
Martin Kaltschmitt
Guido A. Reinhardt
(Hrsg.)

Nachwachsende Energieträger

Grundlagen, Verfahren,
ökologische Bilanzierung



Inhaltsverzeichnis – Grobgliederung

Vorwort des Generalsekretärs der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.....	V
Vorwort der Herausgeber.....	VII
Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses	IX
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
<i>Martin Kaltschmitt und Guido A. Reinhardt</i>	
1.1 Biomasse im Kontext anderer CO ₂ -Minderungsmaßnahmen	1
1.2 Mögliche Umwelteffekte der Biomassenutzung.....	2
1.3 Ziele und Umfang der Untersuchung	3
2 Biomasse als Energieträger.....	6
<i>Martin Kaltschmitt und Jörn Radtke</i>	
2.1 Zusammensetzung	6
2.2 Bestimmungsfaktoren der Biomasseproduktion	7
2.3 Biomasse zur Energiebereitstellung	12
2.4 Sekundärenergieträger aus Biomasse	16
3 Feste Bioenergieträger	20
<i>Stefan Becher und Martin Kaltschmitt</i>	
3.1 Bereitstellung	20
3.2 Energetische Nutzung	34
4 Flüssige Bioenergieträger.....	45
<i>Theis-Uwe Eden, Martin Kaltschmitt, Guido A. Reinhardt und Thomas Stelzer</i>	
4.1 Bereitstellung	45
4.2 Energetische Nutzung	57
5 Methodik und Systemgrenzen	63
<i>Guido A. Reinhardt und Thomas Stelzer</i>	
5.1 Ökologische Bewertungsinstrumente	63
5.2 Produkt-Ökobilanzen im Kontext dieser Untersuchung	66
5.3 Projektinformation und Rahmenbedingungen	69
6 Bilanzen über die gesamten Lebenswege	84
<i>Guido A. Reinhardt</i>	
6.1 Festlegung der Bilanzierungsparameter	84
6.2 Vorgehen bei der Parameterbilanzierung	88
6.3 Bezugsgrößen für die Ergebnisinterpretation	94

7 Zusätzliche Bilanzen für die Pflanzenproduktion.....	96
<i>Bettina Biskupek, Dirk Aderhold und Karl Scheurlen</i>	
7.1 Emissionen in die Hydrosphäre.....	96
7.2 Biodiversität (Arten- und Biotopschutzaspekte).....	107
7.3 Bodenökologische Funktionen.....	113
8 Festlegung der Lebenswege	117
<i>Alle Projektbeteiligten</i>	
8.1 Pflanzenproduktion.....	117
8.2 Feste Bioenergieträger und Äquivalenzprozesse.....	125
8.3 Flüssige Bioenergieträger und Äquivalenzprozesse.....	136
8.4 Zusammenführung	143
9 Basisdaten.....	146
9.1 Datenbasis und Datenqualität.....	146
<i>Andreas Patyk</i>	
9.2 Bereitstellung von Endenergieträgern.....	148
<i>Andreas Patyk</i>	
9.3 Transport.....	160
<i>Andreas Patyk</i>	
9.4 Daten zur Pflanzenproduktion.....	167
<i>Bettina Biskupek, Andreas Patyk und Jörn Radtke</i>	
9.5 Daten zur Bereitstellung fester Bioenergieträger	226
<i>Stefan Becher</i>	
9.6 Daten zur Bereitstellung flüssiger Bioenergieträger	230
<i>Thomas Stelzer</i>	
9.7 Daten zur energetischen Nutzung.....	248
<i>Stefan Becher und Theis-Uwe Eden</i>	
10 Lebenswegvergleiche: Energie und Emissionen in die Atmosphäre	282
<i>Stefan Becher, Theis-Uwe Eden, Martin Kaltschmitt, Hans-Jürgen Nagel, Andreas Patyk, Jörn Radtke, Guido A. Reinhardt und Thomas Stelzer</i>	
10.1 Exemplarische Ergebnisdarstellung	282
10.2 Ergebnisdiskussion der Lebenswegvergleiche	299
10.3 Einfluß der „Pflanzenproduktion“	334
10.4 Einfluß der „Bereitstellung“	369
10.5 Einfluß der „Energetischen Nutzung“	394
10.6 Zusammenführung und Bewertung	411
10.7 Andere Bezugsgrößen.....	423

