

AKTUALISIERUNG VON ÖKOBILANZDATEN FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN IM BEREICH TREIBHAUSGASE UND LUFTSCHADSTOFFE

Lothar RAUSCH, Öko-Institut, Berlin

Einleitung

Der Bundesminister für Umwelt, Energie und Reaktorsicherheit (Berlin) hat ein F&E-Vorhaben gefördert, das vom Öko-Institut (federführend) in Kooperation mit wissenschaftlichen Partnern (Deutsches Biomasseforschungszentrum, DLR Institut für Technische Thermodynamik, Geothermiezentrum Bochum, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Fraunhofer IWES, ESU Services, Smart Green Scan) durchgeführt wurde und zur Aufgabe hatte, die Lebenszyklusanalysen für die in Deutschland genutzten Erneuerbaren Energieträger zu aktualisieren und methodisch fortzuschreiben.

Mit diesen Arbeiten wurden verlässliche Daten für die ganzen Bereitstellungsketten der erneuerbaren Energien im Bereich Strom, Wärme und Kraftstoffen ermittelt und in einer Datenbank des Umweltbundesamtes veröffentlicht.

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

Aufbauend auf diesen Arbeiten veröffentlicht das BMU in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik die durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger vermiedenen Treibhausgasemissionen.

Die Arbeiten wurden durch Zuwendungen des BMU unter dem Förderkennzeichen 0325188 ermöglicht.

Übersicht Datengrundlagen

Biomasse

Bei den biomassebasierenden Systemen zur Bereitstellung von Endenergie ist eine Vielzahl von Technologien zu unterscheiden. Um hier eine Übersicht zu erhalten wurden zunächst sowohl für die Bereitstellung der Brennstoffe wie auch für die Nutzungsphase einzelne Technologiematrizen gebildet.

Auf den Bereitstellungspfaden der Brennstoffe werden die Stufen

- Gewinnung (Saat, Anbau, Behandlung, Ernte),
- Logistik (Traktor, LKW), sowie
- Konvertierung und Veredelung (Trocknung, Zerkleinerung, Aufbereitung, Gaserzeugung, Gas-Reinigung, Umesterung, Vergärung)

berücksichtigt.

Bei der anschließenden Verbrennung werden die Varianten

- Einzelofen,
- Kessel,
- Kessel mit nachgeschalteter Stromerzeugung (Dampf, ORC),
- Wirbelschichtfeuerung,
- Müllverbrennung,
- Mitverbrennung,
- stationäre Motoren,
- Gasturbinen und
- mobile Nutzungen

unterschieden.

Für alle Nutzungsstufen liegen Daten zu Emissionen und Hilfsenergieverbräuchen vor. Daraus lassen sich dann die lebenswegbezogenen Emissionen für den bereitgestellten Strom und die bereitgestellte Wärme ermitteln.

Regenerative Energiegewinnung

Die anderen Anlagen zur regenerativen Energiebereitstellung sind dadurch gekennzeichnet, dass dort der Aufwand zur Herstellung dieser Anlagen den wesentlichen Beitrag zur Emissionsbilanz liefert.

Für die Technologien

- Geothermie (Hydrothermale Systeme und Wärmepumpen),
- Solarenergie (Wärme, Strom aus PV und konzentrierenden Systemen),
- Wasserkraft (klein und groß) und
- Windenergie (onshore alt/neu, offshore)

wurden jeweils für jede Größenklasse die Massenbilanzen und die jährlichen Erträge aufgestellt. Die Emissionen ergeben sich aus den Aufwendungen für die Materialbereitstellung und Fertigung der Anlagen sowie durch den Hilfsenergieeinsatz beim laufenden Betrieb.

