

Ganzheitliche Bilanzen von Energiewandlungsketten und Energiesystemen

A. Wiese

Zusammenfassung

Die ganzheitliche Bilanzierung stellt ein wichtiges Instrument zur Beurteilung von Energiewandlungsketten und Energiesystemen dar. Ziel einer derartigen Analyse ist die Bewertung von unterschiedlichen Systemen, die den gleichen Nutzen erbringen, um zusätzliche Entscheidungshilfen für oder gegen deren Einsatz zur Verfügung zu stellen. Dazu ist u. a. eine möglichst vollständige Bilanzierung aller Energie- und Stoffströme erforderlich, die ursächlich mit Herstellung, Betrieb und Entsorgung aller benötigten Anlagen und Betriebsmittel verbunden sind. Im folgenden Beitrag werden zunächst die Grundlagen der ganzheitlichen Bilanzierung erläutert. Am Beispiel der Bilanzierung klimarelevanter Gase bei der Bereitstellung von elektrischer Energie aus Steinkohle wird die methodische Vorgehensweise anschließend konkretisiert. Darauf aufbauend werden im Rahmen eines Vergleichs von Stromerzeugungssystemen erste Ergebnisse solcher ganzheitlicher Bilanzierungen vorgestellt und die dabei auftretenden Probleme diskutiert. Hier werden exemplarisch der Materialaufwand, der Energieaufwand, die Emissionen, der Flächenbedarf und die Kosten für die jeweiligen Systeme bestimmt und miteinander verglichen. Abschließend wird ein Gesamtvergleich anhand einer definierten Versorgungsaufgabe mit vorgegebener Versorgungssicherheit durchgeführt.

Einleitung

Im Energie- und Umweltbereich stehen wir an der Schwelle zum nächsten Jahrtausend großen Herausforderungen gegenüber. Die Schaffung humaner Lebensbedingungen für eine weiter wachsende Weltbevölkerung, die Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen sind zentrale Probleme, für die Lösungsansätze zu finden sind. Diese sind bei gleichzeitigem Übergang auf ein Wirtschafts- und Produktionssystem, das eine nachhaltige Entwicklung ermöglicht und die natürlichen Lebensgrundlagen nicht zerstört, zu realisieren.

Alle diese Herausforderungen haben einen direkten Bezug zur Energieversorgung. Begründungen dafür gibt es genug. Beispielsweise ist die Verfügbarmachung einer ausreichenden Menge an Energie zur Überwindung von Hunger und Armut sowie zur Begrenzung des Wachstums der Weltbevölkerung unerlässlich. Gleichzeitig stammen derzeit etwa 50 % der anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus der Energieversorgung.

Für die Bereitstellung von Energie steht eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung. Derzeit werden - zumindest in den Industriestaaten - hauptsächlich fossile und nukleare Energieträger eingesetzt. Zunehmend tauchen auch Forderungen auf, verstärkt erneuerbare Energiequellen zu nutzen. Immer mehr rückt dabei auch die Abfallenergienutzung in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses - unabhängig, ob der Abfall biogenen und damit regenerativen oder fossilen Ursprungs ist. Abfälle oder Reststoffe bzw. die darin gespeicherte „Abfallenergie“ sind im Gegensatz zu anderen Energieträgern vielfach kostenneutral verfügbar. Da mit ihrer energetischen Nutzung oft auch eine teilweise oder sogar vollständige Entsorgung verbunden ist, sind in manchen Fällen sogar Entsorgungserlösemöglich.

Abfallenergie tritt bei allen Energiewandlungsprozessen aber auch in nicht stofflich gebundener Form auf - als Abwärme. Trotz beachtlicher Fortschritte in der Vergangenheit bezüglich effizienterer Energienutzung, Erhöhung der Wirkungsgrade etc. kann doch auch in Zukunft nicht verhindert werden, dass derartige Abfallenergie entsteht, denn sie ist eine zwangsläufige Konsequenz des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Nicht stofflich gebundene Abfallenergie weiter zu minimieren sowie die darüber hinaus bei der Energiebereitstellung für einzelne Prozesse entstehende und nicht vermeidbare Abfall-

energie für andere Anwendungen zu nutzen - dies wird ein wesentliches Kriterium sein, an dem zukünftige Energiesysteme gemessen werden.

Wie die für die Menschheit notwendige Energie letztendlich bereitgestellt werden soll, darüber gibt es in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft teilweise erheblich konträre Auffassungen. Im folgenden wird versucht, deutlich zu machen, daß der Vergleich der verschiedenen Energiebereitstellungsmöglichkeiten auf der Basis einer ganzheitlichen Bilanzierung die Diskussion über diese Problemlösungen inhaltlich bereichern und Orientierungen für die Bewältigung der vor uns liegenden Herausforderungen liefern kann. Dies gilt auch für die Abfallenergienutzung - denn unabhängig davon, ob man sich für die Nutzung stofflich gebundener Abfallenergie oder für die Minimierung und Nutzung nicht stofflich gebundener Abfallenergie interessiert, sind doch auch Energiesysteme mit energetischer Nutzung von Abfallenergie zunächst einer grundlegenden Untersuchung hinsichtlich technischer, ökologischer und ökonomischer Kriterien zu unterziehen.

Zur Einführung in die Problematik wird hier die Methodik der ganzheitlichen Bilanzierung zunächst vorgestellt und am Beispiel der Strombereitstellung aus Steinkohle explizit durchgeführt. Anschließend wird beispielhaft die Strombereitstellung betrachtet und hier einige Kennzahlen als Ergebnis erster Abschätzungen der ganzheitlichen Bilanzierung von Energiesystemen vorgestellt und diskutiert.

Grundlagen der ganzheitlichen Bilanzierung

Mit einer ganzheitlichen Bilanzierung sollen die Auswirkungen von verschiedenen Systemen unter definierten Randbedingungen möglichst vollständig bilanziert und bewertet werden. Grundsätzlich besteht dabei das Ziel, den gesamten Lebenszyklus eines Systems von der Rohstofferschließung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung zu erfassen. Die gesamte Bilanz setzt sich aus vier Teilschritten zusammen. Systemdefinition, Sachbilanz, Wirkungsbilanz und Bewertung (*Abbildung 1*).

Die *Systemdefinition* steht am Beginn einer solchen Untersuchung. In ihr werden die Zieldefinition und die daraus resultierenden Systeme mit den Bilanzierungsvarianten, Annahmen und Grenzen beschrieben. Eine Zieldefinition könnte beispielsweise sein: Teilsubstitution einer Stromerzeugung aus konventionellen Energieträgern im deutschen Kraftwerkspark durch eine Stromerzeugung mit Systemen zur Umwandlung erneuerbarer

Energien. Bereits in der Systemdefinition werden die Inhalte der Sach- und Wirkungsbilanz sowie der Bewertung festgelegt. Die betrachteten Systeme sollten den gleichen Nutzen erfüllen, damit ein Vergleich überhaupt möglich ist. Als zu erfüllender Nutzen könnte beispielsweise die Bereitstellung einer Einheit elektrischer Energie mit gleicher Versorgungssicherheit gefordert werden.

In der *Sachbilanz* werden die Größen aufgeführt, die anderen Systemen entnommen werden bzw. die Größen, die aus dem betrachteten System in andere Systeme übergehen. Damit ist u. a. der Verbrauch an Ressourcen und die Nutzung der Natur als Aufnahme-medium für Schadstoffe zu quantifizieren also z. B. Luft, Wasser und Bodenbelastung durch Stoffströme oder Lärm. Die Sachbilanz enthält als ein mögliches Ergebnis z. B. die Mengen an CO₂ und NO_x-Emissionen.

Um Aussagen über die Vor- und Nachteile verschiedener Systeme machen zu können, ist es erforderlich, die Ergebnisse zu bewerten (z. B.: x kg Schadstoff A sind genauso umweltrelevant wie y kg Schadstoff B). Diese Bewertung kann aber nur vorgenommen werden, wenn Aussagen über die Wirkung der einzelnen bilanzierten Größen möglich sind (z. B. Gesundheitsschäden durch Luftschadstoffe).

Systemdefinition	Sachbilanz	Wirkungsbilanz	Bewertung
Technikdefinition, Betrachtungszeit- raum,...	Emissionen, Lärm, Abfälle, Energie,...	Gesundheitsschä- den, Waldschäden,	Kosten, Ökopunkte, ... (A besser als B)

Abbildung 1: Aufbau einer ganzheitlichen Bilanzierung [3]

Aufgabe der *Wirkungsbilanz* ist es, Wirkungen zu erfassen, um sie einer *Bewertung* zugänglich zu machen. Wertmaßstäbe gehen aber nicht erst bei diesem letzten Teilschritt, sondern bereits bei jedem vorherigen Teilschritt in die Bilanzierung ein (z. B. bei der Auswahl der bilanzierten Input- und Outputgrößen) [3].