11 Emissionen in die Hydrosphäre.....	430
<i>Bettina Biskupek, Helmut Döhler, Ute Schultheiß und Dirk Aderhold</i>	
11.1 Grundwasserbelastung mit Nitrat.....	430
11.2 Belastung von Oberflächengewässern mit Stickstoff und Phosphor	438
11.3 Belastung von Grund- und Oberflächengewässern mit Pflanzenschutzmitteln (PSM)	450
12 Biodiversität und bodenökologische Funktionen.....	456
<i>Karl Scheurlen, Werner Spang und Christian Weisser</i>	
12.1 Biodiversität (Arten- und Biotopschutzaspekte)	456
12.2 Bodenökologische Funktionen	472
13 Zusammenfassung und Ausblick.....	476
<i>Martin Kaltschmitt und Guido A. Reinhardt</i>	
13.1 Methodische Vorgehensweise.....	477
13.2 Betrachtete Lebenswege.....	480
13.3 Ergebnisse der Bilanzen.....	483
13.4 Gültigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse	492
13.5 Ergebnisse im Kontext von Ökobilanzen	493
13.6 Ausblick	495
Literatur	497

Inhaltsverzeichnis – Feingliederung

Vorwort des Generalsekretärs der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.....	V
Vorwort der Herausgeber.....	VII
Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses	IX
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1 Biomasse im Kontext anderer CO ₂ -Minderungsmaßnahmen	1
1.2 Mögliche Umwelteffekte der Biomassenutzung.....	2
1.3 Ziele und Umfang der Untersuchung	3
2 Biomasse als Energieträger.....	6
2.1 Zusammensetzung	6
2.2 Bestimmungsfaktoren der Biomasseproduktion	7
2.3 Biomasse zur Energiebereitstellung	12
2.3.1 Energiepflanzen	12
2.3.2 Rückstände	14
2.4 Sekundärenergieträger aus Biomasse	16
2.4.1 Möglichkeiten der Gewinnung von Sekundärenergieträgern.....	16
2.4.2 Abgrenzung der betrachteten Möglichkeiten.....	18
3 Feste Bioenergieträger	20
3.1 Bereitstellung	20
3.1.1 Systematisierung und grundlegender Aufbau	20
3.1.2 Hölzer	23
3.1.2.1 Waldrestholz.....	23
3.1.2.2 Holz aus Kurzumtriebsplantagen.....	26
3.1.3 Halmgüter	27
3.1.3.1 Stroh	28
3.1.3.2 Gräser aus Anbau.....	30
3.1.3.3 Getreideganzpflanzen	31
3.1.3.4 Chinaschilf und Pfahlrohr.....	32
3.1.3.5 Grasschnitt aus der Pflegenutzung	33
3.2 Energetische Nutzung	34
3.2.1 Eigenschaften biogener Festbrennstoffe	34
3.2.2 Systematik der Feuerungsanlagen.....	36
3.2.3 Zentralheizungen	38
3.2.4 Heizwerke.....	38
3.2.5 Heizkraftwerke	40
3.2.6 Biomassezuführung in Kohlekraftwerken.....	42

