

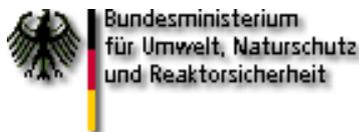
BMU-Vorhaben Förderkennzeichen 0325188

Aktualisierung von Ökobilanz- daten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe

- Endbericht -

Lothar Rausch, Uwe R. Fritsche*
Öko-Institut e.V.

gefördert durch



in Zusammenarbeit mit



* seit April 2012: IINAS - Internationales Institut für Nachhaltigkeits-
analysen und -strategien GmbH, www.iinas.org

Juni 2012

Ausdruck vom 17.12.2012 (Korrektur bei Querverweisen)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* unter dem Förderkennzeichen 0325188 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzbeschreibung

Der Bundesminister für Umwelt, Energie und Reaktorsicherheit hat ein F&E-Vorhaben gefördert, das vom Öko-Institut (federführend) in Kooperation wissenschaftlichen Partnern durchgeführt wurde und zur Aufgabe hatte, die Lebenszyklusanalysen für die in Deutschland genutzten Erneuerbaren Energieträger zu aktualisieren und methodisch fortzuschreiben.

Mit diesen Arbeiten werden verlässliche Daten für die ganzen Bereitstellungsketten der erneuerbaren Energien im Bereich Strom, Wärme und Kraftstoffen ermittelt.

Die vorliegenden Ergebnisse gestatten es, die durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger erzielten Reduktionen von Umweltinanspruchnahmen (Treibhausgase, Luftschadstoffe, nichterneuerbare Primärenergien) bilanziell und statistisch zu erfassen.

Es wurde eine Methode entwickelt, die es gestattet die Daten und die Auswertungen fortzuschreiben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungen	viii
1 Einleitung	1
2 Datengrundlagen: Technologiematrix	2
2.1 Energieträgerbereitstellung	2
2.2 Energieträgernutzung.....	3
3 Lebenswegbilanzierung für EE-Technologien	6
4 Bereitstellung biogener Energieträger	9
4.1 Systemgrenzen für die Bereitstellung biogener Energieträger.....	9
4.2 Daten zum Bioenergieanbau	9
4.3 Daten für Vorketten die Bereitstellung biogener Energieträger	10
4.4 Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogene Vorketten	11
4.5 Exkurs: Zur Methodik der RED bei der THG-Bilanzierung für flüssige Bioenergieträger	13
4.5.1 Anbauflächen	14
4.5.2 Kuppelprodukte als Prozess-Outputs	15
4.5.3 Reststoffe als Rohstoffe	16
4.5.4 Allgemeine Bezugsgrößen	17
4.5.5 Übertragbarkeit der Methodik auf andere erneuerbare Energien	17
4.5.6 Festlegung auf Referenzwerte	18
5 Daten zur Nutzung biogener Energieträger	19
5.1 Daten zur biogenen Strombereitstellung.....	19
5.1.1 Bio-Kraft- und Heizkraftwerke	19
5.1.2 Mitverbrennung.....	19
5.1.3 Gasturbinen und GuD-Anlagen.....	20
5.1.4 Stationäre Motoren	20
5.1.5 Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogenen Strom	20
5.2 Daten zur biogenen Wärmebereitstellung.....	21
5.2.1 Heizungen und kleine Feuerungen.....	21
5.2.2 Größere Feuerungen	21
5.2.3 Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogene Wärme.....	21

5.3	Daten zur biogenen Kraftstoffen	22
5.3.1	Daten für die Nutzung biogener Kraftstoffe.....	22
5.3.2	Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogene Kraftstoffe.....	22
5.4	Daten zur Nutzung von Abfallenergieträgern.....	22
6	Daten zur Nutzung von Geothermie	23
6.1	Tiefe Geothermie.....	23
6.2	Nutzung von Umweltwärme.....	23
7	Daten zur Nutzung von Solarenergie	25
7.1	Photovoltaik	25
7.1.1	Herstellung	26
7.1.2	Auslegungsdaten	26
7.1.3	Abgrenzung.....	27
7.1.4	Ergebnisse der Lebensweganalysen für PV-Systeme.....	27
7.2	Solarthermische Wärmebereitstellung.....	27
7.2.1	Marktdaten für Solarkollektoren	27
7.2.2	Herstellungsaufwand für Solarkollektoren	28
7.2.3	Ergebnisse der Lebensweganalysen für Solarkollektoren.....	29
7.3	Solarthermische Kraftwerke	29
7.3.1	Herstellungsaufwand für CSP-Systeme.....	29
7.3.2	Ergebnisse der Lebensweganalyse für solarthermische Kraftwerke	29
8	Daten zur Nutzung von Wasserkraft	30
8.1	Herstellungsaufwand für WKA.....	30
8.2	Ergebnisse der Lebensweganalysen für WKA	30
9	Daten zur Nutzung von Windkraft	31
9.1	Herstellung und Errichtung von Windenergieanlagen	31
9.2	Ermittlung der Massenbilanz.....	32
9.3	Stromerzeugung mit Windkraftanlagen	33
9.4	Ergebnisse der Lebensweganalysen für WEA	33
10	Emissionsbilanzierung für Erneuerbare Energien in 2010.....	34
10.1	Emissionsbilanzierung für EE-Strom in 2010	34
10.2	Emissionsbilanzierung für EE-Wärme in 2010.....	37
10.3	Emissionsbilanzierung für biogene Kraftstoffe in 2010	40
11	Künftige Datenfortschreibung	41
11.1	Generelle Datengüte.....	41

11.2	Generelle Fortschreibungsnotwendigkeiten	41
11.3	Fortschreibung für Bioenergie.....	42
11.3.1	Vorkettendaten für biogene Energieträger	42
11.3.2	Technologiedaten für biogenen Strom.....	43
11.3.3	Technologiedaten für biogene Wärme	44
11.3.4	Technologiedaten für biogene Kraftstoffe	44
11.3.5	Zusammenfassung des Datenaktualisierungsbedarfs für Nutzungsprozesse von Bioenergie.....	44
11.4	Fortschreibung für Geothermie.....	46
11.5	Fortschreibung für Solarenergie.....	46
11.5.1	Fortschreibung für solare Wärme (Kollektoren)	46
11.5.2	Fortschreibung für PV-Strom.....	46
11.5.3	Fortschreibung für CSP-Strom	46
11.6	Fortschreibung für Wasserkraft.....	46
11.7	Fortschreibung für Windenergie	46
11.8	Fortschreibungsmöglichkeiten dieser Daten insbesondere im Rahmen des ZSE	46
11.9	Andere Fortschreibungsmöglichkeiten	47
11.10	Methodik und Daten der EU-Richtlinie zur Förderung von EE für die künftige Fortschreibung im Bereich der Bioenergie.....	47
12	Forschungsbedarf	48
12.1	Künftig relevante Prozesse (Daten-Ausblicke)	48
12.2	THG-Effekte durch Landnutzungsänderungen	48
12.3	Multi-Output-Prozesse.....	48
12.4	Reststoffe als Energieträger	49
12.5	Bewertung der Verfügbarkeit von Strom	49
12.6	Besonderheiten beim Import von Energieträgern	49
	Quellenverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Prinzip von Lebenswegen – Beispiel Öl	6
Abbildung 2	Prinzip von Lebenswegen – Kopplungen von Energie- und Stoffflüssen.....	7
Abbildung 3	GEMIS als Datenbasis für Energie- und Umweltanalysen	8
Abbildung 4	Marktanteile verschiedener PV Technologien	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Datentypisierung für die biogenen Vorketten	3
Tabelle 2	Datentypisierung für die Nutzung von Bioenergie	4
Tabelle 3	Datentypisierung für die EE-Nutzung (ohne Bioenergie)	5
Tabelle 4	Daten für den Anbau biogener Energieträger	9
Tabelle 5	Direkte THG-Emissionsdaten und N-Inputs beim Anbau biogener Energieträger	10
Tabelle 6	LCA-Daten für den Anbau von Bioenergie	11
Tabelle 7	LCA-Daten für die biogenen Vorketten	12
Tabelle 8	LCA-Daten für die biogene Strombereitstellung	20
Tabelle 9	LCA-Daten für die biogene Wärmebereitstellung in Feuerungsanlagen	21
Tabelle 10	LCA-Daten für biogene Kraftstoffe.....	22
Tabelle 11	LCA-Daten für bestehende und zukünftige Geothermie-Systeme	23
Tabelle 12	LCA-Daten für die betrachteten Wärmepumpen-Systeme	24
Tabelle 13	LCA-Daten für die betrachteten PV-Systeme	27
Tabelle 14	Marktdaten für die betrachteten Solarkollektoren	28
Tabelle 15	LCA-Daten für die betrachteten Solarkollektoren	29
Tabelle 16	LCA-Daten für das betrachtete CSP-System	29
Tabelle 17	LCA-Daten für die betrachteten WKA.....	30
Tabelle 18	LCA-Daten für die betrachteten WEA	33
Tabelle 19	Anteile der Technologien an der EE-Stromerzeugung in 2010 (ohne Bioenergie).....	34
Tabelle 20	Anteile der Bioenergie-Technologien an der EE-Stromerzeugung in 2010.....	35
Tabelle 21	Umweltaspekte der EE-Stromerzeugung in 2010.....	36
Tabelle 22	Anteile der Technologien an der EE-Wärmebereitstellung in 2010.....	37
Tabelle 23	Umweltaspekte der EE-Wärmebereitstellung in 2010	38
Tabelle 24	Anteile der Technologien an der biogenen Kraftstoffbereitstellung in 2010.....	40
Tabelle 25	Umweltaspekte der biogenen Kraftstoffbereitstellung in 2010	40
Tabelle 26	Datenaktualisierungsbedarf für die biogenen Vorketten.....	43
Tabelle 27	Datenaktualisierungsbedarf für Nutzungsprozesse von Bioenergie.....	45

Abkürzungen

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGEE-Stat	Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare-Energien-Statistik
BHKW	Blockheizkraftwerk
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CSP	concentrating solar power (konzentrierende Solarkraftwerke)
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik
dLUC	direct land use change
DT	Dampfturbine
EE	Erneuerbare Energien
EEA	European Environment Agency (Europäische Umwelt-Agentur)
el	elektrisch
EU	Europäische Union
GEMIS	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GJ	Gigajoule (10^9 J)
GT	Gasturbine
GuD	Gas- und Dampfturbine (Kombikraftwerk)
GZB	Geothermiezentrum Bochum
HKW	Heizkraftwerk
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg
IINAS	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien
iLUC	indirect land use change
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
IWES	Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
KEV	kumulierter Energieverbrauch

KEV _{NE}	kumulierter Energieverbrauch nicht erneuerbare Energieträger
KUP	Kurzumtriebsanlage
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCA	life-cycle analysis bzw. life-cycle assessment
LUC	land use change(s)
MJ	MegaJoule (10^6 J)
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	MegaWatt (10^6 W)
MW _{el}	MegaWatt elektrisch
MW _{th}	MegaWatt thermisch
ORC	organic rankine cycle
PV	Photovoltaik
RED	Renewable Energies Directive
REDD	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation
th	thermisch
THG	Treibhausgase
THP	Treibhauspotenzial
TREMOD	Transport-Emissions-Modell (von IFEU und UBA)
UBA	Umweltbundesamt
WEA	Windenergieanlage
WKA	Wasserkraftanlage
WSF	Wirbelschichtfeuerung
ZSE	Zentrales System Emissionen (UBA-interne Datenbank)
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
ZWSF	zirkulierende Wirbelschichtfeuerung

1 Einleitung

Die Erneuerbaren Energien (EE) gelten als umweltverträgliche Optionen eines nachhaltigen Energiesystems, entsprechend fördert das BMU Querschnitts- und übergreifende Untersuchungen im Rahmen der Gesamtstrategie zum weiteren Ausbau der EE, **darunter das Vorhaben** „Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe“ (LCA-EE, FKZ 0325188).

Das Vorhaben wurde unter der Leitung des Öko-Instituts in Kooperation mit

- DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum
- DLR - Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik
- GZB – Geothermiezentrum Bochum
- IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung
- IWES - Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
- ESU services (CH)
- SmartScreenScans (NL)

durchgeführt und bietet Grunddaten für die Berichterstattung über die **effektive** Umweltlastung durch EE, indem **lebenswegbezogenen** Umwelteffekte der EE ermittelt wurden, die denen der substituierten (fossilen) Energieträger gegenübergestellt werden können.

Der vorliegende Endbericht fasst die Ergebnisse der Arbeiten im Vorhaben zusammen. Detaillierte Angaben zu einzelnen EE-Technologien finden sich in den Arbeitspapieren, die getrennt vorgelegt wurden.

Die Arbeit gliedert sich in eine Übersicht über die verschiedenen Technologien (Kapitel 2). In Kapitel 3 erfolgt eine Beschreibung der Methodik zur Bilanzierung. Die Kapitel 4 und 5 beinhalten die Bereitstellung und Nutzung von biogenen Energieträgern. In den Kapiteln 6 bis 9 werden die anderen Technologien zur Bereitstellung von erneuerbarem Strom und erneuerbarer Wärme dargestellt. Kapitel 10 fasst die Ergebnisse zusammen. In Kapitel 11 wird ein Vorschlag zur zukünftigen Datenfortschreibung gegeben. Der Forschungsbedarf, der sich durch zukünftig zu betrachtende Systeme und die sich durch genauere Betrachtungen zur Abgrenzung im Markt ergeben, wird in Kapitel 12 andiskutiert.

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle recht herzlich für die Hinweise aus der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energie Statistik danken. Besonderen Dank gehen an Herrn Memmler, der die Kontakte zu den Mitarbeitern am Umweltbundesamt koordiniert hat. Herrn Böhme gebührt Dank, da er die Treffen aller Beteiligten auch in schwierigen Situationen gut koordinieren konnte.

Herzlichen Dank auch an der Projektträger PTJ, ohne deren Zuwendung das Projekt nicht bearbeitet werden konnte. In der Abwicklung des Projektes haben die MitarbeiterInnen der PTJ den Auftragnehmer an verschiedenen Stellen tatkräftig unterstützt.

Die Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne die Zuarbeit der Kooperationspartner, die an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben soll.

2 Datengrundlagen: Technologiematrix

Für die Systematisierung der verschiedenen untersuchten Technologien wurde eine Matrix erstellt. Anhand dieser Matrix, die in den Tabellen 1-3 dargestellt ist, lassen sich die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Technologien einordnen. Gleichzeitig wird klar, wie sich die Technologien untereinander abgrenzen lassen.

2.1 Energieträgerbereitstellung

Die Bereitstellung und die ersten Verarbeitungsschritte der biogenen Energieträger ist folgender Tabelle zu entnehmen.

Die Technologien werden im Kapitel 4 beschrieben.

Tabelle 1 Datentypisierung für die biogenen Vorketten

	INPUT	Gewinnung		Logistik		Konversion upstream				
		biogener Rohstoff	Saat, Anbau, Behandlung, Ernte	Schlepper, Traktor, Lkw usw.	Lager, Umschlag	Trocknung, Zerkleinerung, Kompaktierung, Aufbereitung	Festbettvergasung (FB)	WS-Vergasung (WS) > 2 MW	Biogas-erzeugung	Gas-Reinigung/upgrading
Energiepflanzen	Kurzumtrieb	X	X		X	X	X			X
	Raps	X	X		X					X
	Zuckerrüben	X	X							X
	Zuckerrohr	X	X							X
	Palm	X	X		X					X
	Soja	X	X		X					X
	Mais-Silage	X	X	X	X			X	X	
	Weizen	X	X							X
	Roggen-Silage	X	X	X	X			X	X	X
Abfälle, Reststoffe	Altholz				X					
	Rest-, Schwachholz		X	X	X	X	X		X	X
	Sägespäne etc.				X					
	Stroh		X		X		X		X	
	Altfett		X							X
	Grünschnitt		X					X		
	Landschaftspflegematerial		X		X			X		
	Gülle		X					X	X	
	org. Hausmüll							X	X	
	industr. Substrate							X		
	industr. fester Bioabfall		X		X					
	Klärgas									
	Tierfett/Tiermehl									
	Klärschlamm				X					
	Schwarzlauge									
Deponiegas										

Quelle: eigene Ermittlungen und Abschätzungen in diesem Vorhaben

2.2 Energieträgernutzung

Die Nutzungsphase der biogenen Energieträger zur Gewinnung von Wärme und Strom bzw. die mobile Nutzung ist der folgenden Tabelle zu entnehmen. Die einzelnen Systeme zur Nutzung biogener Energieträger werden im Kapitel 5 näher erläutert.

Die untersuchten Nutzungsvarianten der anderen Erneuerbaren Energieträger sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Die Leistungsklassen sind je nach Anlage bereitgestellter Nutzenergie (Wärme, Strom) aufgeteilt. Die einzelnen Systeme werden in den Kapiteln 6 bis 9 erläutert.

Tabelle 3 Datentypisierung für die EE-Nutzung (ohne Bioenergie)

Geothermie (Strom- und Wärmebereitstellung)	kW_{el}	kW_{th}
- Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie (aus Aquiferen und Störungszonen)	700	
- Petrothermale Systeme (EGS - Enhanced Geothermal Systems)	5000	
- balneologische Wärmenutzung		100
Wärmeerzeugung (Wärmepumpe), oberflächennah		1
- Boden		
- Wasser		
- Luft		
Solarenergie (Strom- und Wärmebereitstellung)	kW_{el}	kW_{th}
PV dachmontiert/Fassade	1	
PV Freifläche	10	
Solarthermische Kraftwerke - Wasser/Öl mit Speicher	50000	
Solarthermische Kraftwerke - Direktdampf	80000	
Schwimmbadkollektoren		1
Solarkollektor flach		1
Solarkollektor Vakuumröhren		1
Wasserkraftwerke	kW_{el}	
Laufwasser, groß neu	10000	
Laufwasser, klein standalone und integriert	180	
Windenergie	kW_{el}	
onshore Bestandsanlagen	< 2000	
onshore Neubau küstennah	1000 - 2500	
onshore Neubau Binnenland	1000 - 2500	
offshore	5000	

Quelle: eigene Ermittlungen und Abschätzungen in diesem Vorhaben

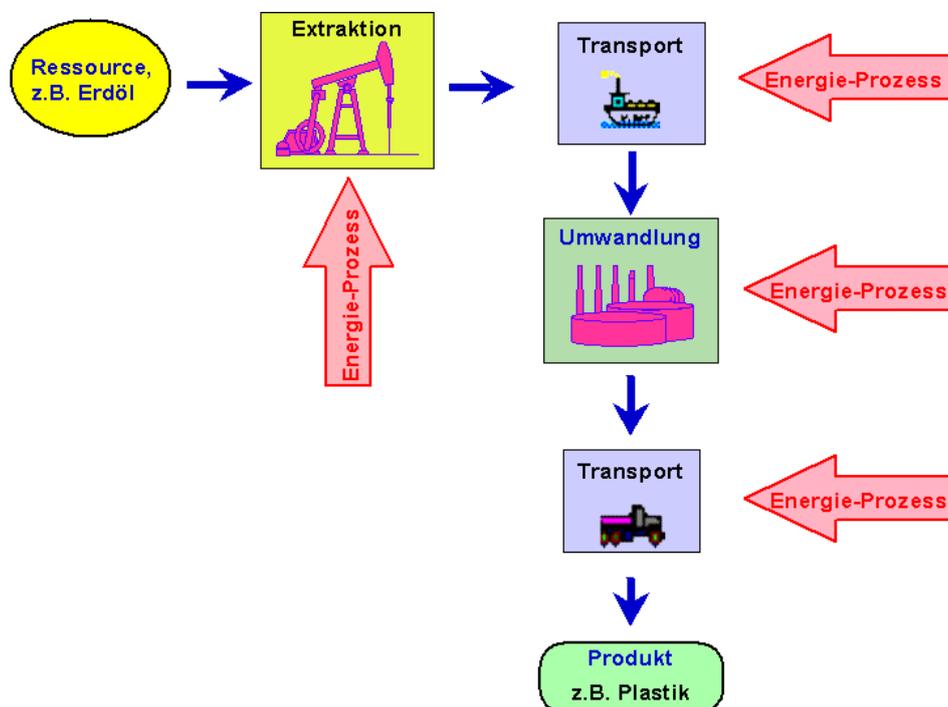
3 Lebenswegbilanzierung für EE-Technologien

Für die umfassende Bilanzierung des Energieeinsatzes und von Umweltaspekten wie z.B. Emissionen von Treibhausgasen (THG) und Luftschadstoffen müssen nicht nur die direkten Energie- und Stoffeinsätze erfasst werden, sondern **komplette „Lebenswege“** von der Primärenergie- und Rohstoffgewinnung bis zur Nutzung des Energieträgers und zudem Hilfsenergien und Materialaufwand zur Herstellung von Anlagen und Transportsystemen einbezogen werden sowie die Entsorgung.

