

# Ökobilanzen erneuerbarer Energiesysteme

Ines Junghans

Sachsenhofstraße 6, 09599 Freiberg, Deutschland

**Abstract.** Die verstärkte Nutzung regenerativer Energien soll die Energieversorgung umweltfreundlicher und ressourcenschonender gestalten. Im Folgenden werden die erneuerbaren Energien kurz vorgestellt sowie die Methode der Ökobilanzierung erläutert. Es werden Ökobilanzen ausgewählter Energiesysteme betrachtet und ein Vergleich der erneuerbaren Energien untereinander, als auch mit fossilen Energieträgern unternommen. Dabei wird eine Abschätzung der Entwicklung für die Jahre 2010 und 2020 gegeben.

## Einleitung

Das Bundesumweltministerium veröffentlichte zu Beginn des Jahres eine erste Abschätzung für die Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2004. Demnach hat sich die Nutzung erneuerbarer Energien positiv weiterentwickelt. Nach Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEEStat) erhöhte sich der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch von rund 7,9% in 2003 auf rund 9,3% in 2004. Ziel der Bundesregierung ist es, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung bis zum Jahr 2010 gegenüber 2000 auf mindestens 12,5% zu verdoppeln. Bis Mitte des Jahrhunderts sollen erneuerbare Energien rund 50% des Energieverbrauchs in Deutschland decken.

Unzweifelhaft führt der forcierte Ausbau erneuerbarer Energien hinsichtlich der Schonung fossiler Energieressourcen und der Verringerung von Treibhausgasemissionen zu deutlichen ökologischen Entlastungswirkungen. Wie bei jeder

technologischen Aktivität stehen diesen Entlastungen punktuell auch umweltbelastende Auswirkungen gegenüber. Eine Möglichkeit zu klären, ob erneuerbare Energieträger tatsächlich zu Umweltentlastungen beitragen bietet die Erstellung von Ökobilanzen. Mit ihrer Hilfe können die im Verlauf der Stromerzeugung auftretenden Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen untersucht werden.

## Was versteht man unter erneuerbaren Energien?

Unter erneuerbaren Energien versteht man die Primärenergien, die – gemessen in menschlichen Dimensionen – als unerschöpflich angesehen werden können. Sie werden laufend aus den Energiequellen Solarenergie, geothermische Energie und Gezeitenenergie gespeist (Kaltschmitt et al. 2003).

Nach §3 des Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG 2004) werden die Erscheinungsformen erneuerbarer Energien wie folgt definiert: „Erneuerbare Energien sind Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Geothermie, Energie aus Biomasse einschließlich Biogas, Deponiegas und Klärgas sowie aus dem biologisch abbaubaren Anteil von Abfällen aus Haushalten und Industrie.

Es stehen mittlerweile zahlreiche Nutzungstechnologien zur Verfügung, die sich im Hinblick auf Entwicklungsstand, Kosten, Leistung, Einsatzbereiche und Entwicklungspotenzial deutlich voneinander unterscheiden. Erneuerbare Energien können sowohl zur Strom- und Wärmeerzeugung als auch in Form von Biokraftstoffen genutzt werden.

**Windenergie.** Zur Stromerzeugung wird die Bewegungsenergie des Windes genutzt. Moderne Windkraftanlagen arbeiten heute zumeist mit dem Auftriebsprinzip. Der Wind erzeugt beim Vorbeiströmen an den Flügeln der Windkraftanlage einen Auftrieb, der infolgedessen den Flügel der Anlage in Rotation versetzt. Der Gütegrad von Windkraftwerken beläuft sich auf einen Wert von 60% (Nill 2004). Nach aktueller Schätzung der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEEStat) des BMU liegt die Windenergie bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (2004) mit 44,8% an der Spitze (BMU 2005). Weiteres Ausbaupotential ist in der Erneuerung bzw. dem Ersatz alter, kleiner Windanlagen durch modernere und leistungsfähigere Windanlagen (auch als Repowering bezeichnet), sowie im Bau von Offshore-Windparks zu sehen.