4 Flüssige Bioenergieträger	45
4.1 Bereitstellung	45
4.1.1 Rapsöl und RME	46
4.1.1.1 Kleintechnische Gewinnung von Rapsöl	46
4.1.1.2 Großtechnische Gewinnung von Rapsöl und RME	47
4.1.2 Alkohol	52
4.2 Energetische Nutzung	57
4.2.1 Rapsöl	59
4.2.2 Rapsölmethylester (RME)	60
4.2.3 Ethanol	61
5 Methodik und Systemgrenzen	63
5.1 Ökologische Bewertungsinstrumente	63
5.2 Produkt-Ökobilanzen im Kontext dieser Untersuchung	66
5.3 Projektinformation und Rahmenbedingungen	69
5.3.1 Ziel der Untersuchung	70
5.3.2 Bilanzierungsobjekte/-optionen	71
5.3.3 Funktionale Einheit	71
5.3.4 Allgemeine Systemannahmen	72
5.3.4.1 Kuppelprodukte	72
5.3.4.2 Definition und Ableitung der Referenzsysteme	74
5.3.4.3 Infrastruktur	77
5.3.4.4 Geographische Systemgrenzen	78
5.3.4.5 Zeitliche Systemgrenzen	78
5.3.5 Auswahl der Wirkungskategorien und der zur Wirkungsabschätzung und Auswertung verwendeten Methoden	78
6 Bilanzen über die gesamten Lebenswege	84
6.1 Festlegung der Bilanzierungsparameter	84
6.1.1 Ressourcenverbrauch	84
6.1.2 Treibhauseffekt	85
6.1.3 Stratosphärischer Ozonabbau	86
6.1.4 Versauerung	87
6.1.5 Human- und Ökotoxizität	87
6.1.6 Zusammenstellung der Bilanzierungsparameter	87
6.2 Vorgehen bei der Parameterbilanzierung	88
6.2.1 Energie	89
6.2.2 Global wirksame Stoffe	90
6.2.3 Nicht global wirksame Stoffe	91
6.2.4 Zusammenstellung der Parameter für die Wirkungsabschätzung	93
6.3 Bezugsgrößen für die Ergebnisinterpretation	94

7 Zusätzliche Bilanzen für die Pflanzenproduktion.....	96
7.1 Emissionen in die Hydrosphäre.....	96
7.1.1 Potentielle Nitratauswaschung in das Grundwasser.....	96
7.1.2 Austrag von Stickstoff und Phosphor in Oberflächengewässer	100
7.1.2.1 Partikulärer Austrag.....	100
7.1.2.2 Gelöster Austrag	102
7.1.3 PSM-Austrag in Grund- und Oberflächengewässer.....	103
7.1.3.1 Austrag in das Grundwasser	103
7.1.3.2 Austrag in Oberflächengewässer.....	105
7.2 Biodiversität (Arten- und Biotopschutzaspekte).....	107
7.2.1 Definitionen und Bilanzziele	108
7.2.2 Bilanzierungsmerkmale	109
7.2.3 Vorgehensweise.....	109
7.2.3.1 Erfassung vorhandener Untersuchungen	110
7.2.3.2 Auswahl geeigneter Indikatoren	110
7.2.3.3 Ermittlung der Empfindlichkeit	111
7.2.3.4 Naturschutzfachliche Bewertung	112
7.3 Bodenökologische Funktionen.....	113
7.3.1 Definitionen und Bilanzziele	113
7.3.2 Bilanzierungsmerkmale	114
7.3.3 Vorgehensweise.....	115
8 Festlegung der Lebenswege	117
8.1 Pflanzenproduktion	117
8.1.1 Landbauform	117
8.1.2 Fruchtfolgegestaltung	118
8.1.3 Standorte und Ertragshöhe	120
8.1.4 Schlaggröße und Maschinenpark.....	121
8.1.5 Kulturpflanzen und Referenzsysteme	121
8.1.6 Anbauintensität.....	125
8.2 Feste Bioenergieträger und Äquivalenzprozesse.....	125
8.2.1 Allgemeine Festlegungen	125
8.2.2 Getreideganzpflanzen	128
8.2.3 Chinaschilf und Pfahlrohr.....	130
8.2.4 Holz aus Kurzumtriebsplantagen.....	131
8.2.5 Knaulgras	132
8.2.6 Stroh	133
8.2.7 Waldrestholz.....	135
8.2.8 Gräser aus der Pflegenutzung	136
8.3 Flüssige Bioenergieträger und Äquivalenzprozesse.....	136
8.3.1 Rapsöl.....	138
8.3.2 RME	139
8.3.3 Ethanol aus Zuckerrüben	139
8.3.4 Ethanol aus Kartoffeln.....	141
8.3.5 Ethanol aus Winterweizen	142
8.4 Zusammenführung.....	143

