Kosten aus. Bei einem Vergleich der relativen Nachhaltigkeit ist diese Stromerzeugungsart daher als ungünstigste Variante einzustufen.

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

Auch das Biomasse-Heizkraftwerk und das Laufwasserkraftwerk zeichnen sich durch vergleichsweise hohe Erzeugungskosten aus, die über denen von Kern-, Steinkohle- und Erdgaskraftwerken liegen. Allerdings sind die direkten Kosten deutlich niedriger als bei einem Photovoltaik-Kraftwerk. Auch die externen Kosten sind wesentlich niedriger als bei der photovoltaischen Stromerzeugung. Die gesamtwirtschaftliche Kosten des Biomasse-Heizkraftwerks und des Laufwasserkraftwerks sind damit deutlich niedriger als bei dem Photovoltaik-Kraftwerk, jedoch höher als bei dem nuklearen oder den fossilen Referenzkraftwerken.

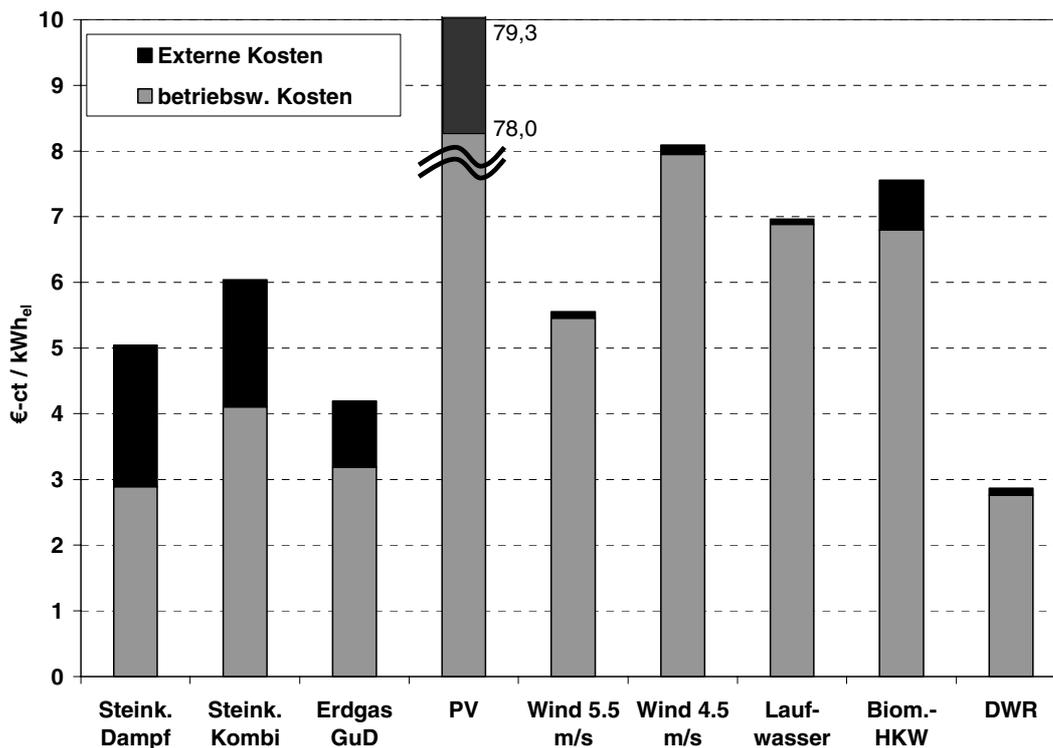


Abbildung 7-6: Nachhaltigkeitsindikator gesamtwirtschaftliche Kosten der Stromerzeugung

Bei den Windkraftwerken schlägt sich der Standortfaktor Windgeschwindigkeit in der Ressourceninanspruchnahme nieder: Während ein Windkraftwerk an einem Standort mit 4,5 m/s mittlerer Windgeschwindigkeit höhere gesamtwirtschaftliche Kosten als sämtliche fossil befeuerten Kraftwerke aufweist, liegen die gesamtwirtschaftlichen Kosten für den Windkonverter an einem Standort mit 5,5 m/s mittlerer Windgeschwindigkeit im Bereich der Gesamtkosten der steinkohlebefeuerten Kraftwerke. Die externen Kosten der Windkraft schlagen bei der Inanspruchnahme der gesamten Ressourcen nur geringfügig zu Buche. Sie sind in vergleichbarer Größenordnung wie bei einem Kernkraftwerk.

Bei den Steinkohlekraftwerken addieren sich zu den Erzeugungskosten externe Kosten, die in vergleichbarer Größenordnung wie bei dem Photovoltaik-Kraftwerk sind. Sie sind überwiegend dem Treibhauspotenzial zuzuschreiben. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten eines modernen Steinkohle-Dampfkraftwerkes, das in bezug auf die Stromgestehungskosten mit

7 Vergleich von Stromerzeugungstechnologien

einem Kernkraftwerk vergleichbar ist, liegen damit deutlich über denen eines Kernkraftwerkes. Die im Vergleich mit dem Steinkohle-Dampfkraftwerk aufwendigere Technik des Steinkohle-Kombikraftwerkes mit integrierter Kohlevergasung hat einerseits deutlich höhere Erzeugungskosten zur Folge. Andererseits fallen die externen Kosten wegen der besseren Brennstoffausnutzung relativ niedriger aus. In der Summe ergeben sich für das Steinkohle-Kombikraftwerk dennoch höhere gesamtwirtschaftliche Kosten als für das Steinkohle-Dampfkraftwerk. Beim Erdgas-GuD-Kraftwerk übertreffen die betriebswirtschaftlichen Kosten aufgrund der relativ höheren Brennstoffkosten die des Steinkohle-Dampfkraftwerks geringfügig, während die externen Kosten aufgrund des geringeren Treibhauspotenzials des Brennstoffs und der besseren Brennstoffausnutzung etwa halb so groß sind. Im Ergebnis sind die gesamtwirtschaftlichen Kosten des Erdgas-GuD-Kraftwerkes damit deutlich niedriger als diejenigen des Steinkohle-Dampfkraftwerkes.

