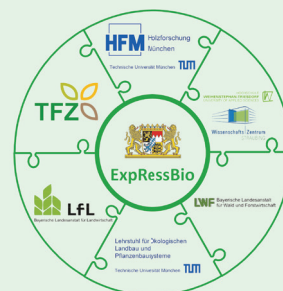


45

Berichte aus dem TFZ

ExpResBio – Methoden

Methoden zur Analyse und
Bewertung ausgewählter
ökologischer und ökonomischer
Wirkungen von Produktsystemen
aus land- und forstwirtschaftlichen
Rohstoffen



ExpResBio – Methoden



ExpResBio – Methoden

**Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter
ökologischer und ökonomischer Wirkungen von
Produktsystemen aus land- und forstwirt-
schaftlichen Rohstoffen**

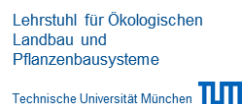
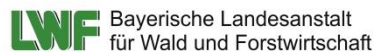
Christian Wolf

Dr.-Ing. Daniela Dressler

Karsten Engelmann

Dr. Daniel Klein

Tobias Böswirth, Taras Bryzinski, Dr.-Ing. Mathias Effenberger,
Dr. Omar Hijazi, Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen,
Dr. Mona Maze, Dr. Edgar Remmele, Prof. Dr. Hubert Röder,
Christoph Schulz, Martina Serdjuk, André Tiemann,
Prof. Dr. Gabriele Weber Blaschke, Prof. Dr. Peter Zerle



Berichte aus dem TFZ 45

Straubing, Februar 2016

Titel: ExpResBio – Methoden

Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen

Projektleiter: Dr. Edgar Remmele

Autoren:

Christian Wolf⁶, Dr.-Ing. Daniela Dressler⁷, Karsten Engelmann⁷, Dr. Daniel Klein², Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke⁶, Tobias Böswirth⁵, Taras Bryzinski⁵, Dr.-Ing. Mathias Effenberger¹, Dr. Omar Hijazi¹, Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen⁵, Dr. Mona Maze¹, Dr. Edgar Remmele⁷, Prof. Dr. Hubert Röder³, Christoph Schulz², Martina Serdjuk⁴, Dr. Klaus Thuneke⁷, André Tiemann³, Prof. Dr. Peter Zerle⁴

¹ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft • Institut für Landtechnik und Tierhaltung • Vöttinger Straße 36 • 85354 Freising

² Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft • Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1 • 85354 Freising

³ Hochschule Weihenstephan-Triesdorf • Betriebswirtschaftslehre Nachwachsender Rohstoffe • Petersgasse 18 • 94315 Straubing

⁴ Hochschule Weihenstephan-Triesdorf • Fachgebiet für Ökonomie Nachwachsender Rohstoffe • Hofgarten 1 • 85354 Freising

⁵ Technische Universität München • Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme • Liesel-Beckmann-Straße 2 • 85354 Freising

⁶ Technische Universität München • Holzforschung München • Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2 • 85354 Freising

⁷ Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) • Schulgasse 18 • 94315 Straubing

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen EW/12/11 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2016

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden. Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil <1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr.-Ing. Daniela Dressler, Karsten Engelmann, Rita Haas,
Ulrich Eidenschink

Verlag: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2016

Gestaltung: Dr.-Ing. Daniela Dressler, Karsten Engelmann, Rita Haas

Fotonachweis: Umschlag: Bilder TFZ; rechts oben R. Rosin (TUM)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 9

Tabellenverzeichnis..... 11

Formelzeichen und Abkürzungen 15

1 Einleitung 17

2 Ziel und Untersuchungsrahmen 21

2.1 Zieldefinition21

2.2 Untersuchungsrahmen.....21

2.2.1 Systemdarstellung22

2.2.2 Systemgrenzen25

2.2.3 Funktionelle Einheit/Bezugsgröße27

2.2.4 Umgang mit Koppelprodukten.....28

2.2.5 Datenqualität und Datenherkunft32

2.3 Festlegung wichtiger Kenngrößen33

3 Produktspezifische Sachbilanzierung 35

3.1 Prozessgruppe [V] Vorleistungen.....35

3.1.1 Systemgrenzen35

3.1.2 Funktionelle Einheit.....35

3.1.3 Allokation35

3.1.4 Beschreibung der einzelnen Prozesse35

3.1.4.1 [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten35

3.1.4.2 [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur.....36

3.1.4.3 Bereitstellung sonstiger Vorleistungen37

3.2 Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse37

3.2.1 Systemgrenzen38

3.2.2 Funktionelle Einheit.....38

3.2.3 Allokation39

3.2.4 Beschreibung der einzelnen Prozesse39

3.2.4.1 [A1] Bestandesbegründung.....40

3.2.4.2 [A2] Bestandesführung41

3.2.4.3 [A3] Ernte.....46

3.2.4.4 [A4] Nicht-zuordenbar49

3.2.4.5 [A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen.....49

3.3 Prozessgruppe [B] Transformation51

3.3.1 Systemgrenzen52

3.3.2 Funktionelle Einheit.....52

3.3.3 Allokation52

3.3.4 Beschreibung der einzelnen Prozesse53

3.3.4.1 [B1] Lagerung53

3.3.4.2 [B2] Vorbehandlung56

3.3.4.3 [B3] Umwandlung.....58

3.4	Prozessgruppe [C] Konversion	61
3.4.1	Systemgrenzen	61
3.4.2	Funktionelle Einheit	62
3.4.3	Allokation.....	63
3.4.4	Beschreibung der einzelnen Prozesse	64
3.4.4.1	[C1] Stromerzeugung	65
3.4.4.2	[C2] Wärmeerzeugung	65
3.4.4.3	[C3] Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung.....	66
3.4.4.4	[C4] Bereitstellung von Antriebsenergie zum Beispiel für Mobilität	66
3.4.4.5	[C5] Abgasreinigung.....	66
3.5	Prozessgruppe [D] Nutzung	68
3.6	Prozessgruppe [E] Abfallbewirtschaftung	69
3.7	Prozessgruppe [T] Transporte	71
3.8	Prozessgruppe [L] Betriebliche Logistik	73
3.9	Prozessgruppe [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze	73
3.10	Prozessgruppe [G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems.....	76
4	Umweltwirkungskategorien und ökonomische Kennzahlen	77
4.1	Umweltwirkungskategorien.....	77
4.1.1	Globale Erwärmung.....	79
4.1.2	Partikelemissionen	80
4.1.3	Eutrophierung.....	81
4.1.4	Versauerung.....	82
4.1.5	Primärenergiebedarf.....	83
4.2	Ökonomische Kennzahlen.....	83
4.2.1	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	84
4.2.2	Volkswirtschaftliche Betrachtung	86
5	Referenzsysteme.....	91
5.1	Referenzsystem der Kraftstoffnutzung	91
5.1.1	Emissionsfaktoren	91
5.1.2	Gestehungskosten für fossile Kraftstoffe	95
5.2	Referenzsystem der Strombereitstellung.....	95
5.2.1	Emissionsfaktoren	95
5.2.2	Stromgestehungskosten.....	96
5.3	Referenzsystem der Wärmebereitstellung	97
5.3.1	Emissionsfaktoren	97
5.3.2	Wärmegestehungskosten.....	98
6	Ergebnisdarstellung	101
7	Anwendungsbeispiele	103
7.1	Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung	103
7.1.1	Untersuchungsrahmen und Systemdarstellung	103

7.1.2	Festlegung der Bilanzkenngößen	106
7.1.3	Ergebnisse.....	113
7.2	Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas.....	119
7.2.1	Untersuchungsrahmen und Systemdarstellung.....	120
7.2.2	Festlegung der Bilanzkenngößen	122
7.2.3	Ergebnisse.....	127
7.3	Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz.....	132
7.3.1	Untersuchungsrahmen und Systemdarstellung.....	133
7.3.2	Festlegung der Bilanzkenngößen	134
7.3.3	Ergebnisse.....	141
 Zusammenfassung.....		 149
 Abstract.....		 151
 Glossar.....		 153
 Quellenverzeichnis.....		 157

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen.....	24
Abbildung 2:	Herstellung der Nutzengleichheit bei der Systemraumerweiterung durch Subtraktion eines Referenzsystems, verändert nach [51][23].....	30
Abbildung 3:	Kombination von THG-Vermeidungskosten und THG-Vermeidungsleistungen.....	88
Abbildung 4:	Grafische Ergebnisdarstellung für ein Produktsystem aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Wirkungsindikator CO ₂ -Äquivalente in g MJ ⁻¹	101
Abbildung 5:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung.....	105
Abbildung 6:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas	121
Abbildung 7:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz.....	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Physikalische und chemische Kenngrößen ausgewählter Energieträger	34
Tabelle 2:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [A1] Bestandesbegründung	41
Tabelle 3:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [A2] Bestandesführung	44
Tabelle 4:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [A3] Ernte	48
Tabelle 5:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [B1] Lagerung	54
Tabelle 6:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [B2] Vorbehandlung	57
Tabelle 7:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [B3] Umwandlung	60
Tabelle 8:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [C] Konversion	67
Tabelle 9:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [T] Transporte und [L] Betriebliche Logistik	72
Tabelle 10:	Emissionsfaktoren für die Anrechnung direkter Landnutzungsänderungen in Ökobilanzen (nach [34])	74
Tabelle 11:	Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze	75
Tabelle 12:	Ausgewählte Wirkungskategorien mit Methoden zur Berechnung der jeweiligen Umweltwirkungsindikatoren nach ILCD [32]	78
Tabelle 13:	Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der globalen Erwärmung bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren [44]	79
Tabelle 14:	Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Partikelemissionen (PM _{2,5}) [43][85]	81
Tabelle 15:	Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Eutrophierung [79][85]	82
Tabelle 16:	Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Versauerung (Kumulierte Überschreitung) [85]	83
Tabelle 17:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für benzin- und dieselpetriebene Personenkraftwagen in Bezug auf den Energie-gehalt des Kraftstoffs, auf Basis von [85][47]	92
Tabelle 18:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für benzin- und dieselpetriebene Personenkraftwagen in Bezug auf den Fahrzeug-kilometer, auf Basis von [85][47]	93
Tabelle 19:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für dieselpetriebene Lastkraftwagen in Bezug auf den Energiegehalt des Kraftstoffs, auf Basis von [85][47]	93
Tabelle 20:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für dieselpetriebene Lastkraftwagen in Bezug auf den Tonnenkilometer, auf Basis von [85][47]	94

Tabelle 21:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für Land- und Forstmaschinen in Bezug auf den Energiegehalt des Kraftstoffs, auf Basis von [85][47]	94
Tabelle 22:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für Land- und Forstmaschinen in Bezug auf die spezifische Arbeitsstunde, auf Basis von [85][47]	95
Tabelle 23:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Strommix Deutschland sowie der Einzeltechnologien zur Strombereitstellung [85]	96
Tabelle 24:	Stromgestehungskosten aus Braun-, Steinkohle und Erdgas	97
Tabelle 25:	Emissionsfaktoren des Referenzsystems Wärmemix Bayern [94] sowie der Einzeltechnologien zur Wärmebereitstellung auf Basis von [85].....	98
Tabelle 26:	Wärmegestehungskosten aus Heizöl und Erdgas	99
Tabelle 27:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A1] Bestandesbegründung.....	106
Tabelle 28:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A2] Bestandesführung	108
Tabelle 29:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A3] Ernte... ..	109
Tabelle 30:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A4] nicht-zuordenbar	109
Tabelle 31:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [B] Transformation	110
Tabelle 32:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [T] Transporte	113
Tabelle 33:	Aggregierte Ergebnisdarstellung für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO ₂ -Äquivalente	114
Tabelle 34:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO ₂ -Äquivalente	114
Tabelle 35:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung der Rohstoffbereitstellungskosten von Rapssaat für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung	117
Tabelle 36:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung der Gestehungskosten für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung	118
Tabelle 37:	Arbeitszeitbedarf für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung....	119
Tabelle 38:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A1] Bestandesbegründung.....	122
Tabelle 39:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A2] Bestandesführung	123

Tabelle 40:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A3] Ernte ...	124
Tabelle 41:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A4] nicht-zuordenbare Prozesse innerhalb Prozessgruppe [A]	124
Tabelle 42:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen	124
Tabelle 43:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [B] Transformation	125
Tabelle 44:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [C] Konversion	126
Tabelle 45:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [T] Transporte.....	126
Tabelle 46:	Aggregierte Ergebnisdarstellung für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO ₂ -Äquivalente	127
Tabelle 47:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung für Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO ₂ -Äquivalente	128
Tabelle 48:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung der Rohstoffbereitstellungskosten von Silomais für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas	131
Tabelle 49:	Aggregierte Ergebnisdarstellung der Gestehungskosten für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas	131
Tabelle 50:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A1] Bestandesbegründung	136
Tabelle 51:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A2] Bestandesführung	136
Tabelle 52:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [A3] Ernte ...	138
Tabelle 53:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [B] Transformation	138
Tabelle 54:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [C] Konversion	139
Tabelle 55:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [E] Abfallbewirtschaftung	139
Tabelle 56:	Dokumentation von Bilanzkenngößen in Prozessgruppe [T] Transporte.....	140
Tabelle 57:	Aggregierte Ergebnisdarstellung für Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit Indikator CO ₂ -Äquivalente	141
Tabelle 58:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung für Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit Indikator CO ₂ -Äquivalente	141

Tabelle 59:	Aggregierte Ergebnisdarstellung der Gestehungskosten für die Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz	144
Tabelle 60:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung für die Kosten der Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz	145

Formelzeichen und Abkürzungen

a	Jahr
AE	Arbeitseinheit
AF	Allokationsfaktor
Afa	Absetzung für Abnutzungen „Abschreibung“
atro	absolut trocken
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Kohlenstoff
°C	Grad Celsius
CCM	Corn-Cob-Mix
CH ₄	Methan
CO ₂ -Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
d	Tag
dt	Dezitonne
Efm mR	Erntefestmeter mit Rinde
Efm oR	Erntefestmeter ohne Rinde
FE	Funktionelle Einheit
FM	Frischmasse
Fzg-km	Fahrzeugkilometer
g	Gramm
GPS	Ganzpflanzensilage
h	Stunde
hl	Hektoliter
ha	Hektar
H _i	Heizwert
H _s	Brennwert
ILCD	International Reference Life Cycle Data System

kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	Liter
LCA	Life cycle assessment
m	Meter
Masse-%	Massenprozent
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
ME	Maßeinheit
MJ	Megajoule
MZ	Maschinenzeit für die jeweilige Maßnahme
N	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
t	Tonne
THG	Treibhausgas(e)
tkm	Tonnenkilometer
TM	Trockenmasse
UW	Umweltwirkung
Volumen-%	Volumenprozent
w	Wassergehalt
wf	wasserfrei
waf	wasser- und aschefrei
μ	Wirkungsgrad

1 Einleitung

Die Entwicklung einer von fossilen Ressourcen abhängigen Industrie hin zu einer biobasierten Wirtschaft ist Bestandteil der Strategie Europa 2020 der Europäischen Kommission [25]. Auch die deutsche Bundesregierung hat mit der im Juli 2013 beschlossenen Politikstrategie Bioökonomie [6], welche auf die Nachhaltigkeitsstrategie aus dem Jahr 2002 aufbaut, ihre zukünftige Zielrichtung vorgegeben. Der Wandel zu einer auf erneuerbaren Ressourcen beruhenden rohstoffeffizienten Wirtschaft wird dadurch weiter konkretisiert. Land- und forstwirtschaftliche Rohstoffe sowie deren stoffliche und energetische Nutzung in effizienten Produktions- und Verarbeitungsverfahren sind eine wichtige Basis für diesen Wandel. Um bestehende und zukünftige Potentiale zu realisieren, sich auf dem Markt zu etablieren und auf breite gesellschaftliche Akzeptanz zu stoßen, bedarf es jedoch einer Charakterisierung und Einordnung bestehender Verfahren bzw. in Entwicklung befindlicher Konzepte hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte. Für eine aussagekräftige Analyse und Bewertung von Produktions- und Verarbeitungsverfahren sind vollständige Prozessketten („Lebenszyklen“) von der jeweiligen Rohstoffbereitstellung, Erst- und Weiterverarbeitung bis hin zur Bereitstellung von Produkten in entsprechenden Anlagen zu betrachten und hierbei auch anfallende Koppelprodukte sowie die Abfallbewirtschaftung einzubeziehen.

Die Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen können mithilfe der Ökobilanzmethode umfassend analysiert und bewertet werden. Grundsätze und Regeln zur Durchführung von Ökobilanzen wurden in internationalen Standards festgelegt und in die deutschen Normenwerke DIN EN ISO 14040 [13] und DIN EN ISO 14044 [12] übertragen. In der darauf basierenden Norm DIN CEN ISO/TS 14067 [16] sind Anforderungen, Grundsätze und Leitlinien zur Quantifizierung und Kommunikation des Carbon Footprints von Produkten (PCF) festgelegt. Mit dem von der Europäischen Kommission geförderten International Reference Life Cycle Data System (ILCD) wurde eine Reihe technischer Dokumente (ILCD-Handbuch) [32] herausgegeben. Hierdurch werden die Bestimmungen der DIN EN ISO 14040 und 14044 zur Erstellung einer Ökobilanz genauer spezifiziert und somit eine Grundlage für die Generierung konsistenter, aussagekräftiger und qualitätsgesicherter Ökobilanzergebnisse geschaffen, wie sie von Industrie und Politik gefordert werden. Weiterhin bildet das ILCD-Handbuch die Grundlage für alle Arbeiten zum Thema Umweltbewertung von Produktsystemen auf europäischer Ebene und ist Vorreiter der Initiative Product Environmental Footprinting (PEF) der Europäischen Kommission [64]. Die bisher genannten Normen, Standards und Initiativen sind grundsätzlich für alle Arten von Produkten und Dienstleistungen anwendbar. Spezifische methodische Fragestellungen zu Ökobilanzen bzw. Treibhausgasbilanzen (THG-Bilanzen), zum Beispiel (z. B.) für Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen, bleiben jedoch offen.

Mit Inkrafttreten der Erneuerbare-Energien-Richtlinie [28] wurde für Biokraftstoffe und Strom aus flüssigen Biobrennstoffen erstmals eine Methode zur THG-Bilanzierung ordnungspolitisch vorgeschrieben, die auch Eingang in das deutsche Normenwerk DIN EN 16214-4 [15] fand – ein Trend, der sich auch in anderen Sektoren der Bioenergiebereit-

stellung und bei der stofflichen Nutzung Nachwachsender Rohstoffe, aber auch bei der Erzeugung von Nahrungsmitteln und Futtermitteln fortsetzen kann. Aus diesem Grund wird die Entwicklung geeigneter Methoden zur ökologisch-ökonomischen Analyse, Bewertung und Optimierung von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen zukünftig von großer Bedeutung sein. Die DIN ISO 13065 [20] legt beispielsweise Nachhaltigkeitsgrundsätze sowie Kriterien und Indikatoren für die Lieferkette von Bioenergie fest. Weiterhin wurde im Rahmen des BMU-Förderprogrammes „Energetische Biomassenutzung“ eine durchgängige Dokumentations- und Methodenbasis für wesentliche Kalkulations- und Bewertungsverfahren ausgewählter energetisch-ökonomisch-ökologischer Analysen erstellt [86]. Im Bereich der stofflichen Nutzung hat die Europäische Kommission dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) im Oktober 2008 ein Mandat zur Entwicklung eines Normungsprogramms für biobasierte Produkte erteilt. Auf nationaler Ebene ist der Normungsausschuss „Biobasierte Produkte“ im Deutschen Institut für Normung (DIN) zuständig. Aktuell wurden zwei Norm-Entwürfe veröffentlicht [18][19]. Zusätzlich entstanden in den letzten Jahren durch Anstoß von Firmen und Verbänden sowie Experten aus dem Bereich der Ökobilanzierung produktspezifische Richtlinien z. B. für Holz und Holzwerkstoffe [17] oder Bauprodukte [14] als Hilfestellung für die arbeitseffiziente Bereitstellung vergleichbarer Ergebnisse. Weiterhin hat der Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) eine Reihe von Nachhaltigkeitsstandards veröffentlicht [76]. Auch im Bereich der Nahrungsmittelerzeugung sind ähnliche Entwicklungen zu beobachten [66].

Problemstellung

Obwohl bereits zahlreiche methodische Festlegungen zur Bewertung von Produkten aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen getroffen wurden, zeigen z. B. Literaturrecherchen zu Ökobilanzen für die Biogaserzeugung [40], Forstwirtschaft [50] und energetische Holznutzung [95], dass sich Studien methodisch stark voneinander unterscheiden können. Das betrifft sowohl die gewählten Systemgrenzen, Bezugsgrößen und funktionellen Einheiten, die berücksichtigten Prozesse, die zugrunde gelegte Datenbasis, die Auswahl der Wirkungskategorien und Methoden zur Berechnung der Wirkungsindikatoren, den Umgang mit Koppelprodukten als auch die Ergebnisaufbereitung bzw. -darstellung (aggregiert, teilweise aggregiert oder nach Prozessen stratifiziert). Aufgrund der methodischen Unterschiede weisen die Ergebnisse in den ausgewerteten Studien, beispielsweise für THG-Emissionen, einen breiten Wertebereich auf. Eine abgestimmte Methodik ist folglich eine wichtige Voraussetzung für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen. Weiterhin müssen für die Ableitung praktisch umsetzbarer Minderungsstrategien, beispielsweise zur THG-Minderung, konkrete Produktionsbedingungen berücksichtigt werden. Bisher werden Ökobilanzen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen jedoch überwiegend für mittlere Produktionsbedingungen berechnet. Standort- und Bewirtschaftungseinflüsse (Böden, Klima, Ertragspotentiale, standortspezifische Produktionsverfahren, Fruchtfolgen, Baumartenzusammensetzung, Umtriebszeiten und Betriebssysteme) werden noch zu wenig in Ökobilanzen einbezogen, obwohl sie erheblichen Einfluss haben.

Zielstellung

Vor diesem Hintergrund fördert das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) die Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern – ExpRessBio, in der verschiedene Kompetenzen aus den Bereichen der land- und forstwirtschaftlichen Produktion, der Treibhausgas- und Ökobilanzierung, der Technologie Nachwachsender Rohstoffe sowie der Ökonomie Nachwachsender Rohstoffe miteinander vernetzt sind. Ein wesentliches Ziel dieses Netzwerks ist die Entwicklung einer harmonisierten Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Biomasseerzeugung für Nahrungs- und Futtermittel, für die Energiebereitstellung und stoffliche Nutzung. Zur Prüfung und Weiterentwicklung dieser Bilanzierungsmethode werden verfahrens- und regionalspezifische Produktsysteme auf der Grundlage von Feldversuchen, Praxis- und Modellbetrieben analysiert. Darüber hinaus soll eine transparente Darstellung der Ergebnisse in nicht-aggregierter Form den Vergleich unterschiedlicher Produktions- und Konversionsverfahren ermöglichen. Hierdurch können regionalspezifische und einzelbetriebliche Handlungsempfehlungen für Optimierungsmaßnahmen einzelner Verfahrensketten abgeleitet werden.

Im vorliegenden Methodenhandbuch werden methodische Festlegungen und Empfehlungen zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen dargelegt. Der Anwender erhält produktspezifische Leitlinien auf der Grundlage einer harmonisierten Bilanzierungsmethode. Der Schwerpunkt der Methodenbeschreibung liegt dabei zunächst auf der Biomasseerzeugung sowie ihrer energetischen Nutzung. Gleichwohl wurden bei der Erarbeitung der harmonisierten Bilanzierungsmethode die besonderen Aspekte der stofflichen Nutzung berücksichtigt. Eine umfassende Validierung hierfür steht jedoch noch aus. Tierische Nahrungsmittel können mit der hier vorgestellten harmonisierten Methode nicht bilanziert werden. Hierzu bedarf es einer zusätzlichen Berücksichtigung von Verwertungsprozessen in der Tierhaltung. Die hier beschriebene Bilanzierungsmethode stellt den aktuellen Stand der methodischen Harmonisierung dar. Dieser methodische Ansatz kann sowohl wissenschaftlich weiterentwickelt als auch durch praktische Anwendung weiter erprobt werden.

Das vorliegende Methodenhandbuch gliedert sich in acht aufeinander aufbauende Kapitel sowie ein Glossar zur Definition und Erläuterung wesentlicher Begriffe. Nach diesem einführenden Kapitel wird in Kapitel 2 die entwickelte harmonisierte Bilanzierungsmethode allgemein erläutert. In Kapitel 3 werden Hinweise für die produktspezifische Sachbilanzierung gegeben und Empfehlungen abgeleitet. Für die Bewertung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen werden in Kapitel 4 ausgewählte Umweltwirkungskategorien mit entsprechenden Wirkungsindikatoren und ökonomischen Kennzahlen sowie in Kapitel 5 geeignete Referenzsysteme aufgeführt. Auf Anforderungen für eine transparente Ergebnisdarstellung und -interpretation wird in Kapitel 6 eingegangen. In Kapitel 7 wird die entwickelte harmonisierte Bilanzierungsmethode anhand von drei Anwendungsbeispielen umfassend dargestellt.

2 Ziel und Untersuchungsrahmen

In Anlehnung an die Methodik des Life Cycle Assessments (LCA) bzw. der Ökobilanzierung nach ISO 14040 [13] und 14044 [12] wird mit der entwickelten harmonisierten Bilanzierungsmethode der gesamte Lebensweg von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen betrachtet. Dabei ist die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen für die Harmonisierung von entscheidender Bedeutung.

2.1 Zieldefinition

Mit der Zieldefinition muss die Motivation zur Durchführung einer Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen eindeutig beschrieben werden. Dabei sollte auch auf die Anwendung der Ergebnisse eingegangen werden. Zieldefinitionen für die Anwendung der vorliegenden harmonisierten Bilanzierungsmethode könnten beispielsweise sein:

- Vergleich von Umweltwirkungen und Kosten verschiedener Produktsysteme zur Strom-, Wärme- oder Kraftstofferzeugung,
- Analyse eines Produktsystems zur Identifikation von Optimierungspotentialen,
- Vergleich unterschiedlicher Anbauvarianten (z. B. Einsatz fossilen Diesels gegenüber Rapsölkraftstoff, unterschiedliche Düngevarianten).

Die Ergebnisse der genannten beispielhaften Analysen könnten die Grundlage für Handlungsempfehlungen für eine umwelt- und ressourcenschonende Bereitstellung und Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rohstoffe sein.

2.2 Untersuchungsrahmen

Der Rahmen des zu untersuchenden Produktsystems sollte eindeutig und unmissverständlich beschrieben werden sowie auf die definierte Zielstellung der ökobilanziellen und ökonomischen Analyse abgestimmt sein. In diesem Zusammenhang stellt die entwickelte Systemdarstellung eine harmonisierte Festlegung des Untersuchungsrahmens sicher. Mit der Systemdarstellung können wesentliche Informationen zum Untersuchungsrahmen, wie beispielsweise das zu untersuchende Produktsystem, seine Funktion und Systemgrenzen sowie die funktionelle Einheit und die Methode zum Umgang mit Koppelprodukten eindeutig definiert und gleichzeitig visualisiert werden (siehe Abschnitt 2.2.1 sowie Abbildung 1).

2.2.1 Systemdarstellung

Wie aktuelle Literaturrecherchen von Ökobilanzstudien im Bereich der Biomasseerzeugung und -nutzung zeigen [40][50][95], wird das untersuchte Produktsystem oftmals nur sehr unzureichend und unklar beschrieben. Dies erschwert Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der veröffentlichten Ergebnisse erheblich. Häufig wird das untersuchte Produktsystem als „von der Wiege bis zum Werkstor“ ohne genauere Details definiert. Zur Beschreibung komplexer Produktsysteme, wie z. B. für biobasierte Produkte, die aus einer Vielzahl unterschiedlicher, miteinander verbundener Systeme bestehen, ist dies allerdings nicht ausreichend. Für diese Produkte ist ein strukturierterer Ansatz zur Beschreibung des untersuchten Produktsystems nötig. Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an die DIN EN 15804 [14] ein Schema entwickelt, mit dem eine umfassende Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen transparent dargestellt werden kann (siehe Abbildung 1).

Mithilfe dieser Systemdarstellung können Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen einheitlich beschrieben, analysiert und bewertet werden. Die Lebenszyklusabschnitte (z. B. Rohstoffgewinnung) sind in Prozessgruppen unterteilt (z. B. [A]), die wiederum aus mehreren Prozess-Untergruppen bestehen (z. B. [A1] bis [A5]). Für eine detaillierte Analyse von Produktsystemen kann es sinnvoll sein, bestimmte Prozess-Untergruppen nochmals in einzelne Prozesse aufzuteilen (z. B. [A1.1] bis [A1.3]). In der Bilanzierung berücksichtigte betriebliche Logistik- und Vorleistungsprozesse können gesondert ausgewiesen werden. Des Weiteren werden Effekte außerhalb der Systemgrenze in einer eigenen Prozessgruppe berücksichtigt.

Folgende Prozessgruppen wurden definiert:

- **[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse** – umfasst die Prozesse der Rohstoffgewinnungsphase. Außerdem werden die Prozesse zur Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen (z. B. Wirtschaftsdünger oder Industrierestholz) in dieser Prozessgruppe erfasst.
- **[B] Transformation** – umfasst die Prozesse der Lagerung und Vorbehandlung von Biomasse sowie deren Umwandlung zu Halbwaren und Produkten für die energetische und stoffliche energetische Nutzung.
- **[C] Konversion** – umfasst die Prozesse der Umwandlung des Biokraftstoffs bzw. Biobrennstoffs (Sekundärenergie) zu Endenergie. Diese Prozessgruppe entfällt für Produktsysteme aus dem Bereich der stofflichen Nutzung.
- **[D] Nutzung** – hier werden Prozesse zusammengefasst, die Umweltwirkungen bzw. betriebs- und volkswirtschaftliche Effekte der Biomassenutzung während der Nutzungsphase charakterisieren. Dazu zählt insbesondere der Kohlenstoffspeicher (C-Speicher) der Produkte. Für die energetische Nutzung ist diese Prozessgruppe nicht relevant.