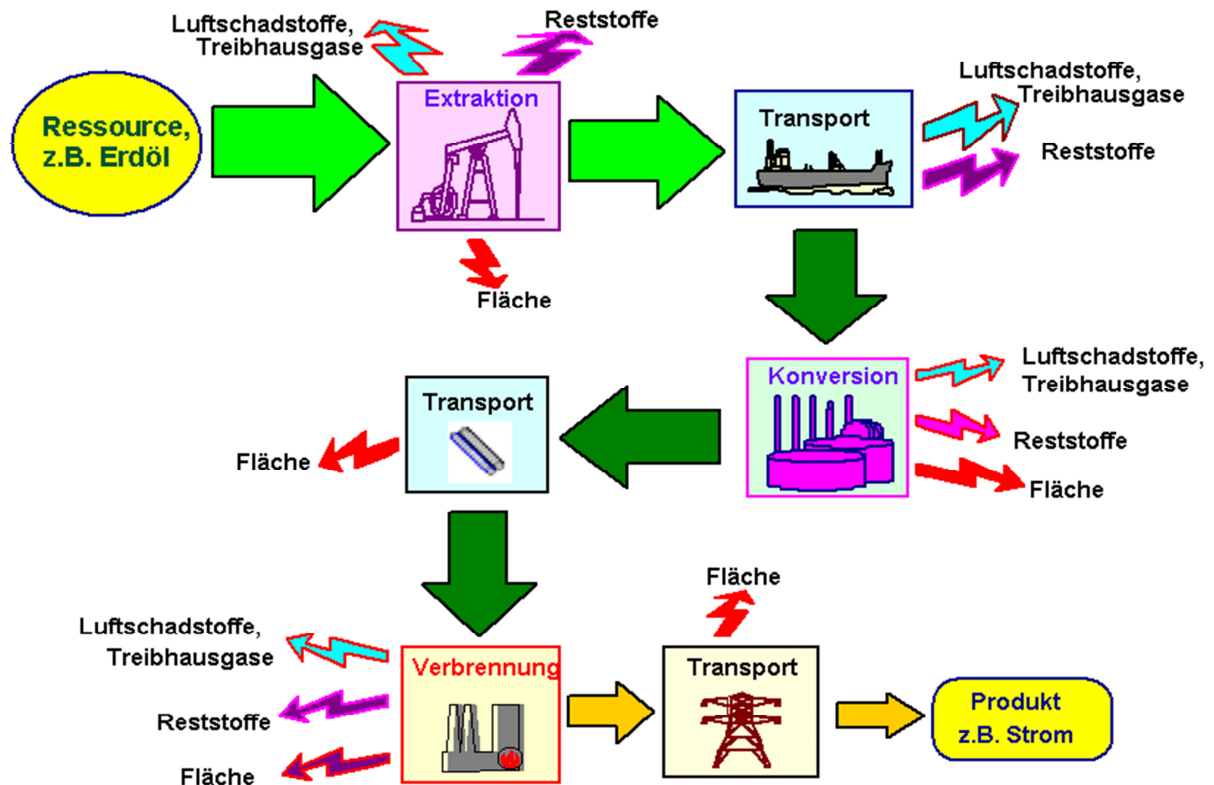
Bilanzierung

Die Bilanzierung der Ergebnisse erfolgte durch das am Öko-Institut entwickelte und öffentlich verfügbare LCA-Tool GEMIS (www.gemis.de).

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 sowie die Entsorgung einbezogen werden.

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).



Neben den Energie- und Stoffflüssen die im obigen Bild dargestellt sind, werden auch alle Hilfsenergien und Hilfsstoffe, sowie die Materialien zum Bau der Systeme berücksichtigt.

Ergebnisse

Bioenergieanbau

Die Ergebnisse für die Bereitstellung von Biomasse ab Bauernhof, Forst bzw. bei Importen ab Grenze Deutschland finden sich in folgender Tabelle.

Tabelle 1: LCA-Daten für die Bereitstellung von Biomasse

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

Die weitere Verarbeitung bis zur nutzbaren Biomasse führt zu zusätzlichen Emissionen.

Tabelle 2: LCA-Daten für biogene 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 = Altfett-Methylester; RME = Rapsöl-Methylester; PME = Palmöl-Methylester; SME = Sojaöl-Methylester; HS = Holzhackschnitzel; KUP = Kurzumtriebsplantage

Die Einbeziehung von Landnutzungsänderungen und durchgeführten Allokationen orientiert sich an den gesetzlichen Bilanzierungsmethoden. Die genaue Vorgehensweise ist im Originalbericht genauer beschrieben.

Bioenergienutzung

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 Systematik der Statistik zu gewährleisten. Dafür wurde eine Technologiematrix entwickelt. Die weitere Darstellung der Ergebnisse orientiert sich an dieser Matrix.

Die Ergebnisse für die Bereitstellung von Strom und Wärme sind den folgenden Tabellen zu entnehmen:

Tabelle 3: LCA Daten 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

Auffällig sind hier die hohen Methanemissionen bei Biosgasnutzung, die sich durch Freisetzung im Gärrestelager und durch einen hohen Methanschluß bei einer motorischen Nutzung verursacht werden. Weiterhin schlagen hohe anrechenbare Emissionen beim Anbau zu Buche.