Bilanzierung klimarelevanter Emissionen am Beispiel „Bereitstellung elektrischer Energie aus Steinkohle“

Alle vier genannten Schritte gehören zur vollständigen ganzheitlichen Bilanzierung. In den folgenden Ausführungen wird eine Bewertung der bilanzierten Größen allerdings nur qualitativ durchgeführt, eine quantitative Bewertung beispielsweise mittels Ökopunkte oder über externe Kosten erfolgt nicht. Die Methodik der Sach- und Wirkungsbilanzierung wird dazu zunächst an einem konkreten Beispiel erläutert. Dabei handelt es sich um die Bilanzierung klimarelevanter Emissionen bzw. der daraus berechenbaren GWP-Werte bei der Bereitstellung elektrischer Energie durch die Nutzung heimischer Steinkohle.

Systemdefinition.

Im Rahmen der Systemdefinition ist zunächst die Fragestellung zu definieren. In diesem Beispiel lautet sie: „Bilanzierung der ursächlich mit der Bereitstellung von elektrischer Energie in einem modernen Steinkohlekraftwerk aus heimischer Steinkohle verbundenen klimarelevanten Emissionen“.

Tabelle 1 zeigt die wesentlichen technischen Daten des untersuchten Kraftwerks. Es handelt sich um ein modernes Steinkohlekraftwerk mit Dampfkreislauf nach heutigem Stand der Technik. Es weist eine Nennleistung von 700 MW_{el}, eine mittlere Vollaststundenzahl von 5 000 h, eine Lebensdauer von 30 Jahren und einen Nettowirkungsgrad von 43 % auf

Für dieses Kraftwerk bzw. die vorgelagerten Prozesse sollen die klimarelevanten Emissionen bilanziert werden. Bei den klimarelevanten Emissionen unterscheidet man hinsichtlich ihrer direkten und indirekten Wirksamkeit. Zu den direkt klimawirksamen Emissionen zählen beispielsweise CO₂, N₂O, CR₈ und die FCKW. Die indirekt wirkenden Emissionen sind dagegen erst nach chemischen Umwandlungsprozessen innerhalb der Troposphäre klimawirksam. Zu diesen zählen beispielsweise CO (Reaktion zu CO₂ und dabei gleichzeitig Beitrag zur troposphärischen Ozonbildung) oder die NO_x (Reaktion zu O₃). Das Ausmaß der Klimawirksamkeit der einzelnen Gase ist allerdings umstritten. Dies gilt insbesondere für die indirekten Emissionen. Aus diesem Grund beschränkt sich die Analyse hier auf die Emissionen mit direkter Wirksamkeit und damit auf Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O).

Tabelle 1: Wichtige technische Daten der Referenzsystems für die Bereitstellung elektrischer Energie durch Steinkohle

<i>Kraftwerk:</i>	
Kraftwerkstyp	Dampfturbinenkraftwerk
Leistung	700 MW _e
Lebensdauer	30 a
Wirkungsgrad	43 %
Standort	Deutschland
Stand der Technik	1994
Entschwefelung	nach GFAVO heute
Entstaubung	nach GFAVO heute
Entstickung	nach GFAVO heute
<i>Sonstiges:</i>	
Brennstoff:	Steinkohle
Brennstoffherkunft	2/3 Ruhrgebiet; 1/3 Saarland
Stand der Technik sonstiger Prozesse	1994

Sachbilanz.

Die eigentliche Sachbilanz besteht in der Auflistung von Eingangs- und Ausgangsgrößen und ihrer Quantifizierung. Die zentrale Aufgabe besteht darin, die Realität in ein Modell zu überführen, mit dessen Hilfe die gewünschten Größen quantifizierbar werden. Zu diesem Zweck sind gegenwärtig zwei Methoden bekannt: die Prozeßkettenanalyse und die Input/Outputanalyse.

Prozeßkettenanalyse. Bei der Prozeßkettenanalyse wird ein beliebig komplexes System (z. B. die Bereitstellung elektrischer Energie durch die Verbrennung von Steinkohle) in endlich viele, überschaubare Teilsysteme (Prozesse) zerlegt. Prozesse zeichnen sich durch Zustandänderungen aus: Eingangsgrößen eines Prozesses werden innerhalb dieses Prozesses in Ausgangsgrößen umgewandelt (*Abbildung 2*). Für jeden einzelnen Prozeß lassen sich die ein- und austretenden Energie- und Stoffströme bestimmen.

Prinzipiell ist eine sehr hohe Genauigkeit erreichbar, die von der Verfügbarkeit der Daten, den Kenntnissen über Produkte und Prozesse sowie der Genauigkeit der Modellierung abhängt. Jede der Inputgrößen hat aber bereits andere Prozesse durchlaufen. Die vollständige Beschreibung eines Produktes setzt sich daher aus der Beschreibung zahlreicher

Einzelprozesse zusammen, die jeweils einzeln zu bilanzieren sind (Abbildung 3). Dementsprechend ist die Prozeßkettenanalyse ein sehr aufwendiges Verfahren.

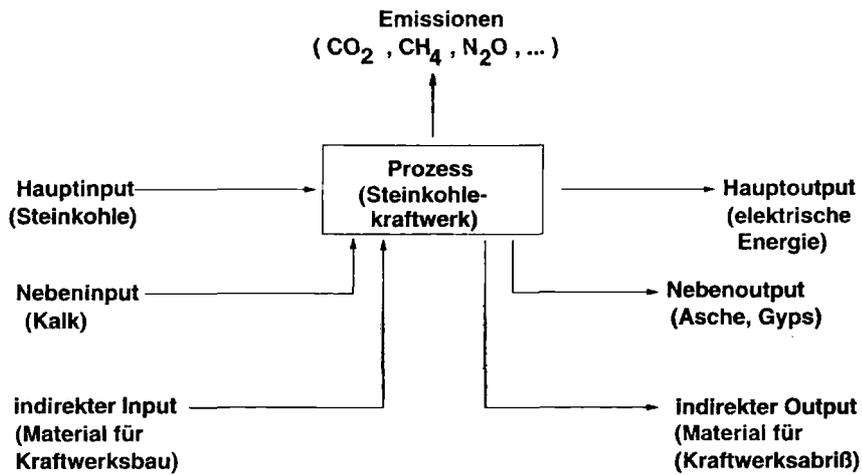


Abbildung 2: Modelltechnische Abbildung des Prozesses „Bereitstellung elektrischer Energi durch die Verbrennung von Steinkohle“

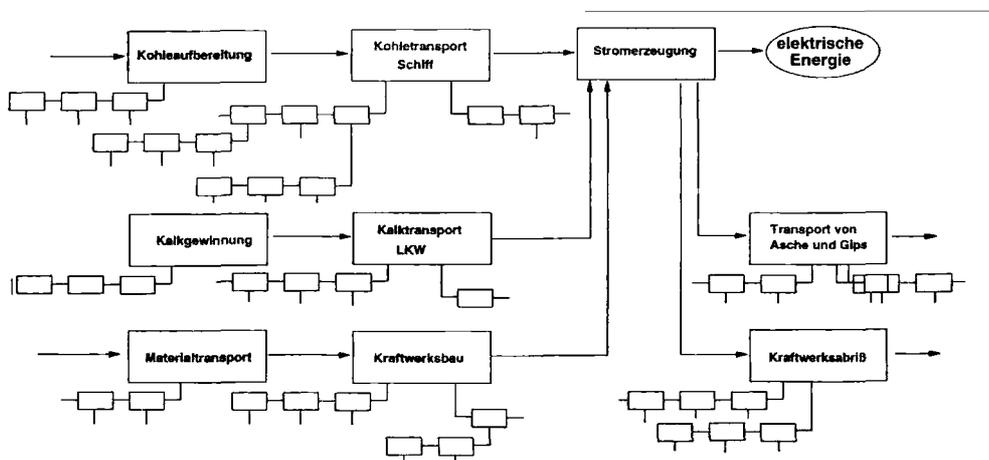


Abbildung 3: Auszug aus der Prozeßkette für die Bereitstellung elektrischer Energie durch Steinkohle

Jede Lebensphase eines Produkts erfordert die Nutzung anderer Produkte, üblicherweise Investitionsgüter (z. B. Telefon, Gebäude, Kraftwerke) und Betriebsstoffe (z. B. Kohle, Strom, Wasser, Öl). Eine vollständige Bilanzierung müßte die Lebenswege sämtlicher Investitionsgüter und Betriebsmittel bilanzieren. Um den Arbeitsaufwand in Grenzen zu halten, wird die Prozeßkette üblicherweise soweit zurückverfolgt, bis die Vernachlässigung weiterer Vorleistungen keinen wesentlichen Fehler mehr verursacht.

Input/Outputanalyse. Die Input/Output Rechnung wurde ursprünglich für volkswirtschaftliche Fragestellungen entwickelt, um die wertmäßige Verflechtung der Sektoren einer Volkswirtschaft darzustellen. Dies erfolgt in einer Tabelle. In der ersten Spalte und in der ersten Zeile sind die Sektoren der Volkswirtschaft aufgeführt, im übrigen Bereich die Geldwerte, die ein Sektor an den anderen liefert. Diese Input/Output-Tabelle ist prinzipiell auf Ströme wie z. B. Energie-, Emissions-, Materialströme erweiterbar. Mit Hilfe mathematischer Umformungen werden die Tabellen analysiert, um beispielsweise den Energieaufwand für die Produktion eines Gutes zu bestimmen.