- **[E] Abfallbewirtschaftung** – für sämtliche Prozesse, die am Ende des Lebenswegs der Produktion von Biomasseprodukten (z. B. Altholzentsorgung) oder Bioenergie (z. B. Ascheentsorgung) stehen.
- **[L] Betriebliche Logistik** – untergliedert nach [L1] außerbetrieblichem Transport (z. B. Transport Pflanzmaterial/Saatgut von Baumschule/Landhandel zum Hof) und [L2] innerbetrieblichem Transport (z. B. Transport Pflanzmaterial/Saatgut vom Hof zur Produktionsfläche).
- **[T] Transporte** – untergliedert nach Transportprozessen zwischen den einzelnen Lebenszyklusabschnitten [T1] Transport Biomasse, [T2] Transport Zwischenprodukte, [T3] Transport Endprodukte sowie [T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle.
- **[V] Vorleistungen** – für die gesonderte Ausweisung von Prozessen, die vor dem untersuchten Produktsystem stattfinden. Dazu zählen [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen, Geräten und Aggregaten, [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur, [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut, [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen, [V5] Prozess- und Hilfsenergien (z. B. Strom oder Wärme), [V6] Mineral- und Kalkdüngern, [V7] Pflanzenschutzmitteln sowie [V8] Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien.
- **[F] Effekte außerhalb der Systemgrenze** – umfassen sämtliche Effekte, die außerhalb der Systemgrenzen liegen. Dazu zählen beispielsweise vermiedene Lasten und Gutschriften durch die Nutzung von Rohstoffen aus vorgelagerten Systemen, direkte und indirekte Landnutzungsänderungen sowie Gutschriften für ein vermiedenes Referenzsystem durch die Nutzung eines Koppelprodukts. Dabei sind [F1] bis [F3] Effekte innerhalb und [F4] bis [F5] Informationen außerhalb des zu untersuchenden Produktsystems.
- **[G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems** – ermöglicht die Darstellung von Effekten, die durch die Substitution von Produkten oder Dienstleistungen eines Referenzsystems mit dem Hauptprodukt des untersuchten Produktsystems auftreten (z. B. die Substitution von Strom aus Steinkohle durch Strom aus Biogas sowie die Gutschrift des Substitutionseffekts). Diese Effekte sollten sowohl bei der Darstellung des Systems als auch bei der Ausweisung von Ergebnissen separat dargestellt werden.

Bezeichnung Produktsystem:			
Rohstoffgewinnung	Produktion	Anwendung	Reststoff- und Abfallbehandlung
<input type="checkbox"/> [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse <input type="checkbox"/> [A1] Bestandesbegründung <input type="checkbox"/> [A1.1] Bodenaufbereitung <input type="checkbox"/> [A1.2] Pflanzen/Aussaat <input type="checkbox"/> [A1.3] sonstige Flächenvorbereitung <input type="checkbox"/> [A2] Bestandesführung <input type="checkbox"/> [A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand <input type="checkbox"/> [A2.2] Zaubau <input type="checkbox"/> [A2.3] Düngung <input type="checkbox"/> [A2.4] Kalkung <input type="checkbox"/> [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung <input type="checkbox"/> [A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen <input type="checkbox"/> [A3] Ernte <input type="checkbox"/> [A3.1] Ernte Biomasse <input type="checkbox"/> [A3.2] Vorliefern zur Straße <input type="checkbox"/> [A3.3] Aufbereitungsprozesse nach Ernte <input type="checkbox"/> [A3.4] Aufladen auf LKW/Traktor <input type="checkbox"/> [A4] nicht-zuordenbar <input type="checkbox"/> [A4.1] C-Speicher <input type="checkbox"/> Fläche <input type="checkbox"/> [A4.2] N ₂ O-Feldmissionen <input type="checkbox"/> [A4.3] andere Feldmissionen <input type="checkbox"/> [A4.4] Unterbringung von Personal <input type="checkbox"/> [A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen	<input type="checkbox"/> [B] Transformation <input type="checkbox"/> [B1] Lagerung <input type="checkbox"/> [B1.1] Biomassalagerung <input type="checkbox"/> [B1.2] Produktlagerung <input type="checkbox"/> [B1.3] Ent- und Beładung <input type="checkbox"/> [B1.4] Verpacken <input type="checkbox"/> [B2] Vorbehandlung <input type="checkbox"/> [B2.1] Reinigung <input type="checkbox"/> [B2.2] Zerkleinerung <input type="checkbox"/> [B2.3] Trocknung <input type="checkbox"/> [B3] Umwandlung <input type="checkbox"/> [B3.1] chemische Transformation <input type="checkbox"/> [B3.2] mechanische Transformation <input type="checkbox"/> [B3.3] biologische Transformation	<input type="checkbox"/> [C] Konversion <input type="checkbox"/> [C1] Stromerzeugung <input type="checkbox"/> [C2] Wärmeeerzeugung <input type="checkbox"/> [C3] Kombinierte Strom und Wärmeeerzeugung <input type="checkbox"/> [C4] Bereitstellung Antriebsenergie (z. B. für Mobilität) <input type="checkbox"/> [C5] Abgasreinigung	<input type="checkbox"/> [D] Nutzung <input type="checkbox"/> [D1] C-Speicher Produkt <input type="checkbox"/> [D2] Energiespeicherung <input type="checkbox"/> [D3] Stoffliche Verwertung <input type="checkbox"/> [D4] energetische Verwertung <input type="checkbox"/> [D5] Beseitigung
<input type="checkbox"/> [L] Betriebliche Logistik <input type="checkbox"/> [L1] außerbetrieblicher Transport <input type="checkbox"/> [L2] innerbetrieblicher Transport	<input type="checkbox"/> [T] Transporte <input type="checkbox"/> [T1] Transport Biomasse <input type="checkbox"/> [T2] Transport Zwischenprodukte <input type="checkbox"/> [T3] Transport Endprodukte <input type="checkbox"/> [T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle	<input type="checkbox"/> [V] Vorleistungen <input type="checkbox"/> [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten <input type="checkbox"/> [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur <input type="checkbox"/> [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut <input type="checkbox"/> [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen <input type="checkbox"/> [V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien <input type="checkbox"/> [V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern <input type="checkbox"/> [V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln <input type="checkbox"/> [V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien	<input type="checkbox"/> [E] Abfallbewirtschaftung <input type="checkbox"/> [E1] Vorbereitung zur Wiederverwendung <input type="checkbox"/> [E2] stoffliche Verwertung <input type="checkbox"/> [E3] energetische Verwertung <input type="checkbox"/> [E4] Beseitigung
<input type="checkbox"/> [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze <input type="checkbox"/> [F1] Gutschriften für vermiedene Lasten <input type="checkbox"/> [F2] Direkte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F3] Indirekte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F4] Gutschriften für vermiedenes Referenzsystem Koppelprodukte <input type="checkbox"/> [F5] Gutschriften für vermiedene Roh- und Brennstoffe durch Abfallbewirtschaftung			
<input type="checkbox"/> [G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems <input type="checkbox"/> [G1] Referenzsystem Hauptprodukt			
Geographische Repräsentativität:		Zeitliche Repräsentativität:	
Anmerkungen:		Anmerkungen:	

Abbildung 1: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen

2.2.2 Systemgrenzen

Durch die Definition der Systemgrenzen wird festgelegt, welche Prozesse für die Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen betrachtet werden und welche außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen. Dabei müssen die Systemgrenzen nach DIN EN ISO 14040 und 14044 dem Ziel der Studie entsprechen. Für die Analyse und Bewertung von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen wird empfohlen, den vollständigen Lebensweg eines Bioenergieträgers (z. B. Kraftstoff), einer Bioenergie (z. B. Wärme oder Mobilität) oder eines biobasierten Produkts (z. B. Holztisch) zu betrachten. Bezogen auf die in Abschnitt 2.2.1 erläuterte Systemdarstellung liegen die Prozessgruppen [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse, [B] Transformation, [C] Konversion bzw. [D] Nutzung, [E] Abfallbewirtschaftung sowie [T] Transporte und [L] Betriebliche Logistik inklusive der Prozessgruppe [V] Vorleistungen innerhalb der Systemgrenzen des zu bilanzierenden und zu bewertenden Lebenswegs. Dieser Lebensweg mit den in Abbildung 1 dargestellten Systemgrenzen beschreibt das jeweilige Basisszenario der Analysen und Bewertungen im Projekt ExpResBio. Folglich liegen die Prozessgruppen [F] und [G] in den Basisszenarien außerhalb der untersuchten Systemgrenzen (siehe Abbildung 1).

Die Prozessgruppen [F] und [G] dienen somit zur Darstellung ergänzender Informationen (z. B. für die Darstellung weiterer Szenarien). Dabei liegen [F1] bis [F3] außerhalb der Systemgrenzen und [F4], [F5] sowie [G] beziehen sich sogar auf andere Produktsysteme.

Neben den bereits definierten Systemgrenzen werden weitere Festlegungen zu den technischen, räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen getroffen, die im Folgenden detailliert aufgeführt sind.

Technische Systemgrenzen:

- **Abschneidekriterien:**
Alle Prozesse, deren Anteil an allen Wirkungsindikatoren kleiner als 1 % ist, dürfen abgeschnitten werden. Es müssen allerdings mindestens 95 % der Gesamtumweltwirkungen abgedeckt sein [51]. Nach Möglichkeit sollen jedoch alle Prozesse berücksichtigt werden.
- **Menschliche Arbeitsleistungen sowie Aufwendungen für die Verwaltung werden in der ökobilanziellen Bewertung generell nicht berücksichtigt. In der ökonomischen Bewertung wird der Arbeitszeitbedarf berücksichtigt.**
- **Infrastrukturbereitstellung und Betrieb:**
Die Bereitstellung der Infrastruktur (z. B. Gebäude, Maschinen, Geräte, Aggregate) sowie deren Betrieb sind in der Bilanz zu berücksichtigen.

- Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen:
Rohstoffe aus vorgelagerten Produktsystemen (siehe Prozessgruppe [A5] in Abschnitt 3.2.4.5), die als Input für das zu untersuchende Produktsystem verwendet werden, gehen mit Umweltlasten („ökologischer Rucksack“) und Kosten in die Bilanz ein. Diese im vorgelagerten System entstandenen Umweltlasten und Kosten werden entweder durch Allokation oder durch ein Substitutionspotential bestimmt (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.4). Weiterhin sind die Transporte der Rohstoffe von ihrem Anfallort zur Transformationsanlage [T1] zu bilanzieren.

Räumliche (geografische) Systemgrenze:

Die räumliche Systemgrenze ist aus der Definition des Produktsystems abzuleiten. Für die ökobilanzielle und ökonomische Bewertung der Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen im Projekt ExpRessBio wird beispielsweise die Fläche des Freistaates Bayern als räumliche Systemgrenze verwendet. Folglich müssen alle Annahmen und Festlegungen der Produktsysteme für Betriebe und Regionen in Bayern getroffen werden und hierfür Gültigkeit aufweisen.

Ausnahmen sind:

- die Bereitstellung des tatsächlich bezogenen Strommixes (z. B. Europäische Union, Deutschland, Bayern) unter Berücksichtigung des Importstrommixes der erforderlichen Energieträger (z. B. Steinkohle, Braunkohle, Mineralöl, Erdgas),
- die Bereitstellung verschiedener Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (z. B. Eisenerz, Mineraldünger, Diesel),
- die Bereitstellung von Substitutionsprodukten (z. B. Sojaschrot als Eiweißfuttermittel).

Der geografische Bezugsraum dieser Einsatzstoffe entspricht den jeweiligen Regionen bzw. Ländern, in denen sie abgebaut, gefördert und/oder erzeugt werden (z. B. Sojaschrot aus Brasilien).

Die im vorliegenden Handbuch beschriebene Methode kann auf jeden anderen geografischen Bezugsraum übertragen werden. Wichtig bei der Übertragung ist, dass der gewählte geografische Bezug das zu bilanzierende Produktsystem widerspiegelt.

Zeitliche Systemgrenze:

Neben den Festlegungen bei der Datenerhebung (Sachbilanzierung) müssen auch für die anschließende ökobilanzielle und ökonomische Bewertung Festlegungen hinsichtlich des Bezugszeitraums getroffen werden. Dabei ist der Bezugszeitraum in Abhängigkeit des definierten Ziels der Analyse festzulegen. Beispiele für die Analyse von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen sind beispielsweise die Umtriebszeit oder eine Fruchtfolge sowie das Anbau- bzw. Wirtschaftsjahr.

2.2.3 Funktionelle Einheit/Bezugsgröße

Die funktionelle Einheit quantifiziert den Nutzen eines untersuchten Produktsystems und normiert alle Inputs und Outputs innerhalb der Systemgrenzen auf eine gemeinsame Einheit [12][51]. Sie dient somit als Bezugseinheit für sämtliche Stoff- und Energieströme, die in der Sachbilanz erhoben werden.

Weiterhin werden die Ergebnisse der anschließenden ökobilanziellen und ökonomischen Bewertung auf diese Einheit bezogen. Deshalb stellt die funktionelle Einheit auch die Vergleichseinheit dar, auf Basis derer Produktsysteme (z. B. aus land- und forstwirtschaftlicher Biomasse) miteinander verglichen werden können. Für den Vergleich verschiedener Produktsysteme ist es in diesem Zusammenhang von großer Wichtigkeit, dass nicht nur die funktionelle Einheit für die zu vergleichenden Produktsysteme identisch ist, sondern diese auch die identischen Eigenschaften beschreibt (funktionelle Äquivalenz) [51]. So ist für den abschließenden Vergleich von Mobilität, Strom und Wärme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen beispielsweise die funktionelle Einheit 1 MJ ab Konversionsanlage allein nicht ausreichend. Deshalb ist zu der funktionellen Einheit immer die beschreibende Größe (Bezugsgröße), z. B. elektrische Energie, anzugeben.

Für die Analyse und Bewertung von **Bioenergien** aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen wird die Festlegung folgender Bezugsgrößen und funktioneller Einheiten empfohlen:

- **Strom:** elektrische Nutzenergie in MJ frei Konversionsanlage,
- **Wärme:** thermische Nutzenergie in MJ frei Konversionsanlage,
- **Mobilität:** Energiegehalt des Kraftstoffs (Heizwert) in MJ frei Konversionsanlage.

Bei der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist die funktionelle Einheit entsprechend dem Hauptprodukt festzulegen.

Bei der Analyse und Bewertung **biobasierter Produkte** der stofflichen Nutzung wird die Bezugsgröße Anzahl mit der funktionellen Einheit Stück oder die Bezugsgröße Masse mit der funktionellen Einheit Kilogramm empfohlen. Sowohl die Bezugsgröße als auch die funktionelle Einheit sind in Abhängigkeit des spezifischen Nutzens des jeweiligen Produkts auszuwählen und gegebenenfalls weiter zu spezifizieren.

Darüber hinaus ist es sinnvoll, vergleichende Aussagen zu den jeweiligen Prozessgruppen, wie z. B. [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse, treffen zu können. Zu diesem Zweck bedarf es weiterer Bezugsgrößen mit entsprechenden funktionellen Einheiten. Dazu zählen die Biomasseerträge bezogen auf die Frisch- bzw. Trockenmasse in kg oder t oder bezogen auf das Volumen in m³ oder Erntefestmeter mit Rinde (Efm mR) sowie die Anbaufläche in Hektar (ha).

Die Festlegung der jeweiligen funktionellen Einheiten erfolgt für den spezifischen Anwendungsfall bei der Beschreibung der Prozessgruppen und Prozesse in Kapitel 3.

2.2.4 Umgang mit Koppelprodukten

Entstehen in einem Prozess neben dem zu analysierenden Hauptprodukt weitere Produkte, werden diese Koppelprodukte genannt. Kann das Koppelprodukt entweder direkt oder auch nach einem Aufbereitungsschritt einer weiteren Nutzung zugeführt werden, die außerhalb der Systemgrenzen des untersuchten Produktionssystems liegt, sollten die entstehenden Umweltbelastungen und Kosten sowohl auf das Haupt- als auch auf das Koppelprodukt nach definierten Regeln bezogen werden. Dieser Bezug kann auf Basis unterschiedlicher Methoden zum Umgang mit Koppelprodukten hergestellt werden, die unter anderem KLÖPFFER und GRAHL (2009) [51] sowie WAGNER et al. (2000) [92] ausführlich beschreiben und diskutieren.

Wird das Koppelprodukt (z. B. Waldrestholz oder Biogaswärme) keiner weiteren Nutzung zugeführt, dann fällt dem Hauptprodukt die volle Umweltlast zu.

Nachfolgend werden die empfohlenen Methoden der Allokation sowie die der Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschrift für den Umgang mit Koppelprodukten im Projekt ExpResBio näher erläutert.

Methodik der Allokation

Unter Allokation ist nach DIN EN ISO 14044 [12] die Zuordnung der Input- und Outputflüsse aller Prozesse zum untersuchten Produktsystem (Hauptprodukt) sowie zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen (Koppelprodukt/-en) zu verstehen. Um eine solche Zuordnung durchzuführen, gibt es verschiedene Ansätze, die alle einen Zusammenhang zwischen Hauptprodukt und Koppelprodukt abbilden [13][51]. In erster Linie sollte die Zuordnung auf Basis der zugrunde liegenden physikalischen Beziehung zwischen den unterschiedlichen Produkten erfolgen. Beispiele hierfür sind die Allokation nach Masse oder die Allokation nach dem Energiegehalt (Heizwert) bzw. dem Exergiegehalt. Sollte keine physikalische Beziehung zwischen den Produkten hergestellt werden können, kann die Zuordnung anhand anderer Zusammenhänge wie beispielsweise des ökonomischen Werts erfolgen [51]. Der Zusammenhang zwischen Hauptprodukt und Koppelprodukt wird durch die jeweiligen Bezugsgrößen (z. B. Masse, Heizwert, Exergie, ökonomischer Wert) dargestellt.

Die für die Zuordnung der Input- und Outputflüsse erforderlichen Allokationsfaktoren (AF) berechnen sich aus dem Verhältnis der Bezugsgrößen von Hauptprodukt bzw. Koppelprodukt und der Summe beider Größen (siehe Formel (2.1)).

$$AF_{\text{Hauptprodukt}} = \frac{\text{Bezugsgröße Hauptprodukt}}{\text{Bezugsgröße (Hauptprodukt + Koppelprodukt)}} \quad (2.1)$$

Bei der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung wird die Exergie als Bezugsgröße herangezogen, sodass sich der Allokationsfaktor für den Strom (Hauptprodukt) wie folgt berechnet (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.4.3):

$$AF_{Strom} = \frac{Strom}{Strom + exergetischer\ Anteil\ der\ Wärme} \quad (2.2)$$

Aus der Multiplikation aller Input- und Outputflüsse mit AF_{Strom} ergeben sich schließlich die Umweltwirkungen und Energieaufwendungen, die der Bereitstellung von Strom zugeordnet werden. Die Berechnung der mit dem Koppelprodukt Wärme verbundenen Umweltwirkungen und Energieaufwendungen erfolgt äquivalent.

Die Wahl der Bezugsgröße (z. B. Masse, Energie, ökonomischer Wert) kann sich deutlich auf das Ergebnis einer Studie auswirken. Zudem treten bei Allokationen methodische Schwierigkeiten auf, beispielsweise durch marktabhängige Preisschwankungen und damit verbundene schwankende Bilanzergebnisse bei der ökonomischen Allokation. Die Auswirkungen unterschiedlicher Allokationen auf die Bilanzergebnisse haben GUINÉE et al. (2009) [36] umfassend dargestellt. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass beim Vergleich von Produkten eine Bezugsgröße festzulegen ist, d. h. innerhalb eines Produktsystems entweder nach Masse, Energiegehalt oder nach dem ökonomischen Wert alloziert werden sollte. Dies lässt sich allerdings bei der Bewertung komplexer Produktsysteme (z. B. bei der kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung aus Industrie-restholz) nicht immer umsetzen.

Für die Bilanzierung von Biokraftstoffen sowie der Strom- und Wärmegegewinnung aus flüssigen Bioenergieträgern ist die Allokation der Input- und Outputflüsse nach dem Heizwert durch die Richtlinie 2009/28/EG [28] sowie durch die Biokraft-NachV [5] ordnungspolitisch vorgeschrieben. Jedoch wird häufig hinterfragt, ob bei der Biokraftstoffproduktion entstehende Koppelprodukte, die als Eiweißfuttermittel Verwendung finden, durch eine heizwertbezogene Allokation ihrer Anwendung entsprechend korrekt abgebildet werden. Eine Alternative zur Allokation stellt die Methodik der Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschriften dar.

Methodik der Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschriften

Die Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 [13][12] sowie DIN CEN ISO/TS 14067 [16] verlangen nach Möglichkeit eine Vermeidung von Allokationen. Dies betrifft nicht nur die Aufteilung der vorgelagerten Umweltlasten bzw. Kosten bei Koppelproduktion, sondern auch die Verwertungs- und Recyclingprozesse von Abfällen, die in Prozessen vor der Nutzung des Endprodukts anfallen. Die Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschriften stellt eine Variante dar, die Allokation von Input- und Outputflüssen zu vermeiden. Hierbei verbleiben die Koppelprodukte im System und werden mitbilanziert. Eine Allokation der Input- und Outputflüsse ist dadurch nicht mehr notwendig. Al-

lerdings gehen aus einem um das Koppelprodukt erweiterten Systemraum zwei oder mehr Produkte hervor und der Nutzen des untersuchten Systems ändert sich (Erzeugung von x MJ Rapsölkraftstoff und y kg Eiweißfuttermittel in Form von Rapspresskuchen aus z kg Rapssaat).

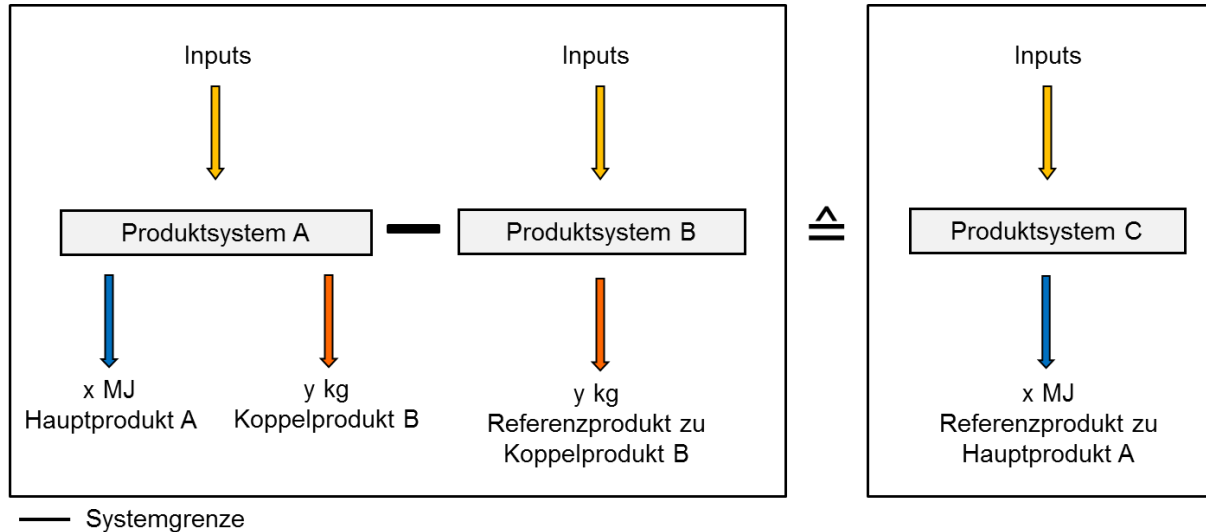


Abbildung 2: Herstellung der Nutzengleichheit bei der Systemraumerweiterung durch Subtraktion eines Referenzsystems, verändert nach [51][23]

Bei einem Vergleich des erweiterten Untersuchungssystems mit einem Referenzsystem (z. B. mit fossilem Dieselkraftstoff) (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.10 und Kapitel 5) müssen beide Systeme den gleichen Nutzen aufweisen. Die gleiche funktionelle Einheit ist kein hinreichendes Kriterium dafür. Aus den zu vergleichenden Untersuchungssystemen müssen auch die gleichen Produkte hervorgehen (z. B. aus beiden nur Kraftstoff oder aus beiden Kraftstoff und Futtermittel). Eine Möglichkeit, diese Nutzengleichheit herzustellen, ist die Subtraktion der Emissionen eines Referenzprodukts (z. B. z kg Sojaschrot), das durch das erzeugte Koppelprodukt (y kg Rapskuchen) substituiert werden kann (siehe Abbildung 2). Hierbei ist die gleiche Wertigkeit von Koppelprodukt und Referenzprodukt (z. B. über das nutzbare Rohprotein) zu berücksichtigen. Somit müssen konkrete Annahmen zum Koppelprodukt und dem substituierten Referenzprodukt getroffen werden. Folglich ist bei einer Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschrift eines Referenzsystems (z. B. Bereitstellung von z kg Sojaschrot) mit einem größeren Datenbedarf zu rechnen [51][23]. Anders als bei der Methodik der Allokation liegen die Informationen zur Gutschrift des Referenzsystems außerhalb des untersuchten Produktsystems (vgl. Abbildung 1, Prozessgruppe F3–F4).

Weiterhin hat die Auswahl des zu vergleichenden Referenzprozesses einen sehr großen Einfluss auf die Bilanzergebnisse. Daher sind das Substitutionspotential sowie die Auswahl der Referenzprozesse transparent darzulegen und zu begründen. Deshalb müssen die Ergebnisse extra in [F4] bzw. [F5] dokumentiert werden (siehe auch Abschnitt 3.9). Als wichtiger Faktor bei der Auswahl des Referenzprozesses ist die Marktrelevanz des zu bewertenden Koppelprodukts zu beachten, d. h. es ist zu überprüfen, ob das Koppel-

produkt auch als solches Anwendung findet. So wird beispielsweise das Glycerin als Koppelprodukt der Biodieselproduktion nicht nur stofflich genutzt, sondern auch als Sekundärrohstoff einer energetischen Nutzung zugeführt. Im Falle einer energetischen Nutzung darf das aus fossilen Rohstoffen erzeugte synthetische Glycerin nicht als Referenzprodukt ausgewählt werden. Das tatsächliche Referenzsystem wäre hier die substituierte Strom- und/oder Wärmemenge.

Empfehlungen zum Umgang mit Koppelprodukten

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird für die Basisszenarien die Methodik der Allokation für die Bewertung von Koppelprodukten empfohlen. So erfolgt für die kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung in KWK beispielsweise die Allokation der Input- und Outputflüsse nach Exergie (siehe Abschnitt 3.4.3). Die Produktsysteme der Biokraftstofferzeugung werden nach Heizwert des Biokraftstoffs und des Koppelprodukts (z. B. Futtermittel) alloziert (siehe Abschnitt 3.3.3).

Bei der Bilanzierung von Biokraftstoffen und der Biogaserzeugung wird empfohlen, die Methodik der Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschriften für die Bewertung von Koppelprodukten, die nicht energetisch genutzt werden, zusätzlich durchzuführen. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei der Methodik der Allokation in diesen Fällen die tatsächliche Nutzung des Koppelprodukts nicht korrekt abgebildet wird. So wird beispielsweise das bei der Ölgewinnung erzeugte Rapsöl (Hauptprodukt) häufig einer energetischen Nutzung zugeführt, während der Rapspresskuchen (Koppelprodukt) basierend auf seinem Proteingehalt als Futtermittel Anwendung findet. Gleiches gilt auch für die Vergärung: Hier entsteht neben dem energetisch nutzbaren Biogas auch ein nährstoffreiches Gärprodukt, das als Düngemittel im Pflanzenanbau genutzt wird. Die Verwendung des physikalischen Zusammenhangs der Energiegehalte von Haupt- und Koppelprodukten gemäß Richtlinie 2009/28/EG würde hier nur den Nutzungsweg der Hauptprodukte widerspiegeln und die tatsächlich genutzten Eigenschaften der Koppelprodukte unberücksichtigt lassen.

Bei der Bewertung land- und forstwirtschaftlicher Koppelprodukte (z. B. Waldrestholz und Getreidestroh) wird ein anderes Vorgehen empfohlen, da deren Nutzung optional ist. Die genaue Vorgehensweise für den Umgang mit diesen Koppelprodukten ist in Abschnitt 3.2.3 beschrieben.

Bei der ökonomischen Bewertung sollten die Erlöse der Koppelprodukte stets von den Produktionskosten des Hauptprodukts abgezogen werden.

Unabhängig von der gewählten Methodik zum Umgang mit Koppelprodukten bzw. mit Recycling- und Wiederverwertungsprozessen ist nach DIN EN ISO 14044 [12] eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, mit der die Auswirkungen des verwendeten Ansatzes auf die Bilanzergebnisse dargestellt werden. Dies wird auch für die Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen empfohlen.

2.2.5 Datenqualität und Datenherkunft

Die ökobilanzielle und ökonomische Bewertung basiert auf einer umfangreichen Erhebung geeigneter Energie- und Stoffströme sowie ökobilanzieller und ökonomischer Daten, mit denen das spezifische land- und forstwirtschaftliche Produktionssystem abgebildet wird. KLÖPFER und GRAHL (2009) [51] verdeutlichen in diesem Zusammenhang, dass die Vertrauenswürdigkeit der Bilanzergebnisse maßgeblich von der Qualität der verwendeten Daten abhängt. Daher werden nach DIN EN ISO 14044 [12] folgende Anforderungen an die **Datenqualität** definiert:

- **Repräsentativität:** Alle Daten sowie Methoden zur Datenerfassung sollten für die Bewertung des untersuchten Produkts in Bezug auf den zeitlichen, geografischen und technologischen Erfassungsbereich angemessen sein.
- **Vollständigkeit:** Alle innerhalb der definierten Systemgrenzen relevanten Daten müssen in die Berechnung einbezogen werden. Alle potentiellen Ausschlüsse von Prozessen, aus denen Emissionen, Energieaufwendungen und/oder Kosten hervorgehen, sollten dokumentiert und gerechtfertigt werden.
- **Konsistenz:** Methoden, Daten und Annahmen sollten konsistent angewendet werden und nachvollziehbare, reproduzierbare Ergebnisse liefern, die auch aussagekräftige Vergleiche zwischen einer ersten und eventuell folgenden Analysen erlauben.
- **Transparenz:** Alle relevanten Punkte sollten transparent und kohärent dokumentiert werden. Alle relevanten Annahmen und Datenquellen sowie Abschätzungen sollten offengelegt werden.
- **Genauigkeit:** Verzerrungen und Unsicherheiten sollten so weit wie möglich vermieden werden.