Durch technologische Weiterentwicklung und Änderungen im zugrunde liegenden Produktionssystem werden in der in der Untersuchung betrachteten Zeitspanne bis 2020 sowohl Verbesserungen bei den Wirkungsgraden als auch hinsichtlich der Inanspruchnahme von Rohstoffen und Auswirkungen auf Klima, Umwelt und Gesundheit sowie bezüglich der Erzeugungskosten der Referenzkraftwerke erwartet. Diese Veränderungen schlagen sich in veränderten betriebswirtschaftlichen und externen Kosten nieder und betreffen die verschiedenen Kraftwerkstechniken in unterschiedlicher Weise. Insgesamt wird sich die Einordnung der Stromerzeugungstechnologien hinsichtlich der relativen Nachhaltigkeit, wie sie für den gegenwärtigen Zeitpunkt gültig ist, durch die im Zeitablauf erwarteten Änderungen allerdings nicht verschieben.

7.4 Bewertung des methodischen Ansatzes und Schlussempfehlungen

Mit dem vorliegenden Ansatz wird eine Orientierung hinsichtlich der qualitativen Einordnung der exemplarisch ausgewählten Kraftwerkstechniken gegeben. Die Aussagen beziehen sich dabei auf die relative Nachhaltigkeit der Systeme. Insofern kann mit der demonstrierten Methodik eine relative Bewertung einzelner Technologieoptionen erfolgen. Aussagen über den Zielerreichungsgrad im Hinblick auf absolute Nachhaltigkeitsziele, z.B. die Vermeidung nicht tolerierbarer Klimabeeinflussungen, können damit jedoch nicht getroffen werden. Mit der hier demonstrierten Methode lässt sich eine sichere Grundlage für „robuste Entscheidungen“ über die relative Nachhaltigkeit von Technologieoptionen ableiten, wobei robust im Sinne des Leitbildes der Nachhaltigkeit, wie sie zuvor definiert wurde, zu verstehen ist (vgl. Kapitel 2, Abschnitt 2.2.2). Es sind allerdings Arbeiten zur Weiterentwicklung des Instrumentariums notwendig, die über den in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungsrahmen hinausgehen. So sind Sensitivitätsrechnungen zur Berücksichtigung von Annahmen oder Schätzungen bestimmter Eingabedaten, die Aufnahme weiterer Kraftwerkstechnologien bei den zu untersuchenden Systemen und weitere Arbeiten zur Verminderung der beschriebenen Unsicherheiten in der Quantifizierung der externen Kosten zu empfehlen.

8 Zusammenfassung

Der Begriff der „Nachhaltigkeit“ bzw. der „nachhaltigen Entwicklung“ (sustainability bzw. sustainable development) ist in den letzten Jahren zunehmend in das Bewusstsein gedrungen. Er wird jedoch nicht einheitlich interpretiert, wie aus der Auswertung verschiedener Arbeiten zur Nachhaltigkeit von Energiesystemen hervorgeht. Nachhaltigkeit ist daher als ein offenes Konzept zu verstehen, das im konkreten Anwendungsfall präzisiert werden muss. Dies gilt auch und in besonderem Maße für die Nachhaltigkeit des Energiesystems.

Für Baden-Württemberg wird mit den in diesem Projektbericht beschriebenen Ergebnissen eine Bewertungsgrundlage für die Entwicklung eines nachhaltigen Energiesystems geschaffen. Eine derartige Grundlage, die auf einem umfassenden Nachhaltigkeitskonzept aufsetzt und mit geeigneten quantitativen Indikatoren den Nachhaltigkeitszustand des Energiesystems Baden-Württembergs beschreibt, gibt es bisher noch nicht. Sie liegt auch nicht für andere Bundesländer vor.

Bei der vorliegenden Untersuchung zur Nachhaltigkeit des Energiesektors wurde zunächst die vorhandene Literatur zu diesem Thema ausgewertet und eine Auseinandersetzung mit der unterschiedlichen Begriffsinterpretation vorgenommen. Ferner wurden die vorhandenen methodischen Ansätze verglichen. Die Untersuchung wurde in sektoraler Hinsicht auf den Subsektor Strom beschränkt. Dies ist gerechtfertigt, weil es den Projektauftrag nicht einengt und gleichzeitig die Möglichkeit eröffnet, den methodischen Ansatz und die Instrumente für den bedeutendsten Subsektor des Energiesystems zu entwickeln. Über die Zukunft der Gestaltung des Stromsektors in Baden-Württemberg existieren nämlich wie in keinem anderen Teilsektor unterschiedliche Vorstellungen. Dies betrifft insbesondere den Primärenergieeinsatz (nuklear, fossil, regenerativ) und die zu wählende Kraftwerkstechnik.