Im Gegensatz zur Prozeßkettenanalyse geht die Input/Output-Rechnung von der Betrachtung volkswirtschaftlicher Daten aus. Dementsprechend haben die Daten einen hohen Aggregationsgrad. Daher ist die Input/Output-Rechnung nur dann zur Untersuchung einzelner Techniken geeignet, wenn diese für einen Produktionsbereich „typisch“ sind. Zudem ist es nicht oder nur schlecht möglich, die Produktentsorgung, Importe u. a. zu erfassen.

Input/Output-Tabellen stehen erst nach mehrjähriger Verzögerung zur Verfügung. Sind sie jedoch erst einmal vorhanden, hat diese Betrachtungsweise einen relativ geringen Arbeitsaufwand zur Folge - aber auch relativ hohe Unsicherheiten. Da die Ungenauigkeit durch die Bandbreite bei der Systemdefinition bereits relativ hoch und schwer abzuschätzen sind, nehmen die meisten Autoren den erhöhten Aufwand einer Prozeßkettenanalyse in Kauf, um die Belastbarkeit der Untersuchung zu erhöhen.

Um die Vorteile beider Berechnungsverfahren auszunützen, erscheint eine Kombination der Prozeßkettenanalyse mit der I/O-Analyse sinnvoll. Dabei werden zunächst die direkten Inputs und Outputs des zu analysierenden Prozeß bilanziert. Ist die Bilanzierung einzelner oder mehrerer Prozesse, die den Inputs vorgelagert sind, aufgrund der Relevanz ihrer Bilanzierungsgrößen für das Ergebnis der ganzheitlichen Bilanzierung wesentlich, wird auch die Bilanzierung dieser Prozesse im Rahmen der Prozeßkettenanalyse durchgeführt. Dafür sind sogenannte Abschneidekriterien zu definieren, mit denen das Weglassen

weiterer Prozesse in der Prozeßkettenanalyse begründet werden kann. Bislang konnten noch keine allgemein gültigen und auch rechentechnisch umsetzbaren Abschneideregeln formuliert werden. Alle weiteren Prozesse werden dann nicht mehr im einzelnen betrachtet, sondern die Größe der mit ihnen verbundenen Energie-, Stoff- oder Materialströme mittels der I/O-Analyse abgeschätzt. Um eine Doppelbilanzierung zu vermeiden, sind dazu zunächst die im Rahmen der Prozeßkettenanalyse bilanzierten Prozesse einzelnen Sektoren zuzuordnen und die bei der I/O-Analyse aus diesen Sektoren resultierenden Bilanzströme vom Ergebnis der I/O-Analyse abzuziehen [1].

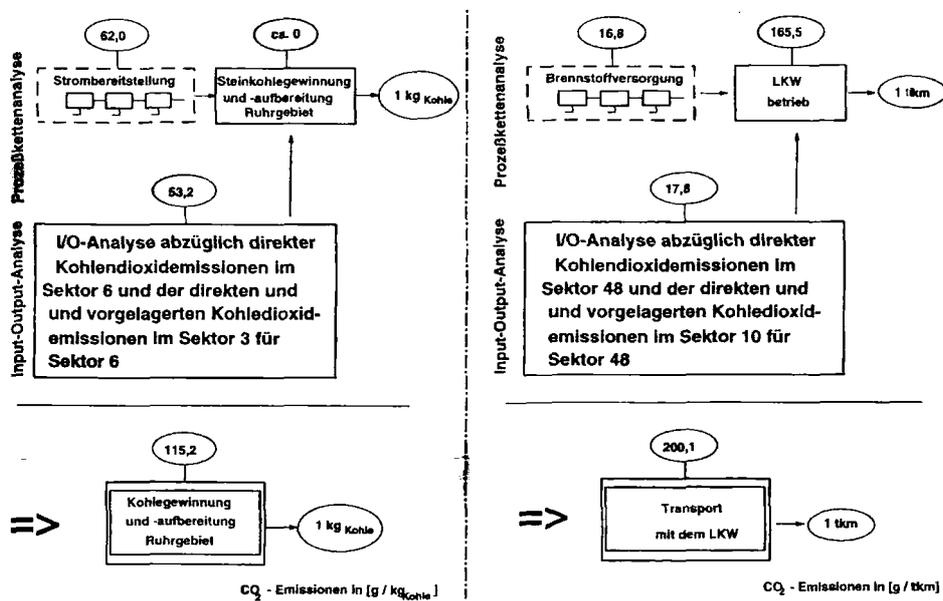


Abbildung 4: Beispiel für die CO₂-Bilanzierung einzelner Prozesse einer Prozeßkette (nach [1] Emissionsberechnung teilweise nach [2] und eigene Berechnungen)

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer derartigen Bilanzierung für zwei Prozesse, für die die CO₂-Emissionen bilanziert werden sollen. Demnach wird bei den unterstellten Verhältnissen für die Bereitstellung von einem Kilogramm Steinkohle im Ruhrgebiet insgesamt etwa 115 g Kohlendioxid emittiert. Davon stammt der größte Teil aus der Strombereitstellung. Bei der Stromerzeugung wurde dabei unterstellt, daß die bei der Gewinnung und Aufbereitung benötigte elektrische Energie aus dem Netz der öffentlichen Elektrizitätsversorgung stammt. Der Transport von 1 tkm mit einem Lastkraftwagen verursacht

derzeit insgesamt CO₂Emissionen von durchschnittlich etwa 200 g, wovon der weitaus größte Teil aus der Verbrennung des Kraftstoffes im Lastkraftwagen selbst resultiert. Diese Bilanzierung wird in gleicher Weise für alle Prozesse durchgeführt, die für die Kohlendioxidemissionen der Energiewandlungskette bzw. Prozeßkette „Bereitstellung elektrischer Energie aus Steinkohle“ relevant sind. Bezieht man die Emissionen auf die von der Anlage bereitgestellte elektrische Energie, erhält man als Ergebnis für jeden Prozeß die CO₂-Emissionen, die für die Bereitstellung einer Einheit elektrischer Energie (1 kWh_{el}) emittiert werden. *Abbildung 5* zeigt das Ergebnis für die hier betrachtete Energiewandlungskette. Werden alle dargestellten Emissionen aufaddiert, ergibt sich ein Wert von 816g/kWh_{el}. Davon stammen über 95% aus der Verbrennung der Steinkohle im Kraftwerk.

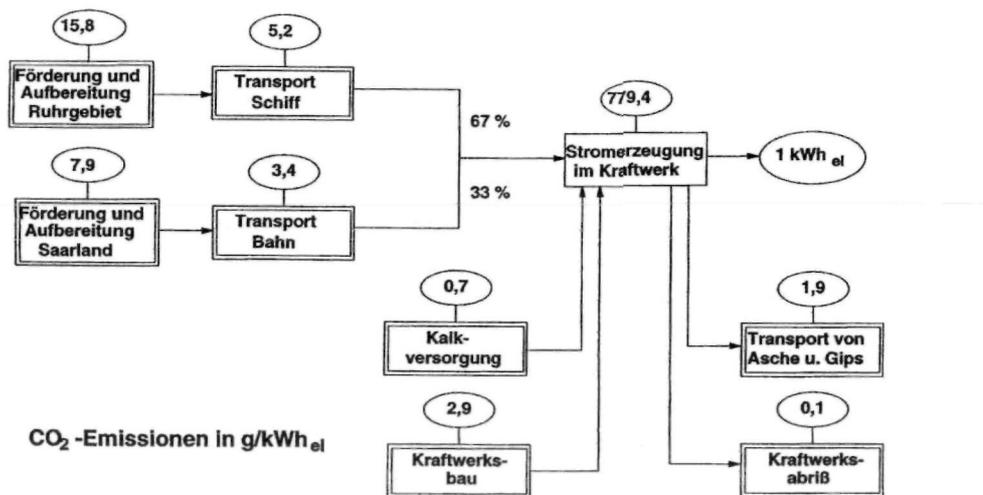


Abbildung 5: CO₂-Bilanzierung der Prozesskette zur Bereitstellung elektrischer Energie durch Steinkohle (nach [1], Emissionsberechnung teilweise nach [2] und eigene Berechnungen)

In ähnlicher Weise werden auch die CH₄- und die N₂O-Emissionen bilanziert. Da für diese Gase allerdings keine Matrix der spezifischen Emissionskoeffizienten für die I/O-Analyse vorliegt, muss sich die Bilanzierung hier auf die Prozeßkettenanalyse beschränken.

Wirkungsbilanz.