Bezüglich der **Datenherkunft** wird im Allgemeinen zwischen Primärdaten und Sekundärdaten unterschieden.

Primärdaten sind solche, die sich direkt auf das untersuchte Produkt und seine Produktionsprozesse beziehen, also spezifisch für dieses Produkt erhoben wurden. Bei einem landwirtschaftlichen Betrieb können dies z. B. die spezifisch eingesetzten Mengen an Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln und Energieträgern sowie die erzielten Erträge sein. Möglichkeiten der Erhebung von Primärdaten in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion stellen insbesondere Feldexperimente oder Ackerschlagkarteien in Praxisbetrieben dar.

Sekundärdaten beziehen sich nicht direkt auf das untersuchte System bzw. sind nicht vor Ort erhoben oder gemessen und somit weniger spezifisch. Beispiele für die Verwendung von Sekundärdaten sind in Anlehnung an NEUGEBAUER und FINKBEINER (2012) [68] die Abbildung

- regionalspezifischer Anbaucharakteristika (z. B. zum Vergleich von Regionen anhand „typischer“ Durchschnittsbetriebe),

- technologiespezifischer Verfahrenstechniken (z. B. zur Strom- und Wärmeerzeugung),
- erforderlicher Hilfs- und Betriebsstoffe (z. B. Düngemittel) entlang der Prozesskette,
- erforderlicher Energieträger (z. B. Dieselkraftstoff) und von End- bzw. Nutzenergien (Strom bzw. Wärme) entlang der Prozesskette,
- von Gutschriften für Koppelprodukte.

Quellen von Sekundärdaten können in diesem Zusammenhang statistische Daten (z. B. Agrarstatistiken), land- und forstwirtschaftliche Erhebungen, LCI-Datenbanken (Life-Cycle-Inventory-Datenbanken, z. B. GaBi, ecoinvent, GEMIS, BioGrace) sowie wissenschaftliche Studien und Publikationen (z. B. IPCC-Berichte) sein.

Die Nutzung der für die Abbildung des untersuchten Produktsystems erforderlichen Primär- und/oder Sekundärdaten ist in Abhängigkeit des jeweiligen Ziels und Untersuchungsrahmens unter Berücksichtigung der aufgeführten Anforderungen an die Datenqualität spezifisch festzulegen.

Für die Beurteilung regionalspezifischer Produktions- und Nutzungsoptionen land- und forstwirtschaftlicher Rohstoffe (z. B. in Bayern) ist auch eine regional- bzw. betriebsspezifische Analyse erforderlich. Dies kann durch Datenerhebung aus Feldversuchen, in Praxisbetrieben sowie für Modellbetriebe und Modellregionen umgesetzt werden. Nur auf diese Weise lassen sich die jeweiligen Standort- und Bewirtschaftungseinflüsse (Boden, Klima, Fruchtfolge etc.) berücksichtigen und damit die entsprechenden regionaltypischen Charakteristika abbilden und beurteilen. Die Verwendung von Standard- und/oder Durchschnittswerten ist für eine regionalspezifische Beurteilung nicht zielführend.

Weiterhin ist eine einheitliche Verwendung von LCI-Datenbanken (z. B. ecoinvent) mit den einzelnen Datensätzen z. B. für Strom, Diesel oder Ähnliches festzulegen und zu dokumentieren. Dies ist ein weiterer Aspekt, um transparente, nachvollziehbare und untereinander vergleichbare Ergebnisse zu generieren. Im Projekt ExpResBio werden für die ökobilanzielle Analyse von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen die LCI-Datenbank ecoinvent [84] in Ergänzung mit den LCI-Datenbanken der GaBi-Software [85] verwendet.

Aufgrund dynamischer Marktentwicklungen ist bei der ökonomischen Bewertung zu beachten, für welchen Zeitraum bzw. -punkt die Berechnungen angestellt werden. Dementsprechend sind Kosten bzw. Preise zeitpunktgerecht zu wählen.

2.3 Festlegung wichtiger Kenngrößen

Für die spezifische Sachbilanzierung und anschließende ökobilanzielle und ökonomische Bewertung werden verschiedene physikalische und chemische Kenngrößen benötigt, um die Input- und Outputflüsse beispielsweise auf eine andere Bezugseinheit umzurechnen. Da die Verwendung unterschiedlicher Heizwerte (z. B. Abweichungen durch Rundung)

zu unterschiedlichen Bilanzergebnissen je Energieeinheit des bilanzierten Produkts führt, wird die eindeutige Festlegung und Dokumentation dieser Kenngrößen empfohlen. Nur so können eine harmonisierte Bilanzierung aller Produktsysteme sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden. Tabelle 1 exemplifiziert häufig genutzte physikalische und chemische Kenngrößen. Es wird empfohlen, diese festgelegten Kenngrößen zu ergänzen und fortzuschreiben.

Tabelle 1: *Physikalische und chemische Kenngrößen ausgewählter Energieträger*

	Dichte in kg m ³	Heizwert in MJ kg ⁻¹	Quelle
Dieselmotortreibstoff (fossil)	840 ¹⁾	42,8	[47]
Benzin (fossil)	730 ¹⁾	43,5	[47]
Heizöl, extra leicht	860 ¹⁾	42,6	[47]
Rapsölmotortreibstoff (15 °C)	920	37,5	[73]
Biodiesel	880 ¹⁾	37,2	[77]
Bioethanol	790 ¹⁾	26,8	[77]
Methan	0,72 ²⁾	50,1 ⁴⁾	[55]
Fichte	379 ³⁾	18,7 ⁴⁾	[52][37]
Kiefer	431 ³⁾	18,7 ⁴⁾	[52][37]
Buche	558 ³⁾	18,0 ⁴⁾	[52][37]
Eiche	571 ³⁾	18,0 ⁴⁾	[52][37]

¹⁾ ohne Bezugstemperaturen angegeben

²⁾ bei Normbedingungen (gasförmig, 0 °C, 1013 hPa)

³⁾ Raumdichte in kg Efm mR⁻¹

⁴⁾ bei 0 % Wassergehalt

3 Produktspezifische Sachbilanzierung

Im folgenden Kapitel werden die Systemgrenzen der einzelnen Prozessgruppen definiert sowie die darin beinhalteten Prozess-Untergruppen bzw. Prozesse beschrieben und wichtige Bilanzkenngrößen aufgeführt. Darüber hinaus werden methodische Besonderheiten zur funktionellen Einheit und zu Allokationsverfahren dargestellt und daraus Empfehlungen abgeleitet.

3.1 Prozessgruppe [V] Vorleistungen

Die Prozessgruppe beinhaltet die Vorleistungsprozesse der einzelnen Lebenszyklusabschnitte im untersuchten Produktsystem (Prozessgruppen [A], [B], [C], [D], [E]) bzw. zwischen den einzelnen Lebenszyklusabschnitten (Prozessgruppe [T]). Nach Möglichkeit sollten die Vorleistungsprozesse den jeweiligen Prozessen in den Prozessgruppen [A], [B], [C], [D], [E], [T] zugewiesen und in der disaggregierten Ergebnisdarstellung für das untersuchte Produktsystem gesondert ausgewiesen werden.

3.1.1 Systemgrenzen

Als Datengrundlage sollten nur Datensätze verwendet werden, die den gesamten Lebensweg der entsprechenden Vorleistung betrachten (von der Rohstoffgewinnungsphase bis zur Entsorgungsphase).

3.1.2 Funktionelle Einheit

Die in den einzelnen Produktionsprozessen benötigten Vorleistungen werden mit unterschiedlichen funktionellen Einheiten verwendet.

3.1.3 Allokation

Generell sollte darauf geachtet werden, ob und wie die entsprechende Vorleistung alloziert wurde.

3.1.4 Beschreibung der einzelnen Prozesse

Im Folgenden werden berücksichtigte Vorleistungsprozesse beschrieben sowie Festlegungen und Bewertungsmethoden für einzelne Vorleistungsprozesse empfohlen.

3.1.4.1 [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet Bauvorleistungen und Instandhaltungsmaßnahmen von Maschinen, Geräten und Aggregaten, die für das untersuchte Produktsystem benötigt werden. Zur Bewertung der Vorleistungen im Herstellungsprozess wird die Be-

rechnung eines Abschreibungsfaktors nach dem Prinzip der Absetzung für Abnutzungen (Afa) empfohlen. Als Eingangsgrößen werden hierzu die tatsächliche Nutzungsgröße und das Nutzungspotential der verwendeten Maschine oder des Geräts benötigt (Formel (3.1)).

$$Afa = \frac{\text{tatsächliche Nutzungsgröße}}{\text{technisches Nutzungspotenzial}} \quad (3.1)$$

Die tatsächliche Nutzungsgröße wird beispielsweise durch die Maschinenzeit in h oder bei Anbau- bzw. Anhängengeräten beispielsweise durch die bearbeitete Fläche in ha, die ausgebrachte Menge Dünger in t bzw. m³ beschrieben. Die Bezugsgröße in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion ist meist die Fläche in ha. Die tatsächliche Nutzungsgröße bei der Biokraftstoffproduktion entspricht 1 kg verarbeiteten Rohstoffs (z. B. Rapssaat) bis zum Umwandlungsprozess. Nach dem Umwandlungsprozess erfolgt die Berechnung des Abschreibungsfaktors auf Basis der produzierten Kraftstoff- bzw. Futtermittelmenge (z. B. Rapsölkraftstoff und Rapspresskuchen).

Das technische Nutzungspotential gibt die Anzahl der möglichen Nutzungseinheiten bis zum Verschleiß einer Maschine, eines Geräts oder Aggregats an. Angegeben wird die maschinenspezifische Nutzungseinheit beispielsweise in h, ha, t oder m³.

Zur Berechnung des spezifischen Maschinen- und Geräteeinsatzes je funktioneller Einheit ist das spezifische Leergewicht mit dem Abschreibungsfaktor zu multiplizieren (Formel (3.2)).

$$\text{spezifischer Maschinen- und Geräteeinsatz} = \text{spezifisches Leergewicht} \cdot Afa \quad (3.2)$$

Darüber hinaus sind bei der Bilanzierung Zuschläge für Wartung und Instandhaltung festzulegen, die sowohl bei der ökobilanziellen als auch bei der ökonomischen Bewertung zu berücksichtigen sind.

3.1.4.2 [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet Bauvorleistungen für Gebäude, bauliche Anlagen und Infrastruktur, die für das untersuchte Produktsystem benötigt werden.

Es wird empfohlen, die spezifischen Abschreibungen individuell festzulegen. Diese sind dann sowohl für die ökobilanzielle als auch für die ökonomische Bewertung zu verwenden. Hierbei gilt:

- Gebäude und Maschinen- oder Lagerhallen werden entsprechend des Förderzeitraums für Bioenergieanlagen über eine Lebenszeit von 20 Jahren abgeschrieben.

- Bauliche Anlagen wie beispielsweise Siloanlagen, Lagerbehälter und Ähnliches werden über ihr Lagervolumen im Verhältnis zum Nutzungspotential abgeschrieben.

Darüber hinaus sind bei der Bilanzierung Zuschläge für Wartung und Instandhaltung festzulegen, die sowohl bei der ökobilanziellen als auch bei der ökonomischen Bewertung zu berücksichtigen sind.

3.1.4.3 Bereitstellung sonstiger Vorleistungen

Die Bilanzierung der Vorleistungen [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut, [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen, [V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien, [V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern, [V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln und [V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien kann mit einem sehr hohen Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden sein. Aus diesem Grund wird die Verwendung aggregierter Datensätze aus Ökobilanzdatenbanken wie beispielweise der GaBi-Software [85] und/oder der ecoinvent-Datenbank [84] empfohlen. Diese aggregierten Datensätze beinhalten alle Aufwendungen und Emissionen von der Wiege (das heißt von der Rohstoffentnahme aus der Umwelt) bis zum Werkstor der Produktion der jeweiligen Vorleistungen. Da die Verwendung dieser Daten einen großen Einfluss auf das Bilanzergebnis haben kann, sind die verwendeten Datenbanken inklusive Versionsnummer und Veröffentlichungsjahr stets anzugeben (vgl. hierzu auch Abschnitt 2.2.5 sowie Kapitel 6).

Für die ökonomische Bewertung werden die üblichen aktuellen Marktpreise der genannten Vorleistungen angenommen.

3.2 Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse

Die Prozessgruppe beinhaltet überwiegend Maßnahmen auf einer Produktionsfläche, die notwendig sind, um land- und forstwirtschaftliche Biomasse zu erzeugen und ab Feldrand bzw. ab Waldstraße bereitzustellen (Prozess-Untergruppen [A1]–[A3]). Dabei auftretende Prozesse, die keiner der Prozess-Untergruppen [A1]–[A3] eindeutig zugeordnet werden können (z. B. Kohlenstoff-Sequestrierung, Feldemissionen oder auch Flächenkosten), werden in der Prozess-Untergruppe [A4] erfasst. Werden für das untersuchte Produktsystem neben Primärrohstoffen auch Koppelprodukte aus der tierischen Erzeugung, wie z. B. Wirtschaftsdünger, oder der Transformation, wie z. B. Industrierestholz, verwendet, werden diese in der Prozess-Untergruppe [A5] entsprechend berücksichtigt.

Eine Besonderheit von Prozessgruppe [A] ist der Flächenbezug der Prozesse [A1]–[A4]. Für die Berechnung der Umweltwirkungen und Kosten mit einem produktspezifischen Masse- oder Volumenbezug (z. B. in t oder Efm mR) müssen die entstehenden Umweltwirkungen bzw. Kosten je Produktionsfläche durch die Produktmasse bzw. das Produktvolumen im jeweiligen Bezugszeitraum geteilt werden (siehe Formel (3.3) bzw. (3.4)).

$$\text{Umweltwirkung je } FE_{\text{Produkt}} = \frac{\text{Umweltwirkung}_{\text{Fläche}}}{\text{Produktmasse bzw. -volumen}} \quad (3.3)$$

$$\text{Kosten je } FE_{\text{Produkt}} = \frac{\text{Kosten}_{\text{Fläche}}}{\text{Produktmasse bzw. -volumen}} \quad (3.4)$$

In der Forstwirtschaft gibt es aufgrund der zumeist sehr langen Produktionszeiträume grundsätzlich zwei Bilanzierungsansätze: die Betrachtung eines einzelnen Eingriffs („Single Moment Approach“) und die Betrachtung einer gesamten Umtriebszeit („Whole Rotation Approach“). Die Wahl des Ansatzes hängt von den Zielen der jeweiligen Untersuchung ab. Für die Bilanzierung nach dem „Whole Rotation Approach“ wird die oben beschriebene Vorgehensweise angewendet. Für die Bilanzierung nach dem „Single Moment Approach“ müssen dagegen die flächenbezogenen Umweltwirkungen und Kosten eines Ernteprozesses in [A3] durch die spezifische Produktmasse bzw. das spezifische Produktvolumen geteilt werden. Die flächenbezogenen Umweltwirkungen und Kosten der Prozesse in [A1], [A2] und [A4] werden jedoch durch die gesamte Produktmasse bzw. das gesamte Produktvolumen im jeweiligen Bezugszeitraum geteilt.

3.2.1 Systemgrenzen

Die Systemgrenze der Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse beginnt mit der Flächenvorbereitung für die Bestandesbegründung (z. B. Stoppelgrubbern) und endet bei der Bereitstellung der Biomasse am Feldrand bzw. an der Waldstraße (z. B. Vorliefern von Rohholz zur Waldstraße).

3.2.2 Funktionelle Einheit

Für die land- und forstwirtschaftliche Biomasse werden unterschiedliche funktionelle Einheiten verwendet.

Im Bereich der Forstwirtschaft ist die gängigste und zu empfehlende Bezugsgröße das Volumen mit der funktionellen Einheit Erntefestmeter mit Rinde (Efm mR) unter zusätzlicher Angabe des Wassergehalts. Eine weitere Bezugsgröße ist die Masse, absolut trocken (atro), mit der funktionellen Einheit Tonne. Zur Umrechnung von Efm mR in t muss zusätzlich die baumartenspezifische Raumdichte (z. B. aus KOLLMANN (1982) [52]) angegeben werden.

Im Bereich der Landwirtschaft ist die zu empfehlende Bezugsgröße der Frischmasseertrag (FM-Ertrag) mit den funktionellen Einheiten Kilogramm (kg), Dezitonne (dt) oder Tonne (t) unter zusätzlicher Angabe des Wassergehalts.

Die zusätzliche Angabe des Wasser- bzw. Trockenmassegehalts (TM-Gehalts) für die land- und forstwirtschaftliche Biomasse wird für anschließende Transport- und Trocknungsprozesse benötigt.

Zusätzlich können flächenbezogene Einheiten wie Hektar (ha) oder ha und Jahr (a) bzw. pro ha und Produktionszeitraum sinnvoll sein. Der Bezug auf Energie in Megajoule (MJ) oder Kilowattstunde (kWh) als alleinige funktionelle Einheit ist nicht zu empfehlen, da die Energieausbeute von vielen Faktoren (z. B. Wassergehalt bei Verbrennung, Wirkungsgrad) abhängt, die zu diesem Zeitpunkt der Bilanzierung nicht eindeutig zu bestimmen sind. Der Energiegehalt in der Trockenmasse sollte aber als zusätzliche Information angegeben werden, um beispielsweise den Energieertrag, das Energie-Input/Output-Verhältnis bzw. die Energieeffizienz berechnen zu können.

3.2.3 Allokation

In der Forstwirtschaft fallen auf einer Produktionsfläche stets mehrere Hauptprodukte an. Hierzu zählen die Holzsortimente Stammholz, Industrieholz, Scheitholz. Es wird empfohlen, die entstehenden Umweltwirkungen und Kosten in den Prozessen [A1] Bestandsgründung, [A2] Bestandesführung und [A4] nicht-zuordenbar diesen drei Holzsortimenten zuzuordnen. Als Bezugsgröße wird hierzu das Gesamterntevolumen in Efm mR empfohlen. Für die Bilanzierung der entstehenden Umweltwirkungen und Kosten in den Prozessen [A3] Ernte kann eine Allokation allerdings vermieden werden. Stattdessen können die dabei entstehenden Umweltwirkungen und Kosten für jedes Holzsortiment (Stammholz, Industrieholz, Scheitholz) separat berechnet werden. Hierdurch wird beispielsweise auch der höhere Energieaufwand berücksichtigt, der bei der Ernte von Industrieholz aufgrund der geringeren Stückmasse benötigt wird.

Die Nutzung der land- und forstwirtschaftlichen Koppelprodukte wie beispielsweise Getreidestroh oder Waldrestholz außerhalb der Produktionsfläche ist optional und sollte das Bilanzergebnis des Hauptprodukts nicht beeinflussen. Dementsprechend werden Koppelprodukten, die auf der Produktionsfläche verbleiben, keine Umweltwirkungen und Kosten zugeordnet. Für die Bewertung von land- und forstwirtschaftlichen Koppelprodukten, die einer Nutzung zugeführt werden, wird empfohlen, die Umweltwirkungen und Kosten ab der Ernte zu berücksichtigen. Hierzu zählen beispielsweise Bergungsprozesse wie das Schwaden, Pressen, Sammeln, Bündeln und Vorliefern zur Waldstraße bzw. zum Feldrand. Darüber hinaus sind notwendige Transport- sowie innerbetriebliche Logistikprozesse zu bilanzieren (siehe Abschnitt 3.7 bzw. 3.8). Alle vorgelagerten Umweltwirkungen und Kosten werden somit dem Hauptprodukt zugeordnet. Diesem Bewertungsansatz liegt die Annahme zugrunde, dass alle Aufwendungen ausschließlich dem Hauptprodukt gelten.

3.2.4 Beschreibung der einzelnen Prozesse

Im Folgenden werden die betrachteten Prozesse für die Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse beschrieben.

3.2.4.1 [A1] Bestandesbegründung

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet das Pflanzen bzw. die Aussaat einschließlich der notwendigen Maßnahmen zur Vorbereitung der Produktionsfläche auf das Pflanzen bzw. die Aussaat. Sie kann in die Prozesse [A1.1] Bodenaufbereitung, [A1.2] Pflanzen/Aussaat und [A1.3] Sonstige Flächenvorbereitung unterteilt werden. In Tabelle 2 sind wichtige Bilanzkenngrößen für die einzelnen Prozesse aufgeführt.

[A1.1] Bodenaufbereitung

Dieser Prozess umfasst Maßnahmen zur Vorbereitung der Produktionsfläche, welche für das Pflanzen bzw. die Aussaat notwendig sind, beispielsweise mechanische Unkrautbekämpfungsmaßnahmen (z. B. Mulchen) sowie Bodenbearbeitungsverfahren (z. B. Pflügen, Grubbern oder Fräsen).

[A1.2] Pflanzen/Aussaat

Dieser Prozess umfasst die Maßnahmen zur Kultur- bzw. Bestandesbegründung. Während das Pflanzen oder die Aussaat in der Landwirtschaft überwiegend maschinell erfolgt, kann im Bereich der Forstwirtschaft neben einer manuellen oder maschinellen Pflanzung/Aussaat auch eine natürliche Verjüngung erfolgen. Bei Naturverjüngung treten keine technischen Prozesse und somit auch keine zu bilanzierenden Umweltwirkungen und Kosten auf. Im Bereich der Forstwirtschaft können Umweltwirkungen durch das Pflanzgerät im Falle einer manuellen Pflanzung vernachlässigt werden. Für die ökonomische Bewertung ist dieser Prozess jedoch zu bilanzieren, da hier Kosten aufgrund der aufgewendeten Arbeitszeit entstehen.

[A1.3] Sonstige Flächenvorbereitung

Dieser Prozess umfasst Maßnahmen, die zusätzlich für die Vorbereitung der Produktionsfläche erforderlich sein können, aufgrund ihrer Vielfältigkeit hier aber nicht einzeln dargestellt werden. Maßnahmen im Bereich der Forstwirtschaft sind beispielsweise die Einrichtung von Feuerschutzschneisen oder die Verbrennung von Holzernteresten zur Vorbeugung von Insektenkalamitäten.

Tabelle 2: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [A1] Bestandesbegründung

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[A1.1] Bodenaufbereitung	Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[V1] Zugmaschine	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	
[V1] Anbau- bzw. Anhängegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl
[A1.2] Pflanzen/Aussaat	Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[L1] Außerbetrieblicher Transport	Transportdistanz Bedarf und Art des Transportmittels Kraftstoffverbrauch	Anlieferung Pflanzmaterial und Saatgut
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Transportdistanz Bedarf und Art des Transportmittels Kraftstoffverbrauch	Anlieferung Pflanzmaterial und Saatgut
[V1] Zugmaschine	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	nur bei maschineller Pflanzung/Aussaat
[V1] Anbau- bzw. Anhängegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	nur bei maschineller Pflanzung/Aussaat
[V3] Pflanzmaterial und Saatgut	Masse, Volumen oder Anzahl	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	nur bei maschineller Pflanzung/Aussaat
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	nur bei maschineller Pflanzung/Aussaat

3.2.4.2 [A2] Bestandesführung

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen, die zur Bestandspflege, zum Bestandsschutz sowie zur Verbesserung der Struktur und der Anbauqualität beitragen. Die Prozesse haben einen sehr bedeutenden Anteil an der Ertragsbildung und Qualitätssteigerung der Ernteprodukte. Im Bereich der Forstwirtschaft kann dieser Prozess mehrere Jahre bis zum Beginn der ersten Durchforstung umfassen. Diese Prozess-Untergruppe kann in die Prozesse [A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand, [A2.2] Zaunbau, [A2.3] Düngung, [A2.4] Kalkung, [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung und [A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen unterteilt werden. In Tabelle 3 sind wichtige Bilanzkenngrößen für die einzelnen Prozesse aufgeführt.

[A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand

Dieser Prozess umfasst land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen, die zur Pflege der Pflanzung und des Bestands dienen.

In der Forstwirtschaft werden solche Pflegeeingriffe üblicherweise in den ersten 20 Jahren durchgeführt und können verschiedene Maßnahmen von der Kultur- und Jungwuchspflege bis hin zur schematischen und selektiven Läuterung umfassen. In der Kultur- und Jungwuchspflege soll die Fläche mittels Freischneidegerät, wahlweise auch eine kleine Motorsäge, hauptsächlich von unerwünschter Begleitvegetation befreit werden. Falls notwendig erfolgt die schematische Läuterung, beispielsweise mittels Mulcher, spätestens bis zum Alter von 15 Jahren bzw. beim Übergang vom Dickungsholz ins Stangenholz. Sie dient auch dazu, Pflegegassen anzulegen, die die Grundlage für spätere Rückegassen bilden. Die selektive Läuterung dient zur Selektion erster Z-Baumanwärter. Es gelten die gleichen methodischen Ansätze wie bei der Kultur- und Jungwuchspflege. Alle Umweltwirkungen, die bei der Ausführung dieser Maßnahmen entstehen, und alle Kosten, die hier zu berücksichtigen sind, werden nicht auf mögliche anfallende Holz-mengen bezogen, sondern auf die gesamte Produktionsmenge je Bezugsfläche und Bezugszeitraum, da diese Maßnahmen nicht der Gewinnung von Biomasse dienen, sondern aus den oben genannten Gründen erfolgen und somit der gesamten Erntemenge über eine Umtriebszeit ab Beginn der Durchforstung zugeordnet werden (siehe Formel (3.3) bzw. (3.4)).

In der Landwirtschaft gehören beispielsweise das Mulchen von Feldrändern, die Bewässerung und der Einsatz von Wachstumsregulatoren zu den Pflegemaßnahmen.

[A2.2] Zaunbau

Dieser Prozess umfasst Maßnahmen zum Aufbau, zur Kontrolle und zum Abbau von Zäunen, die in manchen Fällen zum Schutz der Pflanzung nötig sind. Die Verwendung von Holzpfählen kann aus ökologischer Sicht vernachlässigt werden. Eisenpfähle sollten aufgrund des höheren Energieaufwands und des nicht erneuerbaren Materials bilanziert werden.

[A2.3] Düngung

Dieser Prozess umfasst die mineralische und organische Düngung. In Abhängigkeit vom Anbausystem (ökologisch oder konventionell) und der Betriebsform (mit/ohne Tierhaltung/Biogasanlage) bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der Nährstoffzufuhr und Düngung. Im ökologischen Landbau erfolgt die Stickstoffzufuhr ausschließlich über die symbiotische N_2 -Fixierleistung der Leguminosen sowie organische Dünger. Bei der Erstellung von Nährstoffbilanzen (z. B. Stickstoffbilanzen), bei der Abschätzung von Emissionen zur Treibhausgasbilanzierung (z. B. Lachgasemissionen) und bei der Abschätzung von Humuswirkungen (Humusbilanz, C-Sequestrierung) werden diese organischen Dünger und Stickstoffzufuhren (N_2 -Fixierung) über entsprechende Nährstoffbilanzpara-

meter, Emissionsfaktoren und Humusreproduktionskoeffizienten in die Bilanzen einbezogen.

Bei stickstoffhaltigen Mineraldüngern sind die Herkunft und die Produktionstechnologie von entscheidender Bedeutung für die Bilanzierung der erzeugten Biomasse. Je nach Stickstoffform (N-Form), Düngemittel und Herstellungsprozess variieren der Energieeinsatz und die Treibhausgasemissionen je kg N erheblich. Sind detaillierte Angaben zu den bei der Biomasseerzeugung eingesetzten N-Düngemitteln (z. B. Harnstoff, Kalkammonsalpeter, Mehrnährstoffdünger) verfügbar, sollten die jeweils düngerspezifischen Parameter (Energieäquivalente, Emissionsfaktoren) bei der Bilanzierung verwendet werden. Sind die Herkunft des Mineraldüngers sowie die verwendete Produktionstechnologie nicht bekannt, werden Emissionsfaktoren verwendet, die durchschnittlichen Erzeugungsbedingungen entsprechen. Da die Mineral-N-Erzeugung mit einem hohen Einsatz an üblicherweise fossilen Energieträgern und damit mit erheblichen Emissionen verbunden ist, werden die Energie- und Treibhausgasbilanz sowie Umweltwirkungen (Ammoniak- und Lachgasemissionen in die Atmosphäre, Nitratverluste in Grund- und Oberflächengewässer) der Biomasseerzeugung maßgeblich vom Stickstoffeinsatz und der Stickstoffeffizienz geprägt. Mineralische Phosphor-, Kalium- und Kalzdünger sind im Vergleich zum Stickstoffdünger weniger bedeutsam für die Energieeffizienz, die Treibhausgasemissionen und Umweltwirkungen der landwirtschaftlichen Biomasseerzeugung; sie sind aber ebenfalls in den Bilanzen zu berücksichtigen.

Für die Bilanzierung erfolgen alle Angaben je kg Reinnährstoff. Bei Mehrnährstoffdüngern, wie beispielsweise NPK-Düngemitteln, werden düngerspezifische Parameter verwendet (wenn verfügbar). Stehen diese Werte nicht zur Verfügung, werden Energieäquivalente und Emissionsfaktoren anhand der NPK-Nährstoffgehalte und mittleren Emissionsfaktoren für die Herstellung von N-, P- und K-Düngemitteln abgeleitet. Dies ist nur eine grobe Näherung, da im Produktionsprozess von Mehrnährstoffdüngern mehrere Pfade zu vergleichbaren Produkten, jedoch mit unterschiedlichen Emissionen führen können.

Zudem müssen zusätzliche Umweltwirkungen berücksichtigt werden, die durch den Dünger direkt und indirekt auf der Fläche entstehen, beispielsweise als N_2O -Emissionen. Darüber hinaus wirkt sich die Düngung auf den Bodenkohlenstoffgehalt der Fläche aus (siehe Abschnitt 3.2.4.4).