Es gibt zwei unterschiedliche Arten von Indikatoren, mit deren Hilfe die Nachhaltigkeit des untersuchten Stromsektors angezeigt werden kann. Im Unterschied zu den physischen Indikatoren, die einen Zustand in physikalischen Einheiten beschreiben, können monetäre Indikatoren, also in Geldeinheiten bewertete Messgrößen, durch Summierung aggregiert werden. Im hier durchgeführten Projekt wurden beide Indikatorenarten als Bewertungsgrundlage verwendet. Bei den Kosten wurden auch die in der betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise üblicherweise nicht erfassten externen Kosten durch eine Monetarisierung ermittelt. Aufgrund einer Quantifizierungsproblematik gibt es bei der Bemessung der externen Effekte in Geldwerten allerdings eine gewisse Unsicherheit, die zu einer systematischen Unterschätzung der externen Kosten führt, was bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Um die Nachhaltigkeit von Energietechnologien zu messen, sind Indikatorwerte über den gesamten Lebensweg des ausgewählten Stromerzeugungssystems zu betrachten. Neben den direkten Effekten bei der Energieumwandlung sind dabei auch die vor- und nachgelagerten Prozessstufen zu berücksichtigen, die Bau der Anlagen, Gewinnung und Transport der Brennstoffe sowie Rückbau der Anlagen und Entsorgung umfassen. Dies ist insbesondere

8 Zusammenfassung

deshalb wichtig, weil Stromerzeugungsanlagen, die im Betrieb z.B. praktisch emissionsfrei sind, in vorgelagerten Prozessstufen teilweise bedeutende Umwelteffekte verursachen können. Eine Methodik zur Bestimmung von Indikatorwerten, die Effekte über den gesamten Lebensweg anzeigen, ist daher besonders für den Subsektor Strom von Bedeutung. Die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) ist eine solche Methodik. Im deutschen Sprachgebrauch hat sich dafür auch der Begriff „Ökobilanz“ eingebürgert.

Mit den in der vorliegenden Untersuchung gewählten Indikatoren wird sowohl die ökologische als auch die soziale und ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit des Energiesystems bestimmt. Die Wirkungsbereiche der sozialen und ökonomischen Dimension betreffen Gesundheitsauswirkungen (Indikatoren: öffentliche und private Gesundheitsrisiken) und Kosten (Indikatoren: betriebswirtschaftliche Kosten, externe Kosten). Die Wirkungsbereiche der ökologischen Dimension umfassen Rohstoffinanspruchnahme (Indikatoren: Energieträger, Kupfererz, Bauxit, Eisenerz), Klimabeeinflussung (Indikator: Treibhauspotenzial), Versauerung / Eutrophierung (Indikatoren: Versauerungs-, Eutrophierungspotenzial), Abfallaufkommen (Indikatoren: Abfälle verschiedener Kategorien). Mit Hilfe der LCA-Methodik wurden physische und monetäre Indikatorwerte für einige für Baden-Württemberg besonders relevante Kraftwerkstechniken (in Klammern: elektrische Leistung, Wirkungsgrad des Referenzkraftwerkes) exemplarisch quantifiziert:

- Steinkohle-Dampfkraftwerk (700 MW_{el}, 45%),
- Steinkohle-Kombikraftwerk mit integrierter Kohlevergasung (823 MW_{el}, 47%),
- Erdgas-GuD-Kraftwerk (777,5MW_{el}, 57,5%),
- Biomasse-KWK-Anlage (20 MW_{el}, 24%),
- Biomasse-Zufeuerung im Steinkohle-Dampfkraftwerk (30 MW_{el} Zufeuerung, 42%),
- Photovoltaik-Hausdachanlage, multi-kristallines Si (5 kW_{el}, 13,5%),
- Windkraftkonverter, 5,5 m/s mittlere Windgeschwindigkeit (1,5 MW_{el}),
- Windkraftkonverter, 4,5 m/s mittlere Windgeschwindigkeit (1,5 MW_{el}),
- Laufwasserkraftwerk (3,1 MW_{el}),
- Druckwasserreaktor-Kernkraftwerk (1375 MW_{el}, 33%).

Bei den physischen Indikatoren zeichnen sich Steinkohle-Dampfkraftwerke wirkungsgradbedingt durch einen vergleichsweise hohen Energieträgerverbrauch und wegen des hohen Kohlenstoffanteils durch gleichfalls hohe Beiträge zum Treibhauspotenzial aus. Die relativen Beiträge zu den Versauerungs-/Eutrophierungspotenzialen und zu den Gesundheitsrisiken liegen im mittleren Bereich. Durch Einführung der Kraftwerks-Kombitechnik mit integrierter Kohlevergasung lassen sich die klima-, umwelt- und gesundheitsrelevanten Auswirkungen der Steinkohle-Stromerzeugung zwar verringern, sie bleiben jedoch über dem Niveau von Kern-, Wasser- und Windkraftwerken.

Günstiger als die beiden Steinkohlekraftwerke ist bezüglich der Auswirkungen auf Rohstoffinanspruchnahme, Klimabeeinflussung, Umweltbelastung und Gesundheitsauswirkungen das Erdgas-GuD-Kraftwerk zu bewerten. Gleichwohl sind auch hier die ökologischen

8 Zusammenfassung

Auswirkungen und die Gesundheitsrisiken größer als bei Kern-, Wasser- und Windkraftwerken.

Bei den exemplarisch untersuchten Stromerzeugungstechniken ergeben sich für die 5 kW-Hausdach-Photovoltaikanlage mit multi-kristallinen Si-Zellen die relativ höchsten umwelt- und klimarelevanten Effekte. Sie sind dem aufwendigen Herstellungsprozess der Zellen zuzuschreiben.

Bei den Biomasse-Heizkraftwerken gibt es hinsichtlich der Rohstoffinanspruchnahme und des Treibhauspotenzials nur geringe Effekte. Allerdings ist ein relativ hohes Maß an Gesundheitsrisiken und an Umweltbelastung durch Versauerung mit der Nutzung der biogenen Brennstoffe verbunden, sofern die betrachteten Anlagen, wie hier angenommen, ohne aufwendige Rauchgasreinigungsmaßnahmen betrieben werden.