Die relative Wirksamkeit klimarelevanter Stoffe bezogen auf Kohlendioxid kann mit sogenannten GWP-Werten beschrieben werden (Greenhouse Warning Potential). *Tabelle 2* zeigt die GWP-Werte der untersuchten Gase [6]. Demnach hängt der GWP-Wert von CR, und N₂O wesentlich von dem Betrachtungszeitraum ab. Hier werden die GWP-Werte des Betrachtungszeitraumes 20 Jahre verwendet. Dann hat 1 g Methan die 35-fache Klimawirksamkeit wie 1 g Kohlendioxid, 1 g N₂O besitzt das 260-fache klimawirksame Potential.

Tabelle 2: GWP-Werte für verschiedene Gase [6]

	Lebenszeit in Jahren	Zeithorizont		
		20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre
Kohlendioxid (CO ₂)	ca. 120	1	1	1
Methan CR,)	10,5	35	11	4
Lachgas (N ₂ O)	132	260	270	170

Tabelle 3: GWP-Emissionen der Prozeßkette für die Bereitstellung elektrischer Energie aus Steinkohle

	Prozeßkettenanalyse				Input-Output-Analyse				Summe in g/kWh _{el} ,
	CO ₂	CR,	N ₂ O	Summe	CO ₂	CR	N ₂ O	Summe	
	in %	in %	in %	g/kWh _{el}	in %	in %	in %	g/kWh _{el} ,	
Stromerzeugung	99,8	0,2	0	781,0					781,00
Kohletransport	97,8	0,2	0	6,6	100	0	0	2,2	8,8
Gewinnung, Aufbereit.	4,1	95,9	0	314,3	100	0	0	10,9	325,2
Kalkversorgung	96,3	3,7	0	0,7	100	0	0	0,06	0,8
Transport Asche, Gips	96,6	3,4	0	1,8	100	0	0	0,2	2,0
Kraftwerksbau					100	0	0	2,9	2,9
Kraftwerksabriß	100	0	0	0,09	100	0	0	0,01	0,1
Summe				1 104,5				16,3	1 120,8

Das Ergebnis der Addition der einzelnen Produkte aus der Menge eines klimarelevanten Stoffes und sein GWP-Wert beschreibt die gesamte Klimawirksamkeit. Mit Hilfe der GWP-Werte kann also mit den Ergebnissen der Sachbilanz die Klimawirksamkeit und damit die Wirkungsbilanz der bilanzierten Emissionen Kohlendioxid, Methan und Lachgas aufgestellt werden. *Tabelle 3* zeigt die Ergebnisse für das hier betrachtete Beispiel.

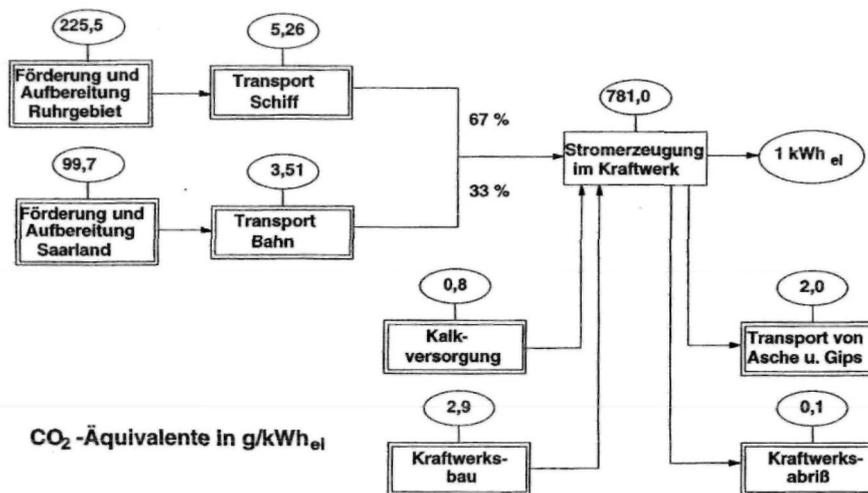


Abbildung 6: GWP-Werte des Prozesskette für die Bereitstellung elektrischer Energie durch Steinkohle

Abbildung 6 veranschaulicht den gleichen Sachverhalt in graphischer Form. Insgesamt werden in dem hier betrachteten Fallbeispiel für die Bereitstellung jeder kWh elektrischer Energie am Ausgang des Kraftwerks CO₂-Äquivalente Emissionen - Kohlendioxid, Methan und Lachgas - in Höhe von durchschnittlich etwa 1 120 g verursacht. Von diesen Emissionen werden hier 98 % bereits in der Prozeßkettenanalyse erfaßt, lediglich 2 % werden im Rahmen der I/O-Analyse berechnet. Von dem gesamten GWP-Wert stammt der größte Teil aus der Emission von Kohlendioxid. Immerhin 27 % werden durch die Methan-Emissionen bei der Steinkohlegewinnung verursacht.

Energiesysteme im Vergleich

Im vorangegangenen wurde die Methode der ganzheitlichen Bilanzierung an einem Beispiel verdeutlicht. Zur Bewältigung des Übergangs auf eine nachhaltige Entwicklung und die dazu notwendige umweltverträgliche Energieversorgung wird es darauf ankommen, diejenigen Energiesysteme zu nutzen, die, „ganzheitlich“ gesehen, am effizientesten mit knappen Ressourcen umgehen. Im folgenden werden einige der uns zur Verfügung stehenden Energien und die für ihre Nutzbarmachung notwendigen Techniken anhand erster Ergebnisse von ganzheitlichen Bilanzen miteinander verglichen. Dabei beschränkt sich hier der Vergleich auf Stromerzeugungsoptionen und zwar auf der Basis erneuerbarer, fossiler und nuklearer Energie.

Die Auswahl der zu bilanzierenden Größen hängt zum einen von der Bedeutung der Größe selbst, zum anderen aber auch von ihrer quantitativen Bestimmbarkeit ab. Hier werden der Materialaufwand, der Energieaufwand, die Emissionen, der Flächenbedarf und die Kosten bestimmt und miteinander verglichen

Im Gegensatz zur detaillierten Bestimmung im vorangegangenen Beispiel werden bei diesem Vergleich einige Vereinfachungen getroffen.

- Die Betrachtung beschränkt sich immer auf Herstellung und Betrieb der Anlagen. Es werden nur die augenscheinlich wichtigsten Prozesse im Rahmen einer Prozeßkettenanalyse bilanziert; die Bilanzierung der sonstigen innerhalb der Volkswirtschaft auftretenden Material- und Energieaufwendungen, Emissionen und Kosten im Rahmen einer I/O-Analyse wird nicht durchgeführt.
- Für die in der Systemdefinition definierten Techniken wird lediglich eine Sachbilanzierung der Energie- und Stoffströme durchgeführt, die Arbeitsschritte der Wirkungsbilanz und der Bewertung werden hier nicht vorgestellt. Lediglich im Zusammenhang mit den Kosten werden auch die externen Kosten - sie stellen eine möglichen Maßstab zur Bewertung von externen Effekten wie z. B. Umweltschäden dar - diskutiert. Dazu werden Zahlenangaben aus anderen Studien herangezogen, in denen der Wirkungsbilanz- und Bewertungsschritt für ähnlichen Referenztechniken durchgeführt wurde.
- Aufgrund der zu erwartenden Weiterentwicklung der konventionellen und der regenerativen Techniken gelten die dargestellten Vergleiche nur für die jeweils ausgewählten Referenzsysteme unter den aufgezeigten Randbedingungen; insbesondere gelten sie

damit nur für den heutigen Stand der Technik und können nur beschränkt für den Vergleich von Techniken für zukünftige Zeitpunkte herangezogen werden.

Die ausgewählten Bilanzierungsgrößen werden für alle Systeme zunächst auf der Basis der Bereitstellung von 1 kWh Strom ermittelt. Damit wird aber nicht der unterschiedlichen Versorgungssicherheit der jeweiligen Systeme Rechnung getragen. Regelbare konventionelle Kraftwerke können dem Leistungsbedarf entsprechend gefahren werden. Windkraftanlagen, Photovoltaikgeneratoren und (eingeschränkt) auch Wasserkraftwerke erzeugen dagegen nur dann elektrische Energie, wenn ein entsprechendes meteorologisches Energieangebot bzw. Wasserdargebot vorhanden ist. Daher sind Kraftwerke auf der Basis fossiler Brennstoffe erforderlich, um die benötigte elektrische Leistung in den Zeiten bereitzustellen, in denen die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien den Bedarf nicht decken kann. Deshalb wird abschließend eine Versorgungsaufgabe definiert und bilanziert, bei der die Strombereitstellung von verschiedenen Energiesystemen mit gleicher Versorgungssicherheit erfüllt werden soll.

Systemdefinition.

Die Bilanzierung erfolgt für die Stromerzeugung aus Solarstrahlung (Photovoltaik), Wind- und Wasserkraft, für die konventionelle Steinkohleverstromung sowie für die Gewinnung elektrischer Energie aus Kernenergie. Die technischen Daten der betrachteten Referenzkraftwerke sind in *Tabelle 4* dargestellt.