[A2.4] Kalkung

Dieser Prozess beinhaltet die Bodenkalkung. Während die Kalkung von Wäldern in Bayern im Gegensatz zu anderen Bundesländern sehr kontrovers diskutiert wird, findet eine maschinelle Kalkung landwirtschaftlicher Produktionsflächen regelmäßig statt, um die Boden-pH-Werte in einem für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und die Ertragsbildung optimalen Bereich zu halten. Dennoch kann die Kalkung als ein möglicher Prozess auch in der forstlichen Produktion betrachtet werden. Die Waldkalkung erfolgt heute fast ausschließlich mit Helikoptern aus der Luft.

Hinweis: Bei der Anwendung von kohlensaurerem Kalk können durch die Bodenatmung zusätzlich direkte Umweltwirkungen (CO₂-Flächenemissionen) entstehen.

[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung

Dieser Prozess beinhaltet sowohl den chemischen und biologischen Pflanzenschutz (Insektizid- und Fungizidmaßnahmen bzw. Einsatz von Pflanzenstärkungsmitteln oder Antagonisten) als auch die chemische und mechanische Unkrautregulierung (Herbizidmaßnahmen bzw. Einsatz von Hackstriegele). Der chemische Pflanzenschutz ist vor allem in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion von Bedeutung, um Ertragsausfälle durch Krankheiten und Schädlinge zu vermeiden. Während die chemische Unkrautregulierung häufig im konventionellen Landbau Einsatz findet, wird die Unkrautregulierung im ökologischen Landbau überwiegend mechanisch durchgeführt.

[A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen

Dieser Prozess beinhaltet den Bau und die Instandhaltung (Instandsetzung und Pflege) von Wegen. Der Bau neuer Wege kann vernachlässigt werden, wenn davon auszugehen ist, dass bereits ein ausreichendes Wegenetz vorhanden ist.

Tabelle 3: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [A2] Bestandesführung

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[A2.1] Pflege Pflanzung/ Bestand	Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[V1] Freischneider/ Motorsäge	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	für Kultur-, Jungwuchspflege und selektive Läuterung
[V1] Zugmaschine	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	für die schematische Läuterung
[V1] Anbau- bzw. Anhängegerät	technisches Nutzungspotential Leergewicht	für die schematische Läuterung
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl
[A2.2] Zaunbau	Arbeitszeitbedarf	inklusive Kontrolle und Abbau
[L1]/ [L2] Außer- und innerbetrieblicher Transport	Transportdistanz Bedarf und Art des Transportmittels Kraftstoffverbrauch	Anlieferung Zaunmaterial
[V8] Zaunmaterial	Masse	
[A2.3] Düngung	Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[L1]/ [L2] Außer- und innerbetrieblicher Transport	Transportdistanz Bedarf und Art des Transportmittels Kraftstoffverbrauch	Anlieferung Mineraldünger
[V1] Zugmaschine	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	
[V1] Anbau- bzw. Anhängegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V6] Mineral- und Wirtschaftsdünger	Düngerart und -form nährstoffspezifische Masse	bei Wirtschaftsdünger auch Herkunft
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl
[A2.4] Kalkung	Anzahl der Maßnahmen Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf Flächenemissionen durch Kalk	
[L1]/ [L2] Außer- und innerbetrieblicher Transport	Transportdistanz Bedarf und Art des Transportmittels Kraftstoffverbrauch	Anlieferung Kalkdünger
[V1] Maschine	Art der Maschine Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	je nach Art der Maßnahme (Helikopter oder Zugmaschine)
[V1] Anbau- bzw. Anhängegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V6] Kalkdünger	Art und Masse	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl
[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung	Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[L1]/ [L2] Außer- und innerbetrieblicher Transport	Transportdistanz Bedarf und Art des Transportmittels Kraftstoffverbrauch	Anlieferung Pflanzenschutzmittel
[V1] Zugmaschine	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	
[V1] Anbau- bzw. Anhängegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	z. B. Pflanzenschutzspritze, Hackstriegel
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V6] Pflanzenschutzmittel	wirkstoffspezifische Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen	Anzahl der Maßnahmen Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[L1]/ [L2] Außer- und innerbetrieblicher Transport	Transportdistanz Art des Transportmittels Kraftstoffverbrauch	Anlieferung Wegebauaterial
[V1] Baumaschine	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	für Instandsetzung
[V1] Zugmaschine	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	für die Wegepflege i. d. R. ein Traktor
[V1] Wegepflegegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Stück	z. B. Schmieröl
[V8] Verbrauchsmaterial	Art des Materials Masse, Volumen	z. B. Schotter oder Kies

3.2.4.3 [A3] Ernte

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet Maßnahmen, die für die Ernte und die Bereitstellung (Vorliefern) von Biomasse zum Feldrand bzw. zur Waldstraße notwendig sind. Zudem werden mögliche Aufarbeitungsprozesse nach der Ernte, die an der Fläche stattfinden, sowie das Beladen der Biomasse auf Transportmittel (Lkw bzw. Traktor mit Anhänger) am Feldrand bzw. an der Waldstraße erfasst. Das Aufbereiten von Biomasse, z. B. das Hacken zur Erzeugung von Holzhackschnitzeln, ist jedoch nicht in Prozessgruppe [A] enthalten. Dieser Prozess ist Bestandteil von Prozessgruppe [B] Transformation, auch wenn das Hacken sehr häufig an der Waldstraße realisiert wird. Prozess-Untergruppe [A3] kann in die Prozesse [A3.1] Ernte Biomasse, [A3.2] Vorliefern zur Straße [A3.3] Aufarbeitungsprozesse nach Ernte und [A3.4] Aufladen auf Lkw/Traktor unterteilt werden. In Tabelle 4 sind wichtige Bilanzkenngrößen für die einzelnen Prozesse aufgeführt.

[A3.1] Ernte Biomasse

Dieser Prozess umfasst die Maßnahmen der Biomasseernte. Diese kann einmalig (z. B. Mähdrusch, Häckseln von Silomais) oder mehrmalig (z. B. mehrere Holzernten über eine Umtriebszeit oder Mähen von Grünland) erfolgen. Aufarbeitungsprozesse nach der Ernte werden gesondert erfasst (siehe [A3.3]).

[A3.2] Vorliefern zur Straße

Dieser Prozess umfasst die Maßnahmen zum Vorliefern der geernteten Biomasse zum Feldrand bzw. zur Waldstraße nach der Ernte. In der Landwirtschaft erfolgt der Transport des Ernteprodukts zum Feldrand teilweise mit der Erntemaschine selbst (z. B. beim Abbunkern des Mähdeschers). Ausnahme sind z. B. der Transport von Heu-, Stroh- oder Silageballen). Für das Vorliefern von Scheitholzrollen per Hand sind Umweltwirkungen zu vernachlässigen, die anfallenden Kosten aufgrund der aufzuwendenden Arbeitszeit sind aber zu bilanzieren.

[A3.3] Aufarbeitungsprozesse nach Ernte

Dieser Prozess umfasst land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen, die im Anschluss an die Biomasseernte zusätzlich notwendig sein können. Im Bereich der Landwirtschaft ist z. B. das Wenden, Schwaden und Pressen von Heu, Stroh oder Anwelksilage zu nennen. In der Forstwirtschaft stellen die Entrindung von Holz im Wald, die Nasslagerung von Holz oder die Behandlung von Poltern mit Schutzmitteln typische Beispiele dar.

[A3.4] Aufladen auf Lkw/Traktor

Dieser Prozess beschreibt das Aufladen der Biomasse am Feldrand bzw. an der Waldstraße oder direkt nach der Ernte und dem Vorliefern. Ähnlich wie bei Prozess [A3.2] erfolgt dieser Prozess im Bereich der Landwirtschaft teilweise mit der Erntemaschine selbst (z. B. Mähdescher oder Feldhäcksler). Beim Verladen am Feldrand lagernder Hackfrüchte (z. B. Zuckerrüben oder Kartoffeln) oder von Pressgut (Heu-, Stroh- und Silageballen) auf einen Lkw oder Anhänger werden jedoch spezielle Verlademaschine (z. B. Teleskop- oder Reinigungslader) eingesetzt. Im Bereich der Forstwirtschaft treten generell zwei unterschiedliche Verladesysteme auf. Beim Transport von Rundholz (Stammholz, Industrieholz) mit einem Lkw erfolgt das Aufladen durch einen Kran am Lkw. Beim Transport von Energieholz (z. B. Scheitholz) kommt zumeist ein Traktor mit Anhänger zum Einsatz. Die Beladung erfolgt zumeist per Hand. Für das Aufladen selbst werden keine Umweltwirkungen bilanziert, allerdings entstehen aufgrund des benötigten Personalaufwands Kosten, die in der ökonomischen Bilanzierung berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 4: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [A3] Ernte

Prozess	Bilanzkenngroße	Erläuterung
[A3.1] Ernte Biomasse	Erntemenge Anzahl der Maßnahmen Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[V1] Maschine	Art der Maschine Leergewicht Maschinenzeit Produktivität der Maschine technisches Nutzungspotential	im Forst: Motorsäge oder Harvester
[V1] Anbau- bzw. Anhängegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	
[A3.2] Vorliefern zur Straße	Erntemenge Anzahl der Maßnahmen Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[V1] Maschine	Art der Maschine Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential	z. B. Forstspezial- schlepper oder Forwarder
[V1] Anhänger	Leergewicht technisches Nutzungspotential	bei Bringung mit Forwarder
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl
[A3.3] Aufarbeitungspro- zesse nach Ernte	Erntemenge Anzahl der Maßnahmen Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[V1] Zugmaschine	Leergewicht Maschinezeit technisches Nutzungspotential	
[V1] Anhängegerät	Leergewicht technisches Nutzungspotential	z. B. Heu- oder Strohpresse
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl oder Bindegarn

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[A3.4] Aufladen auf Lkw/ Traktor	Erntemenge Anzahl der Maßnahmen Kraftstoffverbrauch Arbeitszeitbedarf	
[V1] Maschine	Art der Maschine Ladekapazität Leergewicht technisches Nutzungspotential	Sattelaufleger, Gliederzug und Langholzzug mit Kran
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Schmieröl

3.2.4.4 [A4] Nicht-zuordenbar

In dieser Prozess-Untergruppe werden alle Umweltwirkungen und Kosten (z. B. der Flächenkosten) beschrieben, die mit der Bewirtschaftung der Produktionsfläche zusammenhängen, jedoch nicht eindeutig den Prozessen in [A1] bis [A3] zugeordnet werden können.

Im Prozess [A4.1] werden Kohlenstoffänderungen im Boden durch veränderte Bewirtschaftungsformen erfasst, die im Verlauf eines Bezugszeitraums auftreten können (z. B. Kohlenstoffspeichereffekte (C-Sequestrierung) oder Kohlenstoffsenkleistungen durch den Aufbau von Biomasse im Wald). Zur Humusbilanzierung ackerbaulicher Produktionssysteme wird die aktualisierte VDLUFA-Methode [24] empfohlen. Mit dieser Methode sind Wirkungen der Fruchtarten und Fruchtfolgen sowie der Menge und Qualität (Humusreproduktionsleistung) organischer Dünger auf die Humusversorgung der Böden quantifizierbar.

Im Prozess [A4.2] werden N₂O-Feldemissionen aus der Landwirtschaft infolge von Mineral- und Wirtschaftsdüngung sowie aus Ernte-Wurzel-Rückständen mit den Methoden und Daten des Thünen-Instituts [74] erfasst.

Andere Feldemissionen sowie die Unterbringung von Personal werden in den Prozessen [A4.3] bzw. [A4.4] berücksichtigt.

3.2.4.5 [A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen

Neben Primärrohstoffen (land- und forstwirtschaftliche Biomasse) werden auch oft Kop-
pelprodukte (z. B. Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung, Industrierestholz aus Sägeprozessen) oder Abfälle (z. B. Altholz) aus vorgelagerten Systemen als Rohstoffe für das untersuchte Produktsystem verwendet. Diese Rohstoffe können aus unterschiedlichsten Systemen stammen, denen unter Umständen sehr komplexe Prozessketten zugrunde liegen. So muss beispielsweise für die Ökobilanzierung von Industrierestholz die gesamte Bereitstellungskette von Schnittholz bilanziert werden, um die Umweltwirkungen von Industrierestholz (z. B. Sägespäne zur Herstellung von Holzpellets) auszuweisen. In

Ökobilanzen werden diese Rohstoffe daher oft vereinfachend mit null bewertet. Im Folgenden werden am Beispiel von Wirtschaftsdünger bzw. Gärresten sowie Industrierestholz Empfehlungen ausgesprochen, ob bzw. wie diesen Rohstoffen grundsätzlich Umweltwirkungen und Kosten zugeordnet werden sollten. Die Zuordnung von Umweltwirkungen und Kosten für die Nutzung von Abfällen als Sekundärrohstoffe (z. B. Altholz) ist den Empfehlungen aus der Beschreibung der Prozessgruppe [E] Abfallbewirtschaftung zu entnehmen (Abschnitt 3.6).

Bereitstellung von Wirtschaftsdünger

Als Koppelprodukt der Tierhaltung werden Wirtschaftsdünger wie Jauche, Gülle oder Stalldung entweder zur Düngung im Acker- und Pflanzenbau oder als Gärsubstrate in der Biogasproduktion eingesetzt. Ferner werden Gärreste als Koppelprodukt der Biogasproduktion ebenfalls überwiegend zur Düngung im Acker- und Pflanzenbau verwendet.

Bei der ökologischen und ökonomischen Bewertung von Wirtschaftsdüngern und Gärresten wird empfohlen, diesen keine Umweltwirkungen und keine Kosten des Produktionsprozesses anzurechnen, solange diese Koppelprodukte im eigenen Betrieb verbleiben. Für solch eine Bewertung von Wirtschaftsdüngern bzw. Gärresten spricht, dass die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern im eigenen Pflanzenbau eine innerbetriebliche Verwertung darstellt.

Werden jedoch Wirtschaftsdünger bzw. Gärreste aus anderen Landwirtschaftsbetrieben zugekauft oder in andere Betriebe verkauft, so sind die darin enthaltenen Nährstoffmengen festzustellen und mit einem Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) zu bewerten. Da Wirtschaftsdünger bzw. Gärreste in ihrer stofflichen Zusammensetzung und auch im Herstellungsprozess stark variieren, ist eine pauschale Festlegung von Energieäquivalenten und Emissionsfaktoren nicht gerechtfertigt. Daher werden Wirtschaftsdünger bzw. Gärreste nach dem Mineralstoffgehalt (NPK), der Nährstoffwirkung im Vergleich zu Mineraldüngemitteln (Mineraldüngeräquivalent, MDÄ) sowie der zur Herstellung der wirksamen Nährstoffe notwendigen Energie bewertet (= Substitutionswert).

Das Mineraldüngeräquivalent gibt die Nährstoffwirkung eines Wirtschaftsdüngers im Vergleich zu Mineraldüngemitteln an. Näherungsweise entspricht der Anteil des Ammonium-N am Gesamt-N-Gehalt der Wirtschaftsdünger dem ertragswirksamen Stickstoff (z. B. 20 % in Stalldung, 50–60 % in Gülle und bis zu 70 % in Gärresten). Bei einem Ammonium-N-Anteil von 50 % am Gesamt-N kann von einem MDÄ von 50 ausgegangen werden. Für P und K wird ein MDÄ von 100 angenommen.

Die Methode der Mineraldüngeräquivalente gilt auch bei der ökonomischen Bewertung von Wirtschaftsdüngern. Als Nährstoffpreise für NPK sollten Reinnährstoffpreise angesetzt werden.

Bereitstellung von Industrierestholz

Der Prozess beschreibt die Bereitstellung von Rohstoffen, die aus einem vorgelagerten, Nicht-Bioenergiesystem stammen (z. B. Produktion von Schnittholz oder Holzwerkstoffen). In diesen Prozessen fallen oft Koppelprodukte in Form von Sägespänen oder Ähnlichem an, die als Ausgangsmaterial und somit als Sekundärrohstoffe für ein nachgelagertes Bioenergiesystem dienen können (z. B. bei der Wärmebereitstellung aus Pellets). Aufwendungen, die mit der Produktion dieser Rohstoffe in Verbindung stehen, sollten in angemessenem Umfang für die Berechnungen der Umweltwirkungen und Kosten des Bioenergiesystems einbezogen werden. Da jedoch nicht die vollen Lasten aus der Produktion von Schnittholz auf das Bioenergiesystem umgelegt werden sollten, müssen die bei der Produktion angefallenen Umweltwirkungen per Allokation auf die Haupt- und Koppelprodukte (Schnittholz bzw. Sägespäne) alloziert werden. Hierfür kann sowohl die Massenallokation als auch die ökonomische Allokation angewendet werden.

Wenn die Allokation der Umweltlasten auf Haupt- und Koppelprodukt stets reproduzierbar und einfach nachvollziehbar sein soll, sollte die Massenallokation zum Einsatz kommen. Die Allokationsparameter bei der Massenallokation sind statisch, basieren also auf physikalischen Eigenschaften (im Gegensatz zu dynamischen Parametern, wie z. B. Marktpreisen), was zu einer stets einheitlichen Allokation (bei Wahl gleicher Allokationsparameter) der Umweltlasten führt. Allerdings vereinheitlicht diese Form der Allokation auch die Umweltwirkungen aller Produkte und negiert etwaige produktspezifische Vor- und Nachteile (physikalisch-technische Eigenschaften sowie Brennstoffcharakteristika unterschiedlicher Baumarten, Marktpreise).

Im Falle der Allokation nach Marktpreis (ökonomische Allokation) unterliegen die Allokationsfaktoren einer Veränderlichkeit, die durch vorhandene Marktpreisschwankungen begründet sind. Infolgedessen können durch Preisschwankungen andere Aufteilungen der Umweltwirkungen auf das Haupt- und Koppelprodukt resultieren. Daher sollten bei der ökonomischen Allokation stets die verwendeten Marktpreise sowie deren Abrufdatum dokumentiert werden.

Um einen adäquaten Bezug zwischen Haupt- und Koppelprodukten herzustellen, wird empfohlen, eine ökonomische Allokation der Umweltwirkungen anzuwenden.

Bei der ökonomischen Bewertung werden die Erlöse von Koppelprodukten den Produktionskosten des Hauptproduktes gegengerechnet. Die Erlöse werden mit tatsächlichen oder angenommenen Marktpreisen ermittelt.

3.3 Prozessgruppe [B] Transformation

Diese Prozessgruppe beinhaltet Maßnahmen, die notwendig sind, um die Biomasse in einen Bioenergieträger, wie z. B. Biokraft- bzw. Biobrennstoff, oder ein biobasiertes Produkt, wie z. B. Holztisch oder Bioschmierstoff, umzuwandeln.

3.3.1 Systemgrenzen

Die Prozessgruppe [B] Transformation beginnt mit der Lagerung der Biomasse am Ort der Transformation oder an einer anderen Lagerstätte [B1]. Sie beschäftigt sich weiter mit sämtlichen Prozessen, die zur eigentlichen Transformation nötig sind. Dazu zählen Vorbehandlungsschritte [B2] wie z. B. Trocknung oder Zerkleinerung. Die Bereitstellung inkl. Lagerung des fertigen Bioenergieträgers bzw. des fertigen biobasierten Produkts am Ort der Transformation oder an dessen Hoftor stellt das Ende dieser Prozessgruppe dar.

3.3.2 Funktionelle Einheit

Die Prozessgruppe [B] Transformation lässt sich durch eine Vielzahl verschiedener produktspezifischer funktioneller Einheiten darstellen. Gängig sind in diesem Zusammenhang masse-, volumen- oder energiebezogene Einheiten. Zum Zweck der Vergleichbarkeit verschiedener Bioenergieträger bietet sich die Verwendung energiebezogener funktioneller Einheiten an. Bewährt hat sich hierbei der Energiegehalt des Brennstoffs bezogen auf den Heizwert H_i (z. B. in MJ kg^{-1} Bioenergieträger). Für den Vergleich biobasierter Produkte empfiehlt sich die Verwendung masse-, volumen- oder mengenbezogener Einheiten. Diese Einheiten können auch für die Bewertung von Bioenergieträgern herangezogen werden. Hierbei sollte der Brennstoff mit zusätzlichen Angaben (z. B. Wassergehalt, Raumdichte) weiter spezifiziert werden. Grundsätzlich findet in der Prozessgruppe [B] die Transformation der Biomasse – mit Masse- oder Volumenbezug – zum Bioenergieträger oder zum biobasierten Produkt statt (z. B.: Wieviel Liter Rapsöl können aus einem Kilogramm Rapssaat gewonnen werden?). Am Ende eines Produktsystems sollte als Hinleitung zur Konversion [C] allerdings der Energiegehalt des Bioenergieträgers stehen. Bei einem biobasierten Produkt sollte der Massenbezug (z. B. kg Bio-Schmierstoffe) unter Berücksichtigung weiterer Spezifikationen (z. B. Dichte) als Überleitung zur Nutzung [D] bestehen bleiben.

3.3.3 Allokation

Im Prozess [B3] können verschiedene Koppelprodukte anfallen, wie z. B. Rapspresskuchen bei der Rapsölproduktion oder Gärreste bei der Biogaserzeugung. Im Sägewerk fällt neben dem Schnittholz Industrierestholz an.

Diese Koppelprodukte können mithilfe unterschiedlicher Vorgehensweisen (vgl. hierzu Abschnitt 2.2.4) bewertet werden, die nachfolgend exemplarisch ausgeführt werden.

Für die Bilanzierung von Biokraftstoffen schreiben die Richtlinie 2009/28/EG [28] sowie die Biokraft-NachV [5] die Allokation der Input- und Outputflüsse nach dem Heizwert ordnungspolitisch vor. Diese Allokation lässt sich nach Formel (2.1) berechnen.

Allerdings wird die Methode der heizwertbasierten Allokation in der Praxis häufig hinterfragt, da bei der Biokraftstoffproduktion entstehende Koppelprodukte als Eiweißfuttermittel Verwendung finden und durch eine heizwertbezogene Allokation nicht korrekt abgebildet werden können. Aus diesem Grund wird hier eine zusätzliche Auswertung der Er-

gebnisse nach der Methode der Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschriften empfohlen. Hierfür ist das nutzbare Rohprotein (nXP) des Koppelprodukts und des substituierten Futtermittels zu berücksichtigen. Rapspresskuchen aus dezentraler Ölgewinnung hat beispielsweise ein nutzbares Rohprotein von 208 kg t^{-1} Trockenmasse. Sojaextraktionsschrot dagegen weist ein verfügbares Rohprotein von 319 kg t^{-1} Trockenmasse auf [71]. Folglich kann durch $1,53 \text{ kg}$ Rapspresskuchen aus dezentraler Ölgewinnung 1 kg Sojaextraktionsschrot substituiert werden. Die Aufwendungen, die mit der Bereitstellung von 1 kg Sojaextraktionsschrot entstehen, können je $1,53 \text{ kg}$ Rapspresskuchen dem Produktsystem der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion gutgeschrieben werden. Allerdings ist in der praktischen Tierernährung zu beachten, dass die Substitution von Futtermitteln durch weitere qualitative Parameter (z. B. Ölgehalt oder Proteinqualität bzw. Aminosäurezusammensetzung) eingeschränkt sein kann.

Bei der ökonomischen Bewertung werden die Erlöse für das Koppelprodukt generell den Produktionskosten des Hauptprodukts gegengerechnet.

3.3.4 Beschreibung der einzelnen Prozesse

Im Folgenden werden die betrachteten Prozesse für die Transformation der Biomasse beschrieben.

3.3.4.1 [B1] Lagerung

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet die Vorgänge [B1.1] Biomasselagerung (vor der Transformation), [B1.2] Produktlagerung (nach der Transformation), [B1.3] Ent- und Beladung sowie [B1.4] Verpacken. In Tabelle 5 sind die wesentlichen Kenngrößen für die Bilanzierung der nachfolgend beschriebenen Prozesse aufgeführt.

[B1.1] Biomasselagerung

Nach der Ernte ist eine Lagerung der Biomasse erforderlich, um die Zeitspanne zwischen dem Anfall der Biomasse (z. B. Ernte) und der Nutzung zu überbrücken. Dadurch kann eine kontinuierliche Versorgung der nachfolgenden Umwandlungsschritte sichergestellt werden. Die Biomasse kann sowohl am Ort der Biomasseernte (am Feldrand, an der Waldstraße) als auch an einer anderen Lagerstätte zwischengelagert werden. Die abschließende Lagerung findet dann am Ort der Transformation statt. Dabei kann die Lagerung mit oder ohne Konditionierung der Biomasse (z. B. Regulierung des Wassergehalts) erfolgen. Die Lagerung mit Konditionierung ist in der Regel mit einem zusätzlichen Aufwand an Prozessenergien (z. B. für Lüftungsaggregate) oder Betriebsstoffen verbunden. Generell sind bei der Lagerung auftretende Masseverluste zu berücksichtigen. Im Falle einer Konservierung (z. B. bei der Silierung von Silomais) muss neben den eigentlichen Lagerverlusten auch der mit der Silierung verbundene Trockenmasse-Abbau berücksichtigt werden. Weiterhin können bei Lagerungsprozessen innerbetriebliche Transporte erforderlich sein (z. B. zur Umschichtung).

Je nach anfallendem Erntegut werden unterschiedliche Lagertypen verwendet (Lagerhallen, Flachsilo, Hochsilo, Fahrsilo etc.). Anfallende Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung werden beispielsweise in Güllegruben oder auf Gülleplatten zwischengelagert. Die einzelnen Lagertypen für land- und forstwirtschaftliche Biomasse sowie Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung müssen vor der Nutzung errichtet und je nach Nutzungsdauer auf mehrere Jahre abgeschrieben werden.

[B1.2] Produktlagerung

Zur Produktlagerung zählt auch die Zwischenproduktlagerung, die vor allem bei komplexeren Transformationsprozessen anfällt. Bei der Biodiesel- oder Bioethanolproduktion ist es für einen kontinuierlichen Betriebsablauf erforderlich, Zwischenprodukte (z. B. Rapsöl) vor der Weiterverarbeitung (z. B. Umesterung) zwischenzulagern.

[B1.3] Ent- und Beladung

Ladevorgänge geschehen meist unter Einsatz entsprechender Lademaschinen. In der Land- und Forstwirtschaft kommen dazu Maschinen, wie z. B. Frontlader, Radlader oder Teleskoplader zum Einsatz. Weiterhin können Ladevorgänge mit innerbetrieblichen Fahrten verbunden sein (z. B. mit einem Radlader).

[B1.4] Verpacken

Bestimmte Bioenergieträger sowie biobasierte Produkte werden für den Transport zur Konversion oder Nutzung verpackt (z. B. in Bigbags, Fässern, Folie). Hierbei können neben dem eigentlichen Verpackungsprozess auch innerbetriebliche Fahrten mit mobilen Ladegerätschaften (z. B. mit einem Radlader) erforderlich sein.

Tabelle 5: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [B1] Lagerung

Prozess	Bilanzkenngroße	Erläuterung
[B1.1] Biomasselagerung	Lagerverluste Arbeitszeitbedarf	
[V1] Maschinen, Geräte und Aggregate	Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Gebläse
[V1] Behälter	Nutzungsdauer Lagervolumen	
[V2] Lagerhalle, Siloanlagen	Nutzungsdauer Lagerfläche, -volumen	

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[V5] Energieeinsatz	Strom, Wärme	für Förderbänder, Pumpen, Gebläse etc.
[V8] Betriebsstoffe	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Silierhilfsmittel bei zusätzlicher Konditionierung
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	für Transportfahrzeug
[B1.2] Produktlagerung	Lagerverluste Arbeitszeitbedarf	
[V1] Maschinen, Geräte und Aggregate	Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Gebläse
[V1] Behälter	Nutzungsdauer Lagervolumen	
[V2] Lagerhalle, Siloanlagen	Nutzungsdauer Lagerfläche, -volumen	
[V5] Energieeinsatz	Strom, Wärme	für Förderbänder, Pumpen, Gebläse etc.
[V8] Betriebsstoffe	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Silierhilfsmittel bei zusätzlicher Konditionierung
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	für Transportfahrzeug
[B1.3] Ent- und Beladung	Arbeitszeitbedarf	
[V1] Ladegerätschaft	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Radlader
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	z. B. für Radlader
[V5] Energieeinsatz	Strom	z. B. Schnecke, Pumpe
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	für Transportfahrzeug
[B1.4] Verpacken	Arbeitszeitbedarf	
[V1] Maschinen, Geräte und Aggregate	Nutzungsdauer Leergewicht	
[V5] Energieeinsatz	Strom	
[V8] Verpackungsmaterial		z. B. Folie, Bigbag
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	für Transportfahrzeug

3.3.4.2 [B2] Vorbehandlung

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet alle Vorgänge, die zur Vorbereitung der Biomasse vor der eigentlichen Transformation dienen. Dazu zählen [B2.1] Reinigung, [B2.2] Zerkleinerung und [B2.3] Trocknung der Biomasse. Die wesentlichen Bilanzkenngrößen der beschriebenen Prozesse sind in Tabelle 6 aufgeführt.

[B2.1] Reinigung

Dieser Prozess beinhaltet Aufwendungen zur Reinigung der Biomasse inklusive der dabei auftretenden Masseverluste. In der Landwirtschaft finden diese beispielsweise bei der Reinigung von Getreide vom Unkrautbesatz oder Abrieb (z. B. Spelzen) sowie dem Waschen von Rüben für die Biogasproduktion statt.

[B2.2] Zerkleinerung

Durch den Prozess Zerkleinerung wird die physische Reduktion der Teilchengrößen unter Berücksichtigung von Masseverlusten beschrieben. Dies geschieht in der Forstwirtschaft im Allgemeinen unter Einsatz spezieller Geräte, wie z. B. Hackern, dieselbetriebenen oder elektrisch betriebenen Keil- und Spiralkegelspalter für die Zerkleinerung von Scheitholz oder kombinierten Säge-Spaltmaschinen. Bei der Bilanzierung von Keil- und Spiralkegelspalter muss außerdem das Ablängen des Energieholzes in ofengängige Stücke mit Motorsäge integriert werden. Bei der Zerkleinerung kann es zu innerbetrieblichen Fahrten mit mobilen Ladegeräten kommen (z. B. Radlader).