Durch eine Monetarisierung werden die klima-, umwelt- und gesundheitsrelevanten Effekte der ausgewählten Stromerzeugungstechnologien in Geldeinheiten bewertet. Diese Internalisierung der in betriebswirtschaftlicher Betrachtungsweise üblicherweise nicht erfassten Effekte kommt in dem monetären Indikator „externe Kosten“ zum Ausdruck. In der vorliegenden Untersuchung erfolgt aufgrund der Quantifizierungsproblematik eine Beschränkung der Monetarisierung auf die Wirkungsbereiche Klimabeeinflussung, Versauerung/Eutrophierung und öffentliche Gesundheitsrisiken. Diese Beschränkung führt zu einer systematischen Unterschätzung der externen Kosten, was bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Durch den Nachhaltigkeitsindikator „Gesamtwirtschaftliche Kosten“ wird die Inanspruchnahme knapper Ressourcen als Klima-, Umwelt-, Gesundheit- und Kosteneffekte umfassende Kenngröße dargestellt, die sich aus der Saldierung von externen und betriebswirtschaftlichen Kosten ergibt.

Kernkraftwerke haben unter Berücksichtigung der klima-, umwelt- und gesundheitsrelevanten Auswirkungen die im Vergleich niedrigsten gesamtwirtschaftlichen Kosten zur Folge. Unter allen ausgewählten Kraftwerkstechnologien nehmen Kernkraftwerke die knappen volkswirtschaftlichen Ressourcen damit am geringsten in Anspruch.

Die photovoltaische Stromerzeugung zeichnet sich nicht nur durch die höchsten betriebswirtschaftlichen Kosten aller verglichenen Systeme, sondern auch durch vergleichsweise hohe externe Kosten aus. Bei einem Vergleich der relativen Nachhaltigkeit ist diese Stromerzeugungsart daher als ungünstigste Variante einzustufen.

Auch das Biomasse-Heizkraftwerk und das Laufwasserkraftwerk zeichnen sich durch vergleichsweise hohe Erzeugungskosten aus, die über denen von Kern-, Steinkohle- und Erdgaskraftwerken liegen. Allerdings sind sowohl die direkten als auch externen Kosten dieser Systeme deutlich niedriger als bei dem Photovoltaik-Kraftwerk, so dass die gesamtwirtschaftlichen Kosten des Biomasse-Heizkraftwerks und des Laufwasserkraftwerks damit deutlich niedriger als bei einem Photovoltaik-Kraftwerk sind. Gegenüber den fossilbefeuerten oder dem nuklear beheizten Kraftwerk liegen sie dennoch höher.

8 Zusammenfassung

Bei den Windkraftwerken schlägt sich der Standortparameter mittlere Windgeschwindigkeit deutlich in sämtlichen Indikatoren nieder: Während ein Windkraftwerk an einem Standort mit 4,5 m/s mittlerer Windgeschwindigkeit höhere gesamtwirtschaftliche Kosten als sämtliche fossil befeuerten Kraftwerkssysteme aufweist, liegen die gesamtwirtschaftlichen Kosten für den Windkonverter an einem günstigen Standort mit 5,5 m/s mittlerer Windgeschwindigkeit im Bereich der Gesamtkosten der Stromerzeugung durch die hier betrachteten Steinkohlekraftwerke.

Bei den Steinkohlekraftwerken addieren sich zu den Erzeugungskosten externe Kosten, die in vergleichbarer Größenordnung wie bei dem Photovoltaik-Kraftwerk liegen. Sie sind überwiegend dem Treibhauspotenzial zuzuschreiben. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten eines modernen Steinkohle-Dampfkraftwerkes, das in bezug auf die Stromgestehungskosten mit einem Kernkraftwerk vergleichbar ist, liegen damit deutlich über denen eines Kernkraftwerkes. Die im Vergleich mit dem Steinkohle-Dampfkraftwerk aufwendigere Technik des Steinkohle-Kombikraftwerkes mit integrierter Kohlevergasung hat einerseits deutlich höhere Erzeugungskosten zur Folge. Andererseits fallen die externen Kosten wegen der besseren Brennstoffausnutzung relativ niedriger aus. In der Summe ergeben sich mit dem Steinkohle-Kombikraftwerk dennoch höhere gesamtwirtschaftliche Kosten als bei einem Steinkohle-Dampfkraftwerk. Beim Erdgas-GuD-Kraftwerk übertreffen die betriebswirtschaftlichen Kosten aufgrund der relativ höheren Brennstoffkosten die des Steinkohle-Dampfkraftwerks geringfügig, während die externen Kosten aufgrund des geringeren Treibhauspotenzials des Brennstoffs und der besseren Brennstoffausnutzung etwa halb so groß sind. Im Ergebnis sind die gesamtwirtschaftlichen Kosten des Erdgas-GuD-Kraftwerkes damit deutlich niedriger als diejenigen des Steinkohle-Dampfkraftwerkes.

Insgesamt wird sich die Einordnung der Stromerzeugungstechnologien hinsichtlich der relativen Nachhaltigkeit, wie sie für den gegenwärtigen Zeitpunkt gültig ist, durch die im Zeitablauf erwarteten technologischen Weiterentwicklungen und Änderungen im zugrunde liegenden Produktionssystem nicht verschieben.

Mit dem vorliegenden Ansatz wird eine Orientierung hinsichtlich der qualitativen Einordnung der exemplarisch ausgewählten Kraftwerkstechniken gegeben. Die Aussagen beziehen sich auf die relative Nachhaltigkeit der Systeme. Mit der hier demonstrierten Methode lässt sich eine sichere Grundlage für „robuste Entscheidungen“ über die relative Nachhaltigkeit von Technologieoptionen ableiten. Es sind allerdings Arbeiten zur Weiterentwicklung des Instrumentariums notwendig, die über den in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungsrahmen hinausgehen. So sind Sensitivitätsrechnungen zur Berücksichtigung von Annahmen oder Schätzungen bestimmter Eingabedaten, die Aufnahme weiterer Kraftwerkstechnologien bei den zu untersuchenden Systemen und weitere Arbeiten zur Verminderung der beschriebenen Unsicherheiten bei der Quantifizierung der externen Kosten zu empfehlen.