Diese Lebenswege beginnen bei der Förderung und umfassen die primäre Aufbereitung, den Transport sowie die weitere Verarbeitung von Energieträgern bis zur Sekundär- bzw. Endenergiestufe.

Auf **jeder** Stufe der Prozesskette können Umwelteffekte entstehen: bei der Energie- und Stoffbereitstellung sowie den Transporten (siehe folgendes Bild).

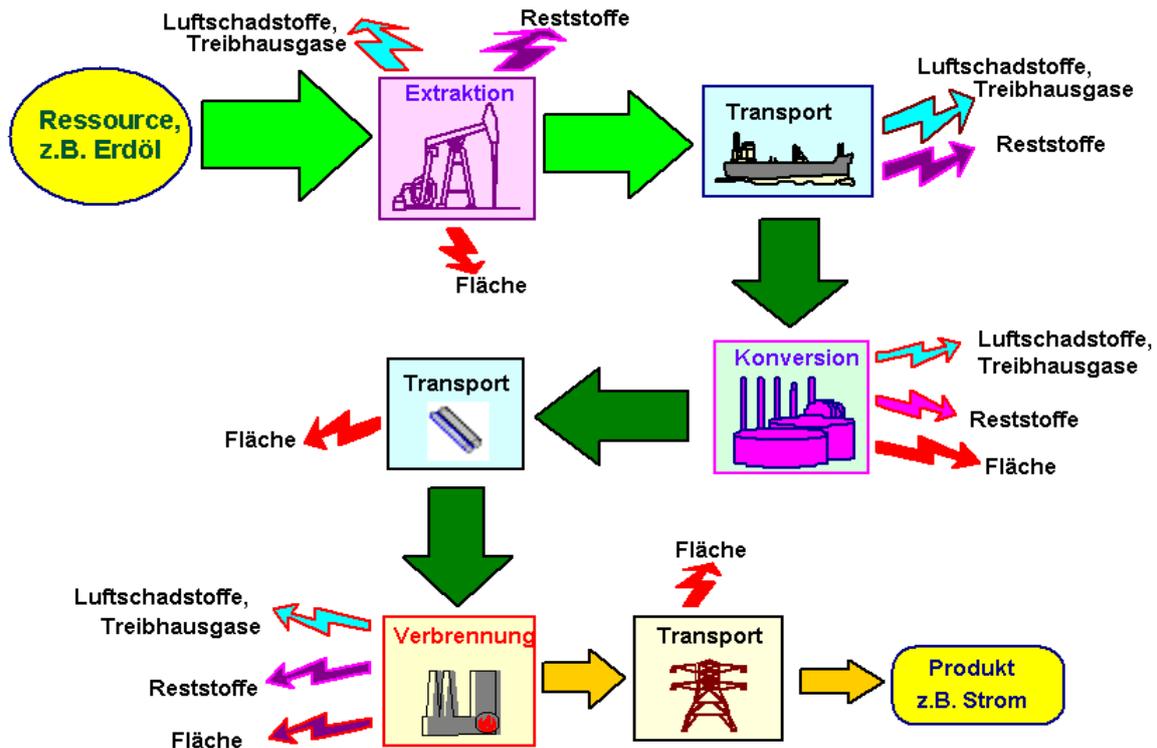
Abbildung 1 Prinzip von Lebenswegen – Beispiel Öl



Quelle: eigene Darstellung des Öko-Instituts

Zudem gilt, dass auch Hilfsenergien Umwelteffekte bewirken (über andere Energieprozessketten) und somit **nicht einfach linear** berechnet werden können. Auch **Stoffvorleistungen** (z.B. zur Herstellung) müssen einbezogen werden sowie **Kopplungen** zwischen Energie- und Stoffflüssen, wie das folgende Bild zeigt.

Abbildung 2 Prinzip von Lebenswegen – Kopplungen von Energie- und Stoffflüssen



Quelle: eigene Darstellung des Öko-Instituts

Die Kompliziertheit der oft verschachtelten Prozessketten ist hoch, meist hat **jeder** Prozess Verknüpfungen zu anderen Prozessen der Energie- und Stoffbereitstellung.

Die Umweltbilanz muss diesen komplexen Verknüpfungen folgen, um ein möglichst vollständiges Bild der Gesamtbelastung zu geben.

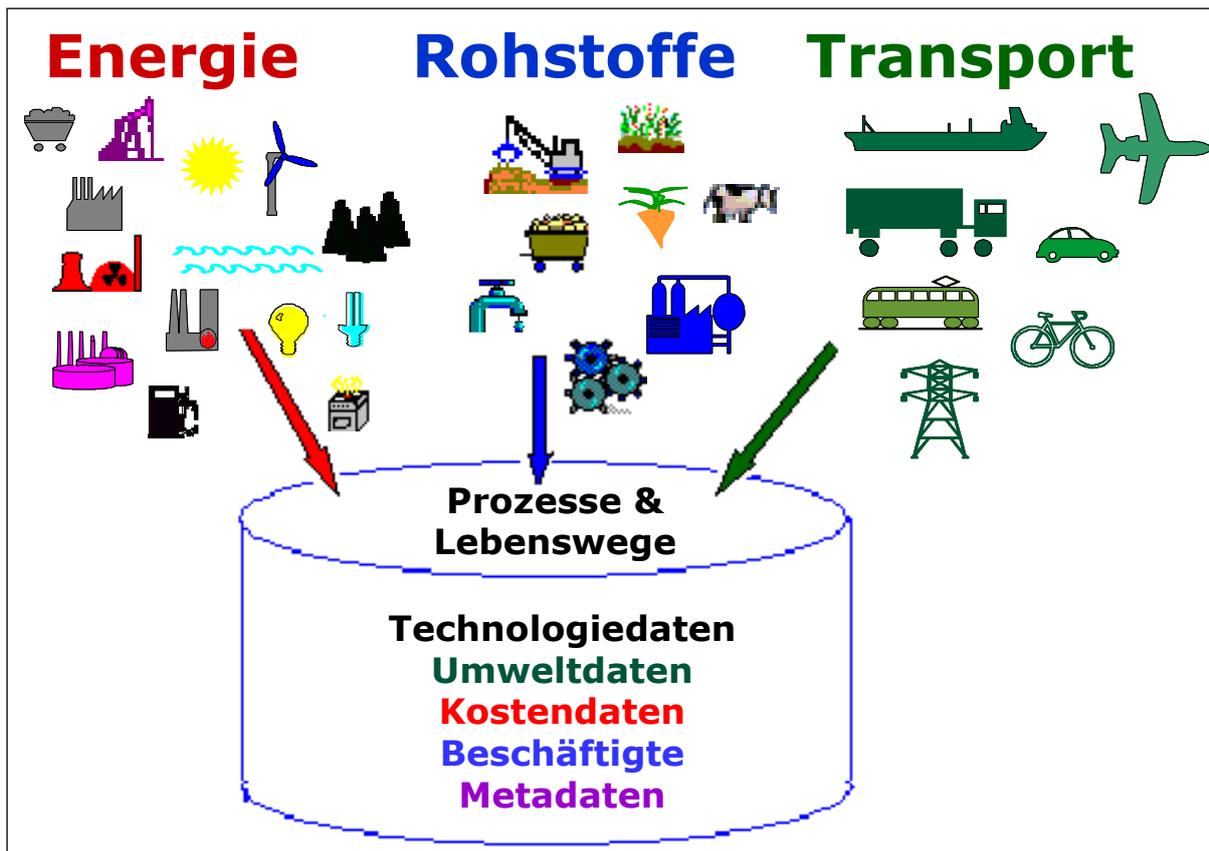
Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, für Energie- und Umweltanalysen **computergestützte Hilfsmittel** einzusetzen, die sowohl große Datenmengen verwalten als auch die komplizierten Berechnungen durchführen können.

Das Öko-Institut hat seit 1987 für diese Fragen die Datenbank GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) zur ganzheitlichen Bilanzierung von Umwelt- und Kostenaspekten im Energie-, Stoff- und Verkehrssektor entwickelt, die mittlerweile in der Version 4.8 vorliegt (vgl. www.gemis.de)¹.

Dieses öffentlich zugängliche und kostenlose Computermodell enthält Informationen zu Prozessketten in mehr als 40 Ländern sowie für rund 10.000 Prozesse aus Energiewirtschaft (Strom, Wärme), Stoffbereitstellung (z.B. Baustoffe, Chemikalien, Metalle, Nahrungsmittel) und Verkehr (Personen- und Gütertransporte).

¹ Seit April 2012 liegen die Rechte für GEMIS beim neuen Institut IINAS, das auch die weitere Aktualisierung und Entwicklung vornehmen wird.

Abbildung 3 GEMIS als Datenbasis für Energie- und Umweltanalysen



Quelle: eigene Darstellung des Öko-Instituts

Mit dieser Datenbank und einem integrierten Berechnungstool kann GEMIS die Lebensweganalyse schnell und transparent durchführen und so die Umwelteffekte ganzheitlich bilanzieren. Auszüge zu Daten und Ergebnissen aus GEMIS können auch ohne das Programm unter www.probas.umweltbundesamt.de abgerufen werden.

Die Lebensweganalysen im vorliegenden Bericht wurden mit GEMIS durchgeführt. Alle Prozessdaten und Szenario-Rechnungen sind in GEMIS Version 4.8 enthalten und können für detaillierte Ergebnisanalysen sowie zur Berechnung eigener Szenarien verwendet werden.

In der GEMIS-Version 4.8 wurden zudem wesentliche nicht-regenerativen Vorkettendaten (Herstellung von Aluminium, Kunststoffe, Stahl usw.) sowie die zugehörigen Energievorketten auf den Stand 2010 aktualisiert². Der generelle Datenhintergrund von GEMIS ist in ÖKO (2003-2009) dokumentiert.

In der vorliegenden Studie werden die Stromerzeugungsanlagen bis zu deren Einspeisung in das Netz bilanziert. Es erfolgt keine Betrachtung zu Fragen der Netzverstärkung und der Änderung von Kraftwerkseinsatzplänen, die sich durch das schwankende Einspeiseprofil ergeben. Bei Offshore-Windkraft-Anlagen ist der Stromtransport bis zur Küste nicht eingerechnet.

² Diese Arbeiten wurden im Rahmen des BMU-Vorhabens „Top100“ durchgeführt, siehe ÖKO (2012).

4 Bereitstellung biogener Energieträger

Entsprechend der Technologiematrix wurde bei den biogenen Energiesystemen zwischen den Daten für die Bereitstellung (Biomasse-Anbausysteme, Transport und Konversion zu Sekundärenergieträgern) und den Daten zur Nutzung von Biomasse unterschieden.

Die unterschiedlichen Systeme zur Bereitstellung biogener Energieträger werden unter dem Begriff „Vorketten“ zusammengefasst und im Folgenden einzeln dargestellt. Die Daten für Systeme zur **Nutzung** von Bioenergie finden sich im Kapitel 5.

Die Bereitstellung biogener Energieträger erfolgt einerseits durch den **Anbau** von Bioenergiepflanzen, andererseits durch die Erfassung und Verarbeitung biogener **Rest- und Abfallstoffe**.

Bei letzteren werden auf Grundlage der Methodik der RED (vgl. Exkurs in Kapitel 4.5) nur die logistischen Aufwände zur Einsammlung sowie die Weiterverarbeitung erfasst.

4.1 Systemgrenzen für die Bereitstellung biogener Energieträger

Als Bezugsbasis aller Systeme zur Bereitstellung biogener Energieträger wurde der Energiegehalt (Heizwert) gewählt, um von den stofflichen Eigenschaften (z.B. Dichte, Feuchte usw.) zu abstrahieren. Hierfür wurden Elementaranalysen je Produkt festgelegt, eine Umrechnung auf Massebezug ist hierbei über die Heizwerte der biogenen Produkte möglich.

Als zeitlicher Bezug wird das Jahr 2010 festgelegt, als räumlicher Bezug gilt einerseits Deutschland (Kapitel 4.2), andererseits wurden relevante Importländer (Kapitel 4.3) gewählt.

4.2 Daten zum Bioenergieanbau

Bei den Anbausystemen für Bioenergie sind u.a. Erträge und direkte Emissionen der Ausgangspunkt der Bilanzierung, hinzukommen die Vorketten für die Inputs (z.B. Diesel, N-Dünger). Die folgende Tabelle zeigt die Kenndaten der Anbausysteme im Jahr 2010.

Tabelle 4 Daten für den Anbau biogener Energieträger

Anbausystem	Ertrag GJ _{brutto} /ha		Diseleinsatz	weitere Kennwerte	
	KTBL*	GEMIS	MJ/GJ _{out}	TM-Gehalt	H _u GJ/t _{FM}
Mais-Silage	297	211	17,0	35%	4,8
Weizen-Körner	117	110	36,5	83%	13,4
Raps-Körner	79	84	22,3	87%	21,8
Zuckerrüben	208	211	11,1	23%	3,7
Gras-Silage, Acker ^{a)}	241	241	24,6	35%	5,8
Gras-Silage, Grünland ^{a)}	157	143	25,7	35%	5,8
KUP Pappel ^{b)}	98	98	47,3	50%	7,5
für Importe:					
Ölpalme ^{c)}		500	9,6	92%	6,6
Zuckerrohr ^{d)}		606	6,6	60%	8,8

*= KTBL-Daten von <http://daten.ktbl.de/energy/>; bei KUP als Hackschnitzel; a) KTBL-Angaben "mittel" für Anweik-Silage; b) KTBL-Angaben Erntejahr umgerechnet auf 4-Jahres-Durchschnitt; c) Daten für erntefrische Fruchtstände Indonesien; d) für Brasilien

Hinzu kommen die direkten Lachgas-Emissionen, die durch den Einsatz von Stickstoff (N) als Dünger entstehen – sowohl aus mineralischem N wie auch aus den organischen Anteilen, die z.B. über Gülle (Wirtschaftsdünger) eingebracht werden. Die entsprechenden Kenndaten zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 5 Direkte THG-Emissionsdaten und N-Inputs beim Anbau biogener Energieträger

Anbausystem	N ₂ O In g/GJ _{brutto}		N-Input In g/GJ _{brutto}	
	direkt	mineralisch	organisch	gesamt
Mais-Silage	29,8	574	574	1149
Weizen-Körner	53,7	1366	749	2114
Raps-Körner	77,8	2568	563	3132
Zuckerrüben	41,7	586	996	1582
Gras-Silage, Acker	17,7	709	694	1404
Gras-Silage, Grünland	10,0	0	320	320
KUP Pappel	3,2	133	0	133
für Importe:				
Ölpalme	6,2	220	21	241
Zuckerrohr	8,0	124	121	244

Hinweise siehe Tabelle 4

Für die Importe von EtOH sowie Palmöl, die aus Brasilien bzw. Indonesien stammen, sind in den Tabellen oben wesentliche Inputs dargestellt.

Ein Entwurf der o.g. Daten wurde in Absprache mit BMU und UBA bei einem internen Workshop, den **Öko-Institut und DBFZ im Rahmen des Prozesses zur „roadmap Bioraffinerien“** durchführten³, kritisch diskutiert und Rückmeldungen aus dieser Diskussion zusammen mit den Daten aus der EU-Diskussion zur Aktualisierung der RED-default-Werte⁴ in die endgültige Datenbasis einbezogen.

4.3 Daten für Vorketten die Bereitstellung biogener Energieträger

Bei biogenen Produkten, die aus der angebauten Biomasse bereitgestellt werden, erfolgt während ihrer Verarbeitung typischerweise auch eine Bereitstellung von Koppelprodukten, die z.B. als Tierfutter oder Chemierohstoff (Glyzerin) genutzt werden. Daher ist hier eine Allokation nötig, um die Umweltlasten des Anbaus auf die bereitgestellten Produkte aufzuteilen. Hierfür wurde einheitlich die **energiebezogene Allokation** zwischen Haupt- und Nebenprodukten nach der RED vorgenommen.

Zur Modellierung der **inländischen** Vorketten, die dem Anbau (vgl. voriges Unterkapitel) nachfolgen, also aus Biomasse-Rohstoffen nutzbare Sekundärenergieträger wie Biogas und Biome-
than, Biokraftstoffe, Holzhackschnitzel und Pellets herstellen, wurde auf die bestehenden Prozesse in GEMIS zurückgegriffen, deren Daten in mehreren BMU-geförderten Vorhaben seit 2004 regelmäßig aktualisiert werden.

³ vgl. BMELV, BMBF, BMU, BMWi (2012)

⁴ siehe: Joint Research Centre – Institute for Energy Expert Consultation on "Assessing GHG default emissions from biofuels in the EU legislation", 22-23 November 2011, Ispra (Italien)

Im Rahmen des LCA-EE-Vorhabens wurde diese Daten für die Herstellung von Biogas sowie dessen Aufbereitung zu Biomethan aktualisiert, wozu Daten des DBFZ, des IFEU und des Öko-Instituts aus mehreren Studien für BMU, BMELV und die EU-Kommission herangezogen wurden.

4.4 Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogene Vorketten

Die modellierten Vorketten wurden mit GEMIS 4.8 bilanziert und dabei die folgenden Ergebnisdaten bestimmt, jeweils je bereitgestellter Einheit Bioenergie (**ohne** Nutzung):

- THG-Bilanz (CO₂-Äquivalente, CO₂)⁵,
- versauernde Luftschadstoffe (SO₂-Äquivalente)⁶ sowie Feinstaub (PM₁₀),
- nichterneuerbarer kumulierter Energieverbrauch (KEV_{NE})⁷.

Die folgende Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse nur für den Anbau von Bioenergie (inländische Produktion ohne Transport und Verarbeitung).