Sofern die Zerkleinerung der landwirtschaftlichen Biomasse nicht direkt beim Erntevorgang erfolgt (z. B. durch einen Feldhäcksler bei der Ernte von Ganzpflanzensilage oder bei der Ernte von Silomais), kann eine Zerkleinerung der Biomasse zu einem späteren Zeitpunkt erforderlich sein. Dies trifft beispielsweise auf die Zuckerrübe zu, die entweder zur Ethanolgewinnung oder für die Biogaserzeugung eingesetzt werden kann.

[B2.3] Trocknung

Der Prozess der Trocknung umfasst Aufwendungen und Effekte, die durch die Reduktion des Wassergehalts der Biomasse entstehen. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen der technischen Trocknung, also der Trocknung unter Zuhilfenahme technischer Verfahren (z. B. Getreidetrocknungsanlagen), und der natürlichen Trocknung ohne technische Hilfe (z. B. Lufttrocknung von Scheitholz). Die natürliche Trocknung der Biomasse erfolgt meist durch natürliche Konvektion oder durch die Selbsterwärmung der Biomasse [48]. Bei der technischen Trocknung muss zwischen Belüftungstrocknung und Warmlufttrocknung unterschieden werden. Bei der Belüftungstrocknung wird mithilfe von Gebläsen nicht oder gering vorgewärmte Außenluft in die Trocknungskammer geblasen. Im Gegensatz zur Belüftungstrocknung wird bei der Warmlufttrocknung die Außenluft unter Einsatz von Energie vorgewärmt. Somit ergeben sich kürzere Trocknungszeiten.

Tabelle 6: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [B2] Vorbehandlung

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[B2.1] Reinigung	Reinigungsverluste Energiebedarf Arbeitszeitbedarf	
[V1] Maschinen, Geräte, Aggregate	Durchsatz Leergewicht Nutzungsdauer Maschinenzeit	Siebmaschinen
[V5] Prozess- und Hilfsenergie	Strom, Wärme	
[V8] Betriebsstoffe	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Wasser
[B2.2] Zerkleinerung	Zerkleinerungsverluste Energiebedarf Arbeitszeitbedarf	z. B. Abrieb, Staub
[V1] Maschinen, Geräte, Aggregate	Durchsatz Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	

Prozess	Bilanzkenngroße	Erläuterung
[V5] Prozess- und Hilfsenergie	Strom, Wärme	
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	für Transportfahrzeug
[B2.3] Trocknung	Trockenverluste Energiebedarf	bei technischer Trocknung
[V1] Maschinen, Geräte, Aggregate	Effizienz Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Gebläse, Lufterhitzer
[V4] Kraft- und Brennstoff	Masse je FE	z. B. Heizöl
[V5] Prozess- und Hilfsenergie	Strom-/Wärmebedarf je FE	

3.3.4.3 [B3] Umwandlung

Diese Prozess-Untergruppe beschreibt die eigentliche Transformation der Biomasse zum Bioenergieträger unter Veränderung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Biomasse mit dem Ziel einer optimalen Anpassung an den anschließenden Konversionsprozess (z. B. Erzeugung von Biogas in der Biogasanlage zur weiteren Konversion im BHKW). Die Prozess-Untergruppe [B3] beinhaltet die Prozesse [B1] Chemische Transformation, [B2] Mechanische Transformation und [B3] Biologische Transformation. Bei komplexeren Umwandlungsprozessen wie bei der Biokraftstoffproduktion kann sich die Umwandlung aus mehreren Prozessschritten zusammensetzen sowie die chemische, die mechanische und die biologische Transformation enthalten. Dabei steht die mechanische Transformation meist am Anfang und die chemische Transformation am Ende der Prozesskette. In Tabelle 7 sind die wesentlichen Kenngrößen für die Bilanzierung der nachfolgend beschriebenen Prozesse aufgeführt.

[B3.1] Chemische Transformation

Alle chemischen Umwandlungsprozesse von Biomasse zum endgültigen Bioenergieträger werden im Prozess [B3.1] chemische Transformation zusammengefasst. Ziel der chemischen Transformation ist die Anpassung der Biomasse an die Anforderungen des nachgeschalteten Konversionsverfahrens durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung. Diese Prozessuntergruppe tritt insbesondere bei der Biokraftstoffproduktion auf. Beispiele hierfür sind die Extraktions- und Raffinationsprozesse bei der industriellen

Ölgewinnung, die Umesterung bei der Biodieselproduktion, die Destillation, Rektifikation und Absolutierung bei der Bioethanolproduktion sowie die Fischer-Tropsch-Synthese bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe.

[B3.2] Mechanische Transformation

Dieser Prozess beinhaltet mechanische Umwandlungsprozesse von Biomasse zum Bioenergieträger mit dem Ziel, die Biomasse an die Anforderungen des Konversionsverfahrens bzw. eines weiteren Transformationsverfahrens (z. B. chemische Transformation) anzupassen. Es handelt sich meist um eine Veränderung der Grobstruktur der Biomasse, um ein Höchstmaß an Homogenität des Bioenergieträgers bezüglich seiner mechanischen und physikalischen Eigenschaften zu erreichen.

Die mechanische Transformation von Holz erfolgt z. B. zur Bereitstellung von Holzpellets. Die mechanische Transformation landwirtschaftlicher Biomasse findet beispielsweise bei der Ölgewinnung Anwendung, wobei bei der industriellen Ölgewinnung der mechanischen Transformation (der Ölsaatenpressung) eine chemische Transformation (Extraktion) nachgeschaltet wird (vgl. [B3.1]).

Neben der eigentlichen mechanischen Transformation können innerbetriebliche Fahrten mit mobilen Ladegeräten erforderlich sein.

[B3.3] Biologische Transformation

Dieser Prozess beinhaltet alle biologischen Umwandlungsprozesse von Biomasse zum Bioenergieträger. Hierbei wird die Struktur der Biomasse durch biologische und chemische Prozesse an die Anforderungen des Konversionsverfahrens oder an ein weiteres Transformationsverfahren (z. B. chemische Transformation) angepasst.

Die biologische Transformation landwirtschaftlicher Biomasse tritt beispielsweise bei der Biogasgewinnung (anaerobe Fermentation) oder bei der Bioethanolproduktion (alkoholische Gärung) auf.

Auch hier können neben der eigentlichen biologischen Transformation innerbetriebliche Transporte erforderlich sein.

Tabelle 7: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [B3] Umwandlung

Prozess	Bilanzkenngroße	Erläuterung
[B3.1] Chemische Transformation	Arbeitszeitbedarf Umwandlungskenngrößen Umwandlungsverluste	z. B. Biodieselausbeute je Input z. B. Verdampfung
[V1] Maschinen, Geräte, Aggregate	Durchsatz Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Pumpen
[V1] Reaktionsbehälter	Materialzusammensetzung technisches Nutzungspotential Volumen	z. B. Destillationskollonne
[V2] Bauliche Anlage	Fläche Nutzungszeitraum	z. B. Ethanolwerk
[V5] Prozess- und Hilfsenergie	Strom, Wärme, Heißdampf	
[V8] Betriebsstoffe	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Katalysatoren
[B3.2] Mechanische Transformation	Arbeitszeitbedarf Umwandlungskenngrößen Umwandlungsverluste	z. B. Ölausbeute je Input z. B. Abrieb, Verdampfung
[V1] Maschinen, Geräte, Aggregate	Durchsatz Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Ölpresse oder Pelletpresse
[V2] Bauliche Anlage	Fläche Nutzungszeitraum	z. B. Ölmühle, Sägewerk
[V5] Prozess- und Hilfsenergie	Strom, Wärme	
[V8] Betriebsstoffe	Masse, Volumen, Anzahl	z. B. Bindemittel
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	für Transportfahrzeug
[B3.3] Biologische Umwandlung	Arbeitszeitbedarf Umwandlungskenngrößen Umwandlungsverluste	z. B. Biogasausbeute je Input z. B. Methanverluste

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[V1] Maschinen, Geräte, Aggregate	Durchsatz Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Rührwerk, Pumpen, Gasfackel
[V1] Reaktionsbehälter	Materialzusammensetzung Fassungsvolumen Nutzungsdauer	z. B. Gärbehälter (Fermenter)
[V2] Bauliche Anlagen	Fassungsvolumen Nutzungsdauer	z. B. Fahrsilo
[V5] Prozess- und Hilfsenergie	Strom, Wärme	
[V8] Betriebsstoffe	Masse, Anzahl	z. B. Gärhilfsmittel
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	für Transportfahrzeug
[L2] Ladegerät	Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential Kraftstoffverbrauch	z. B. Rad- oder Frontlader

3.4 Prozessgruppe [C] Konversion

Diese Prozessgruppe beinhaltet Maßnahmen, die zur Umwandlung des Bioenergieträgers in Endenergie, wie z. B. Strom, Fernwärme oder Nutzenergie wie Raumwärme dienen. Dazu zählen [C1] Stromerzeugung, [C2] Wärmeerzeugung und [C3] Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung sowie [C5] Abgasreinigung. Weiterhin wird die Kraftstoffnutzung zur Bereitstellung von Antriebsenergie (z. B. für Mobilität) [C4] betrachtet.

3.4.1 Systemgrenzen

Das System [C] Konversion beginnt mit der Übernahme des Bioenergieträgers am Ort der Konversion. Es beinhaltet sämtliche Prozesse, die zur Umwandlung des Bioenergieträgers in Energie nötig sind, und endet mit der Bereitstellung von End- oder Nutzenergie (je nach Produkt) bzw. Antriebsenergie (z. B. für Mobilität) (siehe Abbildung 1).

3.4.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit des Konversionssystems soll analog zur DIN EN ISO 14044 (2006) den quantifizierten Nutzen des Produktsystems darstellen, welcher im Fall von Bioenergiesystemen die Bereitstellung von End- oder Nutzenergie ist. Für Strom und Wärme bieten sich daher die funktionellen Einheiten 1 MJ erzeugter Strom und 1 MJ bereitgestellte Wärme (außer Fernwärme) an. Bei der kombinierten Strom- und Wärme-erzeugung [C3] muss die funktionelle Einheit sowohl die Produktion von Strom als auch von Wärme widerspiegeln. Beispielsweise können je 1 MJ elektrischer Energie 1,5 MJ thermische Energie generiert werden. Die funktionelle Einheit wäre dann mit 1 MJ elektrische Energie + 1,5 MJ thermische Energie anzugeben.

Im allgemeinen Sprachgebrauch – von Energieversorgungsunternehmen, an der Börse und auch in Gesetzen und Verordnungen – wird allerdings für Strom bzw. Wärme überwiegend die funktionelle Einheit 1 kWh verwendet. Aus diesem Grund sollte sich die ökonomische Bewertung zusätzlich auf diese funktionelle Einheit beziehen.

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie [28] schreibt für die THG-Bilanzierung von Biokraftstoffen die Einheit 1 MJ (Energiegehalt des Kraftstoffs) vor. Deshalb sollte diese Einheit auch für die Kraftstoffnutzung herangezogen werden. Die Einordnung der Bilanzergebnisse zur Kraftstoffproduktion und -nutzung im Vergleich mit anderen Studien, insbesondere bei der ökonomischen Bewertung, kann allerdings die Definition weiterer funktioneller Einheiten erforderlich machen. Hier empfehlen sich die folgenden nutzungsbedingten Einheiten:

- Nutzung im Personenkraftwagen: Beförderungsleistung in Fzg-km (Fahrzeugkilometer),
- Nutzung im Lastkraftwagen: Transportleistung in tkm (Tonnenkilometer),
- Nutzung im Traktor: Arbeitszeit in h.

Diese funktionellen Einheiten sind jedoch um weitere Bezugsgrößen und Informationen zu ergänzen. So sollte bei der Nutzung im Traktor neben der Arbeitszeit in Stunden die Art der Arbeit und der Leistungsbereich des Motors angegeben werden. Der funktionellen Einheit bei der Nutzung im Lastkraftwagen ist das zulässige Gesamtgewicht hinzuzufügen. Bei der Kraftstoffnutzung im Personenkraftwagen sollte die funktionelle Einheit durch Angaben zur verwendeten Kraftstoffart und Größe des Hubraums ergänzt werden.

Hinweis: Die oben genannten nutzungsbedingten Einheiten sind nicht als abschließend und vollständig zu betrachten. Nutzungsbedingte Einheiten für weitere Anwendungsbereiche, wie die Nutzung von Biokraftstoffen im Flugverkehr, bei der Schifffahrt oder zum Antrieb stationärer Land- und Forstmaschinen (z. B. Pumpen von Beregnungsaggregaten, Hacker), sind denkbar und entsprechend zu definieren.

3.4.3 Allokation

Im Falle von KWK, also der kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme muss das Produktsystem entweder die Summe an Produkten (Strom und Wärme) enthalten (= Systemraumerweiterung) oder mittels Allokation auf ein Produkt reduziert werden. Da Strom oder Wärme aus KWK im Technologievergleich oft mit anderen Systemen zur Strom- oder Wärmebereitstellung verglichen werden sollen, bietet sich die Allokation an. Systemraumerweiterungen sind aufgrund unterschiedlicher produzierter Strom- bzw. Wärmemengen verschiedener Systeme für Technologievergleiche eher ungeeignet. Als Bezugsgröße für die Allokation von KWK-Systemen sollte der Exergiegehalt herangezogen werden. Bei der exergetischen Allokation erfolgt die Allokation über den Exergieanteil der Produktströme, wobei die Unterschiede in der thermodynamischen Energiequalität, z. B. zwischen Strom und Wärme oder Wärme mit unterschiedlichen Temperaturniveaus, berücksichtigt werden. Die Berechnung von Exerriefaktoren für die Allokation erfolgt analog zu BRIEM et al. (2004) [4]. Für die Berechnung des Allokationsfaktors des Stroms (AF_{Strom}) kann Formel (3.5) verwendet werden. Der Allokationsfaktor der Wärme ($AF_{Wärme}$) entspricht folglich $(1 - AF_{Strom})$. Mithilfe der generierten Allokationsfaktoren können dann die Inputs und Outputs prozentual den beiden Produkten zugeteilt werden. Für die Berechnung des exergetischen Anteils der Wärme wird eine Temperatur von 288 K empfohlen. Da KWK-Systeme oft ganzjährig in Betrieb sind, bietet sich diese Temperatur eher an als die niedrigere mittlere Außentemperatur während der Heizperiode.

$$AF_{Strom} = \frac{W_{el}}{W_{el} + E_Q} \quad (3.5)$$

mit:

$$E_Q = Q \cdot \left(1 - \frac{T_U}{T_Q}\right) \quad (3.6)$$

$$AF_{Wärme} = 1 - AF_{Strom} \quad (3.7)$$

AF_{Strom} = Allokationsfaktor des Stroms

$AF_{Wärme}$ = Allokationsfaktor der Wärme

W_{el} = Menge an eingespeistem Strom in MJ

E_Q = exergetischer Anteil der Wärme in MJ

Q = Menge an eingespeister Wärme in MJ

T_U = Umgebungstemperatur in K (Referenztemperatur = 288 K)

T_Q = Temperatur der Wärmemenge in K

Folgende Beispielrechnung soll die Vorgehensweise der Berechnung der exergetischen Allokationsfaktoren verdeutlichen.

$$W_{el} = 1 \text{ MJ}; Q = 2 \text{ MJ}$$

$$T_U = 288 \text{ K}; T_Q = 500 \text{ K}$$

Die Berechnung des exergetischen Anteils der Wärme ergibt:

$$E_Q = 2 \text{ MJ} \cdot \left(1 - \frac{288 \text{ K}}{500 \text{ K}}\right) = 0,848 \text{ MJ}$$

Die Berechnung des exergetischen Allokationsfaktors des Stroms ergibt:

$$AF_{Strom} = \frac{1 \text{ MJ}}{1 \text{ MJ} + 0,848 \text{ MJ}} = 0,541$$

Das bedeutet, dass der Anteil der Umweltwirkungen, die dem Produkt Strom zuzuordnen sind, 54,1 % beträgt. Auf die Wärme entfällt somit ein Anteil von 45,9%.

Hinweis: Es darf nur die Wärmemenge zur Berechnung des exergetischen Allokationsfaktors zugrunde gelegt werden, die einer tatsächlichen Nutzung zugeführt wird. Wird ein Teil der generierten Strom- und/oder Wärmemenge innerhalb des untersuchten Produktsystems genutzt (z. B. als Prozesswärme für die Fermenterheizung bei der Biogasproduktion), so muss dieser Anteil ebenfalls von der generierten Energiemenge abgezogen werden. Folglich dürfen zur Berechnung der Allokationsfaktoren nur die Strom- und Wärmemengen herangezogen werden, die einer Nutzung außerhalb des untersuchten Produktsystems zugeführt werden. Dies gilt für die ökonomische Bewertung gleichermaßen.

Weiterhin wird bei der ökonomischen Bewertung entweder der Strom oder die Wärme als Hauptprodukt benannt. Die Erlöse des Koppelprodukts werden den Produktionskosten des Hauptprodukts gegengerechnet.

3.4.4 Beschreibung der einzelnen Prozesse

Im Folgenden werden die betrachteten Prozesse für die Konversion von Bioenergieträgern beschrieben. Eine genaue Auflistung der für die Bilanzierung der Prozessgruppe [C] erforderlichen Bilanzkenngrößen zeigt Tabelle 8.

3.4.4.1 [C1] Stromerzeugung

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet sämtliche Konversionsprozesse des Bioenergieträgers zur Stromerzeugung (elektrische Endenergie in MJ). Dies geschieht unter anderem mithilfe von Dampfturbinen, Blockheizkraftwerken oder Gasmotoren, wobei diese Systeme auch bei zusätzlicher Produktion von Wärme als [C1] Stromerzeugung zu bilanzieren sind, wenn die produzierte Wärme das System nicht verlässt. Als Beispiel wäre hier die Eigennutzung von BHKW-Abwärme für die Fermenterheizung in der Biogasanlage zu nennen.

Für die Bilanzierung der Konversionsprozesse ist der Anteil unterschiedlicher Bioenergieträger am Brennstoffmix eine wichtige Kenngröße. So können z. B. in größeren Heizwerken Waldrestholzhackschnitzel zusammen mit Sägekoppelprodukten verfeuert werden, wobei beide Brennstoffe allein aufgrund unterschiedlicher Wassergehalte unterschiedliche Brennstoffcharakteristika je FE aufweisen, die differenziert zu berücksichtigen sind.

Für die Verwertung/Entsorgung [E] sind der Aschegehalt je FE sowie der Anteil von Grob- und Feinaschen von Bedeutung, wobei der Wassergehalt w (Wasseranteil an der Gesamtmasse) des Bioenergieträgers und dessen Heizwert H_i bei diesem Wassergehalt ebenso Berücksichtigung finden müssen.

Die Bilanzierung benötigt außerdem den Jahresnutzungsgrad der Konversionsanlage. Dieser ist je nach Konversionsanlage spezifisch zu erfassen oder auf Basis von Literaturangaben festzulegen. Von der Verwendung des Kesselwirkungsgrads (= abgeführte Wärmeenergie im Verhältnis zur zugeführten Brennstoffenergie) wird abgeraten, da Anfahr-, Abfahr- und Bereitschaftsverluste der Anlage im Kesselwirkungsgrad keine Berücksichtigung finden. Der Jahresnutzungsgrad bietet eine praxisnähere Darstellung der Güte einer feuerungstechnischen Anlage. Kombiniert mit dem Anteil unterschiedlicher Bioenergieträger am Brennstoffmix sowie deren Heizwerten lässt sich die benötigte Brennstoffmenge zur Produktion der FE ableiten.

Weiterhin sind der Arbeitszeitbedarf für den Betrieb der gesamten Stromerzeugungsanlage sowie deren Verwaltung und Organisation zu kalkulieren. Für die ökonomische Bewertung müssen außerdem eine eventuelle Grundstückspacht sowie sonstige Kosten (z. B. Gutachten, Analysen, Genehmigungen) einfließen.

3.4.4.2 [C2] Wärmeerzeugung

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet sämtliche Konversionsprozesse des Bioenergieträgers zur Wärmeerzeugung (thermische Nutzenergie in MJ). Zum Einsatz kommen hier Heizkessel, Öfen sowie die Bereitstellung von Wärme durch Nah- und Fernwärme. Die Bilanzierung erfolgt analog zu Prozess-Untergruppe [C1] Stromerzeugung unter Einbezug von Leitungsverlusten.

3.4.4.3 [C3] Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet sämtliche Konversionsprozesse des Bioenergieträgers zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung z. B. im BHKW. Die Bilanzierung erfolgt analog zu [C1] Stromerzeugung, wobei die funktionelle Einheit die Produktion sowohl von Wärme als auch von Strom widerspiegeln muss (vgl. Abschnitt 3.4.2).

3.4.4.4 [C4] Bereitstellung von Antriebsenergie zum Beispiel für Mobilität

Diese Prozess-Untergruppe beinhaltet alle Konversionsprozesse zur Verbrennung von 1 MJ Kraftstoff bzw. zur Erzeugung von beispielsweise 1 Fzg-km oder 1 tkm Transportleistung oder 1 h Arbeitsleistung. Weiterhin fallen unter diese Prozessgruppe auch Antriebsenergien, die z. B. für Pumpen von Beregnungsaggregaten verwendet und durch motorische Verbrennung von Kraftstoffen bereitgestellt werden.

Bei der Bilanzierung der Prozess-Untergruppe [C4] ist die Festlegung folgender Aspekte zu beachten. Zunächst muss das Nutzungssegment festgelegt werden (z. B. Personentransport mit dem Personenkraftwagen, Gütertransport mit dem Lastkraftwagen, Zugleistung mit dem Traktor, Antrieb von Maschinen und Aggregaten). Die weiteren für die Bilanzierung der Prozess-Untergruppe [C4] erforderlichen Kenngrößen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Bei der Bilanzierung der Verbrennungsemissionen sind, sofern möglich, Daten zu verwenden, die direkt auf Prüfständen erhoben wurden oder den Kraftstoffverbrauch und das Emissionsverhalten des jeweiligen deutschen Technologiemies widerspiegeln [85][84].

Sollten diese Daten nicht vorliegen, wird empfohlen, die Verbrennungsemissionen als Worst-Case-Szenario anhand der Grenzwerte der gültigen Emissionsstandards abzubilden, wie beispielsweise:

- für die Kraftstoffanwendung im Pkw und in leichten Nutzfahrzeugen: VO EG 715/2007 [27] zuletzt geändert durch VO EG 459/2012 [31],
- für den Bereich der schweren Nutzfahrzeuge: VO EG Nr. 595/2009 [29],
- für den „Offroad“-Bereich: Richtlinie 97/68/EG [26], zuletzt geändert durch Richtlinie 2012/46/EU [30].

3.4.4.5 [C5] Abgasreinigung

Ziel der Abgasreinigung ist die Schadstoffreduktion mithilfe technischer Maßnahmen. Diese können durch gezielte Prozesssteuerung bereits innerhalb des Prozesses durchgeführt werden oder dem Verbrennungsprozess nachgeschaltet sein. Die Prozessgruppe [C5] Abgasreinigung dient somit zur gesonderten Bewertung der nachgeschalteten Maßnahmen. Dies ermöglicht auch eine bessere Abgrenzung zwischen der eigentlichen Verbrennung sowie der Reinigung der Rauchgase. Möglichkeiten der nachgeschalteten

Schadstoffreduktion sind die Filterung (z. B. Elektrofilter, Staubzyklone) sowie die katalytische und thermische Nachbehandlung der Abgase.

Tabelle 8: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [C] Konversion

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[C1] Stromerzeugung	Jahresnutzungsgrad Anteile der Bioenergieträger Heizwerte der/des Bioenergieträger(s) Aschegehalt Anteil Grob-/Feinasche	bei Verstromung von Biobrennstoff-Mixen bei spezifischem Wassergehalt
[V5] Energieeinsatz	Strom	für Gebläse, Förderung
[V4] Kraftstoff	Masse, Volumen	Zündmittel
[V8] Betriebsstoffe	Masse, Volumen, Anzahl	
[V2] Verbrennungsinfrastruktur	technisches Nutzungspotential Leergewicht	
[L2] Innerbetrieblicher Transport	Kraftstoffverbrauch	
[V1] Transportfahrzeug	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Radlader
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	für Transportfahrzeug
[C2] Wärmeerzeugung		analog [C1]
[C3] Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung	Energiefaktoren für Strom und Wärme	analog [C1]
[C4] Antriebsenergie für Mobilität	Leistungsklasse in l Hubraum Kraftstoffart Kraftstoffverbrauch je 100 km Abgasstufe	
[V1] Personenkraftwagen	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	
[C4] Antriebsenergie für Lastkraftwagen	spezifische Ladekapazität Kraftstoffart Kraftstoffverbrauch je 100 km Auslastung Abgasstufe	z. B. Leerfahrten

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[V1] Lastkraftwagen	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	
[C4] Antriebsenergie für land- und forstwirtschaftlichen Offroad-Verkehr	Nennleistung in kW typischer Leistungsbereich in kW Nennzahl in $U \text{ min}^{-1}$ durchschnittliche Drehzahl in $U \text{ min}^{-1}$ Kraftstoffverbrauch je h Arbeitszeitbedarf je ha Abgasstufe	
[V1] Maschinenart	technisches Nutzungspotential Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Zugmaschine
[V4] Kraftstoff	Volumen, Masse	
[C5] Abgasreinigung	Abscheidungsart Abscheidungsgrad	z. B. chemische Wäsche
[V1] Maschinen und Geräte	Nutzungsdauer Leergewicht Maschinenzeit	z. B. Zyklone
[V5] Energieeinsatz	Strom	z. B. für Elektrofilter
[V8] Betriebsstoffe		z. B. Wasser, Katalysatoren

3.5 Prozessgruppe [D] Nutzung

Die Prozessgruppe beinhaltet Prozesse, die nach der Fertigung oder Bereitstellung von Produkten auftreten und die für die Ausweisung der gesamten ökologischen und ökonomischen Effekte eines Produkts nicht vernachlässigt werden können.

[D1] C-Speicherprodukt

Während der Nutzungsphase [D1] entstehen bei einer energetischen Nutzung biobasierter Produkte keinerlei C-Speichereffekte. Wird Biomasse jedoch stofflich genutzt, so bleibt der auf der Produktionsfläche in der Biomasse gebundene Kohlenstoff während der Nutzungsdauer des einzelnen Biomasseprodukts weiter gespeichert. Um Speichereffekte von Biomasseprodukten zu quantifizieren, empfiehlt es sich, einzelne Produktkategorien mit spezifischen Nutzungsdauern auszuweisen (siehe KLEIN et al. 2013 [49]). So kann zwischen verschiedenen Biomasseprodukten differenziert werden und man wird

der Tatsache gerecht, dass beispielsweise Holzpaletten für einen weitaus kürzeren Zeitraum Kohlenstoff speichern als z. B. Bauholz.

Für die Ausweisung von Kohlenstoffspeichereffekten in Biomasseprodukten ist jedoch die Prüfung der Herkunft des Rohstoffs wichtig. Insbesondere für holzbasierte Biomasseprodukte ist die Anrechnung eines Kohlenstoffspeichers in der Nutzungsphase nur konsistent, wenn sich der C-Speicher auf der Produktionsfläche dauerhaft nicht verringert, beispielsweise durch Landnutzungsänderung von Wald zu einer Fläche mit geringerem Kohlenstoffspeicher. Dies hätte zur Folge, dass der stofflichen Nutzung der Biomasse positive C-Speichereffekte zugerechnet werden, obwohl sich in der Summe (C-Speicher Wald und C-Speicher Biomasseprodukte) der Kohlenstoffspeicher möglicherweise verringert. Zur Bestimmung der Speichereffekte müsste dafür der C-Speicher im Wald mit dem C-Speicher in den Biomasseprodukten verrechnet werden (siehe z. B. KLEIN et al. 2013 [49]).

[D2] Energiespeicherung

Diese Prozessgruppe beinhaltet die Speicherung elektrischer und thermischer Energie. Die Speicherung von Wärme und Strom weist unterschiedliche technische Anforderungen auf. Die Speicherung von Strom erfolgt meist über die Wandlung der elektrischen Energie in mechanische (z. B. Pumpspeicher) oder chemische Energie (z. B. Batterien). Um den Strom bei Bedarf wieder nutzbar zu machen, muss also auch eine Rückwandlung geschehen, wobei zu beachten ist, dass jede Wandlung mit Verlusten verbunden ist. Die Speicherung von Wärme erfolgt entweder in Langzeitspeichern, welche beispielsweise in der Solarthermie zum Einsatz kommen (Heißwasser-Wärmespeicher), oder in Kurzzeitspeichern, welche die Wärme nur für wenige Stunden speichern (z. B. Schamottsteine).

3.6 Prozessgruppe [E] Abfallbewirtschaftung

Diese Prozessgruppe steht am Ende des Produktlebenszyklus (End-of-Life-Phase) und beinhaltet alle Maßnahmen zur Behandlung von Abfällen, welche aus der Nutzung des Hauptprodukts anfallen. Hierzu gehören nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) § 6 Absatz 1 die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das heißt die erneute Verwendung des Produkts in seiner ursprünglichen Form (Re-Use), die stoffliche Verwertung, das heißt die Wieder- und Weiterverwertung eines Produkts mit veränderter Gestalt und veränderten Materialeigenschaften nach Durchlaufen eines oder mehrerer Aufbereitungsschritte (Recycling), die energetische Verwertung inklusive der Nutzung oder Beseitigung von Abfällen aus der eigentlichen Produktnutzung sowie die Beseitigung [9].

Die Abgrenzung der Lasten, die dem untersuchten Produktsystem sowie dem nachgelagerten Produktsystem zugeordnet werden sollen, sind bei der Vorbereitung der Wiederverwendung (Re-Use), der stofflichen Verwertung (Recycling) und der energetischen Verwertung von großer Bedeutung. Hierzu wird die Vorgehensweise nach DIN EN 15804

[14] empfohlen. Darin wird die Behandlung von Abfällen (Entsorgungsphase) als Teil des eigentlichen Produktsystems gesehen. Prozesse, wie das Sammeln und der Transport von Abfällen, die das System als Sekundärroh- oder als Brennstoff in nachgelagerte Produktsysteme (außerhalb des eigentlichen untersuchten Produktsystems) verlassen, sind Teil des untersuchten Produktsystems. Falls weitere Behandlungsprozesse neben der eigentlichen Abfallbehandlung für den Einsatz als Sekundärroh- oder als Brennstoff in nachfolgenden Systemen notwendig sind, müssen diese allerdings dem nachgelagerten Produktsystem zugeordnet werden. Sekundärroh- oder Brennstoffe, die das untersuchte Produktsystem verlassen, können Gutschriften für die Substitution funktionsgleicher Roh- oder Brennstoffe in nachgelagerten Systemen erhalten. Dies ist in der Prozess-Untergruppe [F5] (siehe Abschnitt 2.2.1) zu vermerken.