8 Zusammenfassung

Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

/Alsema 2000/

Alsema, E. A.: Energy Pay-back Time and CO₂ Emissions of PV Systems. Prog. Photovolt. Res. Appl. 8, 17-25 2000

/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. IIASA. Laxenburg 1998

/BfLR 1996/

Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung: Ausmaß der Bodenversiegelung und Potentiale zur Entsiegelung. Bonn 1996

/Blonk et al. 1996/

Blonk, H.; Lindeijer, E.; Broers, J.: Towards a Methodology for Taking Physical Degradation of Ecosystems into Account. Int. J. LCA 2 (2) 91-98 1997

/BMWi 1999/

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Kohlekraftwerke der Zukunft: sauber und wirtschaftlich. 1999

/Bundesamt für Strahlenschutz 1999/

Bundesamt für Strahlenschutz: Anfall radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland – Abfallerhebung für das Jahr 1998. Salzgitter 1999

/CSD 1996/

United Nations Department for Policy Coordination and Sustainable Development (DPCSD): CSD Working List of Indicators of Sustainable Development. 1996.

/CSD 2001/

United Nations Department of Economic and Social Affairs (DESA); Commission on Sustainable Development: Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies. Background Paper No. 3. 2001

/Dedikov et al. 1999/

Dedikov, J.V. et al.: Estimating methane releases from natural gas production and transmission in Russia. Atmospheric Environment 33 3291-3299 1999

/den Drijer 1997/

den Drijer, J.: Strategien zur Verminderung der klimarelevanten Methanemissionen im Steinkohlenbergbau. Verlag der Augustinus Buchhandlung. Aachen 1997

/EC 1997/

European Commission: Communication to the council and the European parliament on a community strategy to combat acidification. Document. Commission of the European Communities. Brussels 1997

Literaturverzeichnis

/EC 1999/

European Commission: Externalities of Fuel Cycles. European Commission. DG XII. Science, Research and Development. JOULE. ExternE -Externalities of Energy. Volume 7. Methodology 1998 update. European Commission 1999

/Eichelbrönnner et al. 1998/

Eichelbrönnner M., Henssen H.: Langfristige Aspekte der Energieversorgung – Ergebnisse eines Diskussionsprozesses, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 1998, Heft 8

/Energy in Europe 1996/

Energy in Europe. European Energy to 2020. A Scenario Approach. Special Issue Spring 1996. European Commission, Brussels 1996

/Energy in Europe 1999/

Energy in Europe: European Union Energy Outlook to 2020. Special Issue November 1999, European Commission, Brussels 1999

/Enquete-Kommission 1994/

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 12. Deutschen Bundestages (1994): Die Industriegesellschaft gestalten - Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Bonn 1994

/Enquete-Kommission 1998/

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages (1998): Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung, Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung, Bonn 1998

/ESL 2001/

European Statistical Laboratory: Informationen unter <http://esl.jrc.it/envind>. 2001

/Ewers; Rennings 1991/

Ewers, H.-J.; Rennings, K.: Die monetären Schäden eines Super-GAU's in Biblis. Diskussionspapier Nr. 2. Institut für Verkehrswissenschaft. Münster 1991

/ExternE 1999/

ExternE: Externalities of Fuel Cycles. European Commission. ExternE-Project. Report No 7 Methodology 2nd Edition. 1999

/Faustzahlen 1993/

Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. Landwirtschaftsverlag. Münster-Hiltrup 1993

/Friedrich 1993/

Friedrich, R.: Externe Kosten der Stromerzeugung – Probleme bei ihrer Quantifizierung. VWEV-Verlag. Frankfurt 1993

/Frischknecht et al. 1996/

Frischknecht, R., Hofstetter, P.; Knoepfel, I.; Dones, R.; Zollinger, E.: Ökoinventare für Energiesysteme. 3. Aufl. Zürich 1996

Literaturverzeichnis

/Giegrich; Sturm 1999/

Giegrich, J.; Sturm, K.: Naturraumbeanspruchung waldbaulicher Aktivitäten als Wirkungskategorie für Ökobilanzen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens Ökologische Bilanzierung graphischer Papiere. Heidelberg 1999

/Goedkoop et al. 1999/

Goedkoop, M.; Effting, S.; Collignon, M.: The Eco-Indicator 99. PRÉ-Consultants. Amersfoort 1999

/Greßmann et al. 2000/

Greßmann, A.; Friedrich, R.; Sawillion, M.; Krewitt, W.: Externe Effekte durch getrennte und gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung - Ein Vergleich, in: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 99 (2000), Heft 12, S. 22 - 29

/Hartmann 2001/

Hartmann, D.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien. IER-Forschungsbericht Band 78, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2001

/Hauff 1987/

Hauff V. (Hrsg.): Unsere gemeinsame Zukunft: Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, Greven 1987

/Heijungs 1992/

Heijungs, R. (final editor): Environmental Life Cycle Assessment of Products. Leiden 1992

/Heinz 2001/

Heinz, A.: Dissertation – Vergleich von Energiesystemen auf Basis biogener und fossiler Energieträger hinsichtlich ökologischer Kriterien. Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik. Technische Universität Wien 2001

/HGF 1999/

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Herausgeber: HGF-Projekt Untersuchung zu einem integrativen Konzept nachhaltiger Entwicklung, Karlsruhe 1999

/Hildebrand 2001/

Hildebrand, M.: persönliche Mitteilung am 23.3.2001 von Herrn M. Hildebrand, VDEW. 2001

/IAEA, IEA 2001/

International Atomic Energy Agency, International Energy Agency: Indicators for Sustainable Energy Development. 2001