Tabelle 6 LCA-Daten für den Anbau von Bioenergie

Anbausystem	Emission In g/GJ _{out} , ohne Nutzung					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	MJ _{primär} /GJ _{out}
Mais-Silage	14.405	2.803	409	31	3,9	44
Raps-Körner	46.948	11.622	757	111	14,5	186
Zuckerrüben	18.627	3.386	640	40	4,6	53
Gras-Silage, Acker	9.822	2.938	254	36	2,5	46
Gras-Silage, Grünland	5.031	2.023	191	31	1,7	29
Stroh (Agrar-Reststoff)	769	758	6	8	0,7	11
Rest/Schwachholz	1.729	1.610	7	7	1,2	20
KUP Pappel	2.739	1.134	28	9	1,2	18
für Importe*						
EtOH aus Zuckerrohr	32.392	17.205	460	294	198	222
Palmöl	54.955	13.999	181	129	38	202

Quelle: GEMIS 4.8; Hinweise siehe Tabelle 4: * = bei Importen sind Verarbeitung und Transport bis zur deutschen Grenze einbezogen.

Die folgende Tabelle 7 gibt die Daten für die gesamten Vorketten frei Verbraucher.

-
- ⁵ Die einzelnen THG-Emissionen wurden hierfür über ihr spezifisches, massebezogenes Treibhauspotenzial (nach IPCC 2007) auf die äquivalente Menge an CO₂ umgerechnet, die über einen Integrationshorizont von 100 Jahren die gleiche atmosphärische Erwärmung verursacht wie die einzelnen THG. Nicht einbezogen sind dabei die kurzfristigen Erwärmungspotenziale durch Ruß („black carbon“) sowie Änderungen der Albedo.
- ⁶ Die einzelnen versauernden Schadstoffe SO₂, NO_x, HCl, HF sowie NH₃ wurden hierfür über ihr spezifisches, massebezogenes Versauerungspotenzial (nach EEA) auf die äquivalente Menge an SO₂ umgerechnet, die zur gleichen Versauerung führt wie die Summe der einzelnen Emissionen an versauernden Gasen.
- ⁷ Der KEV ist dem kumulierten Energie-Aufwand (KEA) ähnlich, berücksichtigt aber, dass die im KEA enthaltenen Heizwerte von (roh)stofflich genutzten Energieträgern nicht „verbraucht“ werden und ist deshalb in der Regel leicht niedriger als der KEA (vgl. Ergebnisse von BMU/UBA-Vorhaben auf www.oeko.de/service/kea). Für die hier bilanzierten Systeme sind die Unterschiede jedoch sehr gering.

Tabelle 7 LCA-Daten für die biogenen Vorketten

Bioenergieträger	Emission in g/MJ _{out} , ohne Nutzung					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	MJ _{primär} /MJ _{out}
AME	7	6	0,013	0,012	0,0005	0,154
RME	56	22	0,719	0,123	0,0147	0,390
PME	60	20	0,233	0,146	0,0383	0,341
SME	14	12	0,117	0,070	0,0125	0,163
Rapsöl	12	11	0,106	0,063	0,0112	0,147
EtOH-Weizen*	50	26	0,680	0,096	0,0095	0,435
EtOH-Zuckerrübe**	29	15	0,597	0,057	0,0049	0,248
EtOH-Zuckerrohr-BR	33	18	0,461	0,296	0,1979	0,226
Holz-Stücke	0,1	0,1	0,000	0,000	0,0000	0,001
Holz-HHS	2	2	0,011	0,011	0,0014	0,030
Holz-HHS KUP	5	3	0,037	0,018	0,0025	0,041
Holz-Pellets	4	4	0,008	0,007	0,0005	0,055
Stroh-Ballen	1	1	0,007	0,010	0,0007	0,015
Biogas-Gülle	9	6	0,014	0,014	0,0009	0,079
Biogas-Mais	31	10	0,623	0,059	0,0066	0,146
Biogas-30% Gülle 70%Mais	25	9	0,473	0,046	0,0051	0,122
Biogas-Gras-Acker	25	11	0,404	0,069	0,0047	0,153
Biogas-Gras-Grünland	18	9	0,309	0,062	0,0036	0,132

Quelle: GEMIS 4.8; * = bei Importen sind Verarbeitung und Transport nach Deutschland einbezogen. **= inländische Produktion;
 AME = Aalfett-Methylester; RME = Rapsöl-Methylester; PME = Palmöl-Methylester; SME = Sojaöl-Methylester; HS = Holzhackschnitzel;
 KUP = Kurzumtriebsplantage

Soweit künftig in stärkerem Umfang feste Bioenergieträger - insb. Pellets - importiert werden, die vorwiegend zur Mitverbrennung in Kohlekraftwerken dienen (vgl. Kapitel 5.1.2), müssen auch die entsprechenden Vorketten modelliert werden.

Hierzu bestehen Datengrundlagen aus Untersuchungen für die EU⁸ und EEA⁹ und es ist geplant, hierzu auch default-Daten nach der RED zu entwickeln¹⁰, so dass dies relativ einfach erfolgen kann.

Sollte künftig auch ein Import von Biomethan stattfinden, was bis 2020 wenig wahrscheinlich ist, so stehen auch hierfür Datengrundlagen in GEMIS zur Verfügung, so dass auch in diesem Fall eine einfache Ergänzung der Vorketteninformationen möglich ist.

⁸ Pelkmans L et al.: Benchmarking biomass sustainability criteria for energy purposes; prepared by VITO, Utrecht University, Imperial College London, Oeko-Institut, TU Vienna, ETA Florence, REC; Final report for EC DG ENER. December 2011 (Bericht wird auf der EU Transparency Platform in 2012 publiziert)

⁹ Elbersen B et al. 2012: Review of the EU bioenergy potential from a resource efficiency perspective; prepared for EEA; Copenhagen (wird als EEA Technical Report auf der EEA website publiziert)

¹⁰ Vgl. Fußnote 4

4.5 Exkurs: Zur Methodik der RED bei der THG-Bilanzierung für flüssige Bioenergieträger

Eine wichtige Grundlage für die Berechnung der biogenen Vorketten ist die Methodik zur THG-Bilanzierung nach der EU-Richtlinie zu Erneuerbaren Energien (Renewable Energies Directive = RED), die für Biokraftstoffe und flüssige Bioenergieträger eine **gesetzliche Bilanzierungsmethode** vorgibt (EU 2009).

Die Methodik zur Treibhausgasbilanzierung der RED, die hier Ausgangspunkt der Diskussion ist, bezieht sich auf flüssige Bioenergieträger. Ein Bericht der Europäischen Kommission (KOM 2010), der diese Methodik zur Anwendung auf feste und gasförmige Bioenergieträger erweitert, wird hier ebenfalls als Diskussionsgrundlage verwendet.

Ziel beider Papiere war es, ein Kriterium für die Nachhaltigkeit von biogenen flüssigen Kraft- und Brennstoffen zur THG-Einsparung zu schaffen. Dieses ist dort definiert als prozentuale Ersparnis von THG-Emissionen im Vergleich zu fossilen Energieträgern.

Die Hauptunterschiede zwischen dem LCA-EE-Vorhaben und der RED sind daher folgende:

- Erstens in der Zielsetzung - statt eines Werkzeugs zur Bewertung der Nachhaltigkeit soll eine Datenbank über Umweltwirkungen geschaffen werden.
- Zweitens soll über flüssige Bioenergieträger hinaus hier auch die Nutzung von Bioenergie für andere energetische Anwendungen sowie für andere erneuerbare Energiequellen Geothermie, Solar-, Wasser- und Windenergie bilanziert werden.
- Drittens sollen im Rahmen dieses Vorhabens abweichend von der RED neben THG auch versauernde und Partikelemissionen sowie der kumulierte Energieverbrauch (KEV) betrachtet und feste und gasförmige Bioenergieträger einbezogen werden.

Daraus ergibt sich ein Anpassungsbedarf der Rahmenbedingungen und Methodik.

Bezüglich der zu berücksichtigenden Lebenswegabschnitte sind zwei Punkte zu diskutieren:

A) Anfangs- und Endpunkt des Lebensweges

Im Rahmen des LCA-EE-Vorhabens wurden Datensätze aufgeschlüsselt nach Lebenswegabschnitten bereitgestellt, um durch die Modularität eine Wiederverwertung zu vereinfachen. Diese enthalten den Lebensweg bis zur Nutzung.

Die Emissionen aus der Verbrennung von Biobrennstoffen werden nach der RED als null gesetzt, da vor allem CO₂ aus erneuerbaren Quellen entsteht. In geringeren Mengen ebenfalls entstehendes Methan und Lachgas wird dort nicht erfasst. Dadurch entsteht eine Ungleichbehandlung von biogenen und fossilen Quellen. Daher und weil in diesem Vorhaben weitere Emissionen bilanziert werden, muss die Nutzungsphase von allen Brennstoffen auf jeden Fall voll berücksichtigt werden.

B) Nebenprodukte und Abfälle

Im Gegensatz zu Nebenprodukten werden Abfällen oder Reststoffen z. B. aus der Forst- und Landwirtschaft nach der RED **keine** Umweltwirkungen zugeordnet. Daraus ergibt sich, dass **Reststoffe, die weiter genutzt werden**, „bis zur Sammlung dieser Materialien“ **keine Lasten mit sich bringen**. Die Abgrenzung ist allerdings schwierig. Im Wesentlichen wurde diese Festlegung als politisches Steuerungsinstrument eingeführt, da hierdurch die ökologisch wünschenswerte, aber ökonomisch oft weniger lohnenswerte Nutzung von Abfällen attraktiver ge-

macht werden soll. Teils sind die Abfälle in der RED explizit benannt. Etabliert sich jedoch deren Nutzung, so müsste diese strategische (und damit fachlich „willkürliche“) Definition in Frage gestellt werden.

Wie in Abschnitt 4.5.2 Kuppelprodukte als Prozess-Outputs näher erläutert, wird eine Allokation nach ökonomischem Wert empfohlen. Dadurch erübrigt sich die Definition von Reststoffen, da ihnen bei einem niedrigen Preis oder bei Unverkäuflichkeit (Durchschnittspreis unter oder gleich null Euro) kaum oder keine Umweltwirkungen zugeordnet werden. Eine alternative Strategie wäre es, die Einteilung in Nebenprodukte und Reststoffe nach bestimmten Kriterien festzulegen (Fehrenbach 2009).

4.5.1 Anbauflächen

Der Anbau von Bioenergieträgern beeinflusst immer auch die Anbaufläche, was für eine Bewertung berücksichtigt werden muss. Die Bewertungen sind allerdings schwierig und dienen teilweise auch als politisches Steuerungsinstrument.

Direkte Landnutzungsänderungen

Die RED legt fest, dass Änderungen des Kohlenstoffbestandes der Anbauflächen durch direkte Landnutzungsänderungen (*direct land use change*, dLUC), also veränderte Nutzungen oder Anbaupraktiken über 20 Jahre verteilt auf die entnommene Anbau-Biomasse angerechnet werden sollen. Das ist mit zwei Schwierigkeiten behaftet:

Erstens sind die Bilanzierungsmethoden verbesserungswürdig, was auch im Bericht der Kommission (KOM 2010) kritisiert wird. Unklar ist, wie vorgegangen werden soll, bis Daten seitens des IPCC oder des *UN programme for reducing emissions from deforestation and forest degradation in developing countries* (REDD) zur Verfügung stehen. Die Kommission hat bereits angekündigt, dass dies neu bewertet werden soll.

Zweitens wird ist eine Festlegung auf eine Abschreibungszeit von 20 Jahren problematisch, weil sie längeren Plantagenzyklen bzw. einem oft längeren Planungshorizont bei der Anlegung der Anbauflächen nicht gerecht wird. Allerdings ist keine feste Abschreibungszeit ideal für alle Landnutzungen. Unterschiedliche Abschreibungszeiten würden hingegen die Vergleichbarkeit stark einschränken. Daher wird empfohlen, diesen Standard beizubehalten.

Indirekte Landnutzungsänderung

Indirekte Landnutzungsänderungen (*indirect land use change*, iLUC) ergeben sich aufgrund der Verdrängung von Nahrungs- oder Futtermittelproduktion z. B. durch Energiepflanzen und äußern sich als Agrarflächenausweitung in unberührte Naturräume. Sie können einen erheblichen Einfluss auf Treibhausgasbilanzen von Bioenergieträgern haben. Gleichzeitig ist dieser Effekt sehr schwer zu quantifizieren (vgl. Kapitel 12.2).

Degradierete Flächen

Für die Nutzung degradierter und kontaminierter Flächen wird in der RED ein Bonus von 29 g CO₂-Äq/MJ gewährt. Dies ist als eine Mischung aus einer sehr pauschalisiert betrachteten möglichen Kohlenstoffbestandsänderung und einer beabsichtigten Steuerungswirkung zu betrachten. Die Steuerungsabsicht verknüpft nun in einer nicht wissenschaftlich belegten Weise Umweltwirkungen wie „kontaminiert“ und „Treibhausgasemissionen“.

Wenn auch andere Umweltwirkungen betrachtet werden sollen, wird dies sogar noch problematischer, da ein Steuerungsbonus mit gleicher Berechtigung auf alle Indikatoren vergeben werden könnte. Daher sollte statt eines generellen Bonus nur die tatsächliche Kohlenstoffbestandsänderung berücksichtigt werden. Bei der Nutzung kontaminierter Flächen sollte dagegen ein Naturraumverbrauch von Null ausgewiesen werden.

4.5.2 Kuppelprodukte als Prozess-Outputs

Kritisch zu bewerten sind die Zuordnungen von Umweltwirkungen aus dem Herstellungsprozess der Biobrennstoffe zu Kuppelprodukten.

Die RED legt sich aus Gründen der Praktikabilität auf das energiebezogene Allokationsverfahren fest, während für Ökobilanzen generell die Substitutionsmethode mit Systemraumerweiterung bevorzugt werden sollte (ISO 14040 und 14044, vgl. ISO 2006).

Da im Rahmen des LCA-EE-Vorhabens eine vergleichende Zustandsbeschreibung im Vordergrund steht, ist die Wahl der energiebezogenen Allokation allerdings vertretbar¹¹.

Wenn man sich für das Allokationsverfahren entscheidet, müssen Festlegungen zur Bezugsgröße, auf denen die Allokationsfaktoren beruhen, getroffen werden. Diese sind immer subjektiv und sollen daher hier noch einmal aufgegriffen werden. Generell soll die Allokation die Umweltwirkungen den Produkten zuordnen, derentwegen sie verursacht wurden. Dementsprechend sind einem Produkt höherer Wertigkeit höhere Emissionen zuzurechnen.

Die Allokation in der RED

Nach der RED werden Emissionen nach Energiegehalt (Heizwert) auf die Kuppelprodukte eines Prozesses alloziert. Ein Problem stellen hierbei allerdings Produkte dar, die wegen ihres hohen Wassergehaltes einen negativen Heizwert haben. Zur Ermittlung des anrechenbaren Heizwerts könnte man eine Nutzung annehmen, die ohne Trocknung auskommt, z. B. mit fermentativen Verfahren, wie sie in Biogasanlagen genutzt werden, aber für diese Prozesse gibt es in der Regel keine Standardwerte, die die erzeugbare Energie pro Masse angeben. Stattdessen die Heizwerte der Trockenmassen zur Bestimmung des Allokationsfaktors heranzuziehen wird oft dem jeweils nötigen Aufwand zur Weiterverarbeitung nicht gerecht. Ein anderes Problem sind Produkte, die stofflich genutzt werden, wenn ihre Erzeugung weit mehr Energie verbraucht als ihrem Energiegehalt entspricht. Dies trifft besonders auf „low volume high value“-Produkte zu wie z. B. aus Biomasse extrahierte Vitamine.

Allokation nach ökonomischem Wert statt nach Energieinhalt

Diese Probleme werden in einem anderen Ansatz relativ einfach gelöst, der Allokation nach ökonomischem Wert der Produkte, der über den Preis angenähert wird. Das Verhältnis von Preisen in der Marktwirtschaft stellt eine gute Abschätzung der Motivation dar, einen Prozess durchzuführen. Damit würden insbesondere mögliche stoffliche Nutzungen einiger Produkte höher bewertet. Das wäre aus Umweltsicht zu begrüßen, wenn bei der Herstellung eines Produktes wesentlich mehr Energie aufgewendet werden muss als in dem Produkt enthalten ist.

¹¹ Um eine Wiederverwendung der Datensätze in anderen Studien zu ermöglichen, die einen anderen Ansatz wählen, wird in GEMIS die verwendete Allokation für jeden Prozess mit Kuppelprodukten explizit ausgewiesen.

Außerdem erübrigt sich eine - ohnehin artifizielle - Abgrenzung von Reststoffen zu Nebenprodukten, da Reststoffen bei einem niedrigen oder sogar negativen Preis geringe oder keine Emissionen zugeschrieben werden. Die Nachteile sind, dass Preise erheblich schwanken und sich im Laufe der Zeit im Verhältnis ändern können und dass sie durch Marktverzerrungen (z. B. Subventionen, geheime Preisabsprachen) beeinflusst werden können.

Im Rahmen eines reinen Energieerzeugungsprozesses mag es sinnvoll sein, eine Allokation nach erzeugter Endenergie durchzuführen und dabei wegen der Konvertierbarkeit der elektrischen Energie einen höheren Wert als der thermischen Energie beizumessen (Exergie-Ansatz). Energetische Kuppelprodukte betreffen v. a. die Kraft-Wärme-Kopplung. Dazu wurde im Kommissionsbericht (KOM 2010) eine Festlegung zur Allokation über Wirkungsgrade getroffen. Weitere alternative Ansätze sind in Fritsche, Rausch (2008) und Fehrenbach (2009) dargestellt.

4.5.3 Reststoffe als Rohstoffe

Wie schon in Abschnitt 4.5.1 für die Flächennutzung beschrieben, müssen alle Umwelteffekte, die kausal durch einen Nutzungsprozess verursacht werden, diesem zugeordnet werden. Falls genutzte Ressourcen bei Nichtnutzung im betrachteten Bioenergie-System zwangsläufig anders behandelt werden müssten, sind die Umweltwirkungen dieser Alternativnutzung dem Lebensweg des Nutzungsprozesses gutzuschreiben. Auf diese Art wird der Kausalzusammenhang der beeinflussten Umweltwirkungen am besten abgebildet.

Alternativnutzung von Reststoffen

Insbesondere gilt dies für Lebenswege, die Rest- oder Abfallstoffe als Ressourcen nutzen. Diese fallen unabhängig von ihrer Nutzung an und müssten ansonsten anders behandelt werden. Da es hier eine Vielzahl an Nutzungs- oder Entsorgungsmöglichkeiten geben kann, wird empfohlen, die Umweltwirkungen des typischen Entsorgungswegs gutzuschreiben. Im Beispiel der Güllelenutzung wäre dies die direkte Feldausbringung der Gülle, beim Grünschnitt die Kompostierung. Die Emissionen, aber auch Aufwendungen, die hier anfallen, werden der Biogaserzeugung aus diesen Reststoffen gutgeschrieben.

Veränderung der Nutzfläche durch Entnahme von Reststoffen

Ähnlich wie die Landnutzungsänderungen gibt es Reststoffnutzungen, die einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Kohlenstoffbestand der Fläche haben können, wie z. B. die Entnahme von Waldrestholz auf den Kohlenstoffhaushalt des Waldes – dies wird ja nur durchgeführt, wenn das Restholz (energetisch) genutzt werden soll. Daher ist diese Umweltwirkung voll dem Restholz zuzurechnen¹². Dies gilt in gleicher Weise auch für die Frage der Strohnutzung, wenn sie Dimensionen bis zur Verursachung von Humuszehrung annimmt¹³. Daher sollten auch hier die singulären Veränderungen, die sich aufgrund der Reststoffnutzung ergeben, über 20 Jahre abgeschrieben werden.