**Wasserkraft.** In Wasserkraftanlagen wird die kinetische und potentielle Energie des Wassers in elektrische Energie umgewandelt. Zum Einsatz kommen Speicherkraftwerke, z.B. Talsperren-Speicherkraftwerke oder Laufwasserkraftwerke. Der Gütegrad von Wasserkraftwerken beläuft sich auf 80% (Nill 2004). Im vergangenen Jahr (2004) wurden 37,6% des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stromes mittels Wasserkraftanlagen gewonnen (BMU 2005). Potentiale für den weiteren Ausbau der Wasserkraft liegen vor allem im Ersatz sowie in der Modernisierung und Erweiterung vorhandener Anlagen.

**Photovoltaik.** Hier wird mit Hilfe von Solarzellen Sonnenlicht in elektrischen Strom umgewandelt. Die Grundlage dafür bildet der innere photoelektrische Ef-

fekt. Nach Nill (2004) wird dabei „die Energie der Photonen, also die des einstrahlten Lichts, in potentielle oder kinetische Energie von Elektronen überführt“. Er gibt für die Stromerzeugung mit Photovoltaikanlagen (auf der Basis von kristallinem Silizium) einen Gütegrad von 34% an. Der Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen, betrug aber nach aktueller Schätzung der (AGEEStat) im Jahr 2004 erst 0,9% (BMU 2005).

**Biomasse.** Der Energiegewinnung aus Biomasse können sehr unterschiedliche Rohstoffquellen dienen. Kaltschmitt & Reinhardt (1997) teilen das Aufkommen in Biomasse aus gezieltem Anbau von Energiepflanzen und Biomasse aus Rückständen (z.B. Stroh, Sägemehl, Altholz,...) auf. Zur Biomasse werden auch Gülle und Stoffe tierischer Herkunft gezählt. Eine effiziente Form der Biomassennutzung stellt der Einsatz in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen dar, weitere Möglichkeiten bilden die Mitverbrennung in existierenden Kraftwerken oder alternativ die Vergasung. Derzeit erreichen Biomassekraftwerke einen Gütegrad von 38% (Nill 2004).

**Biogas.** Biogas entsteht bei der Zersetzung von organischer Materie durch Methanbakterien (Vergärung). Die Verstromung von Biogas kann in Motorblockheizkraftwerken erfolgen. Der Gütegrad der Energieumwandlung in Biogasanlagen beträgt 35% (Nill 2004). Biogas hatte im vergangenen Jahr einen Anteil von 2,4% an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (BMU 2005).

**Geothermie.** Die Geothermie, welche die Wärme des Erdkörpers nutzt, wird bislang vorwiegend zur Wärmeengewinnung genutzt, sie kann aber auch zur Stromerzeugung dienen. Diese ist zum einen durch die Nutzung eines im tieferen Untergrund vorhandenen Thermalwassers und zum anderen mit der Hot-Dry-Rock-(HDR) Technologie auch ohne Vorhandensein von wasserführenden Schichten im Untergrund möglich. Der Gütegrad beläuft sich derzeit auf 27% (Nill 2004).

## Die Ökobilanz

Nach DIN EN ISO 14040 (1997) ist die Ökobilanz als „eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktions-spezifischen potentiellen Umweltauswirkungen“ definiert. Dafür ist nach DIN EN ISO 14040 (1997) eine Sachbilanz von relevanten Input- und Outputflüssen eines Produktsystems zusammenzustellen, die mit diesen Inputs und Outputs verbundenen potentiellen Umweltwirkungen zu beurteilen und im Anschluss sind die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung hinsichtlich der Zielstellung der Ökobilanzstudie auszuwerten. Somit können die im Verlauf des Lebensweges eines Produktes, angefangen von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und die Anwendung bis hin zur Beseitigung, auftretenden Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen, wie z.B. die Nutzung von Ressourcen, untersucht werden.