/IER 2000/

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieverwendung, Universität Stuttgart: Konkretisierung und Operationalisierung des Leitbildes nachhaltige Entwicklung im Energiebereich, Diskussionspapier, Stuttgart, 19.10.2000

Literaturverzeichnis

/IER 2002/

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieverwendung, Universität Stuttgart: Stromgestehungskosten, Stuttgart, 2002

/Infokreis Kernenergie 2000/

Infokreis Kernenergie: Informationen im Internet unter www.infokreis-kernenergie.de/wissen 2000

/IPCC 1995/

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

/IPCC 2001/

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Summary of Policymakers; Working Group II; Informationen unter www.ipcc.ch

/Krewitt 1996/

Krewitt, W.: Quantifizierung und Vergleich der Gesundheitsrisiken verschiedener Stromerzeugungssysteme. IER-Forschungsbericht Bd. 33. Institut für Energiewirtschaft. Stuttgart 1996

/Krewitt et al. 1999/

Krewitt, W.; Heck T.; Trukenmüller, A.; Friedrich, R.: Environmental damage costs from fossil electricity generation in Germany and Europe, *Energy Policy* 27 (1999), 173-183, 1999

/Krewitt 2001/

Krewitt, W.: Externe Kosten der Stromerzeugung. In: Rebhan, E. (Hrsg.): *Energie – Handbuch für Wissenschaftler, Ingenieure und Entscheidungsträger*. Springer-Verlag. Berlin 2001

/Krewitt, Friedrich 1998/

Krewitt, W., Friedrich, R.: Monetäre Bewertung von Umweltschäden - Erfahrungen aus dem ExternE-Projekt. Ansätze zum Vergleich von Umweltschäden. In: Hofstetter, P., Mettler, T., Tietje, O. (Hrsg.): *Nachbearbeitung des 9. Diskussionsforums Ökobilanzen*, ETH Zürich (CH) 1998

/Lauinger et al. 2000/

Lauinger, T.; Schmidt, W.; Wösten, B.; Kalejs, J. P.: EFG-Silizium: Material, Technologie und zukünftige Entwicklung. In: *Forschungsverbund Sonnenenergie: Themen 2000. Sonne – Die Energie des 21. Jahrhunderts. Strategien zur Kostensenkung von Solarzellen*. 2000

/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. In: *SAE 1998 Transactions - Journal of Passenger Cars, Section 6 – Volume 107*. Society of Automotive Engineers (SAE). Warrendale PA. USA 1999

Literaturverzeichnis

/Marheineke et al. 2000/

Marheineke, T.; Krewitt, W.; Neubarth, J.; Friedrich, R.; Voß, A.: Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken; IER-Forschungsbericht Band 74; Universität Stuttgart; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; Stuttgart, 2000

/Marheineke et al. 2001/

Marheineke, T.; Krewitt, W.; Friedrich, R.: Lebenszyklusanalyse verschiedener Stromerzeugungstechnologien, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 51. Jg. (2001) Heft 5, S. 274-279

/Markandya 2000/

Markandya, A.: Sustainability and the Use of Non-renewable Resources (SAUNER). Summary Final Report 2000

/Maycock 2000/

Maycock, P.: Photovoltaic Technology, Performance, and Costs 1995-2010. PV Energy Systems. Warrenton (USA) 2000

/Müller-Wenk 1998/

Müller-Wenk, R.: Depletion of abiotic resources weighted on base of virtual impacts of lower grade deposits used in future. IWÖ-Diskussionsbeitrag Nr 57. St. Gallen 1998

/Müller-Wenk 1998a/

Müller-Wenk, R.: Land Use - The Main Threat to Species. IWÖ-Diskussionsbeitrag. St.-Gallen 1998

/Nagel; Gregor 1999/

Nagel, H.-D.; Gregor, H.-D. (Hrsg.): Ökologische Belastungsgrenzen: Critical Loads & Levels - Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer Verlag. Berlin 1999

/Nill et al. 2000/

Nill, H.; Marheineke, T.; Krewitt, W.; Voß, A.: Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg; Vorhabensnummer BWR 99002; Statusbericht 2000; Universität Stuttgart; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; Stuttgart, 2000

/Nill et al. 2001/

Nill, H.; Marheineke, T.; Krewitt, W.; Voß, A.: Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg; Vorhabensnummer BWR 99002; Statusbericht 2001; Universität Stuttgart; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; Stuttgart, 2001

/OECD 1998/

Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD): Environmental Indicators - Towards Sustainable Development. Paris 1998

Literaturverzeichnis

/OECD 2000/

Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD): Indicators to Measure Progress - Towards Sustainable Development. Paris 2000

/Owens 1999/

Owens, J.W.: Why Life Cycle Impact Assessment is Now Described as an Indicator System. Int. J. LCA 4 (2) 81-86 1999

/Pearce, Turner 1991/

Pearce D. W., Turner R. K.: Economics of Natural Resources and the Environment, 2nd Edition, Johns Hopkins University Press, Baltimore 1991

/Pfister et al. 1997/

Pfister, G.; Knaus, A.; Renn O.: Nachhaltige Entwicklung in Baden-Württemberg. Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg. Stuttgart 1997

/PROGNOS 1998/

PROGNOS AG (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung im Energiesektor? Erste deutsche Branchenanalyse zum Leitbild von Rio. Physica-Verlag, Heidelberg 1998.