¹² Vgl. zur Diskussion die Darstellung in IINAS et al. (2012).

¹³ Vgl. dazu näher DBFZ et al. (2011).

4.5.4 Allgemeine Bezugsgrößen

Die primäre Bezugsgröße ist wie im Kommissionsbericht (KOM 2010) festgelegt die bereitgestellte Endenergie. Vor allem ist dies die elektrische oder thermische Energie (in MJ). Bei Kraftstoffen hat sich statt der mechanischen Arbeit des Fahrzeugs der Kilometerbezug eingebürgert.

Da das Ziel vieler Ökobilanzen die Politikberatung ist, stellt sich oft die Frage, wie eine Ressource (ha Ackerland, MJ Reststoff) optimal zur Minderung von Umweltwirkungen eingesetzt werden kann. Um eine einfache Wiederverwendung der im Rahmen dieses Vorhabens gesammelten Daten zu ermöglichen, wird empfohlen, Umrechnungsfaktoren zu weiteren für den jeweiligen Kontext relevanten Bezugsgrößen mit in die Datenbank aufzunehmen. Insbesondere betrifft dies den Bezug auf die Anbaufläche für Bioenergieträger.

4.5.5 Übertragbarkeit der Methodik auf andere erneuerbare Energien

Flächennutzung

Auch bei den anderen erneuerbaren Energien gibt es Konkurrenz um Standorte. Analog der Argumentation in Abschnitt 4.5.1 für die Flächennutzung sollte diese dann berücksichtigt werden, wenn es eine (direkte) Nutzungsänderung gibt. Treten bei anderen erneuerbaren Energien singuläre Effekte wie Änderungen im Kohlenstoffbestand auf, dann kann die in Punkt 0 genannte Abschreiberegeln angewandt werden. Dies mag z. B. der Fall sein bei einigen Freiland-PV-Anlagen. Weitere Festlegungen müssen mutmaßlich nicht getroffen werden. Als konkretes Beispiel einer Flächennutzungsänderung wird in diesem Vorhaben das Ersetzen alter Windkraftanlagen durch neue betrachtet (Repowering). Indirekte Flächennutzungsänderungen spielen bei den anderen erneuerbaren Energien in Deutschland keine Rolle.

Kuppelprodukte als Prozess-Outputs

Eine Allokation von verschiedenen Energieprodukten wie Strom und Wärme ist bei bestimmten anderen erneuerbaren Energien ebenso ein Thema, wenn es um Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) geht. Stoffliche Nebenprodukte dagegen fallen meist nicht an. Die Kuppelproduktbewertung mit Hilfe der Allokation nach ökonomischem Wert kann bei allen erneuerbaren Energien wie unter Punkt 0 angewendet werden.

Reststoffe als Rohstoffe

Eine methodische Festlegung wie in Abschnitt 4.5.3 ergibt sich aufgrund der Besonderheit der Biomasse als stofflichem erneuerbarem Energieträger. Dies erübrigt sich bei den anderen erneuerbaren Energien, da sie ohne stoffliche, chemisch gebundene Energie auskommen.

Berücksichtigung von Infrastrukturaufwendungen

Die RED und der Bericht der Kommission (KOM 2010) berücksichtigen keine Umweltwirkungen aus dem Bau von Anlagen oder Ausrüstungen, weil diese bei Biokraft- und -brennstoffen keinen großen Anteil ausmachen und auch bei ihren fossilen Referenzen ähnlich anfallen. Diese Umweltwirkungen spielen bei anderen erneuerbaren Energien allerdings eine wesentliche Rolle und müssen daher berücksichtigt werden. Wegen der Vergleichbarkeit sollten die Infrastrukturaufwendungen auch bei Bioenergieträgern überschlägig eingerechnet werden.

4.5.6 Festlegung auf Referenzwerte

Äquivalenzfaktoren

Im Rahmen der RED werden veraltete Äquivalenzfaktoren des IPCC für THG angesetzt. Stattdessen sollte ein erweiterter Satz von aktuellen Indikatoren für die relevanten Emissionen und Wirkungskategorien festgeschrieben werden.

Durchschnittliche Umweltwirkungen für Energieeinsatz und ersetzte Energieträger

Um eine Vergleichbarkeit der betrachteten Lebenswege zu gewährleisten, sollte für die Stromaufwendungen in den jeweiligen Bilanzen die gleichen Mixe angesetzt werden. Für die Wärme sollte der für das jeweilige System typische Mix gewählt werden, während für Strom der deutsche Netzstrom-Mix herangezogen werden sollte. Für ersetzte Strom- und Wärmemengen werden die jeweils aktuellen durchschnittlichen Umweltwirkungen von deutschem Netzstrom bzw. dem Wärmemix der jeweiligen Qualität (Industrie, Haushalte mit ihren jeweiligen Temperaturniveaus) empfohlen.

Preise

Für die Durchführung der Preisallokation sollte der durchschnittliche Preis eines Produktes in Deutschland im letzten verfügbaren Zeitraum von drei Jahren herangezogen werden, bereinigt um Sonderfälle wie z. B. Sturmereignisse im Holzbereich.

5 Daten zur Nutzung biogener Energieträger

Die Umwandlung biogener Energieträger zu nutzbarer Endenergie – Antriebsenergie, Elektrizität, Wärme – erfolgt in einer großen Zahl sehr unterschiedlicher Systeme, die jeweils spezifisch für einen bestimmten Bioenergieträger und mehrere Leistungsklassen definiert wurden, um die Anschlussfähigkeit an die AGEE-Stat-Systematik zu gewährleisten. Da die Anlagen zur Nutzung von Bioenergie in Bezug auf Umweltaspekte weiter differenziert werden müssen, um relevante Unterschiede zu erfassen, ist eine in der hier entwickelten Technologiematrix (vgl. Kapitel 2.2) dargestellte weitergehende Aufteilung erfolgt.

5.1 Daten zur biogenen Strombereitstellung

Die Nutzung von Bioenergieträgern zur Stromerzeugung erfolgt in Anlagen von 0,05 bis 20 MW_{el}, wobei im Bereich unter 0,5 MW_{el} praktisch nur stationäre Motoren (vgl. unten 5.1.4) zum Einsatz kommen, darüber ORC-Systeme¹⁴ und Anlagen mit Dampfturbinen (DT).

5.1.1 Bio-Kraft- und Heizkraftwerke

Für die Erzeugung von Strom aus fester Biomasse werden aktuell in Deutschland vorwiegend DT-Prozesse eingesetzt, die je nach Größe und Auslegung mit Unterschub- bzw. Wanderrostfeuerungen arbeiten. Die dezentrale Vergasung (< 2 MW_{th}) mit nachfolgender Nutzung in GT oder Motoren ist bislang aufgrund des geringen Entwicklungsstands nur ein Nischenphänomen. Die Emissionsdaten für die Feuerungen im Leistungsbereich von 2-50 MW_{th}, die vorwiegend Altholz, Holz-Hackschnitzel sowie Reststoffe aus der Holzverarbeitenden Industrie einsetzen, können dem ZSE entnommen werden, jedoch sind einzelne größere HKW mit Biomasse-(Zu)feuerung in Betrieb (z.B. bei Vattenfall in Berlin), die mit Wirbelschichtfeuerungen (WSF) arbeiten¹⁵. Hierzu gibt das ZSE keine Daten, jedoch sind WSF-Prozesse in GEMIS enthalten, so dass bei künftig steigender Produktion Daten verfügbar sind.

5.1.2 Mitverbrennung

In Deutschland findet, anders als in anderen EU-Ländern, aufgrund der Ausschließlichkeitsregel des EEG gegenwärtig praktisch **keine** Mitverbrennung von festen Bioenergieträgern in größeren Kohlekraftwerken statt, und aktuell geringe CO₂-Zertifikatspreise bieten keinen ausreichenden ökonomischen Anreiz, um die Mehrkosten gegenüber reinem Kohlebetrieb zu rechtfertigen (dena 2011). Wird – wie von einigen erwartet – ab 2013 der Anreiz zur Mitverbrennung über steigende Zertifikatspreise zunehmen, da diese im ETS auktioniert werden, so kann sehr schnell eine nennenswerte Stromerzeugung auch in Deutschland stattfinden und hierzu ggf. importierte Energieträger (Pellets aus Kanada, Russland und den USA).

In diesem Fall kann die Mitverbrennung durch die Emissionsdaten der großen Kohlekraftwerke aus dem ZSE abgedeckt werden, entsprechende Prozesse sind in GEMIS abgelegt.

¹⁴ ORC-Systeme nutzen Kesselanlagen (vgl. 5.2) zur Verbrennung der Biomasse, so dass keine eigenen Emissionsfaktoren zu definieren sind. Die Umrechnung auf strombezogene Emissionen erfolgt über den elektrischen Nutzungsgrad. Die ORC-Arbeitsmittel können z.T. treibhausrelevant sein, jedoch liegen hierzu keine Erkenntnisse vor. Aufgrund der geringen Verbreitung wurde von einer eigenen Recherche dazu abgesehen.

¹⁵ Bei WSF entstehen deutlich geringere NO_x-Emissionen als bei Wanderrost- oder Staubfeuerungen, jedoch treten erhöhte N₂O-Emissionen auf, die aufgrund ihres hohen THP klimarelevant sind.

5.1.3 Gasturbinen und GuD-Anlagen

Bislang spielt die Nutzung biogener Gase in größeren Gasturbinen (GT) oder GuD-Anlagen aufgrund der 20 MW_{el}-Grenze des EEG keine Rolle, es werden nur Grubengase in GT eingesetzt.

Sollte künftig die (Mit)Verbrennung in GT/GuD-Kraft- bzw. Heizkraftwerken eine Rolle spielen, so wird dies über in Erdgasnetze eingespeistes Biomethan erfolgen, für das die im ZSE verfügbaren Emissionsfaktoren für erdgasbetriebene Anlagen direkt verwendet werden können. Eine Ableitung von eigenen Emissionsdaten für diese Anlagengruppe ist daher nicht erforderlich.

5.1.4 Stationäre Motoren

Die Stromerzeugung aus biogenen Gasen und flüssigen Bioenergieträgern mittels Verbrennungsmotoren war in 2010 die wichtigste biogene Stromerzeugungsoption, so dass dies wesentlich für die gesamten Umweltaspekte der biogenen Stromerzeugung ist. Die Emissionen der größeren Dieselmotoren für biogene Öle (Rapsöl und importiertes Palmöl) sind im ZSE bekannt, da sie sich nur unwesentlich von denen für Diesel unterscheiden¹⁶.

Beim Einsatz von biogenen Gasen (Biogas, Deponiegas, Klärgas) in Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren treten höhere Methanemissionen auf als bei Erdgaseinsatz, da die Verbrennungstemperatur durch die höheren CO₂-Anteile im Biogas etwas niedriger und damit die CH₄-Umsetzung geringer ist. Auf Grundlage der Ergebnisse des Messprogramms des DBFZ, IUP (2011) und der Ergebnisse anderer Messungen, die bei einem Expertenworkshop vorgestellt wurden (UBA 2012a), wurden hier typische Werte für Gasmotoren mit Biogaseinsatz ermittelt.

5.1.5 Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogenen Strom

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogene Stromsysteme.

Tabelle 8 LCA-Daten für die biogene Strombereitstellung

System	Emission in g/kWh _{el}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	kWh _{primär} /kWh _{el}
Biogas (Gülle), Gas-BHKW	188	36	0,852	0,509	0,0161	0,139
Biogas (Mais), Gas-BHKW	402	63	4,691	0,789	0,0519	0,257
Biogas (Weizen), Gas-BHKW	394	66	4,286	0,780	0,0569	0,266
Biogas (org. Müll), Gas-BHKW	179	28	0,806	0,456	0,0137	0,107
Biogas (Grasschnitt), Gas-BHKW	363	66	3,310	0,853	0,0401	0,269
Klärgas, Gas-BHKW	6	0	0,469	0,673	0,0187	0,000
Deponiegas, Gas-bHKW	3	0	0,670	0,639	0,0032	0,000
Rapsöl-Diesel-BHKW	307	100	7,147	4,575	0,0920	0,430
Palmöl- Diesel-BHKW	338	87	3,924	4,752	0,2348	0,347
Biomüll-DT-HKW	11	2	0,596	0,855	0,0054	0,003
Altholz- DT-HKW	14	9	1,028	1,423	0,0762	0,035
Holz-IND- DT-HKW	2	0	0,760	0,699	0,0131	0,000
Holz-HS- Wald- DT-HKW	17	14	0,835	0,773	0,0624	0,051
Holz-Pellet-ORC-HKW	37	33	0,669	0,531	0,1394	0,135

Quelle: GEMIS 4.8; BHKW = Blockheizkraftwerk; HKW = Heizkraftwerk; DT = Dampfturbine; HS = Holzhackschnitzel; ORC = organic rankine cycle

¹⁶ vgl. die Ergebnisse des BMBF-Vorhabens BIOclean (DLR, MAN, ÖKO 2010; Petzold u.a. 2011).

5.2 Daten zur biogenen Wärmebereitstellung

Bei der direkten Bereitstellung von Wärme aus biogenen Energieträgern kommen aktuell nur feste Bioenergieträger zum Einsatz, indirekt ist aber auch KWK-Abwärme aus der Stromerzeugung mit Biogas und in sehr geringem Umfang mit flüssigen Bioenergieträgern (vgl. Kapitel 5.1.4) zu berücksichtigen. Das Anlagenspektrum für feste Bioenergieträger reicht von Einzel- (Kamin-)Öfen unter 5 kW_{th} über Kessel für Zentralheizungen (ca. 10-100 kW_{th}) bis hin zu Unterschub- und Rostfeuerungen für Kessel und Heizwerke im Leistungsbereich bis 50 MW_{th}.

5.2.1 Heizungen und kleine Feuerungen

Bei den Einzelheizungen dominieren Öfen und Kamine für Scheitholz, vereinzelt (aber statistisch nicht erfasst) kommen auch Pelleteinzelöfen zum Einsatz - letztere werden hier vernachlässigt. Die Datengrundlage hierfür bieten verschiedene Untersuchungen im Auftrag des UBA, die für die Ableitung von Emissionsfaktoren im Heizungsbereich der Haushalte und des Gewerbe-Handel-Dienstleistungssektors (GHD) erstellt wurden.

Die biogen betriebenen Heizungen für 1-2- und Mehrfamilienhäuser werden einerseits durch automatisierte Scheit- und Hackschnitzelkessel, andererseits durch Pelletheizungen und -kessel geprägt, die auch im GHD-Sektor zum Einsatz kommen. Im ZSE sind generische Emissionsfaktoren für Haushalte/GHD hinterlegt, die hier für die klassischen Scheitholzanlagen („Brennholz“) verwendet werden. Für Holz-Hackschnitzel- und Pellet-Systeme werden die Ergebnisse verschiedener Prüfstandmessungen und Felderhebungen herangezogen, um die direkten Emissionsfaktoren abzuleiten.

5.2.2 Größere Feuerungen

Im Leistungsbereich der Feuerungen für feste Brennstoffe über 1 MW_{th} (1. BImSchV, 17. BImSchV, TA Luft) werden durchweg die Emissionsfaktoren aus dem ZSE für größere Kessel herangezogen.

5.2.3 Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogene Wärme

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für die biogenen Heizsysteme, jeweils bezogen auf die eingesetzte Bioenergie.

Tabelle 9 LCA-Daten für die biogene Wärmebereitstellung in Feuerungsanlagen

System	Emission in g/MJ _{th}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	MJ _{primär} /MJ _{th}
Holz-Stücke HH	5	2	0,079	0,054	0,0517	0,028
Holz-HS-Wald HH&KV	6	5	0,108	0,106	0,0401	0,069
Holz-Pellet HH&KV	7	6	0,096	0,081	0,0181	0,095
Holz-HS-KUP HH&KV	9	6	0,137	0,113	0,0314	0,080
Holz-IND	0	0	0,123	0,113	0,0021	0,000
Holz-HS Wald IND	6	6	0,103	0,080	0,0103	0,082
Holz-Pellet IND	7	7	0,097	0,077	0,0199	0,098

Quelle: GEMIS 4.8; HH= Haushalte; KV = Kleinverbrauch; HS = Holzhackschnitzel; KUP = Kurzumtriebsplantage; IND = Industrie

5.3 Daten zur biogenen Kraftstoffen

5.3.1 Daten für die Nutzung biogener Kraftstoffe

Bei den Biokraftstoffen werden hier nur die Umweltaspekte aus den Vorketten (Energieträgerbereitstellung) einbezogen, da die Emissionen der Kraftstoffnutzung (in Bussen, Pkw, Lkw) durch die Beimischung nicht extra bilanziert werden können.

5.3.2 Ergebnisse der Lebensweganalysen für biogene Kraftstoffe

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für die biogenen Kraftstoffe.

Tabelle 10 LCA-Daten für biogene Kraftstoffe

Bioenergieträger	Emission in g/MJ _{out} , ohne Nutzung					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	MJ _{primär} /MJ _{out}
AME	7	6	0,013	0,012	0,0005	0,154
RME	56	22	0,719	0,123	0,0147	0,390
PME	60	20	0,233	0,146	0,0383	0,341
SME	14	12	0,117	0,070	0,0125	0,163
Rapsöl	12	11	0,106	0,063	0,0112	0,147
EtOH-Weizen	50	26	0,680	0,096	0,0095	0,435
EtOH-Zuckerrübe	29	15	0,597	0,057	0,0049	0,248
EtOH-Zuckerrohr-BR*	33	18	0,461	0,296	0,1979	0,226

Hinweise siehe Tabelle 4. * = bei Importen sind Verarbeitung und Transport einbezogen. AME = Altfett-Methylester; RME = Rapsöl-Methylester; PME = Palmöl-Methylester; SME = Sojaöl-Methylester; BR = Brasilien

5.4 Daten zur Nutzung von Abfallenergieträgern

Neben den biogenen Energieträgern, die aus Anbaubiomasse sowie aus forst- und landwirtschaftlichen sowie industriellen biogenen Reststoffen stammen, gibt es auch biogene Abfälle im Bereich der Haus- und Gewerbemülls („Siedlungsabfälle“), die nicht getrennt gesammelt, sondern als Teil der Siedlungsabfälle im Müllverbrennungsanlagen (MVA) entsorgt werden. Die MVA verfügen in der Regel über Dampfturbinen, mit denen eine Strom- und Wärmebereitstellung möglich ist.

Darüber hinaus wird in hohem Maße aus Reststoffen der Zellstoff- und Papierindustrie direkt Prozesswärme für die Unternehmen erzeugt, die teilweise auch zur Stromerzeugung genutzt wird.

Für beide biogene Stoffströme wurden die Daten des ZSE verwendet, um die Emissionsfaktoren für Prozesse in GEMIS abzuleiten.