Die Grundlage für die Erstellung einer Ökobilanz bildet die Europäische Norm DIN EN ISO 14040 (1997). In ihr sind Prinzipien und allgemeine Anforderungen

an die Durchführung und Berichterstattung einer Ökobilanzstudie festgelegt. Ergänzend gilt die DIN EN ISO 14041 (1998), welche zusätzlich Anforderungen und Verfahren erläutert, „die für die Zusammenstellung und Abfassung der Festlegung des Ziels einer Ökobilanz sowie für die Durchführung, Auswertung und den Bericht einer Sachbilanz notwendig sind“. Die Wirkungsabschätzung als dritte Phase der Ökobilanz wird in ihren Grundsätzen und allgemeinen Anforderungen in der Norm DIN EN ISO 14042 (2000) definiert. Sie legt zudem „Anforderungen an die Durchführung der Wirkungsabschätzungsphase und die Beziehungen zu den anderen Phasen der Ökobilanz fest“. Anforderung an und Empfehlungen für die Auswertung von Ökobilanzstudien legt die internationale Norm DIN EN ISO 14043 (2000) fest. Als feste Glieder muss eine Ökobilanz die Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung der Ergebnisse enthalten. Ein weiterer Bestandteil kann die kritische Prüfung sein. Im Folgenden werden die einzelnen Anforderungen/Teilschritte einer Ökobilanz näher erläutert.

### ***Festlegung und Ziel des Untersuchungsrahmens***

Nach § 5.1 DIN EN ISO 14040 (1997) sind zu Beginn der Ökobilanz Ziel und Untersuchungsrahmen eindeutig festzulegen. Dies sollte in Abstimmung mit der beabsichtigten Verwendung bzw. Zielgruppe erfolgen. Als eine der wichtigsten Entscheidungen ist die Formulierung des Untersuchungsrahmens anzusehen, da er die Basis der Studie, also das vorgegebene Ziel der Untersuchung, darstellt. Der Untersuchungsrahmen beinhaltet neben der Beschreibung des Produktsystems, dessen Funktion und die funktionelle Einheit. Diese stellt ein Maß für den Nutzen des Produktionssystems dar und dient als Vergleichseinheit bzw. Bezugsgröße, auf welche Input und Outputdaten normiert werden. Durch die Definition von Systemgrenzen wird festgelegt, welche Prozesse im Lebensweg des Produktes berücksichtigt werden. Dabei sind die zur Festlegung angewendeten Kriterien zu beschreiben und zu begründen. Die zugrunde liegenden Daten sollten den Zielen und dem Untersuchungsrahmen der Studie entsprechen. Besonderes Augenmerk ist unter anderem auf den Geltungsbereich, die Genauigkeit und Vollständigkeit, die Datenquellen sowie die Repräsentativität der Daten zu legen.

### ***Sachbilanz***

Die Sachbilanz umfasst „Datensammlung und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems. Diese In- und Outputs können sich auf Beanspruchung von zum System gehörenden Ressourcen sowie auf die Emissionen in Luft, Wasser und Boden beziehen“ (§ 5.2 DIN EN ISO 14040, 1997). Diese Daten bilden die Grundlage für die in den nächsten Schritten folgende Wirkungsabschätzung und Auswertung. Zur Berechnung der Sachbilanz kommen mehrere Verfahren zum Einsatz, die im Folgenden beschrieben werden.

**Prozesskettenanalyse.** Die Prozesskettenanalyse stellt ein mathematisches Verfahren dar, mit welchem die einzelnen Prozesse (Teilsysteme) mit Hilfe von

physischen Größen (z.B. kg Brennstoff für Herstellung einer kWh Strom) verknüpft werden können. Vorteil dieser Methode ist die detaillierte Abbildung des Lebensweges, woraus die kumulierte Umweltinanspruchnahme genau ermittelt werden kann. Jedoch birgt die vollständige Erfassung des Lebensweges einen großen Bilanzierungsaufwand. Aus diesem Grund ist die Definition von Abbruchkriterien, zur Reduktion der betrachteten Prozessschritte, notwendig. Folgend kann dies aber zu einer systematischen Unterschätzung der Umwelteinwirkungen führen. Die Prozesskettenanalyse erfordert einen großen Datenumfang und ist damit oft zeit- und kostenintensiv.