/PROGNOS, EWI 1999/

Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut der Universität Köln (EWI) : Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Basel 1999

/PSI 2000/

Paul Scherrer Institut / ETH Zürich: Energie-Spiegel – Facts für die Energiepolitik von morgen, Nr. 3, Villigen September 2000

/Renn et al. 2000/

Renn O., León C, Clar G.: Nachhaltige Entwicklung in Baden-Württemberg, Statusbericht 2000, Nr. 173, Stuttgart, November 2000

/Rennings 1997/

Rennings K., Hohmeyer O.: Linking weak and strong sustainability indicators: the case of global warming, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), Discussion Paper No. 97-11 E, Mannheim 1997

/Ruhrgas 2001/

Ruhrgas AG: Informationsblatt zur Entwicklung des Erdgasaufkommens in Deutschland. 2001

/Ruhrgas, Gazprom/

Ruhrgas; Gazprom: Optimierung des Gastransportes. Ein internationales Gemeinschaftsprojekt zum Klimaschutz.

/Schöttker 2000/

Schöttker, R.: persönliche Mitteilung am 6.4.2000 von Herrn R. Schöttker. Ruhrgas AG. 2000

Literaturverzeichnis

/Schulze 2000/

Schulze, R.: persönliche Mitteilung am 24.11.2000 von Herrn Reinhardt Schulze, Landesanstalt für Pflanzenbau, Forchheim

/SETAC 1999/

SETAC-Europe: Second Working Group on LCIA: Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment. Int. J. LCA 4 (2) 66-74 1999

/SRU 1994/

Rat der Sachverständigen für Umweltfragen: Umweltgutachten 1994, 1994

/Statistisches Bundesamt 1997a/

Statistisches Bundesamt: Umweltschutz. Fachserie 19, Reihe 1.2 Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern. Wiesbaden 1997

/Statistisches Bundesamt 1997b/

Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Fachserie 18 Reihe. Input-Output-Tabellen. Wiesbaden 1997

/Statistisches Bundesamt 1998/

Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Fachserie 19 Reihe 5. Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Wiesbaden 1998

/Statistisches Bundesamt 1999/

Statistisches Bundesamt: Fachserie 19, Reihe 5. Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Wiesbaden 1999

/Umweltbundesamt 1995/

Umweltbundesamt: Methodik Produktbezogener Ökobilanzen – Wirkungsbilanzierung und Bewertung. Texte 23/95 des Umweltbundesamtes. Berlin 1995

/Umweltbundesamt 1999/

Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren. Umweltbundesamt. Berlin 1999

/Voß 2000a/

Voß A.: Die Herausforderung vor Augen – Energiepolitik für eine nachhaltige Entwicklung, in: Zur deutschen Energiewirtschaft an der Schwelle des neuen Jahrhunderts, hrsg. v. Wolfgang Brune, Schriftenreihe des Instituts für Energetik und Umwelt, Leipzig, Verlag B.G.Teubner Stuttgart [u.a.] 2000, S. 206-224

/Voß 2000b/

Voß A.: Nachhaltigkeit als umfassendes Entwicklungsziel - Vision oder Irrweg? (Sustainability as an overall target of development - vision or wrong track?), in: Härdtlein, M.; Kaltschmitt, M.; Lewandowski, I.; Wurl, H. (Hrsg.): Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft. Landwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Ökologie, Ökonomie und Sozialwissenschaften, Erich Schmidt Verlag, Berlin 2000, S.53 - 68

Literaturverzeichnis

/Voß 2001/

Voß A.: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieverwendung, Universität Stuttgart: Die Herausforderungen vor Augen – Energiepolitik für eine nachhaltige Entwicklung, Manuskript, Stuttgart 2001

/WBGU 1998/

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung (WBGU): Welt im Wandel. Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998. Springer-Verlag. Berlin u.a. 1998

/Weiss 2001/

Weiss, V.: Derzeitige und künftig zu erwartende emissionsbegrenzende Anforderungen der TA Luft an Feuerungsanlagen für Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe. Gülzower Fachgespräch. Tautenhain 2001

/Willeke 2001/

Willeke, G.: Persönliche Mitteilung am 29.3.2001 von Herrn G. Willeke, Institut für Solare Energiesysteme Freiburg

/Woditsch 2000/

Woditsch, P.: Kostenreduktionspotentiale bei der Herstellung von PV-Modulen. In: Forschungsverbund Sonnenenergie: Themen 2000. Sonne – Die Energie des 21. Jahrhunderts. Strategien zur Kostensenkung von Solarzellen. 2000

Literaturverzeichnis

Anhang

Anhang: Ergebnisse der LCA für 2010 und 2020

Anhang

Tabelle A-1: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Dampfkraftwerk 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	2,35	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,759	kg CO ₂ -Äqu.	1,535	
	Betrieb	0,754	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,004	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,746	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,128
		Betrieb	0,591	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,154	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	83,00	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	65,00	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	18,00	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	25,8	10 ⁻⁹ YOLL	0,334
		Betrieb	20,3	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	5,5	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			1,997	

Tabelle A-2: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Dampfkraftwerk 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	2,23	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,756	kg CO ₂ -Äqu.	1,436	
	Betrieb	0,684	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,072	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,708	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,122
		Betrieb	0,567	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,141	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	79,00	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	63,00	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	16,00	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	24,4	10 ⁻⁹ YOLL	0,316
		Betrieb	19,5	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	4,9	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			1,874	

Anhang

Tabelle A-3: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Kombikraftwerk 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert	
	Bezug	Wert	Einheit	€-Cent/kWh	
Energieträgerverbrauch	gesamt	2,22	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,758	kg CO ₂ -Äqu.	1,440	
	Betrieb	0,670	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,088	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,514	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,0848
		Betrieb	0,379	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,136	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	51	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	36	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	15	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	17,6	10 ⁻⁹ YOLL	0,231
		Betrieb	12,4	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	5,2	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			1,755	

Tabelle A-4: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Steinkohle-Kombikraftwerk 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert	
	Bezug	Wert	Einheit	€-Cent/kWh	
Energieträgerverbrauch	gesamt	2,12	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,710	kg CO ₂ -Äqu.	1,350	
	Betrieb	0,644	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,066	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,487	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,08
		Betrieb	0,363	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,124	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	48	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	34	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	14	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	16,6	10 ⁻⁹ YOLL	0,218
		Betrieb	11,9	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	4,7	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			1,647	