6 Daten zur Nutzung von Geothermie

6.1 Tiefe Geothermie

Im Rahmen der Datenerhebung erfolgte eine Materialinput-Analyse anhand von Daten aus Literaturquellen, Firmenangaben, Berechnungsmodellen und technischen Handbüchern. Um eine ausreichende Transparenz der Materialinput-Daten zu gewährleisten, wurde die Qualität der recherchierten Daten verifiziert und eine Defizitanalyse durchgeführt. Für nicht recherchierbare Daten wurden plausible Abschätzungen getroffen.

Die Aufstellung der Sachbilanz für geothermische Kraftwerke in Deutschland wurde entsprechend der folgenden Prozesskette untergliedert: Bau Untertage, Bau Übertage, Transport Lkw/Schiene, Betrieb und Rückbau.

Zur Auswertung der hydrothermalen Systeme aus Aquiferen und Störungszonen wurden Referenzanlagen erstellt, die reservoir- und anlagenspezifisch für das Norddeutsche Becken (NDB), den Oberrheingraben (ORG) und das Süddeutsche Molassebecken (SMB) charakteristisch sind.

Bei der Betrachtung von petrothermalen Systemen (EGS – Enhanced Geothermal Systems) spielt der Aspekt der hydraulischen und chemischen Stimulierung (Fracking) eine wichtige Rolle. Hierzu wurden die in Soultz-sous-Forêts, Groß Schönebeck und beim GeneSys-Projekt eingesetzten Stoffe bilanziert und auf ihre möglichen Auswirkungen und Einflüsse, beispielsweise auf die Produktivität des Reservoirs, untersucht und verglichen.

Zum 31.12.2010 arbeiten 5 Anlagen mit einer elektrischen Gesamtleistung von 7,5 MW. Diese erzeugen 27,7 GWh Strom.

Neben den Daten für die vorhandenen Anlagen sind der folgenden Tabelle die Lebenszyklusdaten von den verschiedenen Varianten zu entnehmen.

Tabelle 11 LCA-Daten für bestehende und zukünftige Geothermie-Systeme

System	Emission in g/kWh _{el}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	kWh _{primär} /kWh _{el}
Geothermie KWK NDB	229	218	0,342	0,248	0,0295	0,906
Geothermie KWK ORG	221	211	0,321	0,230	0,0221	0,881
Geothermie KWK SMB	220	210	0,318	0,228	0,0215	0,877
Geothermie KW EGS	217	207	0,310	0,222	0,0186	0,868
Geothermie KW NDB	229	218	0,341	0,247	0,0290	0,905
Geothermie KW ORG	220	210	0,319	0,229	0,0213	0,879
Geothermie KW SMB	219	209	0,316	0,227	0,0207	0,875
Geothermie KW mittel*	222	212	0,324	0,233	0,0232	0,884

Quelle: GEMIS 4.8; NDB= Norddeutsche Becken, ORG= Oberrheingraben; SMB= Süddeutsches Molassebecken; EGS= petrothermale Systeme (Enhanced Geothermal Systems); * = hier berechnet

6.2 Nutzung von Umweltwärme

Die Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen ist vom Geothermiezentrum Bochum hinreichend analysiert worden (Platt et al. 2010). Die Jahresarbeitszahl ist die bestimmende Größe für die Bilanzierung der Umwelteffekte. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen ist eine Jahres-

arbeitszahl von 3,0 für Neubauten und 2,6 für Altbauten zu übernehmen. Sole-Wasser-Wärmepumpen haben Jahresarbeitszahlen von 3,8 (Neubau) bzw. 3,3 im Bestand.

Die stofflichen Aufwendungen wurden aus den alten GEMIS-Daten übernommen. Die Daten für die Wärmepumpenanlagen ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 12 LCA-Daten für die betrachteten Wärmepumpen-Systeme

System	Emission in g/MJ _{th}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	MJ _{primär} /MJ _{th}
WP Luft neu	210	201	0,301	0,216	0,0177	0,840
WP Luft Bestand	240	229	0,343	0,246	0,0198	0,960
WP Sole Neu	178	170	0,268	0,195	0,0182	0,700
WP Sole Bestand	201	192	0,301	0,218	0,0198	0,793
WP-Mittelwert*	207,2	197,9	0,303	0,219	0,0188	0,823

Quelle: GEMIS 4.8; *= hier berechnet

Bei der balneologischen Nutzung von Wärme aus warmen Quellen und warmen Grundwasservorkommen ist der Hauptzweck der Förderung die Nutzung des Wassers im Badebetrieb. Die dabei genutzte Wärme ist quasi emissionsneutral.

7 Daten zur Nutzung von Solarenergie

7.1 Photovoltaik

Die Arbeiten zu PV (Solarstromerzeugung), die durch den Partner SmartGreenScans unterstützt werden, haben ergeben, dass die bisherigen LCA-Daten zur Modulproduktion deutlich veraltet waren. Entsprechend wurde eine Liste erstellt zu laufenden Forschungsvorhaben mit LCA-Bezug und die entsprechenden Institute kontaktiert. Durch Recherche bei den Mitgliedern des Verbunds PV-CYCLE¹⁷ sowie durch persönliche Kontakte konnten Hinweise auf aktualisierte Daten gesammelt werden.

Daraufhin wurden aus öffentlichen Datenquellen, weiteren laufenden Arbeiten und den gegebenen Hinweisen die Daten zur Zusammensetzung von PV-Moduln ermittelt und zusammengestellt.

Die ermittelten Ergebnisse zu Energierücklaufzeit und THG-Emissionen, die sich aus den bislang vorliegenden Daten ergaben, wurden als vorläufige Werte bei der 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Hamburg, 5-9 September 2011) vorgestellt und diskutiert. Von dort wurden hilfreiche Hinweise in den Abschluss der Datenrecherche eingearbeitet.

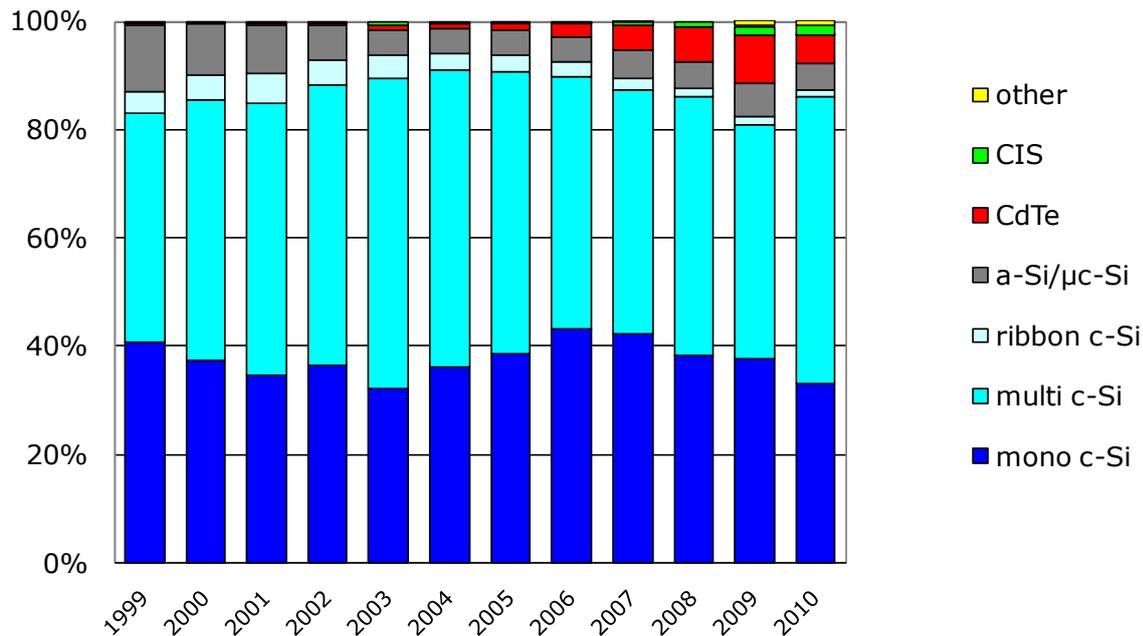
Es wurden folgende System als relevant erachtet:

- Monokristalline Silizium PV-Module,
- Multikristalline Silizium PV-Module,
- Amorphe Silizium PV-Module,
- Mikromorphe Silizium PV-Module
- CdTe PV-Module und
- CIGS PV-Module.

Die Marktanteile der einzelnen Technologien sind folgender Grafik zu entnehmen

¹⁷ Hierin sind die Sustainability Manager der großen PV-Modulhersteller tätig, siehe <http://www.pvcycle.org/index.php?id=27>

Abbildung 4 Marktanteile verschiedener PV Technologien



Photon International March 2011

7.1.1 Herstellung

Alle Module bestehen aus dem Trägermaterial (Glas) und den photoaktiven Halbleitern. Während bei den Modulen mit kristallinen Siliziumzellen der Aufwand für die Herstellung des Halbleiters vergleichsweise hoch ist, kommen die anderen Systeme mit geringem Materialaufwand aus. Bei den Silizium-Dünnschicht Modulen, kommt als Besonderheit die Emission von Reinigungsgasen für die Bedampfungsanlagen hinzu. Meist wird hier NF_3 eingesetzt, das ein hohes Treibhausgaspotential hat. Bei den CdTe-Modulen wird bei der Herstellung des Halbleiters und bei der unsachgerechten Entsorgung ausgedienter Module Cadmium frei gesetzt. In der Analyse werden nur die Emissionen auf der Herstellungsseite berücksichtigt.

Bei allen Anlagen wurde der stoffliche Aufwand für die Rahmen und die Aufständigung eingerechnet. Zwischen Freifeldanlage und Dachanlagen wird nicht unterschieden.

7.1.2 Auslegungsdaten

Zum 31.12.2010 speisten 882.000 Anlagen mit einer gesamten Leistung von 17,4 GW in das Netz ein. Damit werden 11,683 TWh Strom produziert. Geht man davon aus, dass die in 2010 zugebauten Anlagen zu etwa 1/3 der Zeit Strom einspeisen, kann man daraus rund 900 Benutzungsstunden für die PV-Systeme ableiten. Darin sind die nicht optimal ausgerichteten Module, die Nichtverfügbarkeit und die Verluste der Wechselrichter enthalten. Mit zunehmendem Lebensalter wird die elektrische Ausbeute der Anlagen geringer (Degradation). Da hier noch keine genauen Zahlen vorliegen, müssen bei zukünftigen Rechnungen ggf. geringere Vollaststunden in Ansatz gebracht werden.

Da noch keine genauen Daten für die Lebensdauern vorliegen, werden die in der Literatur genannten 30 Jahre für die glasgekapselten Systeme angenommen.

7.1.3 Abgrenzung

Die Aufwendungen für die Wechselrichter und die Verkabelung sind nicht in die Rechnung einbezogen worden. Einzig die damit verbundenen Einbußen bei der Einspeisung fließen durch die Vollaststundenzahl von 900 h/a in die Ergebnisse ein.

7.1.4 Ergebnisse der Lebensweganalysen für PV-Systeme

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für die PV-Systeme.

Tabelle 13 LCA-Daten für die betrachteten PV-Systeme

System	Emission in g/kWh _{el}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	kWh _{primär} /kWh _{el}
Solar-PV-mono	66	59	0,129	0,084	0,0318	0,254
Solar-PV-multi	59	52	0,121	0,078	0,0323	0,227
Solar-PV-amorph	42	36	0,124	0,069	0,0350	0,137
Solar-PV-CdTe-DE-2010	18	15	0,063	0,034	0,0196	0,056
Solar-PV-CIGS-DE-2010	29	26	0,062	0,034	0,0179	0,065
Solar-PV-mono (China)	78	66	0,488	0,197	0,0647	0,247

Quelle: GEMIS 4.8

7.2 Solarthermische Wärmebereitstellung

7.2.1 Marktdaten für Solarkollektoren

Der deutsche Markt für Solarkollektoren unterscheidet sich erheblich vom Weltmarkt. Flachkollektoren stellen in Deutschland seit Jahren den Hauptanteil der installierten Solarkollektoren. 2009 waren etwa 85% aller installierter Kollektoren Flachkollektoren, gefolgt von etwa 10% Vakuumröhrenkollektoren. Daneben haben Schwimmbadabsorber kaum und Luftkollektoren keine Bedeutung.

Die Anbieter von Solarkollektoren erlebten in Deutschland nach dem Rekordjahr 2008 in den Jahren 2009 und 2010 jeweils einen schrumpfenden Markt, bei dem der Absatz von Kollektoren zum Teil erheblich einbrach. Auch die Förderstatistik des deutschen Marktanreizprogramms (MAP) zeigt einen erheblichen Rückgang der Anlageninstallation: Während 2009 noch 140.000 Anlagen durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) gefördert wurden, waren es 2010 nur noch 34.000 mit einer Gesamtleistung von 280 MW, wobei dieser Einbruch auch auf das kurzfristige Aussetzen des MAP zwischen Mai und Juli 2010 zurückgeht.

Allerdings wurden 2010 nur noch 30-50% aller installierten Solarkollektoranlagen durch das MAP gefördert (2008 und 2009 waren es rund 90%), die übrigen Anlagen verzichteten auf Förderung. Im Bereich der Solarkollektoren hat das MAP damit erheblich an Bedeutung verloren, was auch zukünftig den Marktüberblick erschweren wird.

Der deutsche Markt teilt sich wie oben beschrieben in vorwiegend Flachkollektoren und einem geringen Anteil an Vakuumkollektoren auf. Letztere hatten 2010 einen Marktanteil von 11% der gesamten Neuinstallationen in Deutschland (2009: 13%).

Der Schwerpunkt der Anwendung von Solarkollektoren liegt in Deutschland bei Einfamilienhäusern. Während etwa in China oder auch in südlichen Ländern häufig Thermosiphonanlagen genutzt werden, findet man in Deutschland fast ausschließlich Solaranlagen mit Zwangs-

umlauf. Zudem lag der Schwerpunkt der Neuinstallationen bei den Systemen mit Heizungsunterstützung. Laut IEA wurden 2009 etwa 60% der Solarkollektoren in Deutschland in Kombisystemen für Heißwasser und Raumwärme in Einfamilienhäusern und etwa 30% für die reine Heißwasserbereitstellung ebenfalls in Einfamilienhäusern installiert. Systeme für Mehrfamilienhäuser nehmen nur einen sehr geringen Anteil ein. Große, mit Wärmenetzen verbundene Solaranlagen sind bisher sehr wenig verbreitet.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die in Deutschland installierten Flächen und Leistungen an Solarkollektoren.

Tabelle 14 Marktdaten für die betrachteten Solarkollektoren

Leistung		Wasserkollektoren			Luftkollektoren	Summe
		unverglast	Flachkollektoren	Vakuumpöhrrenkollektoren		
Neuinstallation 2008	MW _{th} /a					1.500
Neuinstallation 2009	MW _{th} /a		1.001	130	0	1.131
Gesamtinstallation 2009	MW _{th}	504	7.509	845	24	9.036
Neuinstallation 2010	MW _{th} /a		800	100		900
Gesamtinstallation 2010	MW _{th}					9.831
Fläche		Wasserkollektoren			Luftkollektoren	Summe
		unverglast	Flachkollektoren	Vakuumpöhrrenkollektoren		
Neuinstallation 2007	1000 m ² /a	30	840	100	5	975
Neuinstallation 2008	1000 m ² /a		1.900	200	7	2.107
Neuinstallation 2009	1000 m ² /a		1.430	185	0	1.615
Gesamtinstallation 2009	1000 m ²	720	10.727	1.206	34	12.909
Neuinstallation 2010	1000 m ² /a		1.150	150		1.300
Gesamtinstallation 2010	1000 m ²					14.044

Quelle: nach DLR (2011) Teilbericht Solarthermie

7.2.2 Herstellungsaufwand für Solarkollektoren

Für die Erstellung bzw. Aktualisierung der Datensätze zu Solarkollektorsystemen wurde vom DLR eine Abfrage zu Materialbilanzen bei den wichtigsten Kollektorherstellern durchgeführt. Angefragt wurden dabei die Marktführer für in Deutschland installierte Kollektorsysteme.

Für beide Kollektortypen wurden je zwei Unternehmen befragt, wobei die jeweiligen deutschen Marktführer für Flach- und Vakuumpöhrrenkollektoren jeweils ausführliche Materialbilanzen für die typische Solarkollektoranlage zur Warmwasserbereitung im Einfamilienhaus inklusive Pumpe, Rohrleitungen, Speicher und Montage zur Verfügung stellten.

Zentrale Frage bei der Datenermittlung war die Vergleichbarkeit der beiden Datensätze auf Basis von Flach- bzw. Vakuumpöhrrenkollektor und wissenschaftliche Relevanz der Ergebnisse.

Um dies zu gewährleisten, wurde von beiden Herstellern auf ein standardisiertes System sowie damit erzeugte Daten zurückgegriffen, das am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart (ITW) für die Zertifizierung der Kollektoren nach dem Solarkeymark-Qualitätsstandard¹⁸ verwendet wird. Als Referenzstandort für das Standardsystem wurde Würzburg definiert.

Auf Grundlage der Herstellerdaten wurden dann jeweils typische Neuanlagen für Deutschland im Jahr 2010 festgelegt und die entsprechenden Materialaufwendungen ermittelt.

7.2.3 Ergebnisse der Lebensweganalysen für Solarkollektoren

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für die solarthermischen Kollektoren.

Tabelle 15 LCA-Daten für die betrachteten Solarkollektoren

System	Emission in g/MJ _{th}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	MJ _{primär} /MJ _{th}
Solar-Kollektor flach	23	21	0,067	0,042	0,0165	0,078
Solar-Kollektor Vakuumröhre	33	29	0,097	0,057	0,0264	0,113
Solar-Kollektor Schwimmbad	20	19	0,041	0,035	0,0027	0,068

Quelle: GEMIS 4.8

7.3 Solarthermische Kraftwerke

Für die längerfristig ggf. relevant werdenden solarthermischen Kraftwerke (CSP-Systeme) wurde von der DLR ein Datensatz für eine Parabolrinnen-Anlage bereitgestellt, die an sonnenreichen Standorten mit hoher direkter Solareinstrahlung in Südeuropa und Nordafrika betrieben werden kann.

7.3.1 Herstellungsaufwand für CSP-Systeme

Für den Bereich solarthermischer Kraftwerke wurden die Lebenszyklusdaten verwendet, die am DLR erstellt wurden. Diese basieren auf den Daten, die von der DLR im Rahmen des EU-Projekts NEEDS ermittelt wurden¹⁹.

7.3.2 Ergebnisse der Lebensweganalyse für solarthermische Kraftwerke

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für das solarthermische Kraftwerk.

Tabelle 16 LCA-Daten für das betrachtete CSP-System

System	Emission in g/kWh _{el}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	kWh _{primär} /kWh _{el}
Solar-CSP (ES)	12	11	0,034	0,029	0,0103	0,031

Quelle: GEMIS 4.8

¹⁸ Details zum Solarkeymark-Standard unter <http://www.estif.org/solarkeymark/>

¹⁹ Vgl. <http://www.isistest.com/needswebdb/search.php>

8 Daten zur Nutzung von Wasserkraft

Die Arbeiten zu Stromerzeugung aus Wasserkraftanlagen (WKA), die durch den Partner E-SUservices wurden, ergaben, dass die bisherigen LCA-Daten veraltet sind. Daraufhin wurden die Sachbilanzen von

- Größeren Laufwasserkraftwerken (mit und ohne Stausee) sowie
- Kleinwasserkraftwerken (integriert und alleinstehend)

grundlegend revidiert, erweitert und aktualisiert. Dabei wurde ein spezieller Fokus auf die direkten THG-Emissionen der Kraftwerke gelegt, die sich aus dem anaeroben Abbau von Biomasse im Speicherbecken bzw. im Ober/Unterlauf ergeben und bislang wenig berücksichtigt wurden.