**Input-Output-Analyse.** Auf Grundlage von im Rahmen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung erstellten Input-Output-Tabellen werden in aggregierter Form die einzelnen Sektoren einer Volkswirtschaft durch monetäre Güterströme beschrieben. Der Vorteil der Input-Output-Analyse liegt in ihrer einfachen Anwendbarkeit, die erforderlichen Basisdaten stehen kostengünstig und regelmäßig aktualisiert zur Verfügung. Als nachteilig sind der hohe Aggregationsgrad der Input-Output-Tabellen und verallgemeinerte Annahmen bei der Bilanzierung einzuschätzen. Mit Hilfe der Input-Output-Analyse können die Umweltbelastungen eines Gutes über dessen Preis ermittelt werden.

**Hybrid-Methode.** Eine Kombination der Input-Output-Analyse und Prozesskettenanalyse stellt die Hybrid-Methode dar, welche die Fehler die beide Verfahren bergen verringert. Es sind mehrere Verfahren bekannt. Im Wesentlichen wird zuerst eine Prozesskettenanalyse durchgeführt, aufgrund der damit erzielbaren höheren Genauigkeit. Um ausgeklammerte Prozesse zu betrachten (Abbruchkriterium) kommt die Input-Output-Analyse zum Einsatz.

### **Wirkungsabschätzung**

„In dieser Phase der Ökobilanz wird die Beurteilung der Bedeutung potentieller Umweltauswirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz angestrebt“ (§ 5.3 DIN EN ISO 14040, 1997). Dazu werden die Informationen aus der Sachbilanz zusammengeführt, verdichtet und in Hinblick auf mögliche Umweltauswirkungen ausgewertet. Zuerst werden nach § 4.2.2 DIN EN ISO 14042 (2000) Wirkungskategorien, zugehörige Indikatoren und Charakterisierungsmodelle identifiziert. Dann werden den Sachbilanzdaten Wirkungskategorien zugeordnet (Klassifizierung), anschließend werden die verschiedenen Sachbilanzgrößen innerhalb einer Wirkungskategorie zu einem Wirkungsindikator aggregiert (Charakterisierung).

Nach DIN EN ISO 14040 (1997) enthält die Phase der Wirkungsabschätzung „subjektive Elemente, beispielsweise bei der Auswahl, Modellierung und Beurteilung der Wirkungskategorien. Deshalb ist bei der Wirkungsabschätzung die Transparenz entscheidend, um sicherzustellen, dass die Annahmen eindeutig beschrieben und dargestellt werden.“ Die Wirkungsabschätzung ist im Vergleich zur Sachbilanz einfacher zu handhaben, da sie in der Regel nur wenige Indikatorwerte liefert. Zudem sind die Wirkungsindikatoren durch die konkrete Abbildung von Umweltauswirkungen besser interpretierbar. Weitere fakultative Bestandteile der Wirkungsabschätzung sind die Normierung, Ordnung oder Gewichtung der Indikatorergebnisse, sowie die Analyse der Datenqualität.

### Auswertung

In dieser letzten Phase der Ökobilanz werden die gewonnenen Ergebnisse im Hinblick auf das formulierte Ziel der Ökobilanz ausgewertet. Die Anforderungen und Empfehlungen für die Durchführung der Auswertung sind in der Richtlinie DIN EN ISO 14043 (2000) festgelegt und umfassen die drei folgenden Bestandteile. Die „Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz- und Wirkungsabschätzungs-Phasen der Ökobilanz“, eine „Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt“, sowie „Schlussfolgerungen, Empfehlungen und der Bericht über die signifikanten Parameter“.

### Ökobilanzen ausgewählter erneuerbarer Energien

Im folgenden Abschnitt werden Ökobilanzen verschiedener erneuerbarer Energieträger vorgestellt, welche im Rahmen der Dissertation von Dipl.-Phys. Moritz Nill (2004) erstellt wurden. Ziel der Arbeit war es, „ausgewählte Umwelteffekte unterschiedlicher Energiebereitstellungstechniken unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts für einen sinnvoll prognostizierbaren Zeitraum zu quantifizieren, wobei die Umwelteffekte mit Hilfe von Ökobilanzen über den gesamten Lebensweg der Energietechniken erhoben werden“ (Nill 2004). Die Bilanzierung erfolgte auf Grundlage der im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Methode nach DIN EN ISO 14040 (1997). Die genaue Methode und die Rahmenbedingungen, die bei der Analyse der Stromerzeugungstechniken eingesetzt wurden, würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen, es sei daher an dieser Stelle auf die Ausführungen von Nill (2004) verwiesen.