Anhang

Tabelle A-5: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Erdgas-GuD-Kraftwerk 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	1,98	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,405	kg CO ₂ -Äqu.	0,769	
	Betrieb	0,344	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,061	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,297	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,055
		Betrieb	0,143	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,153	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	43	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	27	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	16	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	10,2	10 ⁻⁹ YOLL	0,132
		Betrieb	5,4	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	4,8	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,956	

Tabelle A-6: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Erdgas-GuD-Kraftwerk 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	1,87	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,379	kg CO ₂ -Äqu.	0,720	
	Betrieb	0,324	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,055	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,275	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,051
		Betrieb	0,135	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,140	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	40	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	25	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	15	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	9,4	10 ⁻⁹ YOLL	0,121
		Betrieb	5,1	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	4,3	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,893	

Anhang

Tabelle A-7: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Photovoltaik-Kraftwerk 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,92	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,191	kg CO ₂ -Äqu.	0,362	
	Betrieb	0,000	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,191	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,956	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,129
		Betrieb	0,038	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,917	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	61	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	61	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	32,7	10 ⁻⁹ YOLL	0,449
		Betrieb	0,0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	32,7	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,941	

Tabelle A-8: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Photovoltaik-Kraftwerk 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,79	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,169	kg CO ₂ -Äqu.	0,320	
	Betrieb	0,000	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,169	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,755	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,102
		Betrieb	0,033	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,722	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	53	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	53	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	26,4	10 ⁻⁹ YOLL	0,363
		Betrieb	0,0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	26,4	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,786	

Anhang

Tabelle A-9: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 5,5 m/s 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,07	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,016	kg CO ₂ -Äqu.	0,030	
	Betrieb	0,000	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,016	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,060	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,0091
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,060	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	5	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	5	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	2,6	10 ⁻⁹ YOLL	0,0367
		Betrieb	0,0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	2,6	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,076	

Tabelle A-10: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 5,5 m/s 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,07	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,015	kg CO ₂ -Äqu.	0,028	
	Betrieb	0,000	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,015	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,054	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,008
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,054	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	5	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	5	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	2,4	10 ⁻⁹ YOLL	0,0335
		Betrieb	0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	2,4	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,069	

Anhang

Tabelle A-11: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 4,5 m/s 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert	
	Bezug	Wert	Einheit	€-Cent/kWh	
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,07	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,023	kg CO ₂ -Äqu.	0,044	
	Betrieb	0,000	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,023	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,088	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,0133
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,088	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	8	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	8	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	3,8	10 ⁻⁹ YOLL	0,0535
		Betrieb	0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	3,8	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,110	

Tabelle A-12: Ergebnisse der Lebensweganalyse für den Windkraft-Konverter 4,5 m/s 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert	
	Bezug	Wert	Einheit	€-Cent/kWh	
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,09	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,021	kg CO ₂ -Äqu.	0,040	
	Betrieb	0,000	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,021	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,079	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,012
		Betrieb	0,000	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,079	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	7	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	0	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	7	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	3,5	10 ⁻⁹ YOLL	0,049
		Betrieb	0	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	3,5	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,101	

Anhang

Tabelle A-13: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Biomasse-HKW 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,15	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,048	kg CO ₂ -Äqu.	0,091	
	Betrieb	0,012	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,036	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,929	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,180
		Betrieb	0,733	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,195	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	140	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	110	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	30	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	32,8	10 ⁻⁹ YOLL	0,412
		Betrieb	26	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	6,8	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,683	

Tabelle A-14: Ergebnisse der Lebensweganalyse für das Biomasse-HKW 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,13	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,042	kg CO ₂ -Äqu.	0,080	
	Betrieb	0,011	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,031	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,862	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,167
		Betrieb	0,691	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,171	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	130	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	104	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	26	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	30,4	10 ⁻⁹ YOLL	0,381
		Betrieb	24,5	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	5,9	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,629	

Anhang

Tabelle A-15: Ergebnisse der Lebensweganalyse für die Biomasse-Zufuhrung 2010

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,11	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,041	kg CO ₂ -Äqu.	0,077	
	Betrieb	0,014	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,027	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,815	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,142
		Betrieb	0,648	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,166	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	98	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	73	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	25	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	27	10 ⁻⁹ YOLL	0,347
		Betrieb	20,7	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	6,3	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,566	

Tabelle A-16: Ergebnisse der Lebensweganalyse für die Biomasse-Zufuhrung 2020

Wirkungsbereich	physischer Indikator je kWh			monetärer Wert €-Cent/kWh	
	Bezug	Wert	Einheit		
Energieträgerverbrauch	gesamt	0,1	kWh	-	
Treibhauspotenzial	gesamt	0,037	kg CO ₂ -Äqu.	0,071	
	Betrieb	0,014	kg CO ₂ -Äqu.		
	Sonstiges	0,023	kg CO ₂ -Äqu.		
Versauerung/ Eutrophierung	Versauerung	gesamt	0,770	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	0,134
		Betrieb	0,619	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
		Sonstiges	0,151	10 ⁻³ kg SO ₂ -Äqu.	
	Eutrophierung	gesamt	93	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Betrieb	70	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
		Sonstiges	23	10 ⁻⁶ kg PO ₄ ³⁻ -Äqu.	
Gesundheits- auswirkungen	öffentliche Gesundheits- risiken	gesamt	25,4	10 ⁻⁹ YOLL	0,327
		Betrieb	19,8	10 ⁻⁹ YOLL	
		Sonstiges	5,6	10 ⁻⁹ YOLL	
Kosten	Externe Kosten			0,532	