9 Basisdaten.....	146
9.1 Datenbasis und Datenqualität.....	146
9.2 Bereitstellung von Endenergieträgern.....	148
9.2.1 Energieträger auf Erdölbasis.....	148
9.2.1.1 Rohölbereitstellung.....	149
9.2.1.2 Raffinerieprozeß.....	150
9.2.1.3 Transport.....	153
9.2.1.4 Emissionen.....	153
9.2.2 Stein- und Braunkohle.....	154
9.2.3 Erdgas.....	155
9.2.4 Uran.....	156
9.2.5 Strom.....	157
9.3 Transport.....	160
9.3.1 Lastkraftwagen.....	161
9.3.1.1 Spezifischer Kraftstoffverbrauch.....	161
9.3.1.2 Emissionen.....	162
9.3.2 Bahn.....	163
9.3.2.1 Spezifischer Endenergieverbrauch.....	163
9.3.2.2 Emissionen.....	163
9.3.3 Schiffe.....	164
9.3.3.1 Treibstoffverbrauch von Binnenschiffen.....	164
9.3.3.2 Treibstoffverbrauch von Seeschiffen.....	164
9.3.3.3 Emissionen.....	165
9.3.4 Pipeline.....	165
9.4 Daten zur Pflanzenproduktion.....	167
9.4.1 Festlegung der untersuchten Standorte.....	167
9.4.1.1 Wasserhaushalt und Bodencharakteristik.....	167
9.4.1.2 Faktoren für die Allgemeine Bodenabtragsgleichung.....	167
9.4.1.3 Oberflächenabfluß.....	170
9.4.1.4 Stickstoff- und Phosphor-Gehalte der Böden.....	170
9.4.2 Fruchtfolgen.....	171
9.4.2.1 Referenzlandbau.....	171
9.4.2.2 Fruchtfolgen des Landbaus mit Viehhaltung.....	172
9.4.2.3 Fruchtfolgen des Extensivlandbaus.....	172
9.4.3 Erträge.....	174
9.4.4 Düngungshöhen: Stickstoff.....	177
9.4.4.1 Stickstoffzufuhr.....	177
9.4.4.2 Stickstoffentzug.....	180
9.4.5 Düngungshöhen: Phosphor, Kalium und Calcium.....	183
9.4.6 Maschinelle Feldarbeit.....	184
9.4.6.1 Methodik und Datengrundlagen.....	184
9.4.6.2 Zeitbezogener Energieaufwand.....	185
9.4.6.3 Emissionsfaktoren.....	187
9.4.6.4 Flächenbezogener Zeitaufwand.....	189
9.4.6.5 Maschinenpark.....	191
9.4.6.6 Kulturspezifische Feldarbeiten.....	192