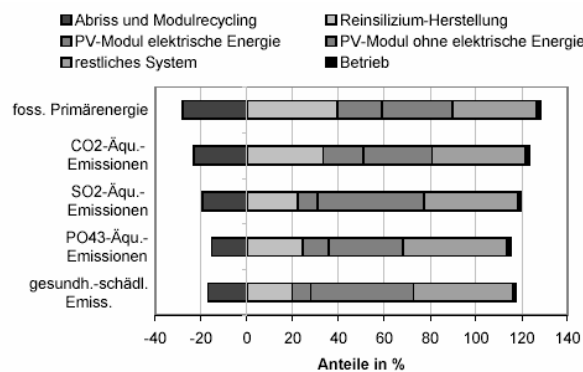
**Tabelle 1.** Ergebnisse der Ökobilanzen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und fossilen Energieträgern in den Jahren 2000, 2010 und 2020 (Nill 2004)

Wirkungskategorie	Indikator	Jahr	Sonne	Wind	Wasser	Bio-masse	Biogas	Geo-thermie	Stein-kohle	Erdgas
Ressourcenbeanspruchung	GJ	2000	3215	552	174	623	301	1019	8706	7160
	Primärenergie	2010	1621	425	143	486	217	747	8498	7032
anth. Treibhauseffekt	t CO <sub>2</sub> -Äqu.	2000	224	41	15	52	25	80	840	399
		2010	112	32	13	42	18	59	794	388
		2020	63	28	12	37	16	47	760	369
Versauerung	kg SO <sub>2</sub> -Äqu.	2000	644	253	50	879	768	411	1283	479
		2010	354	222	40	769	700	327	1323	459
		2020	243	206	36	691	657	278	1326	437
Eutrophierung	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äqu.	2000	42	10	4	137	82	55	110	74
		2010	21	8	4	121	76	46	123	73
		2020	13	7	3	109	71	40	128	69
Gesundheits-schäden	m YOLL	2000	28	10	2	38	29	20	48	18
		2010	15	9	2	33	26	16	50	18
		2020	11	8	2	30	24	14	50	17

Im Rahmen der Sachbilanzierung kam die Hybrid-Methode zum Einsatz. Die Wirkungsabschätzung betrachtet die Umweltbereiche, die eine große ökologische Priorität bei der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien haben. So wurden die Kategorien Ressourcenbeanspruchung, Anthropogener Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung und Gesundheitsschäden für die Untersuchung herangezogen, mit den zugehörigen Wirkindikatoren Verbrauch fossiler Primärenergie, CO<sub>2</sub>-, SO<sub>2</sub>- und Phosphat-Äquivalente sowie YOLL (Years of Life Lost). In der Auswertung wurden die Stromerzeugungstechniken einzeln nach dem heutigen und zukünftigen Stand der Technik analysiert und im Anschluss untereinander als auch mit fossilen Energieträgern verglichen.

Auf Grundlage der in Nill (2004) definierten Referenzanlagen konnten folgende in Tabelle 1 angegebenen Ökobilanzergebnisse für das Basisjahr 2000 und prognostisch für die Jahre 2010 und 2020 ermittelt werden. Im Anschluss werden die Ökobilanzen der Sonnen-, Windenergie sowie Biomasse näher betrachtet.