Abfälle, die während der Produktion anfallen, sind entweder als Koppelprodukte nach den entsprechenden Regeln in Abschnitt 2.2.4 zu behandeln oder als Abfälle (sowie deren Entsorgung) dem eigentlichen Produktionsprozess zuzuordnen.

[E1] Vorbereitung zur Wiederverwendung

Diese Prozess-Untergruppe stellt die Vorbereitung zur erneuten stofflichen Verwendung von Produkten dar. Zu unterscheiden ist zwischen Wieder- und Weiterverwendung. Bei der Wiederverwendung wird ein gebrauchtes Produkt in gleicher Gestalt nach Instandsetzung erneut für den gleichen Zweck wie vorher verwendet (z. B. Altmöbel). Bei der Weiterverwendung wird ein gebrauchtes Produkt in gleicher Gestalt für einen anderen Zweck verwendet (z. B. die Nutzung von Paletten als Designmöbel).

[E2] Stoffliche Verwertung

Diese Prozess-Untergruppe stellt die Wieder- und Weiterverwertung eines Produkts nach Aufbereitung in veränderter Gestalt und veränderten Materialeigenschaften dar. Im Falle von Bioenergiesystemen umfasst die stoffliche Verwertung etwaige Verbrennungsrückstände. Diese können beispielsweise in Form von Aschen einer stofflichen Nutzung im Straßenbau zukommen oder bei der Herstellung von Baustoffen eingesetzt werden. Zudem ist die Nutzung einzelner Aschefractionen als Düngemittelzusatz möglich. Zu unterscheiden ist zwischen Wieder- und Weiterverwertung. Bei der Wiederverwertung wird das Material in demselben Produktionsprozess erneut eingesetzt (z. B. Altholzspäne aus Spanplatten in neuen Spanplatten). Bei der Weiterverwertung wird das Material in einem anderen Produktionsprozess eingesetzt (z. B. Altholzspäne, Alt-Biokunststoffe für die Herstellung chemischer Grundstoffe in der Bioraffinerie, Holzasche als Füllstoff in der Bauindustrie). Die aufeinanderfolgende, mehrmalige stoffliche Verwendung bzw. Verwertung von Biomasse (z. B. einer Einheit Holz) wird Kaskadennutzung genannt.

[E3] Energetische Verwertung

Die energetische Verwertung am Ende des Lebenszyklus des Hauptprodukts sollte laut Kreislaufwirtschaftsgesetz die letzte Option der Nutzung darstellen. Beispielsweise ist sie

für stofflich genutzte Holzprodukte immer der letzte Schritt der sogenannten Kaskadennutzung (siehe [E2]). Die Bilanzierung erfolgt analog der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Vorgehensweise unter Beachtung der tatsächlichen Produkteinheit, die für eine energetische Nutzung infrage kommt.

[E4] Beseitigung

Die Beseitigung von Abfällen wird in [E4] dargestellt. Zu beachten sind hierbei etwaige Emissionen, die während der Dauer der Deponierung anfallen können (z. B. CH₄-Emissionen von Abfällen mit biogenem Anteil, Schwermetalle aus Aschen). Allerdings dürfen in Deutschland Abfälle und Abfallgemische mit einem höheren organischen Anteil als fünf Prozent nach den Regelungen der Deponieverordnung nicht deponiert werden und müssen vor der Ablagerung behandelt werden [8]. Das Verbot der Altholzdeponierung ist beispielsweise auch in der Altholzverordnung geregelt [7].

3.7 Prozessgruppe [T] Transporte

Diese Prozessgruppe beinhaltet die Transportprozesse zwischen den einzelnen Lebenszyklusabschnitten (Prozessgruppen [A] bis [E]). Die Transportprozesse bilden somit die Schnittstellen zwischen den Prozessgruppen [A], [B], [C] bzw. [D] und [E]. Zur besseren Interpretation der Bilanzergebnisse sowie der Erhöhung ihrer Transparenz wird empfohlen, die Prozessgruppe [T] in folgende Prozess-Untergruppen aufzuteilen: [T1] Transport Biomasse, [T2] Transport Zwischenprodukte, [T3] Transport Endprodukte, [T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle. Eine weitere Aufteilung bei unterschiedlichen Transportarten innerhalb einer Prozess-Untergruppe (z. B. Transport einer bestimmten Biomasse per Straße, weiter per Wasserstraße und wieder per Straße) wird für die Ergebnisdarstellung nicht empfohlen. Jedoch sollten diese Besonderheiten als zusätzliche Information in der Systemdarstellung im Feld „Anmerkungen“ aufgeführt werden (siehe Abschnitt 2.2.1). Demgegenüber sollte für den Fall, dass Transporte von unterschiedlichen Biomassen, Zwischenprodukten, Endprodukten oder Koppelprodukten und Abfällen innerhalb einer Prozess-Untergruppe nötig werden (z. B. Transport von Rapsöl und Altspeiseöl zur Biodieselanlage), eine entsprechende Aufteilung erfolgen. Eine genaue Auflistung der für die Bilanzierung der Prozessgruppe [T] erforderlichen Kenngrößen zeigt Tabelle 9.

[T1] Transport Biomasse

Diese Prozess-Untergruppe umfasst den Transport der Biomasse vom Feld- bzw. Waldrand zur Transformationsstätte (Beispiele sind: Transport von Rapssaat zur Ölmühle, Biogassubstrat zur Biogasanlage, Industrieholz zum Holzhackschnitzelwerk oder Stammholz zum Sägewerk).

[T2] Transport Zwischenprodukte

Diese Prozess-Untergruppe umfasst den Transport der Zwischenprodukte von der Transformationsstätte zur Konversions- bzw. Fertigungsanlage (Beispiele sind: Transport von Rapsöl zum Pflanzenöl-BHKW/Pflanzenöl-(Hof-)Tankstelle, Holzhackschnitzel zum Heiz(kraft)werk oder Schnittholz zur Möbelfabrik).

[T3] Transport Endprodukte

Diese Prozess-Untergruppe umfasst den Transport der Endprodukte von der Konversions- bzw. Fertigungsanlage zum Nutzer (Beispiele sind: Transport von Strom/Wärme zum Endverbraucher (Strom- bzw. (Nah-)Wärmenetz, Möbel zum Nutzer).

Hinweis: Bei Anwendung des Allokationsverfahrens wird stets nur ein Endprodukt bilanziert. Nur bei Anwendung der Methodik der Systemraumerweiterung für die kombinierte Strom-Wärme-Erzeugung muss der Transport der zwei Endprodukte Strom und Wärme bilanziert werden.

[T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle

Diese Prozess-Untergruppe umfasst den Transport von Koppelprodukten und Abfällen zum Ort der Wiederverwendung, der stofflichen Verwertung (Recycling), der energetischen Verwertung oder der Beseitigung.

Tabelle 9: Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [T] Transporte und [L] Betriebliche Logistik

Prozess	Bilanzkenngroße	Erläuterung
[T] Transport	Transportmasse bzw. -volumen oder	
[L] Betriebliche Logistik	Anzahl Kraftstoffverbrauch je h Arbeitszeitbedarf Transportdistanz	
[V1] Maschine	Art der Maschine Leergewicht Maschinenzeit technisches Nutzungspotential Geschwindigkeit	
[V1] Anhänger	Leergewicht technisches Nutzungspotential Ladekapazität	
[V4] Kraftstoff	Masse oder Volumen	
[V8] Betriebsstoff	Masse, Volumen, Stück	z. B. Schmieröl

3.8 Prozessgruppe [L] Betriebliche Logistik

Neben den Transportprozessen zwischen den einzelnen Lebenszyklusabschnitten (siehe Abschnitt 3.7) treten oft auch zusätzliche betriebs- bzw. prozessbedingte Transportprozesse beispielsweise zur Anlieferung von Vorleistungsgütern oder zur Lagerung bzw. zum Umschlag von Biomasse, Zwischen- und Endprodukten sowie Koppelprodukten und Abfällen auf. Diese Prozessgruppe kann in die Prozess-Untergruppen [L1] Außerbetrieblicher Transport und [L2] Innerbetrieblicher Transport unterteilt werden. Die Bilanzierung der Kenngrößen erfolgt analog zur Prozessgruppe [T] Transporte (siehe Tabelle 9).

[L1] Außerbetrieblicher Transport

Außerbetriebliche Transporte treten vor allem bei der Anlieferung von Vorleistungsgütern auf, beispielsweise dem Transport von Pflanzmaterial und Saatgut von der Baumschule zur Produktionsfläche.

[L2] Innerbetrieblicher Transport

Innerbetriebliche Transporte treten vor allem bei Umlagerung bzw. beim Umschlag von Biomasse, Zwischen- und Endprodukten sowie Koppelprodukten und Abfällen auf, beispielsweise bei der Umlagerung fertiger Möbel in das Auslieferungslager oder dem Umschlag von Rohholz zur Verarbeitungsanlage innerhalb des Betriebsgeländes.

3.9 Prozessgruppe [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze

In diesem Abschnitt werden alle für die Prozessgruppe [F] wichtigen methodischen Vorgehensweisen beschrieben. Dazu zählt die Berücksichtigung vermiedener Lasten sowie direkter und indirekter Landnutzungsänderungen im Rahmen der ökobilanziellen und ökonomischen Bewertung. Weiterhin wird hier auf die Bewertung von Koppelprodukten durch Systemraumerweiterung eingegangen, sofern die Koppelprodukte nicht bereits innerhalb der Systemgrenzen durch Allokation nach Energiegehalt, Masse und/oder ökonomischem Wert berücksichtigt wurden (vgl. hierzu auch die Abschnitte 2.2.4 und 3.4.4).

Im Regelfall liegt die Prozessgruppe [F] außerhalb der festgelegten Systemgrenzen. Finden die nachfolgend beschriebenen Bewertungsmethoden zur Berücksichtigung von Koppelprodukten sowie direkten und indirekten Landnutzungsänderungen im Rahmen der ökobilanziellen und ökonomischen Bewertung Anwendung, ist eine Erweiterung der festgelegten Systemgrenzen erforderlich. Für die Prozess-Untergruppen [F4] und [F5] ist damit eine Erweiterung des Produktsystems erforderlich.

[F1] Gutschriften für vermiedene (Umwelt-)Lasten

Werden im untersuchten Produktsystem durch die Nutzung von Rohstoffen aus vorgelagerten Systemen (Umwelt-)Lasten vermieden, können diese dem untersuchten Produktsystem gutgeschrieben werden. Dies trifft beispielsweise für die Nutzung von Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung als Biogassubstrat zu. Wird der vergorene Wirtschaftsdünger gasdicht gelagert, wird die Freisetzung von Methan und Ammoniak in die Atmosphäre vermieden. Bei der Tierhaltung ohne angeschlossene Biogasproduktion wird der Wirtschaftsdünger hingegen oftmals in offenen Behältern oder auf Platten gelagert. Somit sollten die durch gasdichte Lagerung vermiedenen Emissionen dem Biogassystem gutgeschrieben werden. Festzulegen sind dabei Art und Höhe der vermiedenen (Umwelt-)Lasten.

[F2] Direkte Landnutzungsänderung

Direkte Landnutzungsänderungen betreffen in Deutschland z. B. den Umbruch von Grünland und sollten im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse in Ökobilanzen bzw. THG-Bilanzen einbezogen werden. Festzulegen sind bei der Bilanzierung direkter Landnutzungsänderungen die jeweils betroffene Fläche, auf der eine Landnutzungsänderung stattfindet, sowie die Faktoren, mit denen die durch die Landnutzungsänderung hervorgerufenen THG-Emissionen bzw. auch die C-Bindung (z. B. Umwandlung von Ackerflächen in Grünland oder Wald) beschrieben werden können. Als Orientierung zur Höhe der THG-Emissionen, z. B. durch Grünlandumbruch, werden die Emissionsfaktoren von FRITSCHKE und WIEGMANN (2008) [34] empfohlen (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Emissionsfaktoren für die Anrechnung direkter Landnutzungsänderungen in Ökobilanzen (nach [34])

Kultur	Vorherige Nutzung	CO ₂ -Emissionen in kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Weizen	Grünland	2.630
	Acker	0
Mais	Grünland	2.630
	Acker	0
Pappel (KUP)	Grünland	1.255
	Acker	-1.375
Raps	Grünland	2.630
	Acker	0

Die in Tabelle 10 aufgeführten Emissionsfaktoren beziehen sich auf eine einmalige Landnutzungsänderung, die für alle Kulturen unter Berücksichtigung der Veränderung der jeweiligen Bodenkohlenstoffvorräte auf einen Zeitraum von 20 Jahren umgerechnet

wurde. In diesem Zusammenhang wird auch darauf hingewiesen, dass die Höhe der THG-Emissionen standortabhängig stark variieren kann.

[F3] Indirekte Landnutzungsänderung

Die Anrechnung indirekter Landnutzungsänderungen bei der Bewertung der THG-Emissionen ist insbesondere aus dem Kontext der Bewertung von Biokraftstoffen und bei der Tierproduktion (Einsatz von Sojafuttermitteln) bekannt. Allerdings werden die verschiedenen Modelle zur Anrechnung indirekter Landnutzungsänderungen auch immer wieder kontrovers diskutiert. So werden in FINKBEINER (2013) [33] verschiedene veröffentlichte Modelle ausführlich beschrieben und miteinander verglichen. Der Vergleich weist eine hohe Bandbreite an iLUC-Werten auf, die beispielsweise bei Biodiesel zwischen -116 und $350 \text{ g CO}_2\text{-Äq MJ}^{-1}$ variieren. FINKBEINER (2013) verdeutlicht in seinen Untersuchungen, dass weder eine Aussage getroffen werden kann, welcher iLUC-Faktor die indirekten Landnutzungsänderungen zuverlässiger beschreibt, noch bestimmt werden kann, ob der Einfluss indirekter Landnutzungsänderungen negativ oder positiv ist. Der jeweilige iLUC-Faktor spiegelt lediglich die spezifische Herangehensweise und das Rechenmodell wider [33].

Aus diesem Grund wird empfohlen, indirekte Landnutzungsänderungen verbal argumentativ zu bewerten und nicht mithilfe eines modellbasierten Emissionsfaktors in den Wirkungsindikator $\text{CO}_2\text{-Äquivalente}$ einzurechnen.

Tabelle 11: *Übersicht zu den betrachteten Prozessen in [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze*

Prozess	Bilanzkenngröße	Erläuterung
[F1] Gutschriften für vermiedene (Umwelt-)Lasten	Art und Höhe der vermiedenen Umweltlast	
[F2] Direkte Landnutzungsänderungen	Emissionsfaktor zur Beschreibung der Kohlenstofffreisetzung	
[F3] Indirekte Landnutzungsänderungen	Emissionsfaktor zur Beschreibung der Kohlenstofffreisetzung	
[F4] Gutschriften für vermiedenes Referenzsystem Koppelprodukte	Art des substituierten Produkts Substitutionsfaktor	
[F5] Gutschriften für vermiedene Roh- und Brennstoffe durch Abfallbewirtschaftung	Art des substituierten Produkts Substitutionsfaktor	

[F4] Gutschriften für vermiedenes Referenzsystem Koppelprodukte

Im Prozess [F4] kann die Substitution eines Referenzprodukts (z. B. Sojaschrot) durch Nutzung eines Koppelprodukts (z. B. Rapspresskuchen) berücksichtigt werden. Durch

die Nutzung des Koppelprodukts lassen sich die Aufwendungen und Emissionen vermeiden, die bei der Herstellung des Referenzprozesses entstehen. Diese vermiedenen Energieaufwendungen und Emissionen werden dann dem Untersuchungssystem gutgeschrieben, in dem das Koppelprodukt entstanden ist. Die methodische Vorgehensweise ist in Abschnitt 2.2.4 ausführlich dargelegt.

Für die Berechnung der Höhe der Emissionsgutschrift muss sowohl das Referenzprodukt als auch der jeweilige Substitutionsfaktor festgelegt werden. So wird durch das Koppelprodukt Rapspresskuchen beispielsweise Sojaschrot substituiert. Der entsprechende Substitutionsfaktor gibt dabei an, wieviele Kilogramm Sojaschrot durch ein Kilogramm Rapspresskuchen substituiert werden können. Die Größe, die diesen Zusammenhang beschreibt, ist in dem genannten Beispiel der jeweilige Futterwert von Referenzprodukt und Koppelprodukt.

[F5] Gutschriften für vermiedene Roh- und Brennstoffe durch Abfallbewirtschaftung

Im Prozess [F5] kann die Substitution funktionsgleicher Roh- oder Brennstoffe in nachgelagerten Systemen durch Abfälle des Untersuchungssystems berücksichtigt werden. Durch die Nutzung von Abfällen lassen sich Aufwendungen und Emissionen vermeiden, die bei der Herstellung von Roh- oder Brennstoffen in nachfolgenden Systemen entstehen würden. Diese vermiedenen Aufwendungen und Emissionen werden dann dem Untersuchungssystem gutgeschrieben, in dem der Abfall entstanden ist. Zur Bestimmung der Höhe der Gutschrift ist der Emissionsfaktor des jeweils substituierten Roh- oder Brennstoffs im nachfolgenden System nötig. Ein Beispiel für diese Art der Substitution und Gutschrift ist beispielsweise die Nutzung von Holzaschen für die Düngung oder als Füllstoff im Straßenbau bzw. in der Zementindustrie, wobei respektive Mineraldünger oder – für den Straßenbau oder die Zementindustrie – andere Füllstoffe ersetzt werden. Die Aufwendungen für die Bereitstellung der substituierten Stoffe können dem untersuchten Produktsystem gutgeschrieben werden.

3.10 Prozessgruppe [G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems

Durch die Nutzung von Produkten aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen (Untersuchungssystem) lassen sich die Umweltwirkungen, Energieaufwendungen und Kosten potentiell vermeiden, die bei der Herstellung von Produkten aus einem (fossilen) Referenzsystem entstehen. Um diesen Vergleich von Untersuchungssystem und Referenzsystem durchführen zu können und damit die potentielle Vermeidung quantifizieren zu können, ist es erforderlich, in Prozessgruppe [G] das Referenzsystem genau zu spezifizieren. Hierbei sollte festgelegt werden, um welches Referenzsystem es sich konkret handelt und mit welchen Umweltwirkungen, Energieaufwendungen und Kosten dieses System belastet ist. Emissionsfaktoren und Kosten verschiedener vorwiegend fossiler Referenzsysteme sind in Kapitel 5 zu finden.

4 Umweltwirkungskategorien und ökonomische Kennzahlen

Im folgenden Kapitel werden die Auswahl von Umweltwirkungskategorien und die Berechnung entsprechender Umweltwirkungsindikatoren sowie die Herleitung ökonomischer Kennzahlen umfassend beschrieben.

4.1 Umweltwirkungskategorien

Um harmonisierte und vergleichbare Ergebnisse zu Umweltwirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen zu generieren, sollten die Umweltbewertungen auf Basis relevanter Wirkungskategorien und wissenschaftlich anerkannter Methoden zur Berechnung entsprechender Wirkungsindikatoren erfolgen. Das ILCD-Handbuch der Europäischen Kommission bewertet vorhandene Methoden zur Berechnung einzelner Wirkungsindikatoren und beurteilt deren Eignung [32]. Des Weiteren bildet das ILCD-Handbuch die Grundlage für alle Arbeiten zum Thema Umweltbewertung von Produktsystemen auf europäischer Ebene und ist Vorreiter der Product-Environmental-Footprinting-Initiative (PEF-Initiative) der Europäischen Kommission. Es ist daher davon auszugehen, dass zukünftig Studien zur Umweltbewertung von Produktsystemen diesem europäischen Standard entsprechen müssen. Aus diesem Grunde und um die Vergleichbarkeit mit zukünftigen Studien zu gewährleisten, sollten die empfohlenen Methoden aus dem ILCD-Handbuch [32] verwendet werden.

Die Auswahl von Wirkungskategorien und entsprechenden Indikatoren zur Bewertung von Umweltwirkungen für Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen basiert auf einer Studie von WOLF et al. (2015) [95]. Die Studie zeigt den aktuellen Stand zur Umweltbewertung der energetischen Holznutzung. Die Wirkungskategorie „Globale Erwärmung“ war dabei das entscheidende Suchkriterium. Unter Berücksichtigung des genannten Suchkriteriums stellt sich die Häufigkeit der verwendeten Wirkungskategorien in der aktuellen Fachliteratur folgendermaßen dar:

- Globale Erwärmung (100 %),
- Primärenergiebedarf (63 %),
- Versauerung (41 %),
- Partikelemissionen (27 %),
- Eutrophierung (18 %).

Diese Ergebnisse zur Häufigkeit der Wirkungskategorien verdeutlichen den derzeitigen Stand für Ökobilanzstudien und lassen sich auf alle Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen übertragen. Weiterhin verdeutlichen sie, dass die bloße Darstellung der Wirkungskategorie Globale Erwärmung für den Anwendungsbereich Biomasse allein nicht ausreichend ist. Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen

Rohstoffen haben aufgrund ihrer komplexen Bereitstellungsketten sowie deren Transformation und Nutzung vielfältigen Einfluss auf die Umwelt.

Als Mindestauswahl werden daher die Wirkungskategorien Globale Erwärmung, Partikelemissionen, Süßwassereutrophierung sowie Versauerung empfohlen. Die entsprechenden Methoden für die Berechnung der jeweiligen Umweltwirkungsindikatoren werden nachfolgend kurz erläutert und können für eine tiefergehende Lektüre dem ILCD-Handbuch [32] entnommen werden. Als ergänzende Information sollte der nicht-erneuerbare Teil des Primärenergiebedarfs in die Untersuchungen einbezogen werden, da diese Kennzahl eine wichtige Ergänzung zur Wirkungskategorie Globale Erwärmung darstellt. Dies zeigen auch die oben aufgeführten Ergebnisse zur Auswahl von Wirkungskategorien zur Bewertung von Umweltwirkungen für Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. In Tabelle 12 sind die für ExpResBio ausgewählten und für weitere Bewertungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen empfohlenen Wirkungskategorien sowie die Methoden zur Berechnung der jeweiligen Umweltwirkungsindikatoren zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 12: Ausgewählte Wirkungskategorien mit Methoden zur Berechnung der jeweiligen Umweltwirkungsindikatoren nach ILCD [32]

Wirkungskategorie	Methode zur Berechnung des Wirkungsindikators	Referenz
Globale Erwärmung	IPCC	[44]
Partikelemissionen (Feinstaub)	RiskPoll	[72]
Süßwassereutrophierung	EUROTREND	[82]
Versauerung	Kumulierte Überschreitung	[79]
Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf	VDI 4600, DREIER (2000)	[89][22]

Bei allen Methoden zur Berechnung der Wirkungsindikatoren werden die ermittelten Sachbilanzgrößen (z. B. Energieinputs, Emissionen) einer oder mehreren Umweltwirkungskategorien zugeordnet (Klassifizierung) und mit spezifischen Charakterisierungsfaktoren multipliziert (Charakterisierung) (siehe Formel (4.1)).

$$\text{Umweltwirkungsindikator}_j = \sum_{i=1}^n \text{Sachbilanzgröße}_i \cdot \text{Charakterisierungsfaktor}_{ij} \quad (4.1)$$

Dadurch werden die Sachbilanzergebnisse auf die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators umgerechnet. Diese gemeinsame Einheit erlaubt nach DIN EN ISO 14044 die

Addition der unterschiedlichen Sachbilanzgrößen zu einem Wirkungsindikatorwert [12][51].

4.1.1 Globale Erwärmung

Die Erwärmung der Erdatmosphäre ist auf den Treibhauseffekt zurückzuführen. Hierbei wird zwischen natürlichem und anthropogenem Treibhauseffekt unterschieden. Der natürliche Treibhauseffekt, der durch Wasserdampf und Kohlendioxid (in seiner vorindustriellen Konzentration) hervorgerufen wird, ist für ein Leben auf der Erde unabdingbar. Ohne diese natürliche Erwärmung der Erdatmosphäre würden mittlere Temperaturen von -18 °C vorherrschen anstatt der derzeitigen globalen Durchschnittstemperatur von 15 °C [51]. Durch den anthropogen verursachten Treibhauseffekt ist diese Durchschnittstemperatur in den letzten ca. 100 Jahren um $0,85\text{ K}$ angestiegen [45]. Grund dafür sind die höheren Konzentrationen treibhausrelevanter Spurengase wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) oder Lachgas (N_2O) in der Atmosphäre. Der Anstieg der Spurengaskonzentration ist einerseits auf die seit der Industrialisierung vermehrte Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas (CO_2 -Anstieg) und andererseits z. B. auf die Intensivierung der Landwirtschaft (CH_4 - und N_2O -Anstieg) zurückzuführen [51].

Die Bewertung des zur globalen Erwärmung führenden anthropogenen Treibhauseffekts erfolgt nach den Empfehlungen des ILCD auf Basis der Berechnungen des Weltklimarats. Der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) befasst sich mit der anthropogen verursachten globalen Erwärmung und deren Folgen sowie mit entsprechenden Vermeidungs- und Anpassungsstrategien. Ein Teil dieser Arbeiten ist die Quantifizierung der verschiedenen Spurengase in Bezug auf ihre Auswirkungen auf den anthropogenen Treibhauseffekt. Die Wertigkeit (Höhe des Charakterisierungsfaktors) eines Treibhausgases richtet sich dabei nach dessen Absorptionsspektrum und der derzeitigen Konzentration sowie der Nutzungsdauer des Treibhausgases in der Atmosphäre. Je höher die Nutzungsdauer und je geringer die derzeitige Konzentration eines Klimagases in der Atmosphäre ist, umso höher ist seine Auswirkung auf den Treibhauseffekt. Unter Berücksichtigung dieses Berechnungsansatzes ergeben sich die in Tabelle 13 aufgelisteten Charakterisierungsfaktoren in Kohlenstoffdioxidäquivalenten (CO_2 -Äq), die aus dem vierten Sachstandsbericht des IPCC (2007) hervorgehen [44].

Tabelle 13: Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der globalen Erwärmung bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren [44]

Sachbilanzgröße		Kohlenstoffdioxidäquivalente (CO_2 -Äq) in kg kg^{-1}
Kohlendioxid	CO_2	1
Methan	CH_4	25
Lachgas	N_2O	298

Es wird dringend empfohlen, nur die THG-Emissionen ohne biogenes CO₂ (Freisetzung von CO₂ aus der genutzten Biomasse) in den THG-Bilanzen zu berücksichtigen. Grund dafür ist, dass bei Nachwachsenden Rohstoffen von einem kurzen biogenen C-Kreislauf auszugehen ist. Die bei der Verbrennung von Biomasse bzw. Bioenergieträgern freigesetzten (biogenen) CO₂-Emissionen entsprechen dem zuvor in der Biomasse durch Photosynthese bzw. Assimilation gespeicherten Kohlenstoff. In der Forstwirtschaft bezieht sich dies jedoch nur auf nachhaltige Produktionssysteme, wenn davon auszugehen ist, dass sich die C-Speicher auf der Fläche langfristig nicht ändern.

4.1.2 Partikelemissionen

Partikelemissionen sind Auslöser für eine Vielzahl körperlicher Beschwerden und Erkrankungen des Menschen. So induzieren Partikelemissionen vor allem Erkrankungen der Lungen und Atemwege, aber auch der Gefäße und des Herzens [70]. Feinstaubemissionen werden anhand der Partikelgröße klassifiziert. PM_{2,5} umfasst alle Partikel mit einer Größe < 2,5 µm und PM₁₀ alle Partikel < 10 µm. Im Falle einer Bewertung von PM_{2,5} und PM₁₀ sollten Doppelzählungen vermieden werden, da PM_{2,5} bereits in PM₁₀ integriert ist. Hierfür kann bei Ergebnissen auf Basis von PM₁₀ ein Korrekturfaktor von 0,6 zur Herleitung der PM_{2,5}-Emissionen herangezogen werden [21].

PM_{2,5}-Emissionen sind aufgrund ihrer Fähigkeit, bis tief in die menschlichen Atemwege einzudringen, verantwortlich für die große Mehrheit an Erkrankungen, die in Verbindung mit Partikelemissionen stehen, und sollten daher vorwiegend als Indikator herangezogen werden. Die Berechnung der PM_{2,5}-Emissionen geschieht analog zur den Leitlinien des ILCD-Handbuchs, wobei die RiskPoll-Methode verwendet wird. Diese Methode dient der wissenschaftlichen Abschätzung der Effekte primärer und sekundärer Feinstäube (SO₂ und NO_x) sowie anderer Luftschadstoffe auf Ökosysteme oder die menschliche Gesundheit [72]. Sie gliedert sich in vier Phasen:

- Phase 1 – Emission: Hier wird das Lebenszyklusinventar der Masse an emittierten Partikeln (z. B. PM_{2,5}) in kg FE⁻¹ erfasst. Die Charakterisierungsfaktoren (vgl. Tabelle 14) basieren weitestgehend auf HUMBERT (2009) [43].
- Phase 2 – Dispersion: Hier werden die regionale Verteilung sowie die Steigerung der Konzentration der Feinstäube in der Untersuchungsregion analysiert.
- Phase 3 – Einfluss der Exposition: In dieser Phase wird die eigentliche Auswirkung (in Abhängigkeit von Faktoren wie z. B. Feinstaubkonzentration, Exposition, Bevölkerungsdichte etc.) der Exposition (z. B. als Krankenhauseinlieferungen aufgrund von PM_{2,5}) mit Partikelemissionen betrachtet.
- Phase 4 – Ökonomische Betrachtung: Diese Phase analysiert die ökonomischen Auswirkungen der Feinstaubexposition.