Ergänzend wurden auch Daten für Speicherkraftwerke (in der Schweiz) bereitgestellt.

8.1 Herstellungsaufwand für WKA

Daten zum Materialbedarf von Wasserkraftanlagen wurden revidiert und zum Teil mit Informationen aus neuen Publikationen ergänzt. Beton, Kies und Zement sind die massenmäßig wichtigsten Baustoffe, wobei bei den bilanzierten Kraftwerken oftmals entweder die Menge Beton, oder die Mengen Zement und Kies bekannt sind.

Im Weiteren werden Stahl in unterschiedlichen Qualitäten, Kupfer (neu in die Bilanzen aufgenommen) und weitere, hier nicht aufgeführte Baustoffe und Materialien eingesetzt.

8.2 Ergebnisse der Lebensweganalysen für WKA

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für die Wasserkraftwerke.

Tabelle 17 LCA-Daten für die betrachteten WKA

System	Emission in g/kWh _{el}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	kWh _{primär} /kWh _{el}
Wasser-KW-gross-DE-2010 (update)	3	3	0,007	0,007	0,0016	0,006
Wasser-KW-klein-DE-2010-integriert	2	2	0,005	0,005	0,0015	0,006
Wasser-KW-klein-DE-2010-standalone	6	6	0,020	0,018	0,0037	0,014

Quelle: GEMIS 4.8

9 Daten zur Nutzung von Windkraft

9.1 Herstellung und Errichtung von Windenergieanlagen

Die relevanten Emissionen entlang des Lebensweges sind durch die Herstellung der Windenergieanlage (WEA) bedingt. Die wichtigsten Komponenten der Windkraftanlage sind

- Turm,
- Gondel,
- Nabe,
- Blätter und
- Fundament.

Der Turm spielt für das Gesamtgewicht der WEA und somit für die Materialbilanz eine entscheidende Rolle, da er in Kombination mit dem Fundament den größten Anteil an der Masse ausmacht. Im Markt sind vier unterschiedlichen Turmbauarten zu finden: Gittermast, Stahlrohrmast, Betonmast und Stahlbetonmast (Hybridtürme).

Der Rotor besteht aus den Rotorblättern und der Rotornabe, an der die Rotorblätter befestigt sind. Da der Rotor das Herz der Windenergieanlage ist, sind seine aerodynamischen Eigenschaften ein entscheidender Faktor für die Funktion der gesamten Anlage.

Für die späteren Berechnungen wird der Rotordurchmesser als entscheidendes Kriterium für die Bilanzierung des Rotors gesehen. Mit größer werdendem Rotordurchmesser steigt die relative Masse der Blätter sowie der Nabe an.

An der Rotornabe werden die Rotorblätter befestigt und das Blattverstellsystem integriert. Sie ist mit der Rotorwelle verbunden, durch welche die durch die Rotorblätter erzeugte mechanische Leistung zum Triebstrang übertragen wird. Die Rotornabe ist eine der am höchsten belasteten Bauteile der Anlage, da sich auf ihr die Kräfte und Momente des Rotors konzentrieren. Aus diesem Grund ist die Auswahl der richtigen Materialien ein sehr wichtiger Punkt, um Ermüdungsschäden zu vermeiden.

Für die Rotornabe werden daher besonders Materialien und Konstruktionen verwendet, die für dynamisch hoch beanspruchte Teile geeignet sind. Die bereits installierten Anlagen bestehen in der Regel aus drei unterschiedlichen Konstruktionen: Stahlblechkonstruktionen, Stahlgusskörpern und Schmiedeteilen. Heutzutage werden jedoch fast alle Naben als Stahl- und Eisenguss gefertigt.

Für die Materialbilanz wird angenommen, dass eine typische Nabe zu je zur Hälfte aus Stahl- und Eisenguss besteht.

Der gängige Werkstoff zur Fertigung von Rotorblättern ist Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK). Viele der installierten Anlagen verwenden Glasfaser mit Polyesterharz als Matrixmaterial. Die Vorteile dieses Materials sind die hohe Festigkeit und der günstige Preis von Polyester. Diese Bauart ist häufiger bei kleinen und mittleren Anlagen vorzufinden. Einige Firmen haben sich trotz seiner schweren Bearbeitbarkeit und seines teuren Preises für Epoxidharz als Matrixmaterial entschieden, welches eine gewichtsgünstigere Konstruktion erlaubt. Das Gewicht kann hierbei bis zu 30% geringer als bei Polyester sein, weshalb dieses Material häufig für größere Anlagen favorisiert wird. Einige Rotorblätter werden aus einer Mischung von Glasfaser (GFK)

und Kohlefaser (CFK) hergestellt. CFK ermöglicht extrem niedrige Gewichte, die Nutzung ist aber immer noch recht teuer.

Die Rotorblätter bestehen hauptsächlich aus GFK, CFK oder einer Mischung aus GFK und CFK auf Basis von Epoxidharz, Polyesterharz oder einer Mischung aus Epoxid- und Polyesterharz, sowie aus einem geringem Anteil Metall.

Zu der Gondel gehören in der Regel die Komponenten des mechanischen Triebstrangs, der Generator und die Hilfsaggregate. Das Gondelgewicht wird durch die Wahl des Anlagenkonzepts stark beeinflusst. So hat eine Getriebelose WEA beispielsweise einen schwereren Turmkopf als WEA mit Getriebe. Anfang der 90er Jahre besaßen ca. 10% der installierten Anlagen kein Getriebe, was sich bis zum heutigen Zeitpunkt jedoch bereits auf ca. 35% der Anlagen gesteigert hat. Seit 2007 besitzen mehr als 50% der pro Jahr installierten Anlagen kein Getriebe. Im Jahr 2011 wurden nur rund 28% der Anlagen mit Getriebe aufgestellt. Dieses Phänomen ist allerdings bislang weitgehend auf den deutschen Markt beschränkt und kann nicht als allgemeingültig betrachtet werden.

Das Fundament ist von der Größe der Anlage, dem Anlagentyp und den Bodenverhältnissen abhängig. Dabei spielen Faktoren wie die Windgeschwindigkeit und die Bauweise der Anlage eine wichtige Rolle bei der Auswahl des Fundamentes. Z.B. können Stall-Regelungen höhere Kräfte verursachen, was zu größeren Fundamenten führen kann.

Wichtige Unterschiede gibt es zwischen Onshore- und Offshore-Fundamenten. Die Fundamente von Onshore-Anlagen werden je nach Bodenverhältnissen als Tiefgründung oder Flachgründung ausgeführt. Bei einer Flachgründung werden die Fundamentlasten in die oberen Bodenschichten eingeleitet, wogegen sie bei der Tiefgründung über Pfähle in tiefere Bodenschichten geleitet werden.

Im Offshore-Bereich werden derzeit unterschiedliche Gründungsvarianten eingesetzt und erprobt, u. a. Monopiles, Schwerkraftfundamente, Jacket-Strukturen, Tripods, Tripiles, Bucket-Konzepte und schwimmende Plattformen.

9.2 Ermittlung der Massenbilanz

In einem ersten Schritt wurden die wesentlichen Eingangsgrößen quantifiziert und entsprechende aktuelle Datengrundlagen identifiziert. Darauf basierend erfolgten die Charakterisierung der wesentlichen Technologietypen (z.B. on- und offshore) und die Erstellung eines typischen „Anlagenmix“ (z.B. Binnenland, Küste, offshore). Anschließend erfolgte die Ermittlung der technischen Kenndaten für Windenergie (z.B. Größe, Material, Flächenbedarf) und die aktualisierten Lebenswegdaten wurden zusammengestellt. Hierfür wurden in Abhängigkeit der Eingangsgrößen (z.B. Nabenhöhe und Rotordurchmesser) repräsentative Massen sowie Materialverteilungen ermittelt. Diese Ermittlungen erfolgten auf der Ebene der Anlagen in der IWES-Datenbank.

In einem zweiten Schritt wurde die IWES-Datenbank mit den vorhandenen Windkraftanlagen entsprechend der folgenden Größenklassen gefiltert und die Kennwerte für den Materialeinsatz ermittelt.

Die Windkraftanlagen werden in Klassen aufgeteilt:

- Bestandsanlagen,
- Neuanlagen mit moderatem Windangebot,
- Neuanlagen mit gutem Windangebot und
- Offshore-Anlagen.

Die Klasse der Bestandsanlagen stellt einen Anlagenmix dar, der sehr unterschiedliche Größenklassen beinhaltet. Da in deren Berechnung die Angaben aus einer Datenbank abgeleitet wurden, die nahezu alle Windkraftanlagen in Deutschland beinhaltet, sind sie im statistischen Mittel konsistent. Die Neuanlagen und Offshore-Anlagen sind typische Vertreter.

9.3 Stromerzeugung mit Windkraftanlagen

Für die oben definierten Anlagenklassen wurden mittlere Vollaststunden ermittelt. Für Onshore-Anlagen wurde eine mittlere Lebensdauer von 20 Jahren unterstellt. Damit ist auch der vorzeitige Ersatz durch Repowering berücksichtigt. Für Offshore-Anlagen wurde eine Lebensdauer von 25 Jahren angenommen.

9.4 Ergebnisse der Lebensweganalysen für WEA

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Lebensweganalysen für die Windkraftwerke.

Tabelle 18 LCA-Daten für die betrachteten WEA

System	Emission in g/kWh _{el}					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	kWh _{primär} /kWh _{el}
Wind Bestand	10	9	0,028	0,020	0,0094	0,024
Wind Moderater Standort	9	8	0,025	0,019	0,0087	0,022
Wind Guter Standort	5	5	0,016	0,011	0,0054	0,013
Wind Offshore	5	4	0,014	0,010	0,0054	0,013

Quelle: GEMIS 4.8

10 Emissionsbilanzierung für Erneuerbare Energien in 2010

Die hier ermittelten Datengrundlagen für die lebenswegbezogenen Umweltaspekte bei der Bereitstellung von Kraftstoffen, Strom und Wärme aus EE sollen im Folgenden mit den statistischen Daten der AGEESTat für das Jahr 2010 gekoppelt werden, um mit diesem Mengengerüst eine Hochrechnung der **gesamten** Umweltaspekte zu erlauben.

Hierfür werden die differenzierten Ergebnisse der Lebenswegbilanzen der einzelnen EE-Technologien mit den höher aggregierteren AGEESTat-Daten durch „Mixer“ verknüpft, die bezogen auf die jeweilige AGEESTat-Kategorie aus den einzelnen Anteile der differenzierteren Technologien gewichtete Durchschnittswerte bestimmen.

Dies erfolgt getrennt für die Bereiche Strom, Wärme und Kraftstoffe.

10.1 Emissionsbilanzierung für EE-Strom in 2010

Die in den vorangehenden Kapiteln dargestellten spezifischen EE-Technologien zur Stromerzeugung wurden auf Grundlage vorhandener Daten und eigener Schätzungen mit den aggregierten AGEESTat-Daten zur EE-Stromerzeugung über jeweilige Erzeugungsanteile verknüpft, die in beiden folgenden Tabellen zusammen mit den daraus errechneten Stromerzeugungsmengen dargestellt sind. Die Anteilsdaten für die Technologiemixe können künftig fortgeschrieben werden (vgl. Kapitel 11).

Tabelle 19 **Anteile der Technologien an der EE-Stromerzeugung in 2010 (ohne Bioenergie)**

	Erzeugung	
	Anteil	GWh
Wasserkraft	19,9%	20.630
davon groß	80%	16.504
davon klein standalone	15%	3.095
davon klein integriert	5%	1.032
Windkraft	36,5%	37.793
onshore Bestand	99,54%	37.619
onshore neu, moderat	0%	0
onshore neu, gut	0%	0
offshore	0,46%	174
Solar-PV	11,3%	11.683
monokristallin	35%	4.089
polykristallin	50%	5.842
amorph	5%	584
CdTe, andere	10%	1.168
Geothermie	0,0%	28
oberflächennah	0%	0
tief	100%	28
Summe anderer RE-Strom	67,8%	70.134

Quelle: eigene Berechnungen nach BMU (2011), Neuanlagen Wind ab 2011

Die aus Bioenergie bereitgestellte Stromerzeugung und ihre Aufteilung auf Technologien zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 20 Anteile der Bioenergie-Technologien an der EE-Stromerzeugung in 2010

feste Bioenergie	11,4%	11.800
Altholz	70%	8.260
Industrierestholz	20%	2.360
HHS-Wald	10%	1.180
ORC Pellets	0%	0
flüssige Bioenergie	1,7%	1.800
Rapsöl	50%	900
Palmöl	50%	900
Biogas	12,9%	13.300
- Gülle	15%	1.995
- Mais	75%	9.975
- Weizen, Roggen	5%	665
- org. Hausmüll, ind. Reststoffe	2%	266
- Grasschnitt	3%	399
Klär gas	1,1%	1.101
Deponie gas	0,7%	680
biogene Abfälle in MVA	4,5%	4.651
Summe biogener Strom	32,2%	33.332

Quelle: eigene Berechnungen nach BMU (2011)

Mit diesem Mengengerüst und den spezifischen Emissionsdaten für die Technologien wurden dann die gesamten hier bilanzierten Umweltaspekte der EE-Stromerzeugung im Jahr 2010 berechnet, wobei diese Werte sowohl die Vorketten (Energieträgerbereitstellung, Herstellung der Anlagen) wie auch die direkten Effekte (bei Bioenergie) enthalten.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 21 Umweltaspekte der EE-Stromerzeugung in 2010

	Emission in t/a					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	GWhprimär
Wasserkraft	57.908	55.138	149	156	35	129
davon groß	45.275	43.298	112	123	26	97
davon klein standalone	6.094	5.667	17	15	5	17
davon klein integriert	6.539	6.173	20	19	4	15
Windkraft	369.560	332.825	1.041	757	354	910
onshore Bestand	368.734	332.092	1.039	755	353	908
onshore neu, moderat	0	0	0	0	0	0
onshore neu, gut	0	0	0	0	0	0
offshore	826	733	2	2	1	2
Solar-PV	663.163	585.412	1.384	882	362	2.509
monokristallin	270.743	241.463	528	345	130	1.039
polykristallin	346.571	305.139	709	456	189	1.325
amorph	24.683	21.277	73	40	20	80
CdTe, andere	21.166	17.533	74	40	23	65
Geothermie	6.153	5.871	9	6	1	24
oberflächennah	0	0	0	0	0	0
tief	6.153	5.871	9	6	1	24
Summe anderer RE-Strom	1.096.783	979.246	2.583	1.802	751	3.573
feste Bioenergie	135.565	91.930	11.258	14.309	733	346
Altholz	111.226	75.619	8.488	11.751	630	287
Industrierestholz	4.654	77	1.788	1.644	31	0
HHS-Wald	19.684	16.234	982	914	73	58
ORC Pellets	0	0	0	0	0	0
flüssige Bioenergie	572.266	159.783	9.879	8.424	293	668
Rapsöl	276.152	90.085	6.431	4.117	83	387
Palmöl	296.114	69.698	3.448	4.307	210	281
Biogas	4.838.078	781.105	52.859	9.872	606	3.148
- Gülle	374.990	72.377	1.698	1.016	32	276
- Mais	4.009.131	630.814	46.777	7.876	517	2.559
- Weizen, Roggen	261.659	44.100	2.849	519	38	177
- org. Hausmüll, ind. Reststoffe	47.606	7.379	214	121	4	28
- Grasschnitt	144.691	26.435	1.320	340	16	107
Klärgas	6.396	1	516	741	21	0
Deponiegas	1.998	1	456	435	2	0
biogene Abfälle in MVA	53.312	7.770	2.770	3.975	25	15
Summe biogener Strom	5.607.614	1.040.590	77.738	37.756	1.681	4.176
Summe RE-Strom	6.704.398	2.019.835	80.321	39.558	2.432	7.749

Quelle: eigene Berechnungen

10.2 Emissionsbilanzierung für EE-Wärme in 2010

Die in den Kapiteln 5.2 sowie 6 und 7.2 dargestellten spezifischen EE-Technologien zur Wärmebereitstellung wurden auf Grundlage vorhandener Daten und eigener Schätzungen mit den aggregierteren AGEESat-Daten zur EE-Wärmenutzung über jeweilige Erzeugungsanteile verknüpft, die in der folgenden Tabelle zusammen mit den daraus errechneten Wärmebereitstellungsmengen dargestellt sind.

Tabelle 22 Anteile der Technologien an der EE-Wärmebereitstellung in 2010

	Erzeugung	
	Anteile	GWh
biogenes Wärmesystem		
biogene Festbrennstoffe (Haushalte)	58,0%	72.700
Scheitholz	85%	61.795
Holz-HS	1%	727
Pellets	14%	10.178
biogene Festbrennstoffe (Industrie)	16,3%	20.400
Industrierestholz	80%	16.320
Holz-HS	5%	1.020
Pellets	15%	3.060
biogene Festbrennstoffe (HW/HKW)*	5,7%	7.200
Altholz	25%	1.800
Industrierestholz	65%	4.680
HHS-Wald	10%	720
biogene flüssige Brennstoffe*	3,3%	4.100
Rapsöl	50%	2.050
Palmöl	50%	2.050
Biogas*	6,1%	7.600
- Gülle	15%	1.140
- Mais	75%	5.700
- Weizen, Roggen	5%	380
- org. Hausmüll, ind. Reststoffe	2%	152
- Grasschnitt	3%	228
Deponiegas*	0,3%	360
Klärgas*	0,9%	1.086
biogene Abfälle*	9,5%	11.850
biogene Wärme gesamt	92,1%	125.296

*= anteilig von KWK-gesamt über energiebezogene Allokation ermittelt

Die Anteilsdaten der Technologiemixe können künftig fortgeschrieben werden (vgl. Kapitel 11.3).