9.4.7 Düngemittel	196
9.4.7.1 Energieeinsatz der Düngemittelproduktion.....	196
9.4.7.2 Emissionen der Düngemittelproduktion	207
9.4.7.3 Transport von Düngemitteln.....	208
9.4.7.4 Zusammenführung	209
9.4.7.5 Produktions- und ausbringungsunabhängige Emissionen.....	214
9.4.8 Pflanzenschutzmittel.....	217
9.4.8.1 Produktion	217
9.4.8.2 Energieeinsatz und Rohstoffbedarf.....	218
9.4.8.3 Emissionen.....	219
9.4.8.4 Zusammenfassung – Energie und Emissionen.....	220
9.4.8.5 Pflanzenschutzmittelmengen	220
9.4.9 Saatgut.....	223
9.5 Daten zur Bereitstellung fester Bioenergieträger	226
9.5.1 Maschinenpark	226
9.5.2 Technische Trocknung	226
9.6 Daten zur Bereitstellung flüssiger Bioenergieträger.....	230
9.6.1 Rapsöl.....	230
9.6.2 RME	232
9.6.3 Ethanol aus Zuckerrübe	238
9.6.4 Ethanol aus Kartoffeln.....	243
9.6.5 Ethanol aus Weizen	246
9.7 Daten zur energetischen Nutzung.....	248
9.7.1 Stationäre Feuerungsanlagen	248
9.7.1.1 Energetische Kenngrößen	249
9.7.1.2 Emissionsentstehung bei der Biomasseverbrennung	254
9.7.1.3 Emissionsmodell für Biomassefeuerungen	256
9.7.1.4 Emissionsfaktoren.....	258
9.7.2 Verbrennungskraftmaschinen	268
9.7.2.1 Ethanol-Mischkraftstoff versus Ottokraftstoff	273
9.7.2.2 Rapsöl versus Dieselmotor	277
9.7.2.3 Rapsölmethylester versus Dieselmotor	278
9.7.2.4 Resümee.....	279
10 Lebenswegvergleiche: Energie und Emissionen in die Atmosphäre.....	282
10.1 Exemplarische Ergebnisdarstellung	282
10.1.1 Winterweizen-Ganzpflanze	282
10.1.1.1 Pflanzenproduktion.....	282
10.1.1.2 Bereitstellung.....	285
10.1.1.3 Nutzung	288
10.1.1.4 Fossiler Äquivalenzprozeß und Vorkette.....	289
10.1.1.5 Lebenswegvergleich	291
10.1.2 RME als Substitut für Dieselmotor	291
10.1.2.1 Pflanzenproduktion.....	292
10.1.2.2 Bereitstellung.....	293
10.1.2.3 Nutzung	296
10.1.2.4 Fossiler Äquivalenzprozeß und Vorkette.....	297
10.1.2.5 Lebenswegvergleich	297

10.2 Ergebnisdiskussion der Lebenswegvergleiche	299
10.2.1 Erschöpfliche Primärenergieträger	301
10.2.2 CO ₂ -Äquivalente	304
10.2.3 Distickstoffoxid	307
10.2.4 SO ₂ -Äquivalente	309
10.2.5 Schwefeldioxid	311
10.2.6 Stickstoffoxide	313
10.2.7 Emissionsortsklassen	315
10.2.8 Chlorwasserstoff	316
10.2.9 Ammoniak	318
10.2.10 Kohlenstoffmonoxid	320
10.2.11 Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe	320
10.2.12 Dieselpartikel	322
10.2.13 Staub	325
10.2.14 Formaldehyd	327
10.2.15 Benzol	327
10.2.16 Benzo(a)pyren	329
10.2.17 TCDD-Äquivalente	332
10.3 Einfluß der „Pflanzenproduktion“	334
10.3.1 Landbauform	334
10.3.2 Schlaggröße	338
10.3.3 Ertragshöhe	342
10.3.4 Feldarbeit	345
10.3.5 N ₂ O-Emissionen aus dem Boden	351
10.3.6 Phosphor-, Kalium- und Calcium-Düngung	354
10.3.7 Bewirtschaftung des Referenzsystems	357
10.4 Einfluß der „Bereitstellung“	360
10.4.1 Wassergehalt bei Festbrennstoffen	360
10.4.2 Transportfahrzeuge und -entfernungen bei Festbrennstoffen	364
10.4.3 Materialverluste bei Festbrennstoffen	367
10.4.4 Rapsöl und RME	370
10.4.5 Ethanol aus Zuckerrüben	376
10.4.6 Ethanol aus Kartoffeln	383
10.4.7 Ethanol aus Winterweizen	389
10.5 Einfluß der „Energetischen Nutzung“	394
10.5.1 Emissionsfaktoren bei der motorischen Nutzung von Kraftstoffen	394
10.5.2 Anlagenkonzepte und substituierte fossile Energieträger	395
10.5.3 Netzstrombezug	399
10.5.4 Gutschrift durch Ascherückführung	400
10.5.5 Wirkungsgrade der Feuerungsanlagen	403
10.5.6 Emissionen aus Feuerungsanlagen	407
10.6 Zusammenführung und Bewertung	411
10.6.1 Zusammenführung	411
10.6.2 Biogene versus fossile Energieträger	419
10.6.3 Vergleich der Bioenergieträger untereinander	421
10.7 Andere Bezugsgrößen	423