Da die Betrachtungen der Umweltwirkungen von Produktsystemen in diesem Methodenhandbuch auf Basis von „Midpoint-Indikatoren“ (teilaggregierte Indikatoren für einzelne Umweltwirkungen) [46] geschehen und auf die Bewertung möglicher Umweltschadens-

kategorien („Endpoint-Indikatoren“) verzichtet wird, beschränkt sich die Anwendung der RiskPoll-Methode für den vorliegenden Anwendungsfall auf Phase 1. Die entsprechenden Charakterisierungsfaktoren für die Bewertung primärer und sekundärer Feinstäube (SO_2 und NO_x) sowie anderer Luftschadstoffe, die Auswirkungen auf Ökosysteme oder die menschliche Gesundheit haben, sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Partikelemissionen (PM_{2,5}) [43][85]

Sachbilanzgröße		Partikelemissionsäquivalente (PM _{2,5} -Äq) in kg kg ⁻¹
Ammoniak	NH ₃	0,0667
Kohlenmonoxid	CO	0,0004
Schwefeldioxid	SO ₂	0,0611
Schwefeltrioxid	SO ₃	0,0489
Staub (PM ₁₀)	PM ₁₀	0,2278
Staub (PM _{2,5})	PM _{2,5}	1
Stickstoffdioxid	NO ₂	0,0072
Stickstoffmonoxid	NO	0,0111

4.1.3 Eutrophierung

Der übermäßige Eintrag von Phosphor- und Stickstoffverbindungen von gedüngten landwirtschaftlichen Flächen kann beispielsweise zu einem beschleunigten Algenwachstum in Oberflächengewässern führen. Dies führt zu einer Verringerung der Photosynthese und damit zu einem Sauerstoffdefizit in den tieferen Wasserschichten und ist wesentliche Ursache für das „Umkippen“ von Gewässern und das Fischsterben [51].

Zur Quantifizierung der Nährstoffeinträge in Bezug auf ihre eutrophierende Wirkung wird die EUROTREND-Methode nach STRUIJS et al. (2009) [82] verwendet. Hier wird zwischen Süßwasser- und Meerwassereutrophierung unterschieden. Während bei der Süßwassereutrophierung die P-Einträge betrachtet werden, fließen bei der Meerwassereutrophierung schwerpunktmäßig N-Einträge in die Bewertung der Eutrophierung mit ein.

In Tabelle 15 sind die Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Süßwassereutrophierung nach der EUROTREND aufgeführt.

Tabelle 15: Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Eutrophierung [79][85]

Sachbilanzgröße		Phosphoräquivalente (P-Äq) in kg kg ⁻¹
Phosphorsäure (Emissionen in Böden)	H ₃ PO ₄	0,32
Phosphor (Emissionen in Süßwasser und Böden)	P	1,00
Phosphat (Emissionen in Süßwasser)	PO ₄ ³⁻	0,33

Zusätzlich wird empfohlen, eine flächenbezogene N-Bilanz mit allen relevanten N-Bilanzgliedern, wie z. B. N-Depositionen, zu erstellen. Der daraus berechnete N-Saldo beziffert das gesamte N-Verlustpotential an reaktiven N-Verbindungen. Darüber hinaus kann auf der Grundlage flächenbezogener N-Bilanzen durch die Berücksichtigung weiterer standortspezifischer Parameter (Boden, Klima) der Nitrataustrag berechnet werden.

4.1.4 Versauerung

Die Erhöhung der Wasserstoffionenkonzentration (H⁺) in Böden und Gewässern führt zu einer Absenkung des pH-Werts und damit zu einer Verschiebung des Nährstoffgleichgewichts. Dieser Vorgang wird als Versauerung von Böden und/oder Gewässern bezeichnet. Ursache für die Erhöhung der Wasserstoffionenkonzentration ist der Eintrag säurebildender Luftschadstoffe wie beispielsweise Ammoniak (NH₃), Stickoxide (NO_x) oder Schwefeldioxid (SO₂).

Zur Quantifizierung der genannten Luftschadstoffe hinsichtlich ihrer versauernden Wirkung wird nach der Empfehlung des ILCD die länderspezifische „Methode der Kumulierten Überschreitung“ nach SEPPÄLÄ (2006) [79] verwendet. Bei dieser Bewertungsmethode wird neben der Emissionsverteilung in der Luft auch die Sensitivität des Ökosystems, das diese Emission aufnehmen muss, berücksichtigt. Die Sensitivität des Ökosystems wird über die sogenannte kritische Belastung charakterisiert, die in einer Datenbank für 1,2 Millionen Ökosysteme (z. B. Wald, Oberflächenwasser, naturnahe Vegetation) zusammengetragen ist. Die kumulierte Überschreitung gibt dabei die flächengewichtete Summe aller Überschreitungen der kritischen Belastungen für eine bestimmte Region (z. B. Deutschland) an [79].

Die Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Versauerung nach der „Methode der Kumulierten Überschreitung“ sind für Deutschland in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Charakterisierungsfaktoren zur Quantifizierung der Versauerung (Kumulierte Überschreitung) [85]

Sachbilanzgröße		Kumulierte Überschreitung H ⁺ -Äq in mol kg ⁻¹
Ammoniak	NH ₃	3,02
Schwefeldioxid	SO ₂	1,31
Schwefeltrioxid	SO ₃	1,05
Stickoxide	NO _x	0,74
Stickstoffdioxid	NO ₂	0,74
Stickstoffmonoxid	NO	1,13

4.1.5 Primärenergiebedarf

Nach KLÖPFFER und GRAHL (2009) [51] stellt der Primärenergiebedarf selbst keine Wirkungskategorie einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044 dar, sondern ist vielmehr ein Ergebnis der Sachbilanz. Da der Primärenergieaufwand allerdings eine wichtige Informationsgröße zur Bewertung des energetischen Aufwands eines Produktsystems darstellt, sollte er auch im Rahmen einer Ökobilanz als Bewertungskriterium ausgewertet werden. Darüber hinaus stellt er insbesondere für die Bewertung von Energiesystemen eine wichtige Ergänzung zur Wirkungskategorie Globale Erwärmung dar [51].

Die Berechnung des Primärenergiebedarfs erfolgt nach den Grundsätzen der VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden“ [89]. Für die primärenergetische Bewertung von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlicher Biomasse ist allerdings eine Differenzierung zwischen regenerativen und nicht-regenerativen Energieaufwendungen zwingend erforderlich. Deshalb sind die in der VDI-Richtlinie 4600 genannten Berechnungsverfahren um die definierten Kenngrößen nach DREIER (2000) [22] zu ergänzen. Dies ermöglicht eine Aufteilung in einen nicht-erneuerbaren Primärenergieaufwand und einen erneuerbaren Primärenergieaufwand. Der Primärenergieaufwand errechnet sich auf Basis des Heizwerts des jeweiligen Energieträgers zuzüglich des Aufwands für deren Bereitstellung (z. B. Rohölförderung, Biomasseanbau). Atomstrom fließt unter Berücksichtigung eines elektrischen Wirkungsgrads von 33 % und der Aufwendungen für den Abbau der daraus abgeleiteten Menge an Uran in die Berechnungen ein [51].

4.2 Ökonomische Kennzahlen

Die ökonomische Bewertung der Produktsysteme erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst erfolgt die betriebswirtschaftliche Betrachtung mit entsprechenden Kostenkalkulationen und Gewinnausweisungen. Darauf aufbauend erfolgt die volkswirtschaftliche Betrachtung mit den Kennzahlen Umweltwirkungs-Vermeidungskosten, Umweltwirkungs-

Vermeidungsleistungen, Brutto-Arbeitseffekte und regionale Wertschöpfung. Alle ökonomischen Berechnungen werden ohne Steuern wie beispielsweise Mehrwertsteuer durchgeführt.

4.2.1 Betriebswirtschaftliche Betrachtung

Kostenkalkulation und Rentabilität der Rohstoffbereitstellung

Auf langfristige Sicht ist es bei der Rohstoffbereitstellung (Produktion von Agrar- bzw. Forstrohstoffen, wie z. B. Weizen bis Feldrand bzw. Rohholz bis Waldstraße inklusive Transport zur Transformationsstätte) nötig, dass alle entstehenden Kosten von den Erlösen mindestens abgedeckt werden. Um dies in den ökonomischen Berechnungen abbilden zu können, ist eine Vollkostenrechnung inklusive der kalkulatorischen Kosten (Boden, Kapital und Arbeit) zwingend notwendig [81].

Die **Rohstoffbereitstellungskosten** ($K_{Rohstoff}$) werden anhand des Schemas der Betriebszweigabrechnung der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft [11] strukturiert und summiert. Formel (4.2) zeigt die Summation der einzelnen Kostenarten in € je funktionelle Einheit (FE).

$$K_{Rohstoff} = K_{Direkt} + K_{Arbeit} + K_{Gebäude} + K_{Fläche} + K_{Sonstige} \quad (4.2)$$

$K_{Rohstoff}$	=	<i>Rohstoffbereitstellungskosten in € FE⁻¹</i>
K_{Direkt}	=	<i>Direktkosten in € FE⁻¹</i>
K_{Arbeit}	=	<i>Arbeitserledigungskosten in € FE⁻¹</i>
$K_{Gebäude}$	=	<i>Gebäudekosten in € FE⁻¹</i>
$K_{Fläche}$	=	<i>Flächenkosten in € FE⁻¹</i>
$K_{Sonstige}$	=	<i>Sonstige Kosten in € FE⁻¹</i>

Im Folgenden werden die oben aufgeführten Kostenarten erläutert:

Direktkosten

Die Direktkosten umfassen alle Kosten, die einem Betriebszweig direkt und verursachungsgemäß zugeordnet werden können, wie z. B. Saatgut, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel, Hagelversicherung, sowie einen kalkulatorischen Zinsansatz für das Umlaufkapital.

Arbeitserledigungskosten

Mit den Arbeitserledigungskosten werden alle Kosten erfasst, die durch den Einsatz von Maschinen in den Prozessen [A1] bis [A3] bzw. [T] entstehen. Der Arbeitszeitbedarf beinhaltet nicht nur die reine Maschinenzeit auf dem Feld/im Wald, sondern auch eventuel-

le Wartezeiten (z. B. bei der Ernte), Rüstzeiten am Hof (Vorbereiten der Maschinen, Befüllen mit Saatgut etc.) sowie Wegezeiten. Bei Transportvorgängen kommen die Lade- und Entladezeiten hinzu. Die Maschinenkosten setzen sich aus den fixen und variablen Maschinenkosten zusammen. Die fixen Maschinenkosten beinhalten die Abschreibungskosten der Maschinen, einen Zinsansatz bzw. Zinskosten, Kosten der technischen Überwachung, Kfz-Steuer, Versicherungskosten sowie Wartungskosten. Die variablen Maschinenkosten berücksichtigen Kraftstoff-, Schmierstoff-, Betriebsmittel- und Reparaturkosten.

Gebäudekosten

Zu den Gebäudekosten zählen alle Kosten für betriebliche Gebäude. Dies sind die Aufwendungen für Unterhaltung, Versicherungen, Abschreibung sowie der kalkulatorische Zinsansatz für das gebundene Gebäudekapital bzw. Zinskosten. Die Berechnung der Abschreibung erfolgt zeitabhängig und linear ohne Restwert nach Ablauf des wirtschaftlichen Nutzungspotentials.

Vergleichbar zu den Umweltwirkungen lassen sich die Direktkosten, Arbeitserledigungskosten und Gebäudekosten den einzelnen Prozessen in den Prozess-Untergruppen [A1] bis [A3] der Systemdarstellung (siehe Abschnitt 2.2.1) zuordnen. Flächenkosten (Pacht, sonstige Flächenkosten, wie z. B. Wegekosten) und Sonstige Kosten (Gemeinkosten, wie z. B. Verwaltungskosten oder allgemeine Betriebsversicherungen) lassen sich den einzelnen Prozessen in den Prozess-Untergruppen [A1] bis [A3] der Systemdarstellung jedoch nicht eindeutig zuordnen. Aus diesem Grund werden die Flächenkosten und Sonstigen Kosten der Prozess-Untergruppe [A4] zugeordnet.

Als ökonomische Kennzahl für die Rentabilität der Rohstoffbereitstellung dient der **Unternehmergewinn** [56]. Dieser berechnet sich aus der Differenz von Erlösen des Rohstoffs und den Kosten der Rohstoffbereitstellung (siehe Formel (4.3)). Der Unternehmergewinn sagt aus, ob es langfristig für einen Betrieb sinnvoll ist, den gewählten Rohstoff anzubauen. Nur mit einem positiven Unternehmergewinn wird ein Landwirt bzw. Forstwirt langfristig die Rohstoffbereitstellung betreiben. Der Unternehmergewinn aus der Rohstoffbereitstellung ist eine Eingangsgröße für die regionale Wertschöpfung. Für den Fall der eigenbetrieblichen Rohstoffbereitstellung ist der Unternehmergewinn null, da in diesem Fall die Selbstkosten in das weitere Produktsystem eingehen.

$$UG = E_{Rohstoff} - K_{Rohstoff} \quad (4.3)$$

UG = Unternehmergewinn in € FE⁻¹

$E_{Rohstoff}$ = Erlöse Rohstoff in € FE⁻¹

$K_{Rohstoff}$ = Kosten der Rohstoffbereitstellung in € FE⁻¹

Kostenkalkulation und Rentabilität des Produktsystems

Im nächsten Schritt werden die Kosten des Produktsystems (z. B. für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung, Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas, Wärmebereitstellung aus Scheitholz) analog zur Kostenkalkulation der Rohstoffbereitstellung auf Vollkostenbasis inklusive der kalkulatorischen Kosten ermittelt.

$$K_{\text{Produktsystem}} = (K_K + K_V + K_B + K_S) - E_{KP} \quad (4.4)$$

$K_{\text{Produktsystem}}$	=	<i>Gestehungskosten des Produktsystems in € FE⁻¹</i>
K_K	=	<i>Kapitalgebundene Kosten in € FE⁻¹ (Investitionen, Zins)</i>
K_V	=	<i>Verbrauchsgebundene Kosten in € FE⁻¹</i> <i>(Rohstoffbereitstellungskosten, sonstiger Materialverbrauch etc.)</i>
K_B	=	<i>Betriebsgebundene Kosten in € FE⁻¹ (Personal, Wartung etc.)</i>
K_S	=	<i>Sonstige Kosten in € FE⁻¹ (Versicherungen etc.)</i>
E_{KP}	=	<i>Erlöse in € FE⁻¹ (Erlöse Koppelprodukte)</i>

Die Gestehungskosten des Produktsystems setzen sich aus den kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten sowie den Sonstigen Kosten zusammen.

Die Kapitalkosten berücksichtigen die Abschreibung für die Anlagen- und Bautechnik sowie die (kalkulatorische) Zinsbelastung. Verbrauchsgebundene Kosten sind in erster Linie die Rohstoffbereitstellungskosten (Forst- und Agrarrohstoffe inklusive deren Transport). Wird der Forst- bzw. Agrarrohstoff gehandelt, sind Marktpreise anzusetzen. Liegt der Rohstoff noch nicht in der Form für die weitere Nutzung vor (z. B. Hackschnitzel aus Rohholz), so müssen die Kosten für den Bearbeitungsprozess (= Arbeiterledigungskosten) ebenfalls berücksichtigt werden. Die sonstigen Kosten umfassen z. B. Kosten für Versicherungen. Erlöse von Koppelprodukten werden den Kosten des Hauptprodukts gegengerechnet, z. B. Wärme bei stromgeführten KWK-Anlagen. Zur Bewertung der Koppelprodukte werden reale bzw. marktübliche Preise angesetzt.

Analog zur Rohstoffbereitstellung dient der Unternehmerngewinn als ökonomische Kennzahl für die Rentabilität des Produktsystems. Dieser berechnet sich aus der Differenz der Erlöse des Hauptprodukts und den Kosten des Produktsystems inklusive der Erlöse der Koppelprodukte.

4.2.2 Volkswirtschaftliche Betrachtung

Umweltwirkungs-Vermeidungskosten

Aus volkswirtschaftlicher Sicht bieten die Umweltwirkungs-Vermeidungskosten eine Orientierung bei der Frage, welche Produktsysteme der Staat unterstützen sollte. Bei begrenzten Fördermitteln sollten tendenziell die Produktsysteme gefördert werden, die geringe Umweltwirkungs-Vermeidungskosten aufweisen. Damit soll erreicht werden, einen möglichst hohen Umweltschutz mit den eingesetzten finanziellen Mitteln zu erreichen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Berechnung der Vermeidungskosten aufgrund des hohen Umfangs variabler Größen (Preisentwicklung von Kraftstoffen/konventionellen Brennstoffen, Konkurrenz auf dem Markt nachwachsender Rohstoffe, Lernkurveneffekte bei neuartigen Konversionstechnologien) eine statische Zeitpunkt Betrachtung ist und dynamische Effekte nicht erfasst werden. Innovative Technologien mit ggf. höheren Vermeidungskosten sollten nicht generell von der Förderung ausgeschlossen werden, da dies neuartige Vermeidungstechnologien eher verhindern würde und anzunehmen ist, dass sich diese ohne Förderung nicht am Markt durchsetzen.

Zur Berechnung von Umweltwirkungs-Vermeidungskosten werden die Gestehungskosten und die Umweltwirkungen des untersuchten Produktsystems sowie des jeweiligen Referenzsystems benötigt.

Die Formel (4.5) zeigt die Berechnung der Vermeidungskosten für die isolierte Betrachtung einer Umweltwirkung [86][93].

$$VK = \frac{K_{\text{Produktsystem}} - K_{\text{Referenzsystem}}}{UW_{\text{Referenzsystem}} - UW_{\text{Produktsystem}}} \quad (4.5)$$

VK	=	<i>Umweltwirkungs-Vermeidungskosten in € ME⁻¹</i>
$K_{\text{Produktsystem}}$	=	<i>Gestehungskosten des Produktsystems in € FE⁻¹</i>
$K_{\text{Referenzsystem}}$	=	<i>Gestehungskosten des Referenzsystems in € FE⁻¹</i>
$UW_{\text{Produktsystem}}$	=	<i>Umweltwirkung des Produktsystems in ME FE⁻¹</i>
$UW_{\text{Referenzsystem}}$	=	<i>Umweltwirkung des Referenzsystems in ME FE⁻¹</i>

Umweltwirkungs-Vermeidungsleistung

Volkswirtschaftlich betrachtet sind grundsätzlich die Produktsysteme vorteilhafter, die zu einer hohen Umweltwirkungs-Vermeidungsleistung führen. Formel (4.6) zeigt die Berechnung der Umweltvermeidungsleistung.

$$VL = UW_{\text{Referenzsystem}} - UW_{\text{Produktsystem}} \quad (4.6)$$

VL	=	<i>Umweltwirkungs-Vermeidungsleistung in CO₂-Äq FE⁻¹</i>
$UW_{\text{Produktsystem}}$	=	<i>Umweltwirkung des Produktsystems in CO₂-Äq FE⁻¹</i>
$UW_{\text{Referenzsystem}}$	=	<i>Umweltwirkung des Referenzsystems in CO₂-Äq FE⁻¹</i>

Vor allem der Bezug der Vermeidungsleistung auf die Fläche (funktionelle Einheit FE = Flächeneinheit) ist in landwirtschaftlich stark genutzten Gebieten von großer Bedeutung. Landwirtschaftliche Fläche stellt dort eine begrenzte Ressource dar, bei der es zur Konkurrenz zwischen den verschiedenen Produktsystemen (energetische und stoffliche Nutzung, Nahrungsmittelproduktion) kommen kann. Dementsprechend sollte die Vermei-

dungsleistung je Flächeneinheit bei der Bewertung von Produktsystemen stets Berücksichtigung finden.

Kombination von Vermeidungskosten und Vermeidungsleistung

Letztendlich ist eine Gewichtung der beiden Kriterien Vermeidungskosten und Vermeidungsleistung vorzunehmen. Im Folgenden wird beispielhaft die Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Wirkungsindikator CO₂-Äquivalente herangezogen. Es sind diejenigen Produktsysteme überlegen, mit denen auf der Fläche hohe THG-Vermeidungsleistungen zu erzielen sind und zugleich geringe THG-Vermeidungskosten entstehen (Bereich B in Abbildung 3). Die Entscheidung bezüglich der Bereiche A und C ist im Einzelfall zu treffen, ob ein Produktsystem aufgrund weiterer Kriterien, z. B. dem Anfall wertvoller Koppelprodukte, dennoch als vorteilhaft erachtet werden kann. Beispielsweise können hier weitere Wirkungskategorien wie Versauerung, Eutrophierung, Auswirkung auf die Biodiversität usw. herangezogen werden, um eine mehrdimensionale Bewertung vornehmen zu können. Produktsysteme aus dem Bereich D sind volkswirtschaftlich nur schwer vertretbar.

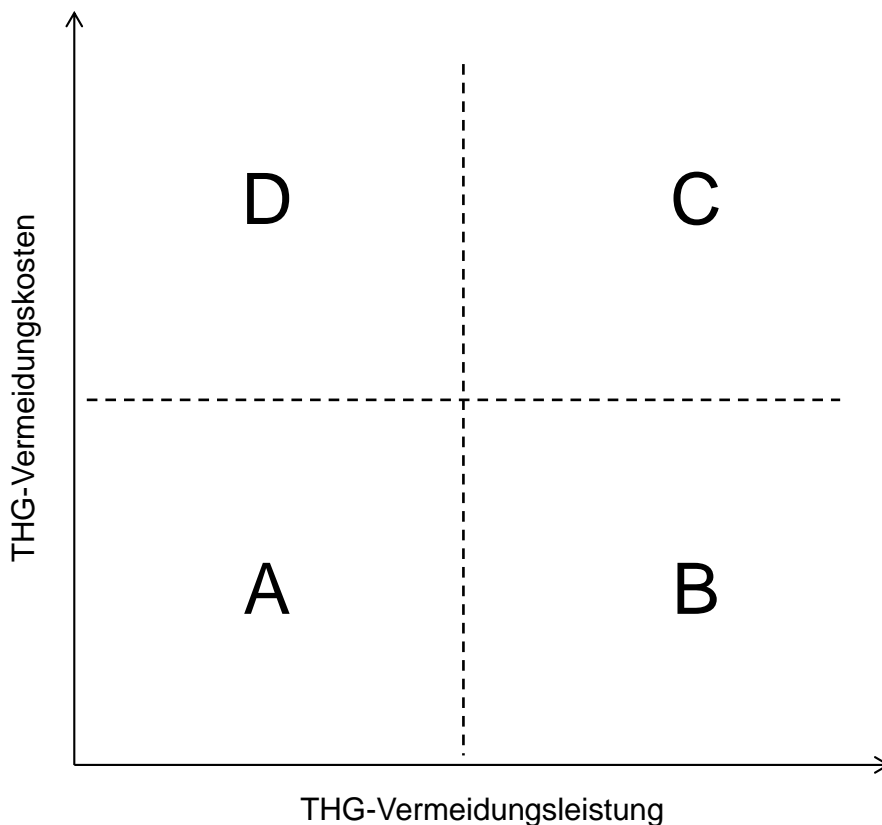


Abbildung 3: Kombination von THG-Vermeidungskosten und THG-Vermeidungsleistungen

Beschäftigungseffekte und Strukturwandel

Die Begründung neuartiger Technologien und ein damit einhergehender Strukturwandel sind immer mit einer Veränderung der Beschäftigungsstruktur verbunden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist die Bewertung eines Strukturwandels hinsichtlich der Beschäftigung sehr differenziert vorzunehmen. Für einzelne Teilbereiche von Wirtschaftssektoren, wie die regenerative Energiegewinnung, bestehen bereits Studien, die Auskunft über die Bruttobeschäftigung geben [69]. Aus volkswirtschaftlicher Sicht bedeutet Bruttobeschäftigung, dass die Zunahme der Beschäftigten im betrachteten Sektor erfasst wird, ohne die Abwanderungen und Verluste in anderen Wirtschaftssektoren zu berücksichtigen. Erst die komplexe Betrachtung der Nettobeschäftigung ließe Aussagen darüber zu, welche Auswirkungen ein Strukturwandel wie die sogenannte Energiewende auf die Beschäftigungszahlen in den einzelnen Wirtschaftssektoren hat. Es empfiehlt sich in den einzelnen Produktsystemen die Arbeitserledigungskosten und damit auch die Arbeitszeiten zu erfassen. Werden diese Arbeitsstunden für die jeweiligen Produktsysteme aggregiert, können Kennzahlen ermittelt werden, die die Arbeitsintensität der einzelnen Produktsysteme widerspiegeln.

Regionale Wertschöpfung

Der Anbau von Forst- und Agrarrohstoffen und ihre zentrale oder dezentrale Weiterverarbeitung können für die Region eine Wertschöpfung bedeuten. Zur Berechnung der ökonomischen Kennzahl „Regionale Wertschöpfung“ wird der Unternehmergewinn des untersuchten Produktsystems herangezogen. Werden die bereitgestellten Rohstoffe (Forst- bzw. Agrarrohstoffe) des untersuchten Produktsystems am Markt gehandelt, muss auch ein eventueller Unternehmergewinn der Rohstoffbereitstellung berücksichtigt werden.

5 Referenzsysteme

Zur Einschätzung der ökobilanziellen und ökonomischen Bewertung land- und forstwirtschaftlicher Produktsysteme können die Ergebnisse einem oder mehreren Referenzsystemen gegenübergestellt werden, um z. B. etwaige Substitutionseffekte abzuleiten (vgl. Prozessgruppe [G] in Abschnitt 2.2.1). Für jedes bereitgestellte Produkt muss dann mindestens ein Referenzsystem herangezogen werden, je nachdem welche Art von Vergleich benötigt wird. So könnte beispielsweise von Interesse sein, die THG-Vermeidungsleistungen (Substitutionseffekte) zu quantifizieren, wenn eine bestehende Ölheizung durch eine Pelletheizung ersetzt wird. Das Referenzsystem wäre dann die Erzeugung von Wärme aus Heizöl.

Nachfolgend werden die Referenzsysteme für die Bereitstellung von Biokraftstoffen sowie für die Bereitstellung von Strom- und Wärme exemplarisch dargelegt. Die stoffliche Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Biomasse ist in diesem Zusammenhang zu komplex, um hier im Einzelnen dargestellt werden zu können. Hier sind zahlreiche Nutzungsvarianten möglich, die wiederum mit einem Vielfachen an Referenzsystemen gegenübergestellt werden können.

5.1 Referenzsystem der Kraftstoffnutzung

5.1.1 Emissionsfaktoren

Für die Ableitung des richtigen Referenzsystems sind für die oben benannten Anwendungsbereiche z. B. folgende Substitutionsmöglichkeiten zu beachten:

- Bioethanol wird als Ersatz für fossilen Ottokraftstoff (Benzin) als Quasi-Reinkraftstoff in Form von „E85“ oder als Blendkomponente für die Verbrennung in Ottomotoren verwendet.
- Biodiesel kann sowohl als Reinkraftstoff als auch zur Beimischung zu fossilem Dieseldieselkraftstoff verwendet werden.
- Pflanzenölkraftstoff findet als Substitut für fossilen Dieseldieselkraftstoff im forst- und landwirtschaftlichen „Offroad“-Verkehr Anwendung.
- Biomethan wird als Substitut in (erdgasbetriebenen) Ottomotoren sowie in Dieseldieseldiesel-Zündstrahlmotoren eingesetzt.

Für alle aufgeführten Kraftstoffe gilt, dass 1 MJ Biokraftstoff 1 MJ fossilen Kraftstoff im jeweiligen Motorenkonzept ersetzen kann [65].

Die Richtlinie 2009/28/EG schreibt für die Bewertung des THG-Minderungspotentials von Biokraftstoffen $83,8 \text{ g CO}_2\text{-Äq MJ}^{-1}$ als allgemeinen fossilen Referenzwert vor. Eine Differenzierung zwischen Ottokraftstoff und Dieseldiesel sowie der spezifischen Motornutzung erfolgt nicht. Weitere Emissionen wie z. B. Partikelemissionen oder Emissionen mit versauernder oder eutrophierender Wirkung bleiben in der Richtlinie unberücksichtigt.

Für eine differenzierte Bewertung von Biokraftstoffen wird neben der Verwendung des ordnungspolitisch vorgeschriebenen Referenzwerts empfohlen, die Referenzszenarien entsprechend den jeweiligen Nutzungsvarianten festzulegen. Dazu zählen z. B. der Straßen-, der Flug-, der Eisenbahn- und der Schiffsverkehr sowie der land- und forstwirtschaftliche Offroad-Bereich.

Nachfolgend werden die Referenzsysteme Straßenverkehr sowie land- und forstwirtschaftlicher Verkehr im Offroad-Bereich dargelegt. Dabei wird sowohl zwischen den fossilen Kraftstoffen als auch zwischen den verschiedenen Nutzungsoptionen unterschieden. Darüber hinaus werden alle aufgeführten Referenzsysteme sowohl für 1 MJ eingesetzten Kraftstoff als auch für die spezifische Nutzungseinheit (Fzg-km, tkm bzw. h) angegeben.

Benzin- und dieselbetriebene Personenkraftwagen

In Tabelle 17 und Tabelle 18 sind die Emissionsfaktoren benzin- und dieselbetriebener Personenkraftwagen aufgeführt. Sie sind der Professional-Datenbank der GaBi-Software [85] entnommen und spiegeln den Kraftstoffverbrauch und das Emissionsverhalten des deutschen Technologiemies für Fahrzeuge der Abgasnorm Euro 5 wider. Weiterhin beinhalten die Emissionsfaktoren die Umweltauswirkungen sowohl durch die Verbrennung als auch durch die Bereitstellung des Kraftstoffs. Die Vorketten der Diesel- und Benzinbereitstellung stammen aus der ecoinvent-Datenbank [47].