Dabei handelt es sich um den aktuellen Stand der Technik, d. h., bei allen Systemen wird von derzeit neu zu bauenden Anlagen ausgegangen. Alle Angaben beziehen sich zudem ausschließlich auf in Deutschland hergestellte und betriebene Anlagen. Das Steinkohlekraftwerk entspricht den gegenwärtigen Anforderungen der GFAVO an Entstaubung, Entschwefelung und Entstickung. Es wird unterstellt, daß die regenerativen Energietechniken unter Ausnutzung des vorhandenen meteorologischen Energieangebots betrieben werden (maximal mögliche mittlere Vollaststunden an einem vorgegebenen Standort), während die konventionellen Kraftwerke im heute üblichen Maß eingesetzt und demzufolge mit Vollaststunden gefahren werden, die unterhalb des technisch Machbaren der einzelnen Kraftwerke liegen.

Materialaufwand.

Tabelle 5 zeigt für ausgewählte Materialien die Materialintensität der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme. Erfasst ist der jeweilige Materialaufwand für den Bau des

Kraftwerks und der Anlagen zur Bereitstellung des Brennstoffs. In der Tabelle ist dabei nur ein kleiner Teil aller Materialien erfaßt; sie stellt also keine vollständige Materialbilanz dar. Sie läßt aber erkennen, daß die geringe Energiedichte der solaren Strahlung und des Windes über die notwendigen großen Energiesammelungsflächen zu einem vergleichsweise hohen Materialaufwand führt.

Tabelle 4: Technische Daten der Referenzkraftwerke [4, 5]

	Nennleistung in MW	Lebensdauer in a	Nutzungsgrad ⁵ in %	Volllaststunden in h/a	Sonstiges
Windenergie ¹	0,5	20	30-40	1 600	4,5 m/s ⁶
				2 400	5,5 m/s ⁶
				3 200	6,5 m/s ⁶
Photovoltaik ¹ (polykrist. ²)	0,005	25	9,1	795 - 960	1 045 - 1 265
	0,025		9,3	815 - 985	kWh/(m ² a) ⁷
	1		9,7	845 - 1 020	
Wasserkraft	10 ³	60 (bzw. 30) ⁴	70-90	5 000	
Steinkohlekraftwerk	700	30	43	5 000	7 % ⁸
Kernkraftwerk	1 300	30	43	6 000	1,9-3,1 % ⁹

¹ Anlagenverfügbarkeit 95 %. ² Jahresmittlerer Anlagenwirkungsgrad bei Zellenwirkungsgrad 12 %. ³ Referenzkraftwerk für Anlagennennleistungen > 1 MW. Gebäude bzw. technische Anlagen. ⁴ Nettonutzungsgrad, berücksichtigt z. B. Wechselrichterverluste der Photovoltaik, Rauchgasentschwefelung der Steinkohlekraftwerke usw. ⁵ Jahresmittlere Geschwindigkeiten in 10 m Höhe über dem Grund. ⁶ Jährliche Einstrahlung auf die geneigte ausgerichtete Fläche. ⁷ Verluste der vorgelagerten Prozeßkette „Steinkohle frei Kraftwerk“ (Förderung, Transport und Aufbereitung des Brennstoffes), Mix aus Importkohle und heimischer Steinkohle, nach [2]. ⁸ Verluste der vorgelagerten Prozeßkette „Uran frei Kraftwerk“

Dem hohen Materialaufwand für die Umwandlungsanlage bei Wind und Photovoltaik steht andererseits gegenüber, daß die Stromerzeugung nicht an eine stoffliche Umsetzung eines Energieträgers gebunden ist. Diesbezügliche Stofffreisetzungen, die zu Umweltbelastungen führen, treten somit nicht auf. Umweltbelastungen, die aus Stoffemissionen resultieren, können demnach nur im Zusammenhang mit der Erstellung des Kraftwerks entstehen. Von allen betrachteten Technologien ist die Photovoltaik durch die größten Materialaufwendungen gekennzeichnet; sie liegen in der Regel mindestens um eine Größen-

Ordnung über den Materialmengen der Steinkohleverstromung. Die Wasserkraft weist im Vergleich zur Steinkohle etwa gleiche spezifische Aufwendungen bei Stahl, dafür aber deutlich höhere spezifische Aufwendungen bei Zement auf.

Tabelle 5: Gesamtmaterialaufwand [4,5] in kg/GWh_{el}¹

	Stahl	NE-Metalle	Zement	Kunststoff	Glas und Quarz
Windenergie ²					
4,5 m/s	2 910-6 640	90- 130 ⁵	1 050 - 2 420	380 - 570	
5,5 m/s	1 940 - 4 470	60 - 90 ⁵	710-1630	250 - 370	-
6,5 m/s	1 460 - 3 370	50- 70 ⁵	530 - 1 230	180 - 280	
Photovoltaik (Polykrist.)	10600-13600	1 510- 1 940	4 310-5540	90 - 120 ⁸	18 120-23 300
Wasserkraft	1 300	-	2 000	-	-
Steinkohle ³	1 200 - 2 550 ⁴	15 ⁶	360 - 520 ⁷	8	-
Kernenergie	530	-	1 280	-	-

¹ Bezogen auf die während der gesamten Lebensdauer erzeugte elektrische Energie.

Alle Anlagen mit horizontaler Achse, Zwei- oder Dreiblattrotor aus Kunststoff, Stahlurm.

Materialaufwand für das Kraftwerk, die Förderung und den Transport.

⁴ Unterer Wert: Förderung im Tagebau, Transport mit dem LKW.

Oberer Wert: Förderung im Tiefbau, Transport mit dem Schiff.

⁵ Kupfer.

Kupfer und Aluminium.

Unterer Wert: Förderung im Tagebau.

Oberer Wert: Förderung im Tiefbau

⁸ Kunststoff einschließlich Propylen.

Kumulierter Energieaufwand.

Die Gewinnung von für den Menschen nutzbare Arbeitsfähigkeit über Energiewandlungsanlagen ist immer mit einem investiven Energieaufwand für die Errichtung der Anlagen und im Falle der nuklearen und fossilen Energieträger für die Bereitstellung des Brennstoffes verbunden. Der Verbrauch von Arbeitsfähigkeit zur Bereitstellung von nutzbarer Energie läßt sich durch Kenngrößen wie kumulierter Energieaufwand, Erntefaktor oder energetische Amortisationszeit beschreiben.

Der kumulierte Energieaufwand (*KEA*) berücksichtigt alle energetischen Aufwendungen, die in ein Produkt einfließen (auch die Energie, die in Stoffen gespeichert ist). Er wird in

der Regel in Primärenergieäquivalenten angegeben. Der Aufwand für die Herstellung (KEA_H) besteht aus sämtlichen energetischen Aufwendungen für die Herstellung eines Produktes, einschließlich der Rohstoffgewinnung und aller vorgelagerten Verarbeitungsstufen. Der kumulierte Energieaufwand für die Nutzung (KEA_N) beinhaltet sämtliche energetischen Aufwendungen, die während der Nutzung eines Produktes anfallen. Brennstoffgewinnung, -aufbereitung und -transport sind in dieser Kenngröße enthalten. Bei den regenerativen Energietechnologien ist der Energieaufwand für den Betrieb der Anlagen im Vergleich zu dem der Anlagenherstellung näherungsweise vernachlässigbar. Bei der Verteuerung von Steinkohle sind demgegenüber die Energieaufwendungen zu berücksichtigen, die für Förderung, Transport und Aufbereitung („vorgelagerte Prozeßkette“) notwendig sind, bis die Brennstoffe gebrauchsfertig ins Kraftwerk gelangen.

Tabelle 6: Kumulierter Primärenergieaufwand, Erntefaktoren und Amortisationszeiten für Herstellung und Betrieb [4, 5]

	KEA in kWh/MWh ³	EF_{Prim}	AZ_{Prim} in Monaten
Windenergie			
4,5 m/s	65-218	13-44	5 - 18
5,5 m/s	44 - 142	20-65	4-12
6,5 m/s	33 - 106	27-86	3 - 9
Photovoltaik (Polykrist.)	650- 840	3,4-5,3	68 - 88
Wasserkraft	13 -33	87 - 220	2 - 4
Steinkohle			
Durch Materialaufwand (KEA_H)	11 - 23		
In vorgelagerter Prozeßkette (KEA_N)	163		
Summe	173 - 185	15- 16	2 - 4
Kernenergie			
Durch Materialaufwand (KEA_H)	6		
In vorgelagerter Prozeßkette (KEA_N) ²	57-91		
Summe	63 - 97	29-45	0,8

KEA für Mix aus Inportkohle und heimischer Steinkohle.

KEA für Mix bei Anreicherung, 70 % Zentrifuge und 30 % Diffusion.

³ Bezogen auf die während der gesamten Lebensdauer erzeugte Energie.