11 Emissionen in die Hydrosphäre	430
11.1 Grundwasserbelastung mit Nitrat	430
11.1.1 Ergebnisse	430
11.1.1.1 Stickstoff-Bilanzen	430
11.1.1.2 Unterschiede zum Referenzsystem	432
11.1.2 Diskussion	433
11.1.2.1 Einfluß der Landbauform.....	433
11.1.2.2 Einfluß unterschiedlicher Referenzsysteme	436
11.1.2.3 Einfluß unterschiedlicher Standorte.....	437
11.1.2.4 Schlußfolgerungen.....	437
11.2 Belastung von Oberflächengewässern mit Stickstoff und Phosphor	438
11.2.1 Ergebnisse	438
11.2.1.1 Stickstoff.....	438
11.2.1.2 Phosphor.....	441
11.2.1.3 Exkurs: Extensivlandbau	442
11.2.2 Diskussion	443
11.2.3 Schlußfolgerungen.....	448
11.3 Belastung von Grund- und Oberflächengewässern mit Pflanzenschutzmitteln (PSM)	450
11.3.1 PSM-Austräge in das Grundwasser	450
11.3.1.1 Ergebnisse und Diskussion	450
11.3.1.2 Schlußfolgerungen	451
11.3.2 PSM-Austrag in Oberflächengewässer	452
11.3.2.1 Potentielle Austragsgefährdung verschiedener Kulturen	452
11.3.2.2 Eigenschaften und Vorkommen der PSM.....	454
11.3.2.3 Schlußfolgerungen.....	455
12 Biodiversität und bodenökologische Funktionen	456
12.1 Biodiversität (Arten- und Biotopschutzaspekte)	456
12.1.1 Ausgangssituation und Empfindlichkeit der Indikatorgruppen.....	456
12.1.1.1 Ackerbegleitflora	456
12.1.1.2 Blütenbesuchende Hautflügler.....	459
12.1.1.3 Phytophage Wanzen	459
12.1.1.4 Doppelfüßer (Diplopoda).....	459
12.1.1.5 Regenwürmer.....	459
12.1.1.6 Laufkäfer.....	460
12.1.1.7 Spinnen.....	460
12.1.1.8 Schwebfliegen.....	461
12.1.1.9 Ausgangssituation und Empfindlichkeit: Zusammenfassung.....	462
12.1.2 Gegenüberstellung der Energieträgerkulturen und Referenzsysteme	462
12.1.2.1 Winterweizen, Ganzpflanze	462
12.1.2.2 Winterweizen, Ethanol.....	463
12.1.2.3 Wintergerste.....	463
12.1.2.4 Winterraps	464
12.1.2.5 Triticale.....	465
12.1.2.6 Zuckerrübe.....	465
12.1.2.7 Winterroggen	466
12.1.2.8 Kartoffel.....	467
12.1.2.9 Energieträger im Extensivlandbau	468

12.1.2.10 Chinaschilf.....	468
12.1.2.11 Pappel und Weide im Kurzumtrieb	469
12.1.3 Bewertung	469
12.1.3.1 Annuelle Energieträger.....	469
12.1.3.2 Perennierende Energieträger.....	470
12.1.4 Zusammenfassung und Diskussion.....	471
12.2 Bodenökologische Funktionen.....	472
12.2.1 Potentielle Wirkungen der Wirkfaktoren auf die bodenökologischen Funktionen	473
12.2.2 Gegenüberstellung der Kulturen und Referenzsysteme	474
12.2.3 Zusammenfassung und Diskussion.....	475
13 Zusammenfassung und Ausblick	476
13.1 Methodische Vorgehensweise.....	477
13.2 Betrachtete Lebenswege.....	480
13.2.1 Standard-Lebenswegvergleiche.....	480
13.2.2 Sensitivitätsanalysen.....	482
13.3 Ergebnisse der Bilanzen.....	483
13.3.1 Energie- und Emissionsbilanzen.....	483
13.3.2 Bilanzen in der Pflanzenproduktion	489
13.3.3 Zusammenführung nach Bioenergieträgern.....	490
13.4 Gültigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse	492
13.5 Ergebnisse im Kontext von Ökobilanzen	493
13.6 Ausblick	495
Literatur.....	497