**Sonnenenergie.** Die Verteilung der Umweltinanspruchnahme einzelner Bereiche im Lebensweg einer Photovoltaikanlage ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1.** Verteilung der Umweltinanspruchnahme auf einzelne Bereiche im Lebensweg der PV-Stromerzeugung (100 stellt dabei die Gesamtbelastungen dar) (Nill 2004)

Die größten Belastungen entstehen im Herstellungsprozess der PV-Module. Verschwindend gering sind dagegen die Belastungen während Betrieb der PV-Anlagen. Durch das Modulrecycling (Wiedergewinnung der Wafer) können heute schon Umweltbelastungen vermieden werden. Nach Nill (2004) werden die Umweltbelastungen bis 2020 um bis zu 70% abnehmen. Vor allem bei der Herstellung des Photovoltaiksystems können durch verbesserte Fertigungstechniken, Verringerungen im Material- und Energieverbrauch und erhöhte Wirkungsgrade Reduktionen der Belastungen erreicht werden.

**Windenergie.** In Abbildung 2 ist die Aufteilung der Gesamtbelastungen auf einzelne wichtige Lebenswegabschnitte dargestellt.

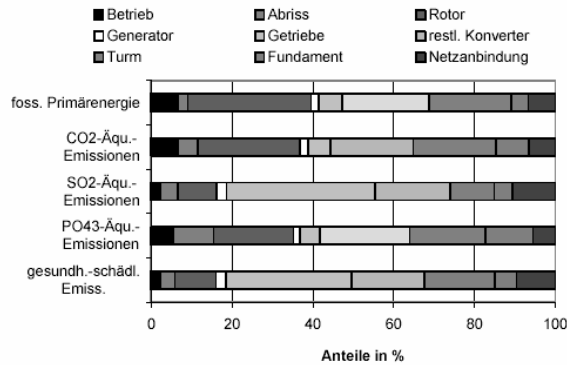


Abbildung 2. Aufteilung der Gesamtbelastungen auf wichtige Bereiche des Lebenswegs der Wind-Stromerzeugung (Nill 2004)

Der Bau der Windkraftanlage ruft in allen Wirkungskategorien hohe Umweltbelastungen hervor. Insbesondere die Herstellung des Rotors und des restlichen Konverters sowie der Bau des Turmes sind hier ausschlaggebend. Ähnlich wie bei der Nutzung der Sonnenenergie entfallen dagegen nur geringfügige Belastungen auf den Betrieb der Anlage. Nill (2004) prognostiziert einen Rückgang der Umweltbelastungen um 20-30% bis zum Jahr 2020. Dieser kann durch eine Erhöhung des Nutzungsgrads und damit der Volllastbenutzungsstunden sowie einer Verringerung des Energieeinsatzes bei der Herstellung der Anlage erreicht werden.

**Biomasse.** Die Verteilung der Umweltinanspruchnahme nach heutigem Stand zeigt Abbildung 3.

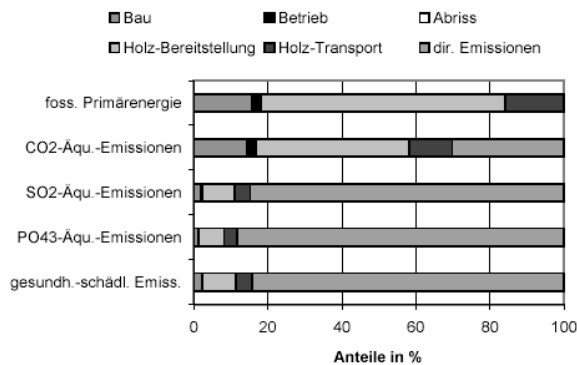


Abbildung 3. Verteilung der Umweltinanspruchnahme der Biomasse-Stromerzeugung auf einzelne Bereiche im Lebensweg (Nill 2004)

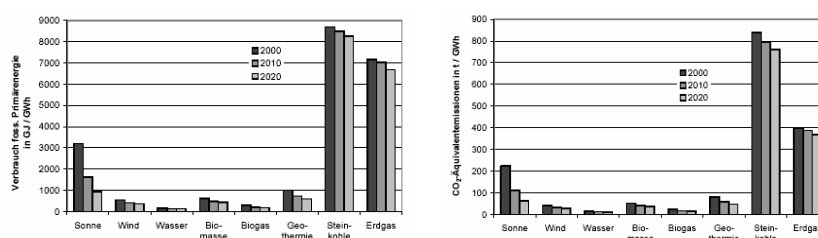
Vor allem im Bereich fossiler Primärenergie und den CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen dominieren die Belastungen durch die Holz-Bereitstellung und den Holztransport, auch im Bau der Anlage entstehen in diesen Bereichen größere Belastungen. Die direkten Emissionen während des Betriebes verursachen in den Be-