Der Vergleich der energetischen Bilanzgrößen ist in *Tabelle 6* dargestellt. Die Wasserkraftnutzung weist demzufolge von allen Technologien die günstigsten Kennzahlen auf. Die Steinkohle hat im Vergleich zu den laufenden Energieaufwendungen für den Betrieb einen geringen kumulierten Energieaufwand für die Herstellung der Anlage. Der gesamte kumulierte Energieaufwand ist in etwa genau so groß wie für die Windenergie, lediglich der für die Photovoltaik erforderliche Aufwand ist um eine Größenordnung höher. Die bilanzierten Größen der Windenergie sind stark von der Windgeschwindigkeit abhängig: bei einem Anstieg von 4,5 auf 6,5 m/s halbieren sich der kumulierte Energieaufwand und die energetische Amortisationszeit. Der Zeitpunkt der energetischen Amortisation liegt für alle Technologien innerhalb der angenommenen technischen Lebensdauer, allerdings ist die Photovoltaik durch vergleichsweise lange energetische Amortisationszeiten gekennzeichnet.

Kumulierte Emissionen.

Bei der Emissionsbilanz sind neben den Emissionen, die direkt bei der Stromerzeugung im Kraftwerk freiwerden, die indirekten Emissionen zu berücksichtigen, die bei der Herstellung der Anlagen (Kraftwerk und Anlagen zur Brennstoffförderung, -aufbereitung und -transport) sowie während der Nutzung der Anlagen der vorgelagerten Prozeßkette entstehen. Dabei werden hier außer den klassischen Luftschadstoffen (SO_2 , NO_x und Staub) und dem Klimagas Kohlendioxid keine anderen Stofffreisetzungen betrachtet (z. B. die mit dem Abwasser freigesetzten Schadstoffe, radioaktive Stoffe oder Abfälle der Kernenergie).

In Anlehnung an die bisherige Vorgehensweise werden auch hier die Emissionen auf die von den Referenzkraftwerken während ihrer Lebensdauer erzeugte elektrische Energie bezogen. Die Kraftwerksemissionen wurden auf der Grundlage der geltenden gesetzlichen Regelungen (GFAVO, TA-Luft) bestimmt; das beinhaltet für das Steinkohlekraftwerk die Erfüllung der entsprechenden Anforderungen an Entstickung und Entschwefelung [2],

Tabelle 7 zeigt den Vergleich der auf die insgesamt erzeugte elektrische Energie bezogenen spezifischen Emissionen, die mit den technischen Verfügbarkeiten, Lebensdauern und den Vollaststundenzahlen aus den Emissionsfaktoren nach [2] berechnet werden. Die Emissionen der Steinkohleverstromung resultieren hauptsächlich aus der Verbrennung der Kohle. Bei den regenerativen Energiesystemen treten Emissionen nur bei der Herstellung der Anlagen auf. Sie sind demnach weitgehend proportional zum Materialbedarf und

liegen bei der Photovoltaik um eine Größenordnung über den Emissionen der Windenergie und der Wasserkraftnutzung. Die Nutzung der Kernenergie führt bei den hier betrachteten Schadstoffen zu kumulierten Emissionen, die im Bereich der Emissionen der Stromerzeugung aus Windenergie liegen.

Tabelle 7: Kumulierte Emissionen für Herstellung und Betrieb [4, 5] in kg/Gwh

	SO ₂	NO _x	Staub	CO ₂
Windenergie				
4,5 m/s	16,3-34,9	24,1 -50,7	3,0-6,3	16 300 - 35 700
5,5 m/s	10,9-23,5	16,0-34,2	2,0 - 4,3	10 800-24 000
6,5 m/s	8,1- 17,7	12,0-25,8	1,5-3,2	8 100- 18 100
Photovoltaik (Polykrist.)	300 - 380	300 - 380	60- 80	232 000-298 000
Wasserkraft	13	23	2	7 200
Steinkohle				
Durch Materialaufwand	6-11	10- 14	1 -2	4 400 - 7 300
In vorgelag. Prozeßkette	128	137	9	93 000
Emissionen Kraftwerk	570	570	140	781 000
Summe	704 - 709	717-721	150	878 400-881 300
Kernenergie				
Durch Materialaufwand	5	9	1	5 400
In vorgelag. Prozeßkette ¹	28-45	55-87	5-7	13 000-20 000
Emissionen Kraftwerk	0	0	0	0
Summe	33-50	64-96	6-8	18 400 - 25 400

Die Bandbreite ergibt sich aus den unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Verluste in der vorgelagerten Prozeßkette.

Flächenbedarf.

Die verschiedenen Stromerzeugungssysteme nutzen die jeweiligen Flächen in einer unterschiedlichen Form und mit unterschiedlichen Intensitäten. Daher werden die in Anspruch genommenen Flächen in drei verschiedene Kategorien eingeteilt:

Flächentyp I: Flächen, die von den jeweiligen Anlagen vollständig und ausschließlich in Anspruch genommen werden (z. B. Betriebsgebäude, sonstige versiegelte

Flächen allgemein oder das gesamte Betriebsgelände einschließlich der dort vorhandenen Infrastruktur).

Flächentyp II: Flächen, die von den Stromerzeugungssystemen nur teilweise in Anspruch genommen werden oder eingeschränkt auch einer anderen Nutzung zur Verfügung stehen (z. B. Schutzzonen um Kraftwerke, landwirtschaftlich nutzbare Flächen von Windparks).

Flächentyp III: Sonstige Flächen außerhalb des Betriebsgeländes des Kraftwerks, u. a. die indirekt genutzten Gebiete (z. B. Deponien, Kohleabbaugebiete des Tagebaus).

Tabelle 8: Flächenbedarf [4, 5] in $\text{m}^2/(\text{Gwh/a})$ ⁶

	Flächentyp I	Flächentyp II	Flächentyp III
Windenergie			
4,5 m/s	1 900 - 3 500 ¹	15 800 - 109 000 ⁷	0
5,5 m/s	1 300 - 2 300 ¹	10 600 - 71 000 ⁷	0
6,5 m/s	960 - 1 700 ¹	8 000 - 53 000 ⁷	0
Photovoltaik (Polykrist)	0 ² - 47 200 ³	0	0
Wasserkraft	0	40	0
Steinkohle	30 - 60 ⁴	1400 ⁸	250 - 20 700 ⁹
Kernenergie	54 ⁵	620 ⁸	1 350 ¹⁰

¹ Flächenbedarf für Windkraftanlagenfundament, Betriebsgebäude und Servicewege.

² Flächenbedarf für Photovoltaikkraftwerke bei Integration in bestehende Bauten.

³ Flächenbedarf für Photovoltaikkraftwerke bei einem Abstandsfaktor von 3; keine landwirtschaftliche Nutzung; einschl. Zuwege, Servicegebäude sowie Abstand innerhalb der Reihen.

⁴ Unterer Wert: Flächenbedarf Kraftwerk für Betriebsgebäude, Kühltürme, Kohleneingangslager.

Oberer Wert: Fläche innerhalb Anlagenzaun.

Flächenbedarf für Kraftwerk, Aufbereitung, Konversion, Anreicherung und Brennelementefertigung.

⁶ Bezogen auf die jährlich erzeugte elektrische Energie.

Restlicher Flächenbedarf des Windparks bei einem Abstandsfaktor zwischen 6 und 12.

Mittlerer Flächenbedarf aufgrund des Sicherheitsabstandes zum Kraftwerk (1 000 m).

⁹ Flächenbedarf für die Steinkohleförderung im Tiefbau oder Tagebau.

¹⁰ Flächenbedarf für die Uran-Förderung.

Hier werden nur die wichtigsten für den Betrieb der Anlagen benötigten Flächen berücksichtigt. Anteilmäßig in Anspruch genommene Flächen wie die öffentlichen Verkehrswege für den Transport, die Flächen für die Fabrikgebäude zur Herstellung der Anlagen

oder der Flächenbedarf für die Stromverteilung werden bei allen Systemen außer acht gelassen. Damit ist bei der Windenergie nur die Fläche der eigentlichen Windkraftanlage bzw. des Windparks einzubeziehen (unter Berücksichtigung der ausschließlich für den Windpark notwendigen Straßen und Betriebsgebäude). Bei der Stromerzeugung aus Photovoltaikkraftwerken wird die gesamte innerhalb des Betriebsgeländes liegende Fläche dem Flächentyp I zugeordnet, also auch die zwischen den Modulen freibleibende Fläche, die zur Vermeidung von Abschattungseffekten benötigt wird.

Den Vergleich des spezifischen Flächenbedarfs zeigt *Tabelle 8*. Im Gegensatz zu der bisherigen Vorgehensweise wurden dabei die Flächen auf die jährlich erzeugte und nicht auf die in der gesamten Lebensdauer der Anlagen erzeugte elektrische Energie bezogen. Damit wird der unterschiedlichen Dauer der Flächennutzung Rechnung getragen.