Mit diesem Mengengerüst und den spezifischen Emissionsdaten für die Technologien wurden dann die gesamten hier bilanzierten Umweltaspekte der EE-Wärmebereitstellung im Jahr 2010 berechnet, wobei diese Werte sowohl die Vorketten (Energieträgerbereitstellung, Herstellung der Anlagen) wie auch die direkten Effekte (bei Bioenergie) enthalten.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 23 Umweltaspekte der EE-Wärmebereitstellung in 2010

	Erzeugung		Emission In t/a					KEV _{NE}	Umrechnung auf	Quelle	künftig
	Anteile	GWh	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	GWh _{primär}	KWK-Wärme		
biogenes Wärmesystem											
biogene Festbrennstoffe (Haushalte)	58,0%	72.700	1.342.914	684.723	21.311	15.309	12.264	2.789			
Scheitholz	85%	61.795	1.063.607	436.929	17.525	12.060	11.500	1.777		eig. Schätzung	via ZSE?
Holz-HS	1%	727	16.723	12.943	281	277	105	50		eig. Schätzung	
Pellets	14%	10.178	262.584	234.850	3.505	2.971	659	963		eig. Schätzung	Pelletverband?
biogene Festbrennstoffe (Industrie)	16,3%	20.400	121.669	94.374	8.693	7.805	380	385			
Industrierestholz	80%	16.320	18.874	310	7.249	6.664	125	1		eig. Schätzung	via ZSE?
Holz-HS	5%	1.020	23.042	20.984	376	294	37	82		eig. Schätzung	
Pellets	15%	3.060	79.753	73.079	1.068	846	219	301		eig. Schätzung	Pelletverband?
biogene Festbrennstoffe (HW/HKW)*	5,7%	7.200	23.687	11.373	4.394	4.218	124	42			
Altholz	25%	1.800	4.849	3.297	370	512	27	13	0,20	eig. Schätzung	AGEEStat?
Industrierestholz	65%	4.680	9.230	152	3.545	3.259	61	1	1,00	siehe oben	Verband?
HHS-Wald	10%	720	9.608	7.924	479	446	36	28	0,80	eig. Schätzung	
biogene flüssige Brennstoffe*	3,3%	4.100	642.020	179.259	11.083	9.451	329	749			
Rapsöl	50%	2.050	309.812	101.065	7.215	4.619	93	434	0,49	eig. Schätzung	BLE, DBFZ?
Palmöl	50%	2.050	332.208	78.194	3.868	4.832	236	316	0,49	eig. Schätzung	BLE, DBFZ?
Biogas*	6,1%	7.600	1.283.138	207.162	14.019	2.618	161	835			
- Gülle	15%	1.140	99.454	19.196	450	269	8	73	0,46	eig. Schätzung	DBFZ?
- Mais	75%	5.700	1.063.288	167.302	12.406	2.089	137	679	0,46	eig. Schätzung	DBFZ?
- Weizen, Roggen	5%	380	69.396	11.696	756	138	10	47	0,46	eig. Schätzung	DBFZ?
- org. Hausmüll, ind. Reststoffe	2%	152	12.626	1.957	57	32	1	8	0,46	eig. Schätzung	DBFZ?
- Grasschnitt	3%	228	38.374	7.011	350	90	4	28	0,46	eig. Schätzung	DBFZ?
Deponiegas*	0,3%	360	529	0	121	115	1	0	0,5		
Klärgas*	0,9%	1.086	3.154	1	255	366	10	0	0,5		
biogene Abfälle*	9,5%	11.850	81.499	11.878	4.235	6.076	39	22	0,6		
biogene Wärme gesamt	92,1%	125.296									

* anteilig von KWK-gesamt über energiebezogene Allokation ermittelt

EE-Wärmesystem	Anteil	GWh	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	GWh _{primär}			
Solarthermie	48,2%	5.200	130.458	415.629	1.342	826	336	1.573			
- Flachkollektoren	80%	4.160	97.058	309.968	1.000	622	246	1.167		DLR	Verband?
- Vakuumröhrenkollektoren	18%	936	31.311	98.404	327	191	89	381		DLR	Verband?
- Schwimmbadabsorber	2%	104	2.089	7.257	15	13	1	25		DLR	Verband?
Geothermie & WP	51,8%	5.585	1.124.693	1.074.354	1.611	1.155	95	4.492			
tief	5%	285	10.256	9.791	15	11	1	41		AGEEStat	
Wärmepumpen	95%	5.300	1.114.438	1.064.563	1.596	1.144	94	4.451		eig. Schätzung	Verband?
Summe nichtbiogene EE-Wärme	7,9%	10.785									
Summe RE-Wärme		136.081									

Quelle: eigene Berechnungen

10.3 Emissionsbilanzierung für biogene Kraftstoffe in 2010

Die im Kapitel 4 dargestellten spezifischen EE-Technologien zur Bereitstellung biogener Kraftstoffe wurden auf Grundlage vorhandener Daten und eigener Schätzungen mit den aggregierten AGEESat-Daten zu Biokraftstoffen über jeweilige Erzeugungs- und Importanteile verknüpft, die in der folgenden Tabelle zusammen mit den daraus errechneten Kraftstoffberestellungsmengen dargestellt sind. Die Anteilsdaten für die Technologiemixe können künftig fortgeschrieben werden (vgl. Kapitel 11.3.1).

Tabelle 24 Anteile der Technologien an der biogenen Kraftstoffbereitstellung in 2010

	Anteile	GWh
Biodiesel		26.520
AME	2%	530
RME	90%	23.868
PME	5%	1.326
SME	3%	796
Pflanzenöl		636
Raps	100%	636
Bioethanol		8.541
Weizen, Roggen	70%	5.979
Zuckerrübe	25%	2.135
Zuckerrohr-BR	5%	427

Quelle: eigene Schätzungen und Berechnungen nach BLE (2011) und BMU(2011); AME = Altfett-Methylester; RME = Rapsöl-Methylester; PME = Palmöl-Methylester; SME = Sojaöl-Methylester; BR = Brasilien

Mit diesem Mengengerüst und den spezifischen Emissionsdaten für die Technologien wurden dann die gesamten hier bilanzierten Umweltaspekte der biogenen Kraftstoffbereitstellung im Jahr 2010 berechnet, wobei diese Werte nur die Vorketten (Energieträgerbereitstellung) enthalten, da die Emissionen der Kraftstoffnutzung (in Bussen, Pkw, Lkw) durch die Beimischung nicht extra bilanziert werden können.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 25 Umweltaspekte der biogenen Kraftstoffbereitstellung in 2010

	Emission in t/a					KEV _{NE}
	CO ₂ Äq	CO ₂	SO ₂ Äq	NO _x	PM ₁₀	GWh _{primär}
Biodiesel	5.137.465	2.052.605	63.254	11.529	1.485	35.913
AME	12.986	11.357	24	24	1	294
RME	4.796.522	1.909.731	61.784	10.607	1.266	33.527
PME	288.257	96.174	1.110	698	183	1.626
SME	39.701	35.343	336	201	36	466
Pflanzenöl	28.563	25.428	242	144	26	336
Raps	28.563	25.428	242	144	26	336
Bioethanol	1.348.696	698.474	19.941	2.959	546	11.607
Weizen, Roggen	1.073.953	557.869	14.642	2.065	205	9.355
Zuckerrübe	224.392	113.611	4.589	439	38	1.906
Zuckerrohr	50.350	26.995	709	455	304	347

Quelle: eigene Berechnungen

11 Künftige Datenfortschreibung

Dieses Kapitel resümiert die in den verschiedenen Teilberichten zu EE-Technologien ermittelten Optionen zur Fortschreibung der LCA-Daten und systematisiert diese zu einem Gesamtkonzept. Es gliedert sich wie folgt in einzelne Abschnitte:

- Datengüte und Fortschreibungsnotwendigkeit für die einzelnen EE und deren Nutzungstechnologien
- Fortschreibungsmöglichkeiten dieser Daten insbesondere im Rahmen des ZSE
- Andere Fortschreibungsoptionen
- Methodik und Daten der EU-Richtlinie zur Förderung von EE für die künftige Fortschreibung im Bereich der Bioenergie
- Künftig relevante EE-Prozesse.

11.1 Generelle Datengüte

Die vorgelegten Daten für die LCA-bezogenen Daten sind hinsichtlich ihrer Güte zu unterscheiden in

- a) **Inventar**daten für die Beschreibung der Energieprozesse (stoffliche Zusammensetzung, Hilfsenergie- und Stoffinputs, direkte Emissionen, Effizienz, Lebensdauer)
- b) **Hintergrund**daten für die Bereitstellung der entsprechenden Stoff- und Energiemengen (sowie Transporte).

Im LCA-EE-Vorhaben wurden die Daten nach a) eruiert, während für b) die Daten aus der aktualisierten Datenbank von GEMIS (Version 4.8) verwendet wurden.

Je nach EE-Typ und betrachtetem Umweltaspekt können diese beiden Datenkategorien sehr unterschiedliche Relevanz aufweisen - z.B. THG-Emissionen von PV-Systemen dominiert Typ b), während die PM₁₀-Emissionen von Systemen für biogene Festbrennstoffe vorwiegend durch a) bestimmt werden.

11.2 Generelle Fortschreibungsnotwendigkeiten

Die Ebene der Inventardaten für EE-Systeme wird weiter unten im Einzelnen diskutiert.

Vorab sei darauf hingewiesen, dass die „Hintergrunddaten“ vor allem im Bereich der Stoffprozesse (z.B. Herstellungsaufwand für seltene Erden, Recyclingraten für Metalle, Herstellungsmixe für Kunststoffe) deutlich weniger belastbar sind als die für Energie- und Transportprozesse, da für letztere mittlerweile eine vergleichsweise lange Zeitreihe mit vielen qualitätsgesicherten Daten aus Statistiken und THG-Inventaren vorliegen, die regelmäßig fortgeschrieben werden.

Bei den Stoffsystemen fehlt diese generelle Fortschreibung bislang und auch eine statistische Absicherung von Emissionsdaten für die Herstellungsprozesse ist nur in wenigen Einzelfällen (z.B. Aluminium, Stahl) möglich.

Hier sollte künftig ein besonderes Augenmerk gelegt werden, da diese Prozesse durchaus Einfluss auf die LCA-Ergebnisse haben.

11.3 Fortschreibung für Bioenergie

Die im Vorhaben geführte Diskussion zu Fortschreibungsnotwendigkeiten hatte zum Ergebnis, dass nur eine Teilmenge der Daten in den nächsten Jahren einer Fortschreibung bedarf.

Die Datenaktualisierungen werden, wie die LCA-Daten, für die Vorketten und die Prozesse zur Nutzung der Bioenergieträger getrennt behandelt.

11.3.1 Vorkettendaten für biogene Energieträger

Die Vorkettendaten für biogene Energieträger, d.h. die Bereitstellungsketten für z.B. Biogas, Biokraftstoffe, Holzpellets, Pflanzenöle und Stroh sind auf dem Stand des Jahres 2010 und können modular fortgeschrieben werden.

Für die Zeit bis 2015 ist mit **keiner** nennenswerten Änderung in den spezifischen Ketten innerhalb Deutschlands zu rechnen, jedoch können danach mit Blick auf 2020 durchaus merkbare Änderungen durch neue Technologien (z.B. 2. Generation Biokraftstoffe, Biogasaufbereitung, Torrefaktion) eintreten und auch die Herkunftsmixe (Importe) werden sich voraussichtlich ändern.

Daher sollten die Vorketten eingedenk der jeweiligen Anteile an der Kraftstoff-, Strom- und Wärmebereitstellung jährlich fortgeschrieben und bis 2015 eine Aktualisierung und ggf. Revidierung vorgesehen werden.

Bei den Daten für die ausländischen Vorketten (Importe) sind die Aktualisierungen der RED-default-Daten heranzuziehen, wenn diese durch die EU-Kommission vorgelegt werden.

Die folgende Tabelle zeigt eine Synopse der entsprechenden Ergebnisse.

Tabelle 26 Datenaktualisierungsbedarf für die biogenen Vorketten

	INPUT	Gewinnung	Logistik		Konversion upstream						update?
			Schlepper, Traktor, Lkw usw.	Lager, Umschlag	Trocknung, Zerkleinerung, Kompaktierung	Festbettvergasung (FB)	WS-Vergasung (WS) > 2 MW	Biogas-erzeugung	Gas-Reinigung/upgrading	Sonstige (Umesterung, Ethanol, FT)	
Energiepflanzen	Kurzumtrieb	(x)	(x)		(x)	(x)	(x)			(x)	2015
	Raps	(x)	(x)		(x)					(x)	
	Zuckerrüben	x	(x)							(x)	Biogas 2015
	Zuckerrohr	x	(x)							(x)	RED default
	Palm	x	(x)		(x)					(x)	RED default
	Soja	x	(x)		(x)					(x)	RED default
	Mais-Silage	(x)	(x)	(x)	(x)			x	x		ggf 2015
	Weizen	(x)	(x)							(x)	
	Roggen-Silage	(x)	(x)	(x)	(x)			x	x	(x)	ggf 2015
Abfälle, Reststoffe	Altholz				(x)						
	Rest-, Schwachholz		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)		(x)	(x)	2G EtOH ab 2015
	Sägespäne etc.				(x)						
	Stroh		(x)		(x)		(x)		(x)	(x)	2G EtOH ab 2015
	Altfett		(x)							x	
	Grünschnitt		(x)					x			
	Landschaftspflegematerial		(x)		(x)			x			Menge wenig relevant
	Gülle		(x)					x	x		
	org. Hausmüll							x	x		
	industr. Substrate							x			
	industr. fester Bioabfall		(x)		(x)						
	Klärgas										
	Tierfett/Tiermehl									(x)	
Klärschlamm				(x)							
Schwarzlauge						(x)					
Deponiegas											

x = relevant für Fortschreibung

x = ggf. relevant für Fortschreibung

(x) = aktuell nicht relevant

(x) = ggf. mittelfristig relevant für Fortschreibung

11.3.2 Technologiedaten für biogenen Strom

Bei der Stromerzeugung aus biogenen Energieträgern sind die mengenmäßig dominanten Daten für Altholz auf Basis der ZSE-Emissionswerte (vgl. 11.25.1) angesetzt und können damit über die ZSE-interne Fortschreibung erfasst werden (vgl. Kapitel 11.8).

Auch bei flüssigen Bioenergieträgern sind die Emissionsdaten (für größere Dieselmotoren) belastbar, darüber hinaus ist ihr Einsatz rückläufig. Eine Fortschreibung ist daher hier nicht notwendig.

Bei biogenen Gasen sind sowohl Aufkommen wie auch Nutzung sehr unterschiedlich:

- Bei Deponie- und Klärgas können Daten aus ZSE übernommen werden, die der internen Fortschreibungslogik von ZSE unterliegen (vgl. Kapitel 11.8).
- Bei Biogas in Gas- und Zündstrahlmotoren sind die Emissionen je nach Motortyp und Leistungsklasse unterschiedlich und es liegt eine steigende Zahl von Messwerten aus dem Anlagenbetrieb vor, die zur Ableitung entsprechender Emissionsfaktoren genutzt wurden. Da hier bis 2015 keine nennenswerte Veränderung der spezifischen Emissionen der eingesetzten Technologien zu erwarten ist, können diese Werte – mit jährlicher Fortschreibung des Einsatzmixes – auch in den nächsten Jahren verwendet werden.

Bei künftig vermehrtem Strom aus Biomethan können dagegen die direkten Emissionsfaktoren für erdgasbetriebene Systeme aus ZSE, inklusive deren interner Fortschreibung, verwendet werden (vgl. Kapitel 11.8).

11.3.3 Technologiedaten für biogene Wärme

Bei der Wärmebereitstellung aus biogenen Energieträgern sind die vorhandenen Daten im ZSE (vgl. Kapitel 11.8) aus unserer Sicht ausreichend und ihre Fortschreibung erfolgt ZSE-intern analog zu denen der fossilen Energieträger (Öl, Erdgas).

Die Daten für Stückholz sind erfordern einerseits aufgrund der hohen Abhängigkeit der Emissionen von realen Betriebsweisen und Brennstoffeigenschaften und andererseits aufgrund der tendenziell rückläufigen Mengen u.a. in absehbarer Zeit keine Fortschreibung.

Dagegen steigen die Mengen an **Holzpellets**, die sowohl bei Haushalten und Kleinverbrauchern wie auch im Bereich der Nah- und Prozesswärme eingesetzt werden.

Hier ist eine bessere Typisierung und emissionsseitige Charakterisierung (vor allem für NO_x und PM₁₀) mittelfristig sinnvoll und sollte im ZSE aufgenommen werden.

11.3.4 Technologiedaten für biogene Kraftstoffe

Es wird in Absprache mit IFEU unter Bezug auf die TREMOD-Datenbank unterstellt, dass die biogenen Anteil an Diesel- und Ottokraftstoffen in Deutschland **nicht** zu einer Änderung der **direkten** Emissionen von Fahrzeugen führen. Die Fortschreibung der direkten Fahrzeugemissionsdaten erfolgt im Rahmen der üblichen TREMOD-Aktualisierungen und ist im ZSE verfügbar.

Die Fortschreibung der Daten für die Vorketten (in- und ausländische Herstellung) kann über die BLE erfolgen (vgl. Abschnitt 3).

11.3.5 Zusammenfassung des Datenaktualisierungsbedarfs für Nutzungsprozesse von Bioenergie

Die folgende Tabelle zeigt eine Synopse der Ergebnisse zum Datenaktualisierungsbedarf biogener Energiesysteme.

Tabelle 27 Datenaktualisierungsbedarf für Nutzungsprozesse von Bioenergie

INPUT	INPUT	Einzelofen	Heizungen		Unterschub		Rostfeuerung			(Z)WSF		MVA	Mitverbrennung Kohle		Motoren						
			< 10	10-50	50-100	100-500	> 500	1-5	5-20	ORC	5-50	> 50	5-100	50-300	> 300	Gas	Zündstrahl	Diesel			
			kW _{th}				Kessel kW _{th}	DT MW _{el}			MW _{th}		MW _{el}	DT-HKW MW _{th}							
	fest																				
Holz	Scheitholz	(x)	(x)	(x)																	
	Holzhackhack-schnitzel		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)		(x)	(x)						
Abfälle	Altholz A1-2								(x)				(x)								
	Altholz A3-4								(x)				(x)								
Reststoffe	Pellets	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)											
	Stroh					(x)	(x)	(x)	(x)	(x)				(x)	(x)						
	Schwarzlauge																				
Abfälle	industr. Bioabfall												(x)								
	org. Hausmüll												(x)								
	Klärschlamm												(x)								
	Tierfett/Tiermehl												(x)								
	gasförmig																				
Holz	Produktgas (roh)																x	x			
	Biomechan*																(x)	(x)			
Gülle	Biogas																x	x			
	Biomechan*																(x)	(x)			
org. Hausmüll	Biogas																x	x			
	Biomechan*																(x)	(x)			
Mais	Biogas																x	x			
	Biomechan*																(x)	(x)			
Roggen	Biogas																x	x			
	Biomechan*																(x)	(x)			
Abfälle	Klärgas																(x)	(x)			
	Deponiegas																(x)	(x)			
	flüssig																				
Abfälle	AME																		(x)		
Raps	Pflanzenöl																		(x)		
	RME*																		(x)		
Palm	PME*																		(x)		
Soja	SME*																		(x)		

* = Datenfortschreibung für Einsatz in Fahrzeugen über TREMOD

x = relevant für Fortschreibung

x = ggf. relevant für Fortschreibung

(x) = aktuell nicht relevant

(x) = ggf. mittelfristig relevant für Fortschreibung

Die Synopse zeigt, dass vorwiegender Aktualisierungsbedarf bei Pellets im Bereich von Kleinfeuerungen sowie bei der motorischen Nutzung von Biogas besteht.

11.4 Fortschreibung für Geothermie

Da bisher nur einzelne Anlagen erreicht wurden, können diese einzeln betrachtet werden. Eine Aussage, wie sich der Anlagenmix in Zukunft entwickelt, ist noch nicht abzusehen. Die ermittelten Daten können als Anhaltspunkt für zukünftige Systeme dienen. Es wird empfohlen, bei neuen Anlagen gegebenenfalls zu überprüfen, ob sich Aufwandsverbesserungen erzielen ließen.

11.5 Fortschreibung für Solarenergie

11.5.1 Fortschreibung für solare Wärme (Kollektoren)

Die aktualisierten Daten für die Solarkollektoren sind aufgrund mittelfristig nicht erkennbarer grundsätzlicher Änderungen als belastbar für die nächsten Jahre anzusehen. Dies gilt auch für die Schwimmbadkollektoren, für die keine neuen Werte erhoben wurden.