reichen mit versauernder, eutrophierender und gesundheitsschädlicher Wirkung über 80% der Gesamtbelastungen, die verursachten CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen können als klimaneutral gewertet werden. Vergleichsweise geringe Belastungen entstehen dagegen durch den Betrieb und Abriss der Anlagen. Eine Kopplung von Strom- und Wärmeerzeugung wirkt sich positiv auf den Verbrauch fossiler Primärenergie und die Belastungen durch CO<sub>2</sub>-Äquivalentkonzentrationen aus. In den nächsten Jahren ist infolge des technischen Fortschritts mit einer Abnahme der Umwelteffekte zu rechnen, nach Nill (2004) können die Belastungen bis 2020 zwischen 20 und 31% zurückgehen (in Bezug auf 2000). Dies kann z.B. die Erhöhung des Wirkungsgrades der Anlagen erreicht werden.

### Vergleich verschiedener Stromerzeugungstechniken

Im Folgenden soll ein kurzer Vergleich der erneuerbaren Energieträger untereinander und mit den fossilen Energieträgern vorgenommen werden. Grundlage bilden wiederum die in Nill (2004) vorgestellten Ökobilanzen für die verschiedenen Energiesysteme, deren Ergebnisse in Tabelle 1 dargestellt sind.

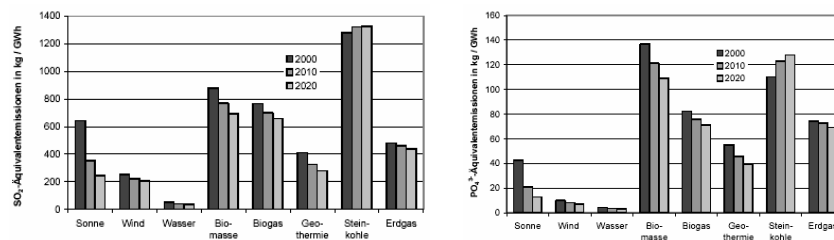


**Abbildung 4.** Verbrauch fossiler Primärenergie (links) und CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen (rechts) durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und fossilen Energieträgern im Vergleich für 2000, 2010 und 2020 (Nill 2004)

Wie Abbildung 4 verdeutlicht sind die erneuerbaren Energien in Hinblick auf die Schonung fossiler Energieressourcen und die Verringerung von Treibhausgasemissionen gegenüber den fossilen Energieträgern Steinkohle und Erdgas unschlagbar. Die größten Belastungen unter den erneuerbaren Energien werden in diesen Bereichen durch die Photovoltaik verursacht, hier sind aber auch die größten Reduktionspotentiale unter anderem durch neue Techniken zu sehen.

Ein anderes Bild ergibt sich bei Betrachtung der Beiträge erneuerbarer Energieträger zur Versauerung und Eutrophierung (siehe Abbildung 5). Biomasse- und Biogasstromerzeugung erzeugen deutlich höhere SO<sub>2</sub>-Äquivalentkonzentrationen als Erdgas. Dieses Bild wird sich auch durch den technischen Fortschritt in den nächsten Jahren nicht ändern, es ist jedoch mit einem Rückgang der Emissionen zu rechnen. Eine große Belastung unter den erneuerbaren Energien wird momentan noch durch die Photovoltaik verursacht, hier liegen aber wie bereits erwähnt die größten Reduktionspotentiale. Bei den Phosphat-Äquivalentemissionen

liegen die Emissionen durch den Einsatz von Biomasse zum Stand der Technik im Jahr 2000 sogar deutlich höher als bei Steinkohle und Erdgas. Trotz fortschrittlicher Technologien werden die Emissionen bei der Biomasse- und auch Biogasstromerzeugung nicht unter die Emissionen der Erdgasnutzung fallen. Die Verwendung von Sonne, Wind, Wasser sowie Geothermie zur Energiegewinnung kann dagegen in Zukunft entscheidend zur Reduktion eutrophierender als auch versauernder Emissionen beitragen.