Die Anlagen und Betriebsgebäude der Windkonverter haben selbst an Standorten mit hohem Windangebot einen Flächenbedarf, der um mehr als eine Größenordnung über dem Flächenbedarf der Steinkohle oder der Kernenergie liegt. Photovoltaikkraftwerke auf Freiflächen haben einen um bis zu drei Größenordnungen höheren Bedarf an ausschließlich genutzter Fläche. Diese Flächen können prinzipiell in Gebäude oder andere Bauwerke integriert werden, so daß die bereits vorhandenen Flächen doppelt genutzt werden und damit nicht mehr dieser regenerativen Energietechnik zugerechnet werden müssen. Demgegenüber fällt der Vergleich der sonstigen Flächen (Flächentyp III) eindeutig zu Gunsten der regenerativen Energiesysteme aus, da diese im Gegensatz zur Steinkohle oder zur Kernenergie keine Flächen für die Förderung und Bereitstellung der Betriebsstoffe benötigen, wobei der Flächenbedarf der Kernenergie im Vergleich zur Steinkohle im Tagebau eine Größenordnung niedriger, im Vergleich zum Tiefbau eine Größenordnung höher liegt.

Kosten.

Mit Hilfe eines Kostenvergleichs können weitere Entscheidungshilfen im Hinblick auf den Einsatz oder Nichteinsatz einzelner Stromerzeugungssysteme oder auch einzelner Kraftwerke bereitgestellt werden. Die betriebswirtschaftlichen Kosten setzen sich aus den Investitionen und den Betriebskosten zusammen. Darüber hinaus können die Kosten als Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen als eine von verschiedenen Methoden zur Bewertung von Bilanzierungsergebnissen verwendet werden. In diesem Fall werden zusätzlich die finanziellen Aufwendungen betrachtet, die sich aus der Monetarisierung der noch nicht im betriebswirtschaftlichen Kostenkalkül enthaltenen externen Effekte ergeben

(„externe Kosten“). Unter den externen Kosten der Stromerzeugung sind alle als Folge der Elektrizitätserzeugung auftretenden technologiebedingten Aufwendungen zu verstehen, die nicht der Produzent, sondern dritte Personen oder die Allgemeinheit zu tragen haben. Der Begriff Elektrizitätserzeugung schließt dabei die vor- und nachgelagerten Prozeßstufen mit ein, wie z. B. Bau der Anlagen, Energieträrgewinnung und -transport sowie Entsorgung. Volkswirtschaftlich betrachtet führt die Nichterfassung externer Kosten in der betriebswirtschaftlichen Rechnung und somit auch in den Preisen zur Fehlallokation knapper Ressourcen.

Die Internalisierung der externen Kosten stellt damit ein Hilfsmittel dar, um für die Volkswirtschaft optimale Entscheidungen zu treffen. Dazu müssen sie allerdings bekannt und quantifizierbar sein. Dies ist jedoch aufgrund der teilweise unbekanntem externen Effekte und der mangelnden Quantifizierbarkeit bekannter sekundärer Einflüsse (z. B. visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch Windkraftanlagen) sehr schwierig und nicht zweifelsfrei möglich. Daher sind die Methoden und die Ergebnisse der verschiedenen Studien zu externen Kosten mit Unsicherheiten behaftet.

Tabelle 9 zeigt die Kosten aus Investition und Betrieb. Unter bestimmten Randbedingungen weisen die betriebswirtschaftlichen Kosten die Nutzung der Windenergie bereits heute als rentabel aus. Auf die Photovoltaik trifft diese Aussage gegenwärtig nicht zu; die betriebswirtschaftlichen Kosten liegen heute etwa um den Faktor 10 bis 20 über den Kosten der Kernenergienutzung oder der Steinkohleverstromung. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Abschätzung einiger externer Kosten dargestellt [7]. Dabei wurde zwischen den externen Kosten der Gesundheitsauswirkungen, des Ressourcenverzehr, der Umweltbelastung und der Forschung und Entwicklung sowie den Subventionen unterschieden. Nicht berücksichtigt in dieser Zusammenstellung sind u. a. die externen Kosten, die sich durch die möglichen Klimaveränderungen, verursacht durch die Emissionen anthropogener klimarelevanter Gase (bei der Stromerzeugung im wesentlichen CO_2 und CH_4), ergeben.

Bei den regenerativen Energietechniken sowie der Kernenergie ist der Großteil der quantifizierten externen Kosten auf die Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen zurückzuführen. Bei der Steinkohle machen die Subventionen (Kohlepfennig) und die möglichen Auswirkungen auf die Gesundheit den größten externen Kostenanteil aus. Der Vergleich der betriebswirtschaftlichen Gestehungskosten mit den externen Kosten verdeutlicht allerdings, daß diese gegenwärtig quantifizierbaren externen Kosten nur einen Bruchteil der

durch Investitionen und Betrieb verursachten finanziellen Aufwendungen ausmachen. Durch die Vernachlässigung der externen Effekte verändert sich damit die Kostenrelation der regenerativen und der konventionellen Stromerzeugung nicht grundlegend. Diese Aussage gilt nur für die Annahmen, unter denen die hier dargestellten externen Kosten berechnet wurden. In anderen Quellen findet man abweichende Angaben zu den externen Kosten [8].

Tabelle 9: Spezifische Energiekosten in Deutschland [4, 5] in PfkWh ¹

	Windenergie			Photo- voltaik	Wasser- kraft	Steinkohle	Kernenergie
	4,5 m/s	5,5 m/s	6,5 m/s				
Inv. u. Betrieb ²	17,0- 30,0	11,0- 20,0	8,0- 15,0	100- 230 ⁶	7-30	14,4- 15,7 ⁴ 9,7-11,1 ³	8,6 - 9,6 ⁵
externe Kosten:							
Gesundheit	0,02 - 0,05			0,06- 0,10		0,19- 1,47	0,02-0,11
Umwelt Wald Lärm Tiere u. Pflanz. Material	0-0,01					0,20 0,02 0,05 - 0,09	0,01 - 0,08
Ressourcenverzehr						0 - 0,03	0 - 0,03
Forschung und Entwicklung	0 - 0,36			0- 1,34		0 - 0,06	0 - 0,48
Subventionen						0 - 0,62	0 - 0,03
Summe externe Kosten	0,02 - 0,42			0,06- 1,44	k. A.	0,46 - 2,49	0,03 - 0,73

¹ in Pf₁₉₉₀/kWh.

² Abschreibungsdauer 20 Jahre, realer Zinssatz 4 %.

³ 4 000 bis 5 000 Vollaststunden im Jahr, Importkohle.

⁴ 4 000 bis 5 000 Vollaststunden im Jahr, heimische Steinkohle.

⁵ 6 000 bis 7 000 Vollaststunden im Jahr.

⁶ Bandbreite für monokristalline, polykristalline oder amorphe Zellen; Einstrahlung 1 045 bis 1 265 kWh/(m²a), jährliche Einstrahlung auf die geneigte ausgerichtete Fläche.

Vergleich am Beispiel einer Versorgungsaufgabe.

Um die Stromnachfrage jederzeit zu decken, müssen bei regenerativen Systemen Speicher oder andere Kraftwerke die Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage ausglei-

chen. Im folgenden wird daher von einer definierten Versorgungsaufgabe ausgegangen, die entweder ausschließlich durch ein Steinkohlekraftwerk oder durch ein kombiniertes Stromerzeugungssystem, bestehend aus Steinkohlekraftwerken und einer vorzugebenden Windkraft- bzw. Photovoltaikanlagenleistung, zu decken ist.

Die fiktive Nachfrage ist durch einen jährlichen Gesamtstrombedarf von 25 000 GWh und einer Höchstlast von 5 000 MW gekennzeichnet. Zur Nachfragedeckung wird eine regenerative Leistung von 2 500 MW integriert. Abhängig von der Technik und der mittleren Windgeschwindigkeit bzw. der solaren Strahlung beträgt die Durchdringung (also das Verhältnis zwischen der jährlichen regenerativen Stromerzeugung zum gesamten elektrischen Energiebedarf innerhalb des betrachteten Versorgungsgebietes) unter den gewählten Bedingungen 15 bis 33 % bei der Windenergie bzw. 8 bis 10 % bei der Photovoltaik. Unter diesen Bedingungen entsteht kein nennenswerter über die augenblickliche Nachfrage hinausgehender Überschußstrom, der dann zwischengespeichert werden müßte. Die gesicherte Leistung von Windkraftanlagen liegt unter den Windverhältnissen in Deutschland zwischen 5 und 10 % und wird hier zu 7,5 % angenommen. Der entsprechende Wert der photovoltaischen Anlagen liegt bei etwa 2 % (vgl. [9, 10]).

Für die kombinierten Systeme werden alle bisher bilanzierten Größen berechnet und einander gegenübergestellt (*Tabelle 10*). Dabei ist zu beachten, daß eine windtechnische Leistung von 2 500 MW das Potential der in Deutschland nutzbaren Standorte, die durch jahresmittlere Windgeschwindigkeiten von mehr als 6 m/s gekennzeichnet sind, bereits um ca. 600 MW übersteigt (vgl. [2]). Als realistischere Vergleichswerte sollten daher eher die entsprechenden Werte der jahresmittleren Windgeschwindigkeiten von 4,5 oder 5,5 m/s herangezogen werden.