Tabelle 4: LCA-Daten für die biogene Wärmebereitstellung aus 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

Eine Bilanzierung der **Nutzung** von Bioenergieträgern als Kraftstoffe wurde nicht weiter untersucht. Die LCA zur **Bereitstellung** der Kraftstoffe ergeben sich direkt aus Tabelle 2.

Daten zur Nutzung von Geothermie und Umweltwärme

Derzeit arbeiten nur wenige Anlagen zur Nutzung von Geothermie in Deutschland. Daher wurde für unterschiedliche Standorte und Technologiekonzepte eine Erweiterung der Datenbasis vorhandener Anlagen auf Grundlagen von Berechnungsmodellen und plausiblen Abschätzungen getroffen.

Tabelle 5: 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

Bei der Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen sind die Ergebnisse sehr stark von der unterstellten Jahresarbeitszahl abhängig. Neuere Anlagen weisen hier bessere Werte als Bestandsanlagen auf.

Tabelle 6: 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

Solarenergie

Für die Photovoltaik zeigen sich durch Verbesserungen im Herstellungsprozess und durch Prozesseinsparung deutlich bessere Werte als in der Vergangenheit. Für die zukünftige Herstellung von Strom aus PV ergeben sich für einen mittleren Standort in Deutschland folgende Werte:

Tabelle 7: 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

Die PV-Anlage aus China hat wegen der schlechteren Kraftwerke deutlich höhere anrechenbare Emissionen.

Thermische Solaranlagen haben erwartungsgemäß niedrige anrechenbare Emissionen

Tabelle 8: LCA Daten für Thermische Solaranlagen

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

Wasserkraft

Die Daten für Wasserkraftanlagen wurden anhand der aktualisierten Sachbilanzen nachkalkuliert. Es ergaben sich erwartungsgemäß keine Überraschungen. Ein besonderer Augenmerk wurde auf die Ergänzung der Daten durch die Einbeziehung von direkten Emissionen aus der anaeroben Vergärung von Pflanzenteilen gelegt.

Tabelle 9: LCA-Daten für die betrachteten Wasserkraftanlagen

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
------------------------------------	---	---	-------	-------	--------	-------

Windkraft

Für Windkraftanlagen wurde eine Klassierung gebildet. Die Bestandsanlagen wurden in eine Gruppe einsortiert und dann anhand der jeweils einzeln vorliegenden Massenbilanz berechnet. Neuanlagen werden für moderate und für gute Windstandorte im Binnenland ausgewiesen. Offshore-Anlagen bilden die 4. Klasse.

Tabelle 10: LCA-Daten für die betrachteten Windenergieanlagen

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

Technologievergleich

Bei der Gegenüberstellung der spezifischen Emissionen der einzelnen Technologien zeigt sich, dass die Wasserkraft und die Windturbinen die geringsten Werte aufweisen. Die anrechenbaren Emissionen für PV Systeme haben sich gegenüber älteren Studien verbessert. Die Biomassenutzung ist sehr heterogen. Während die Holz-basierenden Systeme erwartungsgemäß niedrige Treibhausgase emittieren, sind die die Methanemissionen der Biogas-Systeme in vielen Fällen sehr hoch. Hier wurden teilweise Treibhausgasreduktionen von lediglich 50% gegenüber fossilen Systemen ermittelt.

Der Endbericht („Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe“) mit weiteren Erläuterungen zu den Datenhintergründen ist auf der Homepage des Öko-Institutes veröffentlicht.

Die Daten selbst sind im aktuellen GEMIS Datensatz (<http://www.gemis.de>) dokumentiert. Ein einfacher Zugriff auf die LCA-Ergebnisse ist auf einer Datenbank beim Umweltbundesamt <http://probas.umweltbundesamt.de> möglich.

Eine ausführliche Quellenübersicht ist dem Originalbericht zu entnehmen.

Quellen und weiterführende Literatur:

ÖKO 2012: Rausch, L.; Fritsche, U.R.: Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe, Endbericht. Öko-Institut Darmstadt 2012.

UBA (Umweltbundesamt) 2013: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012. Reihe Climate Change | 15/2013 Dessau 2013. Auf der Homepage des UBA verfügbar.