Das Mix zwischen Flach- und Vakuumröhren-Kollektoren sollte jährlich auf Basis der Absatzzahlen fortgeschrieben werden.

11.5.2 Fortschreibung für PV-Strom

Die PV-Systeme sind auf dem Stand 2010 und bedürfen – je nach Technologie- und Marktentwicklung – erst in einigen Jahren einer weiteren Aktualisierung.

Bei den Herstellungsmixen sollte künftig insbesondere die Herstellung in China beachtet werden, da hier das Hintergrundsystem aufgrund des hohen Anteils von Kohle an der Stromerzeugung vergleichsweise THG- und Luftschadstoff-intensiv ist.

11.5.3 Fortschreibung für CSP-Strom

Die Daten sollten für die nächsten Jahre Gültigkeit haben, erst bei nennenswerten Anteilen neuer Technologien (Fresnel-Linsen, Solar-Tower) wären diese entsprechend zu berücksichtigen.

11.6 Fortschreibung für Wasserkraft

Die Daten zur Stromerzeugung aus kleinen und großen Laufwasserkraftwerken, die auf Basis der Schweizer Daten auf Deutschland übertragen wurden, sind für die nächsten Jahre als belastbar anzusehen (zur Frage der Pumpspeicherkraftwerke siehe Kapitel 12.112.5).

11.7 Fortschreibung für Windenergie

Die Daten zur Stromerzeugung aus onshore-Wind sind aufgrund der neu erhobenen Informationen als gut belastbar für die nächsten Jahre anzusehen.

Bei offshore-Windkraftstrom sollte in ca. 2-3 Jahren eine Aktualisierung vorgesehen werden, die dann auf eine breitete Datengrundlage insbesondere im Bereich der Fundamente und der erreichbaren typischen Auslastung zurückgreifen kann.

Bei offshore-Wind sollte dann auch die Frage der netzseitigen Anbindung (Seekabel) belastbar beantwortet werden können.

11.8 Fortschreibungsmöglichkeiten dieser Daten insbesondere im Rahmen des ZSE

Im ZSE sind für Energieprozesse Emissionsdaten bei der Nutzung biogener Energieträger hinterlegt, die damit folgende Bereiche abdecken:

- Stromerzeugung aus fester Biomasse (Altholz sowie Hackschnitzel/Pellets aus Rest- und Schwachholz) mit Dampfturbinen-Kraft- und Heizkraftwerken (Prozesse mit 5-50 MW_{th} Feuerungswärmeleistung)
- Stromerzeugung aus biogenen Anteilen des Hausmülls mit Dampfturbinen-Kraft- und Heizkraftwerken
- Stromerzeugung aus flüssigen Bioenergieträgern (vorwiegend Pflanzenöl) in Dieselmotoren
- Stromerzeugung aus gasförmiger Biomasse (Biogas, Deponiegas, Klärgas) in Diesel- und Gasmotoren

Soweit die im Rahmen des LCA-EE-Projekts vorgelegten Emissionsdaten in ZSE eingepflegt werden, kann ihre Fortschreibung direkt im ZSE erfolgen.

Im Bereich der biogenen Wärme können die Emissionsdaten für kleinere und mittlere Kessel (Nah/Fern- und Prozesswärme) sowie für Scheitholz im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher verwendet werden. Hier sind aufgrund des erwartbar weiter steigenden Pelleteinsatzes eine eigene Datenkategorie zum Brennstoffeinsatz sowie entsprechende Emissionsfaktoren vor allem für CO, NMVOC, NO_x und PM₁₀ sinnvoll, die mittelfristig fortgeschrieben werden sollte.

Für Pellets in größeren Anlagen sollte dagegen eine eigene Datenkategorie **zum Brennstoffeinsatz** überlegt werden, da die künftig relevante werdende **Mitverbrennung** von fester Biomasse (insb. Pellets) in größeren Kohle(heiz)kraftwerken der öffentlichen Versorgung (sowie ggf. industrieller Eigenerzeugung) damit **direkt über ZSE „erkannt“** werden. Hier sind die Emissionsfaktoren der großen Kohleanlagen relevant, deren Fortschreibung damit unmittelbar für die Mitverbrennung verwendet werden kann.

11.9 Andere Fortschreibungsmöglichkeiten

Es wäre mittelfristig zu prüfen, inwieweit eine Erweiterung der Statistik vor allem in den Bereichen feste biogene Energieträger (insb. Pellets) und Importanteile für flüssige (und künftig auch feste) Bioenergieträger erreicht werden kann, da hierzu bereits internationale Initiativen von Seiten der IEA Bioenergy Task 40 vorliegen.

Durch die RED und die entsprechende Zertifizierung liegen prinzipiell Daten zur Herkunft vor, die durch die BLE gesammelt und zu aggregierten nationalen Durchschnittswerten umgerechnet werden könnten.

11.10 Methodik und Daten der EU-Richtlinie zur Förderung von EE für die künftige Fortschreibung im Bereich der Bioenergie

Die im Exkurs (vgl. Kapitel 4.5) diskutierten Notwendigkeiten zur Verbesserung der THG-Bilanzierung nach der RED sollten von BMU und UBA aufgegriffen und in die ab 2013 anstehende europäische Diskussion über die RED eingebracht werden.

Darüber hinaus wird die EU-Kommission in naher Zukunft aktualisierte default-Daten vorlegen²⁰, die vor allem für die Importe von außerhalb der EU genutzt werden sollten.

Insoweit besteht Aktualisierungsbedarf für die hier vorgelegten Daten.

²⁰ Vgl. Fußnote 4.

12 Forschungsbedarf

12.1 Künftig relevante Prozesse (Daten-Ausblicke)

Über die heute verfügbaren und implementierten EE-Technologien hinaus wurden im Vorhaben ein „Daten-Ausblick“ (grobe LCA-Daten) erstellt werden für die solarthermische Stromerzeugung (CSP) auf Basis von Parabolrinnen-Kraftwerken, die künftig wichtig für Stromimporte werden könnten.

Für weitere potenziell relevante Systeme wie Strom aus Wellenenergie und Strömungskonverter konnten keine belastbaren Daten ermittelt werden, ihre Rolle wird aufgrund des geringen Entwicklungsstands aber vor 2020 vergleichsweise klein bleiben.

Auch im Hinblick auf die künftig bedeutsamer werdende Frage der **Systemintegration von EE** und entsprechende Speicher ist eine Erweiterung der Systemgrenzen sinnvoll, um z.B. Untertage-Speicher sowie Pumpspeicherkraftwerke einzubeziehen. Im Teilbericht zur Wasserkraft sind **Daten für letztere enthalten, und GEMIS 4.8 bietet auch erste Prozesse für „Power2Gas“, d.h. Biomethanproduktion auf Basis von Windstrom²¹.**

In diesem Kapitel sollen zudem die offenen Punkte zur Lebenswegbilanzierung aufgeführt und um zusätzliche Elemente erweitert werden, deren Bearbeitung künftig relevant sein kann.

12.2 THG-Effekte durch Landnutzungsänderungen

Sowohl bei direkten als auch bei indirekten Landnutzungsänderungen gibt es offene Fragen hinsichtlich der Bilanzierungsmethoden. Hier sind von Seiten der Wissenschaft (IPCC), der UN (REDD) und der EU verschiedene Entwicklungen angestoßen, die diese Mängel beseitigen oder zumindest abmildern sollen. Die wesentliche Problematik liegt in der Beurteilung indirekter Landnutzungsänderungen, zu denen die EU-Kommission in 2012 voraussichtlich einen Regelungsvorschlag vorlegen wird. Aber auch eine verlässliche Ableitung der Änderung des Bodenkohlenstoffhaushalts bei direkten Landnutzungsänderungen durch die verstärkte Nutzung biogener Forstprodukte (Rest- und Schwachholz) ist bisher noch nicht erreicht.

12.3 Multi-Output-Prozesse

In Multi-Output-Prozessen müssen die Umweltwirkungen des Prozesses auf die verschiedenen Kuppelprodukte aufgeteilt werden oder aber der Prozess durch Systemraumerweiterung so ergänzt werden, dass die resultierenden Umweltwirkungen eindeutig dem zu untersuchenden Produkt zugeschrieben werden können.

Sollte statt der vorgeschlagenen Allokation nach ökonomischem Wert (s. Punkt 0) eine Allokation nach Energieinhalt gewünscht sein, so stellt sich die Frage nach der Abgrenzung zwischen Nebenprodukten und Abfällen, da Reststoffe trotz ihres etwaigen Heizwertes als Stoffe betrachtet werden müssen, für die der Prozess nicht aufgebaut wurde. Hierzu müssen klare Definitionen erfolgen, aber selbst dann wird man möglicherweise um eine explizite Auflistung

²¹ Diese Daten beruhen auf einer Studie zur Energie- und Klimabilanz von unkonventionellem Erdgas, siehe ÖKO, IINAS (2012).

aller Stoffe nicht herunkommen, die als Nebenprodukte bzw. Abfälle gelten. Dies bringt für das zu erstellende Regelwerk einen erhöhten Pflege- und Nachbesserungsbedarf mit sich, sobald sich neue Energieprozesse mit bisher unberücksichtigten Kuppelprodukten etablieren.

12.4 Reststoffe als Energieträger

Werden Reststoffe als Energieträger eingesetzt, so sollten diesen wie in Punkt 0 beschrieben die Umweltlasten aus der Entsorgung der Reststoffe gutgeschrieben bzw. der alternative Nutzen angelastet werden. Hierzu sind Definitionen nötig, welches für jeden Reststoff der typische Entsorgungsweg ist. Ferner muss die Einheitlichkeit der Gesamtbewertung gewährleistet sein: Wird im verursachenden System ein bestimmter Entsorgungsweg der Reststoffe angerechnet, so müssen die daraus resultierenden Umweltauswirkungen im Energiesystem, das diese Reststoffe benötigt, abgezogen werden (mit anderen Worten: resultierende Umweltlasten führen zu Gutschriften, Umweltentlastungen zu zusätzlichen Aufwendungen).

12.5 Bewertung der Verfügbarkeit von Strom

Die Stromlieferung aus vielen erneuerbaren Energien ist fluktuierend und im Regelfall zumindest nicht an die Lastcharakteristik des nationalen Strombedarfs angepasst.

Erst wenige Anlagen speisen Strom bedarfsgerecht ins Netz. Daher wurde dieser Fall im Bericht der Kommission (KOM 2010) nicht berücksichtigt. Im Rahmen des Ausbaus der erneuerbaren Energien ist dies aber relevant, da ein Ausgleich durch zentrale oder lokale Speicher Kosten verursacht und Umweltwirkungen erzeugt (z. B. Pumpspeicherkraftwerke, Erdgaslager bei eingespeistem Biomethan oder Gasspeicher in Biogasanlagen). Diese Umweltwirkungen sollten je nach Übereinstimmungsgrad von Stromangebot und -nachfrage den unregelmäßigen oder stetigen Stromquellen angerechnet werden.

Analog der empfohlenen Preisallokation von Nebenprodukten könnte die Übereinstimmung von Angebot und Nachfrage z. B. über Preise an der Strombörse abgebildet werden. Problematisch bleibt die Frage, wie mit unterschiedlichen Speicherdauern umzugehen ist und **wie der „Stromspeichermix“ für die verschiedenen Kraftwerke aussehen soll. Ein genaues Verfahren muss daher noch festgelegt werden.**

12.6 Besonderheiten beim Import von Energieträgern

Geht es um den Import von Energieträgern oder energie- bzw. stoffintensiven Prozessen zur Energieumwandlung, so muss deren ausländische Produktion bilanziell berücksichtigt werden.

Dazu sind Festlegungen über die dort aufgewendeten Rohstoffe und konventionellen Energieträger nötig. Hierzu müssen zur Vereinheitlichung relevante Datenbasen bestimmt werden, auf die für die Bilanzierung zurückgegriffen werden kann, bzw. die international relevanten methodischen Besonderheiten bedacht werden.

Wird der vorgeschlagene Ansatz der Preisallokation verwendet, so muss berücksichtigt werden, dass die Preise in unterschiedlichen Teilen der Welt unterschiedlich ausfallen und daher die Umweltwirkungen von Energieprodukten verschiedener Herkunft trotz gleicher Vorkette unterschiedlich bewertet werden müssen – daher wird in absehbarer Zeit der energiebezogenen Allokation immer dann vorrangig Verwendung finden, wenn dies möglich ist.

Bei der zunehmenden Verflechtung mit stofflichen Produkten – Stichwort Bioraffinerie – wird dies jedoch tendenziell immer weniger der Fall sein, und auch stoffliche Vorketten im Bereich der Herstellung - z.B. PV-Systemen aus China – lassen sich nicht über Energieallokation normieren.

Andererseits muss bei Abgrenzung von Abfällen zu Nebenprodukten einbezogen werden, dass in anderen Teilen der Welt ggf. andere Nutzungsarten existieren, die mit in die Abgrenzung zwischen Nebenprodukten und Abfällen einfließen sollten.

Quellenverzeichnis

- AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.) 2011: Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2010; Berlin <http://www.ag-energiebilanzen.de>
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz), BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) – Hrsg. - 2012: Roadmap Bioraffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe; Berlin
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) 2011: Erneuerbare Energien 2010; Berlin
http://www.erneuerbare-energien.de/files/bilder/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf
- DBFZ (Deutsches BiomasseForschungsZentrum), TLL (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft), INL (Institut für Nachhaltige Landbewirtschaftung e.V.), ÖKO (Öko-Institut e.V.) 2011: Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung; Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Band 2; Leipzig
www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/02_Basisinformationen_Reststoffe_web.pdf
- DBFZ (Deutsches BiomasseForschungsZentrum), IUP (Institut für Umweltplanung) 2011: Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung; DBFZ Report Nr. 4; Edel M u.a.; gefördert vom BMU (FKZ 0327635); Leipzig, Hannover
- dena (Deutsche Energie-Agentur) 2011: Die Mitverbrennung holzartiger Biomasse in Kohlekraftwerken – Ein Beitrag zur Energiewende und zum Klimaschutz?; Endbericht; Berlin
http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Pressemitteilungen/2011/Endbericht_Biomassenutzung_in_Kohlekraftwerken_final.pdf
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Physik der Atmosphäre), MAN (MAN Diesel SE), ÖKO (Öko-Institut e.V.) 2010: BIOclean - alternative fuels in shipping. Reduktion der Emissionen klimarelevanter Gase und Partikeln aus Diesel-Großmotoren für die Schifffahrt und für den stationären Einsatz durch den Einsatz regenerativer Treibstoffe; Petzold A u.a.; Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben 01LS05014 und 01LS05015; Weßling
- EU (Europäische Kommission) 2009: Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:DE:PDF>
- Fehrenbach, Horst 2009: **Methodische Fragestellungen zum Arbeitsschwerpunkt „Defaultwerte für das EEG“**, im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens „Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel“, FKZ 3707 93 100, in Kooperation mit Öko-Institut e. V., Heidelberg
- Fritsche, Uwe; Rausch, Lothar 2008: Bestimmung spezifischer Treibhausgasemissionsfaktoren für Fernwärme; Vorhaben FKZ Nr. 360 16 008; Öko-Institut im Auftrag des Umweltbundesamts, Darmstadt
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3476.pdf>

- GZB (Geothermiezentrum Bochum) 2010: Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes Bestandsaufnahme und Trends; Platt M, Exner S, Bracke R; im Auftrag des Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Bochum
http://www.geothermie-zentrum.de/fileadmin/media/geothermiezentrum/Projekte/WP-Studie/Abschlussbericht_WP-Marktstudie_Mar2010.pdf
- IINAS (Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien) 2012: GEMIS Version 4.8; internet-release auf www.gemis.de
- IINAS (International Institute for Sustainability Analysis and Strategy) et al. 2012: Workshop Outcome Paper: Sustainability Criteria and Indicators for Solid Bioenergy from Forests - Results from the Joint Workshops on Extending the RED Sustainability Requirements to Solid Bioenergy; Darmstadt (in Vorbereitung, wird in 2012 publiziert auf <http://www.iinas.org/Work/Projects/REDEX/redex.html>)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007: Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 129-134.
- ISO (International Organization for Standardization) 2006: ISO 14040:2006 / 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework / Requirements and guidelines; Berlin: Beuth Verlag
- KOM (Europäische Kommission) 2010: Bericht der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament über Nachhaltigkeitskriterien für die Nutzung fester und gasförmiger Biomasse bei Stromerzeugung, Heizung und Kühlung KOM/2010/0011 endg., vom 25. Feb. 2010
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0011:FIN:DE:PDF>
- ÖKO (Öko-Institut e.V.) 2003: Energiebilanzen und Treibhausgas-Emissionen für fossile Brennstoffketten und Stromerzeugungsprozesse in Deutschland für die Jahre 2000 und 2020; Bericht für den Rat für Nachhaltige Entwicklung; Darmstadt
www.nachhaltigkeitsrat.de/service/download/pdf/Energiebilanzen_fossil_und_Strom_08-03.pdf
- ÖKO (Öko-Institut e.V.) 2006: Stand und Entwicklung von Treibhausgasemissionen in den Vorketten für Erdöl und Erdgas; Fritsche U, Rausch L, Schmidt K; Endbericht i.A. des IWO e.V., Darmstadt
www.oeko.de/service/gemis/files/present/2006vorketten_iwo.pdf
- ÖKO (Öko-Institut e.V.) 2007: Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten; Kurzbericht i.A. des BGW; Darmstadt
- ÖKO (Öko-Institut e.V.) u.a. 2009: **RENEWABILITY “Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030”** – Teil 1: Methodik und Datenbasis; Darmstadt/ Berlin
www.renewability.de/fileadmin/.../endbericht_renewability_teil1.pdf
- ÖKO (Öko-Institut e.V.) 2012: Aktualisierung der GEMIS-Daten für Stoff- und Transportsysteme; Jenseit W, durchgeführt im Rahmen des BMU-Vorhabens „TOP 100 – Umweltzeichen für klimarelevante Produkte“; Darmstadt <http://oekotop100.de>
- ÖKO (Öko-Institut e.V.), IINAS (Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH) 2012: Energie- und Klimabilanz von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten im Vergleich zu anderen Energiequellen; Endbericht zum Gutachten für Team Ewen im Rahmen des InfoDialog Fracking; Fritsche U, Herling J; Darmstadt http://dialog-erdgasundfrac.de/sites/dialog-erdgasundfrac.de/files/OEKO_IINAS-Fracking-Energie-Klimabilanz.pdf

Petzold A, Lauer P, Fritsche U, Hasselbach J, Lichtenstern M, Schlager H, Fleischer F 2011: Operation of Marine Diesel Engines on Biogenic Fuels: Modification of Emissions and Resulting Climate Effects; in: Environmental Science & Technology vol. 45 (24), pp. 10394-10400

UBA (Umweltbundesamt) 2012a: Bioenergie - Datengrundlagen für die Statistik der erneuerbaren Energien und Emissionsbilanzierung - Materialband zum Workshop vom Juli 2011; Dessau <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4252.pdf>

UBA (Umweltbundesamt) 2012b: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2010 - Aktualisierte Anhänge 2 und 4 der Veröffentlichung „Climate Change 12/2009: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2007“; Dessau <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/3761.html>

ÜNB 2012: Informationen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber zum EEG. <http://www.eeg-kwk.net/de/index.htm>