Durch die Integration windtechnischer oder photovoltaischer Leistung kommt es beim Materialaufwand insgesamt zu einer deutlichen Erhöhung der spezifischen Werte. Ursache ist, daß sich beim kombinierten System die installierte Leistung der Steinkohlekraftwerke durch die gesicherte regenerative Leistung nur geringfügig verringert, während gleichzeitig Windkraftanlagen bzw. Photovoltaik-Kraftwerke mit ihrem hohen Materialbedarf hinzukommen. Auch eine Nutzung der Windkraft an Standorten mit hoher mittlerer Windgeschwindigkeit hat auf diesen Zusammenhang nur einen geringen Einfluß. Die Materialaufwendungen des Steinkohle-Photovoltaiksystems liegen sogar etwa doppelt so hoch wie die des reinen Steinkohlesystems.

Werden die energetischen Kenngrößen miteinander verglichen, zeigt sich, daß durch die Integration windtechnischer Leistung die Erntefaktoren des Gesamtsystems erhöht werden, während sie durch die Integration photovoltaischer Leistung tendenziell eher verringert werden. Da die Amortisationszeit wesentlich von den kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung (KEA_H) beeinflusst wird, bewirkt die Integration photovoltaischer Leistung sogar eine Erhöhung der energetischen Amortisationszeit. Bei der Windenergie bleiben diese Kennzahlen gleich bzw. sinken geringfügig. Letzteres gilt allerdings nur für den Fall einer Integration von Windkraftanlagen an Standorten mit hohen jahresmittleren Windgeschwindigkeiten.

Tabelle 10: Vergleich der Bilanzierungsgrößen am Beispiel einer Versorgungsaufgabe [4, 5]

		Nur Steinkohle	Steinkohle und Windenergie 4,5 m/s	Steinkohle und Windenergie 5,5 m/s	Steinkohle und Windenergie 6,5 m/s	Steinkohle und Photovoltaik Polykristall.
Materialaufwand	kg/GWh					
Stahl		1 200-2 550	1 540-3 340	1 500-3 190	1 570-3 360	2 200-3 500
Zement		360 - 520	410-585	410-580	410-565	800 - 940
Kumul. Energieaufwand						
Primären.Erntefakt.		15-16	17-19	19-21	20-23	15-16
Primären. Amort.-zeit	Monate	1,9-3,9	1,9-3,9	1,9-3,8	1,8-3,6	4 - 6
Kumulierte Emissionen						
SO ₂	kg/GWh	710	600	550	490	680
CO ₂	t/GWh	880	710	650	580	790
Flächenbedarf	m ² / (GWh a)					
Flächentyp I		30-60	366-575	366-575	366-575	30 - 3 800
Flächentyp II		1 400	3 955-4 994	3 955-4 995	3 955-4 994	1 400
Flächentyp III		230-20 700	200-18 600	180-16 000	160-14 300	210-19 100
Kosten	Pf/kWh					
Betriebswirt. Kosten		9,7- 15,7	12,3-20,7	11,3- 19,1	10,4- 17,6	19-37
Externe Kosten		0,5-2,5	0,4 - 2,2	0,4 - 2,0	0,3- 1,8	0,4 - 2,4

Versorgungsaufgabe: Höchstlast 5 000 MW, jährlicher Energiebedarf 25 000 GWh. Installierte windtechnische Leistung: 2 500 MW. Anlagenmix aus kleinen, mittleren und großen Anlagen. Installierte solartechnische Leistung: 2 500 MW. Definitionen und Annahmen zum Kumulierten Energieaufwand (KEA).

Der Wirtschaftlichkeitsvergleich zeigt eine Erhöhung der Kosten der kombinierten Systeme im Vergleich zur ausschließlichen Steinkohleverstromung. Während sich die Kosten durch die Windkraftintegration nur relativ gering erhöhen, steigen sie im kombinier-

ten Steinkohle-Photovoltaiksystem auf das Doppelte an. Obwohl die externen Kosten der kombinierten Systeme niedriger sind als die externen Kosten bei einer ausschließlichen Steinkohleverstromung, ändert sich diese prinzipielle Relation auch durch eine Berücksichtigung der derzeit quantifizierbaren externen Kosten nur unwesentlich.

Ausblick

Sinnvolle Nutzung stofflich gebundener Abfallenergie, Minimierung nicht stofflich gebundener Abfallenergie sowie weitergehende Nutzung von unvermeidbarer nicht stofflich gebundener Abfallenergie - dies sind Kriterien, an denen die zukünftige Energieversorgung gemessen wird. Für eine Beurteilung, inwieweit Energiewandlungsketten bzw. Energiesysteme diese Kriterien erfüllen, kann eine ganzheitliche Bilanzierung wichtige Informationen liefern. Eine derartige Bilanzierung hat zum Ziel, die positiven und negativen Auswirkungen von Produkten und Systemen möglichst vollständig zu erfassen und vergleichend zu bewerten.

Vor diesem Hintergrund wurde die methodische Vorgehensweise einer ganzheitlichen Bilanzierung hier vorgestellt. Anhand ausgewählter Stromerzeugungssysteme wurden anschließend einige erste Ergebnisse ganzheitlicher Bilanzen exemplarisch dargestellt und diskutiert. Bereits bei den wenigen hier beispielhaft dargestellten ganzheitlichen Bilanzierungen wurden zahlreiche Probleme deutlich. Dazu zählt u. a. das Fehlen von Daten für die Bilanzierung bestimmter Energie- und Stoffströme, die Unsicherheiten über die Weiterentwicklung der Techniken im einzelnen, die Bilanzierung indirekter Aufwendungen wie z. B. die Benutzung von Infrastruktur etc. Noch komplexer gestaltet sich die Analyse der Wirkungen von bilanzierten Energie- und Stoffströmen, insbesondere dann, wenn diese zuletzt noch einer Bewertung unterzogen werden sollen.

Im Vergleich zur Gegenüberstellung verschiedener Energiewandlungsketten erweitert sich bei der Anwendung der ganzheitlichen Bilanzierung auf Energiewandlungsketten mit Abfallenergienutzung die Fragestellung: Beim dem Vergleich von Energiewandlungsketten steht die Frage im Vordergrund, welche Technik unter Berücksichtigung technischer, ökologischer und ökonomischer Kriterien bei vorgegebenen Randbedingungen anderen Techniken vorzuziehen ist. Bei der Analyse der energetischen Nutzung von Abfällen ist neben der Gegenüberstellung der Abfallenergienutzung versus anderen Möglichkeit der

Energiebereitstellung auch die Gegenüberstellung der energetischen und der stofflichen Nutzung von Abfällen wesentlich. Neben der stofflichen und der energetischen Nutzung der Abfälle ist die Deponierung eine weitere Möglichkeit der Abfallentsorgung. Daher ist auch sie in den Vergleich mit einzubeziehen. Die Anwendung der ganzheitlichen Bilanzierung auf die „Abfallenergienutzung“ wird sich damit als noch wesentlich komplexer herausstellen als ihre Anwendung lediglich auf die Problematik der Energiebereitstellung.

Literatur

- [1] Friedrich, R. Marheineke. T.: Technology assessment of energy technologies
in IAEA (Hrsg.); Proceedings of the IAEA Workshop/Advisory Group; Meeting on full-energy chain assessment of greenhouse gas emission factors
IAEA, Wien, zur Veröffentlichung vorgesehen 1995
- [2] Fritsche, U. u. a.: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme; Öko-Institut Darmstadt, Darmstadt, 1992
- [3] Stelzer, T.: Grundlagen der ganzheitlichen Bilanzierung; Internes Arbeitspapier, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 1994
- [4] Voß, A.; Stelzer, Th.; Wiese, A.: Vergleichende Bilanzierung verschiedener Stromerzeugungsoptionen; Vortrag, Tagung „Ganzheitliche Bilanzierung von Industrieprodukten“, Frankfurt, Dezember, 1993
- [5] Stelzer, Th.; Wiese, A.: Ganzheitliche Bilanzierung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern; 9 Internationales Sonnenforum 1994, Stuttgart Bundesrepublik Deutschland, Tagungsband S. 1636 - 1643
- [6] IPCC (Hrsg.): Climate Change 1992, The supplementary report to the IPCC scientific Assessment; Cambridge, 1992
- [7] Mayerhofer, P.; Krewitt, W.; Trukenmüller, A.; Domrös, R.; Friedrich, R.: Externe Kosten der Energieversorgung; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Stuttgart, 1992
- [8] Hohmeyer, O.: Soziale Kosten der Energieversorgung; Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg, New York, 1989, 2. Auflage
- [9] Wiese, A.; Kaltschmitt, M.: Regenerative Stromerzeugung in Deutschland - Technische Möglichkeiten und ökonomische Grenzen; Elektrotechnische Zeitschrift, Band 114 (1993). Heft 23-24, S. 1432 -1437
- [10] Wiese, A.: Ausgleichseffekte, gesicherte Leistung und Speicherbedarf einer großtechnischen regenerativen Stromerzeugung in Deutschland. 9. Internationales Sonnenforum 1994, Stuttgart, Tagungsband S. 1539-1546