**Abbildung 5.** SO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen (links) und Phosphat-Äquivalentemissionen (rechts) durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und fossilen Energieträgern im Vergleich für 2000, 2010 und 2020 (Nill 2004)

## Schlussfolgerungen

Die Ökobilanzierung stellt ein geeignetes Instrument dar, um im Verlauf der Stromerzeugung auftretende Umweltaspekte und potentielle Umweltwirkungen abzubilden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der Studie immer in Bezug zum Untersuchungsrahmen zu betrachten sind.

Die vorgestellten Ökobilanzen zeigen, dass die erneuerbaren Energien zum Klimaschutz und zur Einsparung fossiler Primärenergie beitragen. Umweltbelastungen werden bei Sonnen-, Wind-, Wasser- und Erdwärmennutzung vor allem durch den Bau der Anlagen verursacht. Bei der Biomassenutzung, deren Energieumwandlung mit einem Verbrennungsprozess verbunden ist, wird der Großteil der Umweltbelastung durch direkte Emissionen und die Brennstoffbereitstellung verursacht. Hier entstehen im Vergleich zu den fossilen Energieträgern sogar höhere Belastungen im Bereich der Emissionen mit versauernder, eutrophierender und gesundheitsschädlicher Wirkung. Insgesamt ist festzustellen, dass durch die Stromerzeugung aus Wasserkraft, aber auch Windenergie die geringsten Belastungen zu verzeichnen sind. Jedoch spielen bei der Nutzung dieser Techniken auch andere Aspekte, wie Standortfaktoren oder Klimawirkungen eine Rolle.

Bis 2010 bzw. 2020 ist für die erneuerbaren Energien mit einer Abnahme der Umwelteffekte, vor allem in der photovoltaischen Stromerzeugung (um 60 bis 70%), der Geothermie (30 bis 40%) oder der Biomasseanlagen (20 bis 30%) zu rechnen, da diese noch relativ jungen, unreifen Techniken über großes technisches Entwicklungspotential verfügen.

## Referenzen

- BMU (2002): Erneuerbare Energien und nachhaltige Entwicklung. Natürliche Ressourcen – Umweltgerechte Energieversorgung
- BMU (2004): Entwicklung der erneuerbaren Energien, Stand November 2004
- BMU (2004): Novelle des EEG. Überblick über die Regelungen des neuen EEG vom 21. Juli 2004
- BMU (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
- BMU (2005): Umwelt Nr. 4/2005, Sonderteil – Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien. Jahresbericht 2004
- BMU (2005): Erste vorläufige Abschätzung zur Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2004 in Deutschland. Stand Februar 2005. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEEStat)
- BMU (2005): Der globale Ausbau der erneuerbaren Energien – die internationalen institutionellen Rahmenbedingungen
- DIN EN ISO14040 (1997): Umweltmanagement — Ökobilanz — Prinzipien und allgemeine Anforderungen
- DIN EN ISO14041 (1998): Umweltmanagement — Ökobilanz — Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz
- DIN EN ISO14042 (2000): Umweltmanagement — Ökobilanz — Wirkungsabschätzung
- DIN EN ISO14043 (2000): Umweltmanagement — Ökobilanz — Auswertung
- EEG (2000): Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien. Bundesgesetzblatt
- EEG (2004): Gesetz zur Neuregelung des Rechts der erneuerbaren Energien im Stromverbrauch
- Kaltschmitt, M.; Reinhardt, G. (1997): *Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bedeutung.* Vieweg
- Kaltschmitt, M.; Wiese, A.; Streicher, W. (2003): *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte.* Springer
- Marheineke, T.; Krewitt, W.; Neubarth, J.; Friedrich, R.; Voß, A. (2000): *Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken.* Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
- Marheineke, T. (2002): *Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken.* Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart
- Nil, M. (2004): *Die zukünftige Entwicklung von Stromerzeugungstechniken. Eine ökologische Analyse vor dem Hintergrund technischer und ökonomischer Zusammenhänge.* Stuttgart