Tabelle 17: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für benzin- und dieselbetriebene Personenkraftwagen in Bezug auf den Energiegehalt des Kraftstoffs, auf Basis von [85][47]

	Globale Erwärmung	Primärener- giebedarf	Partikel- emission	Eutrophie- rung	Versaue- rung
	CO ₂ -Äq in kg MJ ⁻¹	MJ MJ ⁻¹	PM _{2,5} -Äq in kg MJ ⁻¹	P-Äq in kg MJ ⁻¹	H ⁺ -Äq in mol MJ ⁻¹
Benzin					
> 2,0 l Hubraum	8,53E-02	1,25	1,49E-05	2,83E-06	2,71E-04
1,4 – 2,0 l Hubraum	8,53E-02	1,25	1,56E-05	2,83E-06	2,93E-04
< 1,4 l Hubraum	8,53E-02	1,25	1,61E-05	2,83E-06	3,10E-04
Diesel					
> 2,0 l Hubraum	8,31E-02	1,20	1,30E-05	2,26E-06	3,82E-04
1,4 – 2,0 l Hubraum	8,33E-02	1,20	1,39E-05	2,26E-06	4,56E-04
< 1,4 l Hubraum	8,35E-02	1,20	1,51E-05	2,26E-06	5,49E-04

Tabelle 18: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für benzin- und dieselbetriebene Personenkraftwagen in Bezug auf den Fahrzeugkilometer, auf Basis von [85][47]

	Globale Erwärmung	Primärener- giebedarf	Partikel- emission	Eutrophie- rung	Versaue- rung
	CO ₂ -Äq in kg Fzg-km ⁻¹	MJ Fzg-km ⁻¹	PM _{2,5} -Äq in kg Fzg-km ⁻¹	P-Äq in kg Fzg-km ⁻¹	H ⁺ -Äq in mol Fzg- km ⁻¹
Benzin					
> 2,0 l Hubraum	2,67E-01	3,91	4,68E-05	8,87E-06	8,49E-04
1,4 – 2,0 l Hubraum	1,94E-01	2,84	3,55E-05	6,45E-06	6,68E-04
< 1,4 l Hubraum	1,61E-01	2,35	3,03E-05	5,33E-06	5,84E-04
Diesel					
> 2,0 l Hubraum	2,02E-01	2,91	3,16E-05	5,49E-06	9,29E-04
1,4 – 2,0 l Hubraum	1,51E-01	2,17	2,53E-05	4,09E-06	8,27E-04
< 1,4 l Hubraum	1,15E-01	1,65	2,08E-05	3,10E-06	7,54E-04

Dieselbetriebene Lastkraftwagen

Die in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgeführten Emissionsfaktoren der Lastkraftwagen-Nutzung beinhalten die Umweltauswirkungen sowohl durch die Verbrennung als auch durch die Bereitstellung des Kraftstoffs. Die Emissionsfaktoren aus der Kraftstoffverbrennung basieren auf Datensätzen der Professional-Datenbank der GaBi-Software und beziehen sich auf unterschiedliche Gewichtsklassen für den deutschen Technologiemarkt der Abgasnorm Euro 5. [85]. Die Vorketten der Diesel- und Benzinbereitstellung sind der ecoinvent-Datenbank [47] entnommen.

Tabelle 19: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für dieselbetriebene Lastkraftwagen in Bezug auf den Energiegehalt des Kraftstoffs, auf Basis von [85][47]

zulässiges Gesamtgewicht	Globale Erwärmung	Primärener- giebedarf	Partikel- emission	Eutrophie- rung	Versaue- rung
	CO ₂ -Äq in kg MJ ⁻¹	MJ MJ ⁻¹	PM _{2,5} -Äq in kg MJ ⁻¹	P-Äq in kg MJ ⁻¹	H ⁺ -Äq in mol MJ ⁻¹
> 20 t	8,27E-02	1,20E+00	1,43E-05	2,26E-06	3,74E-04
14 – 20 t	8,27E-02	1,20E+00	1,44E-05	2,26E-06	3,93E-04
12 – 14 t	8,28E-02	1,20E+00	1,40E-05	2,26E-06	3,63E-04
7,5 – 12 t	8,28E-02	1,20E+00	1,40E-05	2,26E-06	3,65E-04
7,5 t	8,29E-02	1,20E+00	1,36E-05	2,26E-06	3,48E-04

Tabelle 20: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für dieselbetriebene Lastkraftwagen in Bezug auf den Tonnenkilometer, auf Basis von [85][47]

zulässiges Gesamtgewicht	Globale Erwärmung CO ₂ -Äq in kg tkm ⁻¹	Primärenergiebedarf MJ tkm ⁻¹	Partikelemission PM _{2,5} -Äq in kg tkm ⁻¹	Eutrophierung P-Äq in kg tkm ⁻¹	Versauerung H ⁺ -Äq in mol tkm ⁻¹
> 20 t	5,75E-02	8,34E-01	9,97E-06	1,57E-06	2,60E-04
14 – 20 t	6,97E-02	1,01E+00	1,22E-05	1,90E-06	3,31E-04
12 – 14 t	7,47E-02	1,08E+00	1,26E-05	2,04E-06	3,28E-04
7,5 – 12 t	1,33E-01	1,92E+00	2,25E-05	3,62E-06	5,86E-04
7,5 t	1,44E-01	2,08E+00	2,36E-05	3,92E-06	6,04E-04

Land und forstwirtschaftlicher Verkehr im Offroad-Bereich

Beispielhaft für den land- und forstwirtschaftlichen Verkehr im Offroad-Bereich wurde der Einsatz im Traktor herangezogen. Die dazu in Tabelle 21 aufgeführten Emissionsfaktoren sind ebenfalls der Professional-Datenbank der GaBi-Software entnommen [85]. Das dabei zugrunde gelegte Abgasmodell basiert auf Emissionsmessungen von Agroscope – Schweizer Forschung für Landwirtschaft, Ernährung und Umwelt bis zum Jahr 2013 für Traktoren in einem Leistungsbereich von 30 bis 180 kW. Für den Kraftstoffverbrauch wurde ein Traktor mit einer Nennleistung von 176 kW nach [10] angenommen. Die Emissionsfaktoren für die Dieselbereitstellung stammen aus der ecoinvent-Datenbank [47].

Tabelle 21: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für Land- und Forstmaschinen in Bezug auf den Energiegehalt des Kraftstoffs, auf Basis von [85][47]

	Globale Erwärmung CO ₂ -Äq in kg MJ ⁻¹	Primärenergiebedarf MJ MJ ⁻¹	Partikelemission PM _{2,5} -Äq in kg MJ ⁻¹	Eutrophierung P-Äq in kg MJ ⁻¹	Versauerung H ⁺ -Äq in mol MJ ⁻¹
Transportarbeiten	8,25E-02	1,20E+00	8,03E-05	2,26E-06	8,00E-04
wenig Leistung, mittlere Drehzahl	8,25E-02	1,20E+00	8,04E-05	2,26E-06	1,00E-03
hohe Leistung, mittlere Drehzahl	8,25E-02	1,20E+00	8,04E-05	2,26E-06	9,97E-04

Tabelle 22: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Kraftstoffnutzung für Land- und Forstmaschinen in Bezug auf die spezifische Arbeitsstunde, auf Basis von [85][47]

	Globale Erwärmung CO ₂ -Äq in kg h ⁻¹	Primärenergiebedarf MJ h ⁻¹	Partikelemission PM2,5-Äq in kg h ⁻¹	Eutrophierung P-Äq in kg h ⁻¹	Versauerung H ⁺ -Äq in mol h ⁻¹
Transportarbeiten	6,11E+01	8,88E+02	5,95E-02	1,67E-03	5,93E-01
wenig Leistung, mittlere Drehzahl	4,98E+01	7,23E+02	4,85E-02	1,36E-03	6,04E-01
hohe Leistung, mittlere Drehzahl	7,06E+01	1,03E+03	6,88E-02	1,93E-03	8,53E-01

5.1.2 Gesteungskosten für fossile Kraftstoffe

Als Referenzsystem dienen fossiler Otto- bzw. Dieseldieselkraftstoff. Als Gesteungskosten für Dieseldieselkraftstoff wird der Preis in € hl⁻¹ bei Abgabe von mindestens 100 hl an den Großhandel, frei Zielort gewählt (einschließlich Mineralölsteuer und Erdölbevorratungsbeitrag (EBV), ohne Mehrwertsteuer). Dieser Wert lag bei 93 € im ersten Halbjahr 2015 [80]. Die Mineralölsteuer muss hiervon noch abgezogen werden, die aktuell laut Energiesteuergesetz (EnergieStG) 47,04 Cent pro Liter Diesel beträgt. Damit betragen die Kosten für das Referenzsystem Diesel 45,96 Cent pro Liter Dieseldieselkraftstoff. Je MJ Dieseldieselkraftstoff ergeben sich mit den festgelegten Kraftstoffparametern in Tabelle 1 Kosten in Höhe von 0,0128 €. Das Vorgehen bei anderen fossilen Kraftstoffen (z. B. Ottokraftstoff) ist identisch. Da die Preise starken Schwankungen unterliegen, sind diese stets aktuell für die Berechnung anzusetzen.

5.2 Referenzsystem der Strombereitstellung

5.2.1 Emissionsfaktoren

Für den Strombereich wird empfohlen, den deutschen Strommix zu verwenden, falls keine genauere Zusammensetzung des Referenzsystems bekannt ist. Falls ein abweichender Strommix (z. B. Strommix Bayern oder 100 % Wasserkraft) bekannt ist, kann dieser individuell als Referenzsystem verwendet werden. Tabelle 23 zeigt die Emissionsfaktoren des Referenzsystems Strommix Deutschland sowie der Einzeltechnologien zur Strombereitstellung in Deutschland. Die aufgeführten Emissionsfaktoren sind der Professional-Datenbank der GaBi-Software entnommen [85]. Mithilfe der Emissionsfaktoren der Einzeltechnologien sowie deren Anteil am Strommix kann ein individuelles, strommengen-gewichtetes Referenzsystem generiert werden.

Tabelle 23: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Strommix Deutschland sowie der Einzeltechnologien zur Strombereitstellung [85]

	Globale Erwärmung	Primärenergiebedarf	Partikelemission	Eutrophierung	Versauerung	Anteil
	CO ₂ -Äq in kg MJ ⁻¹	in MJ MJ ⁻¹	PM2,5-Äq in kg MJ ⁻¹	P-Äq in kg MJ ⁻¹	H ⁺ -Äq in mol MJ ⁻¹	%
Strommix Deutschland	0,178	2,314	1,49E-05	3,42E-07	3,20E-04	100,0
Abfall	0,194	0,365	4,81E-06	8,02E-08	3,55E-04	1,8
Atomkraft	0,001	2,781	6,09E-07	1,02E-08	1,07E-05	17,8
Biogas	0,102	1,249	3,08E-05	6,82E-06	8,05E-04	3,5
Biomasse (fest)	0,014	0,149	1,47E-05	3,33E-06	4,42E-04	1,9
Braunkohle	0,323	2,841	2,17E-05	1,14E-08	4,52E-04	24,8
Erdgas	0,138	2,234	3,28E-06	4,39E-09	1,33E-04	13,8
Kohlegas	0,285	2,693	1,27E-05	3,92E-08	5,92E-04	1,6
Photovoltaik	0,014	0,213	1,30E-05	5,53E-08	7,44E-05	3,2
Schweröl	0,226	2,710	3,35E-05	3,92E-08	7,51E-04	1,1
Steinkohle	0,286	2,879	2,99E-05	4,38E-08	5,64E-04	18,6
Wasserkraft	0,002	0,008	1,81E-07	1,36E-09	2,94E-06	3,9
Windkraft	0,003	0,041	1,51E-06	5,89E-09	1,16E-05	8,1

5.2.2 Stromgestehungskosten

Bei der Ermittlung der THG-Vermeidungskosten erneuerbarer Energien auf dem Stromsektor sind die Besonderheiten des Strommarkts zu berücksichtigen. Wichtig ist hierbei die Frage, welche Stromerzeugung durch die Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie verdrängt wird und welche Referenzanlage somit heranzuziehen ist. Denn das Stromangebot am Stromgroßhandel basiert auf den Grenzkosten der Stromerzeugung. Die Kraftwerke werden anhand ihrer Grenzkosten, beginnend mit den Kraftwerken, welche die geringsten Grenzkosten aufweisen, sortiert (Merit Order) und eingesetzt. Die Höhe der Grenzkosten der Stromerzeugung (variable Kosten) ist insbesondere von den Brennstoffkosten abhängig. Da fossile Kraftwerke dem europäischen Emissionshandel unterliegen, ist bei der Ermittlung der variablen Kosten zusätzlich der CO₂-Preis zu berücksichtigen. Welches Kraftwerk gerade noch benötigt wird, um den Bedarf zu decken, ist von der Höhe der Stromnachfrage abhängig. Da die Stromerzeugung aus Windenergie und solarer Strahlungsenergie minimale Grenzkosten aufweisen, verdrängt die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien fossile Kraftwerke, insbesondere Gas- und Steinkohlekraftwerke und wirkt auf den Strompreis an der Börse preisdämpfend (Merit-Order-Effekt). Demnach ändern sich der Strommix und somit auch die Emissionsfaktoren

im Tagesverlauf, da die Stromnachfrage von unterschiedlichen Energieerzeugungsanlagen gedeckt wird.

Zur Ermittlung der Umweltwirkungs-Vermeidungskosten sollten als Referenzwerte die Stromgestehungskosten derjenigen Technologien herangezogen werden, die durch die Bioenergie ersetzt werden. Wenn die zu ersetzenden Technologien nicht eindeutig feststellbar sind, ist es sinnvoll, als Referenzwert einen Strommix heranzuziehen. Dieser kann der im vorangegangenen Abschnitt dargestellte deutsche Gesamtstrommix sein (siehe Tabelle 23). Wird davon ausgegangen, dass die erneuerbaren Energien als Ersatz für fossilen Strom dienen, wird empfohlen, einen Strommix aus Braunkohle-, Steinkohle und Erdgaskraftwerken zu verwenden. Die Gewichtung erfolgt gemäß ihrem Anteil an der deutschen Bruttostromerzeugung (siehe Tabelle 23) bezogen auf 100 %. Die durchschnittlichen Stromgestehungskosten basieren auf Werten des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme [54] (siehe Tabelle 24). Die Stromgestehungskosten des gewählten Strommixes betragen demnach 0,0177 € MJ⁻¹. Die Berechnungen der Umweltwirkungen zur Ausweisung der Vermeidungskosten sind dann ebenfalls aus den relativen Anteilen am deutschen Strommix (siehe Tabelle 24) und den Emissionen in Tabelle 23 zu ermitteln. Diese betragen demnach für den fossilen Strommix 0,266 kg MJ⁻¹.

Tabelle 24: Stromgestehungskosten aus Braun-, Steinkohle und Erdgas

Energieträger	Relativer Anteil am deutschen Strommix (siehe Tabelle 23) in %	Durchschnittliche Stromgestehungskosten [54] in € MJ ⁻¹
Braunkohle	43,4	0,0126
Steinkohle	32,5	0,0199
Erdgas	24,1	0,0240

5.3 Referenzsystem der Wärmebereitstellung

5.3.1 Emissionsfaktoren

Für den Wärmebereich wird empfohlen, den Emissionsfaktor der tatsächlich verdrängten Technologie (falls bekannt) zu verwenden. Ist dies nicht der Fall, sollte der Emissionsfaktor des Referenzsystems Wärmemix Bayern verwendet werden (siehe Tabelle 25).

WOLF et al. (2015) [94] stellen für den Wärmemix Bayern die entsprechenden Emissionsfaktoren zur Verfügung, welche die Anteile der einzelnen Technologien am Endenergieverbrauch zur Wärmebereitstellung im Jahr 2011 widerspiegeln. Tabelle 25 zeigt die Emissionsfaktoren des Referenzsystems Wärmemix Bayern sowie der Einzeltechnologien zur Wärmebereitstellung basierend auf der Professional-Datenbank der GaBi-Software [85].

Tabelle 25: Emissionsfaktoren des Referenzsystems Wärmemix Bayern [94] sowie der Einzeltechnologien zur Wärmebereitstellung auf Basis von [85]

	Globale Erwärmung	Primärenergiebedarf	Partikelemission	Eutrophierung	Versauerung
	CO ₂ -Äq in kg MJ ⁻¹	MJ MJ ⁻¹	PM _{2,5} -Äq in kg MJ ⁻¹	P-Äq in kg MJ ⁻¹	H+-Äq in mol MJ ⁻¹
Wärmemix Bayern	0,075	1,087	2,19E-05	1,31E-06	1,24E-04
Wärmemix Bayern ohne Erneuerbare	0,086	1,251	4,75E-06	8,70E-08	1,18E-04
andere Erneuerbare*	0,028	0,516	1,45E-05	2,76E-05	1,71E-04
Braunkohle	0,114	1,004	7,68E-06	4,26E-09	1,60E-04
Erdgas	0,066	1,078	1,59E-06	2,15E-09	6,41E-05
Fernwärme	0,090	1,244	5,33E-06	8,05E-09	1,32E-04
feste Biobrennstoffe	0,010	0,099	1,39E-04	4,47E-06	1,57E-04
Flüssiggas	0,084	1,168	6,37E-06	3,38E-08	1,18E-04
Heizöl leicht	0,085	1,178	3,60E-06	1,41E-08	1,19E-04
Steinkohle	0,106	1,068	1,11E-05	1,65E-08	2,09E-04
Strom	0,171	2,313	1,60E-05	3,26E-07	3,33E-04

* Mix aus Tiefen- und oberflächennaher Geothermie, Solarthermie, Biogaswärme und biogenem Anteil des Abfalls gewichtet nach Endenergiemengen

5.3.2 Wärmegestehungskosten

Zur Berechnung der Wärmegestehungskosten wird die gleiche Vorgehensweise wie bei der Berechnung der Stromgestehungskosten empfohlen (vgl. Tabelle 25). Ist bekannt, welche Technologie durch die Bioenergie ersetzt wird, sollten stets die Emissionen und Kosten dieses Referenzsystems herangezogen werden. Weiterhin sollte auf eine Übereinstimmung der Rahmenbedingungen zwischen dem untersuchten Bioenergieproduktsystem und dem Referenzsystem geachtet werden. Das bedeutet, dass in beiden Fällen eine Skalierung der Kosten bezogen auf die Anlagennenngröße stattfindet. Hierzu eignen sich beispielsweise Nennwertleistungen.

Die dominierenden fossilen Energieträger für Wärmebereitstellung in Bayern sind derzeit leichtes Heizöl und Erdgas [94].

Heizölfeuerungen

Die Berechnung der Wärmegestehungskosten (Tabelle 26) von Heizöl-Feuerungsanlagen mit Nennwertleistungen von 6, 50 und 300 kW erfolgt konform zur VDI-Richtlinie 2067 [90] nach den Vorgaben des Handbuchs Bioenergie Kleinanlagen [39]. Für die Brennstoffkosten wird der Großhandelspreis (€ hl⁻¹) bei Abgabe von mindes-

tens 500 t ab Lager München angesetzt (einschließlich Mineralölsteuer und Erdölbevorzugungsbeitrag (EBV), ohne Mehrwertsteuer). Für das erste Halbjahr 2015 betrug der Preis 50,10 € pro Hektoliter [80]. Nach Abzug der Mineralölsteuer von 6,14 Cent pro Liter ergeben sich Brennstoffkosten pro Liter von 0,44 €. Die Ermittlung der Wärmegestehungskosten für die 300-kW-Feuerung erfolgt mithilfe einer Skaleneffektkurve auf Basis der 50-kW-Feuerung [35].

Erdgasfeuerungen

Die errechneten Wärmegestehungskosten der Heizölfeuerungen dienen als Grundlage für die Ermittlung der Wärmegestehungskosten des Erdgasreferenzsystems (Tabelle 26). Die kesselnennwertbezogene Skalierung erfolgt über den Vergleich der Skaleneffektkurven zwischen Heizöl und Erdgas. Die durchschnittliche prozentuale Kostendifferenz wird mit den jeweils ermittelten Ergebnissen des Referenzsystems Heizöl verrechnet und führt zu den Wärmegestehungskosten des Referenzsystems Erdgas [35].

Tabelle 26: Wärmegestehungskosten aus Heizöl und Erdgas

Leistung des Feuerungs-Referenzsystems	6 kW in € MJ ⁻¹	50 kW in € MJ ⁻¹	300 kW in € MJ ⁻¹
Heizölfeuerung	0,025	0,024	0,023
Erdgasfeuerung	0,016	0,015	0,014

Wenn die zu ersetzenden Technologien nicht eindeutig feststellbar sind, ist es sinnvoll, als Referenzwert einen Wärmemix heranzuziehen. Dies kann der im vorangegangenen Abschnitt dargestellte bayerische Wärmemix sein (siehe Tabelle 25). Überwiegend kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Bioenergie als Ersatz für die dominierenden fossilen Energieträger der Wärmebereitstellung in Bayern leichtes Heizöl (ca. 42,0 % der Endenergie) und Erdgas (ca. 20,8 % der Endenergie) [94] dienen. Aus diesem Grund wird empfohlen, die jeweiligen Wärmegestehungskosten aus diesen beiden fossilen Energieträgern als Referenzwerte zu verwenden. Die Gewichtung erfolgt gemäß ihrem Anteil am bayerischen Wärmemix (Endenergieverbrauch) bezogen auf 100 %. Als Kosten werden die mittleren Wärmegestehungskosten für ein Feuerungs-Referenzsystem mit einer Leistung von 50 kW herangezogen (siehe Tabelle 26).

6 Ergebnisdarstellung

Die ökologischen und ökonomischen Bilanzergebnisse für das untersuchte Produktsystem sollten möglichst transparent und konsistent analog zur Systemdarstellung in Abschnitt 2.2.1 dargestellt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit von Ergebnissen sollten genaue Angaben gemacht werden, welche Prozessgruppen das veröffentlichte Ergebnis beinhaltet. Grundsätzlich können die Ergebnisse sowohl grafisch als auch tabellarisch dargestellt werden. Zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit sollten aus der Ergebnisdarstellung das Gesamtergebnis und die Teilergebnisse der einzelnen Prozessgruppen innerhalb der Systemgrenze ([A], [B], [C], [D], [E], [T]) hervorgehen. Falls Effekte außerhalb der Systemgrenze (Prozessgruppe [F]) mitberücksichtigt werden, sollten diese als gesondertes Teilergebnis ausgewiesen werden. Das Gesamtergebnis inklusive des Teilergebnisses aus Prozessgruppe [F] sollte ebenfalls als eigenständiger Wert ausgewiesen werden (Abbildung 4).

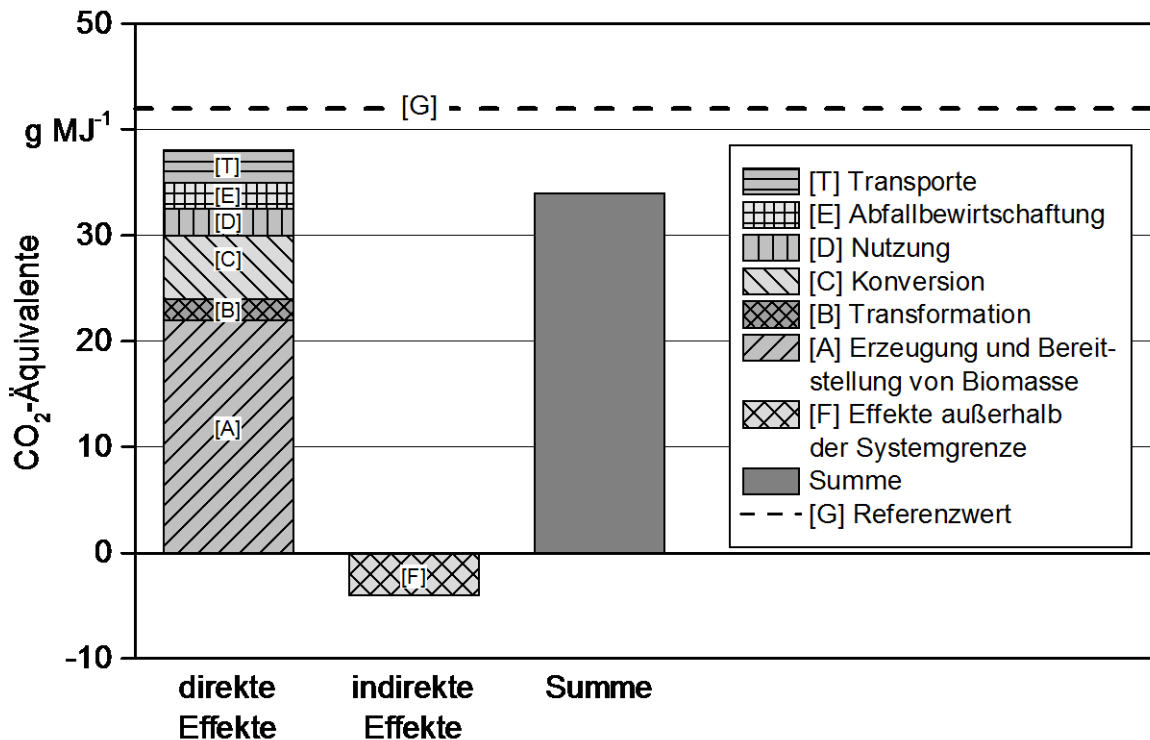


Abbildung 4: Grafische Ergebnisdarstellung für ein Produktsystem aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Wirkungsindikator CO₂-Äquivalente in g MJ⁻¹

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Transparenz ist die disaggregierte Ergebnisdarstellung in tabellarischer Form. Hierbei werden Teilergebnisse zugeordnet nach Prozessgruppe bzw. Prozess-Untergruppe auf Prozessebene dargestellt. Diese Vorgehensweise ermöglicht den praktischen, transparenten Vergleich von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien. Diese Art der Ergebnisdarstellung erfolgt ebenfalls analog zu der in Kapitel

2.2.1 beschriebenen Systemdarstellung und wird durch die Anwendungsbeispiele in Kapitel 7 ausführlich dargelegt.

Weiterhin sind zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit bei der Auswertung der Bilanzergebnisse stets die zeitlichen Bezüge der verwendeten Ökobilanzdatenbanken, Preisen und Kostenansätzen inklusive ihrer Quelle anzugeben. Sollten die Bilanzergebnisse einem Referenzsystem [G] gegenübergestellt werden, muss auch dieses mit zeitlichem Bezug und Quelle ausgewiesen werden. Hintergrund dafür ist, dass Ökobilanzdatenbanken und damit auch die in einer Bilanz verwendeten Emissionsfaktoren fortlaufend aktualisiert werden. Auch Referenzsysteme, wie beispielsweise der deutsche Strommix, unterliegen fortlaufenden Veränderungen, die sich auf die potentiellen Umweltwirkungen aber auch auf die Kostenstrukturen auswirken. Folglich ist die Angabe der Bezugszeiträume und Quellen insbesondere von Referenzsystemen und verwendeten Datenbanken für die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Bilanzergebnisse unerlässlich.

Neben der konsistenten und transparenten Aufbereitung der Ergebnisse analog zu Abbildung 4 oder Kapitel 7 sind die Bilanzergebnisse umfangreich auszuwerten und zu diskutieren. In diesem Zusammenhang werden folgende Punkte zur Ergebnisauswertung und -diskussion empfohlen:

- Identifikation von wesentlichen Einflussgrößen
- Durchführung von Szenarioanalysen (Variation der identifizierten Einflussgrößen)
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen unter Berücksichtigung folgender Aspekte:
 - mögliche Fehlerquellen
 - unzureichende Datenqualität
 - Auswahl der gewählten Methode zum Umgang mit Koppelprodukten.

7 Anwendungsbeispiele

Im folgenden Kapitel wird die harmonisierte Bilanzierungsmethode anhand von drei verschiedenen Produktsystemen der energetischen Biomassenutzung (Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung, Strom und Wärmebereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas, Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz) beispielhaft dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf der allgemeinen Beschreibung des Produktsystems, der Darstellung der Grundannahmen bzw. Bilanzkenngrößen sowie der Ergebnisdarstellung am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente ohne biogenes CO₂ und ökonomische Kennzahlen. Hier ist zu erwähnen, dass die für die Wirkungsabschätzung erforderlichen Emissionsfaktoren der einzelnen Hintergrundprozesse, wie z. B. die THG-Emissionen für die Herstellung von Maschinen oder für die Bereitstellung von Betriebsstoffen, nicht explizit dargestellt werden, sondern lediglich die Endergebnisse für die entsprechenden Produkte. Für die Hintergrundprozesse sind die Emissionsfaktoren vom Anwender selbst, beispielsweise mittels geeigneter Datenbanken, welche zum Teil bereits in speziellen Ökobilanzprogrammen oder Rechentools integriert sind, oder aus der Fachliteratur zu erheben. Dies ist damit zu begründen, dass das vorliegende Methodenhandbuch sich auf die methodische Herangehensweise der Ökobilanzierung fokussiert, Emissionsfaktoren sehr variabel sein können und deswegen hier standardmäßig keine Faktoren angegeben werden.

7.1 Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung

Im Folgenden wird die Anwendung der entwickelten Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen beispielhaft für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung dargestellt. Hierbei wird auf die getroffenen Grundannahmen zum Untersuchungsrahmen (Abschnitt 7.1.1), die festzulegenden Bilanzkenngrößen (Abschnitt 7.1.2) sowie auf die Bilanzergebnisse (Abschnitt 7.1.3) getrennt voneinander eingegangen.

7.1.1 Untersuchungsrahmen und Systemdarstellung

Die Rapsölkraftstoffproduktion erfolgt in einer dezentralen Ölmühle. Für die Bilanzierung werden die Rapszerzeugung (Prozessgruppen [A]), die dezentrale Ölgewinnung (Prozessgruppe [B]), der Transport der Rapsaat (Prozessgruppe [T]) sowie die betrieblichen Logistik- [L] und Vorleistungsprozesse [V] berücksichtigt. Als Bezugsgröße wird die Energie mit der funktionellen Einheit 1 MJ festgelegt. Neben dem Hauptprodukt Rapsölkraftstoff wird das Koppelprodukt Rapspresskuchen erzeugt, welches von der Ölmühle als Futtermittel vermarktet wird.

Die Zuordnung der Emissionen zwischen dem Rapsölkraftstoff und dem Presskuchen erfolgt durch Allokation nach dem Heizwert. Unter Berücksichtigung einer Ölausbeute von 0,365 kg kg⁻¹ Rapsaat mit einem Heizwert von 37,5 MJ kg⁻¹ sowie einem Rapskuchenanteil von 0,625 kg kg⁻¹ Rapsaat mit einem Heizwert von 20,7 MJ kg⁻¹ ergibt sich

ein Allokationsfaktor für den Rapsölkraftstoff von 51,4 %. Folglich entfallen 51,4 % aller Aufwendungen bis zur Ölpresung auf den Rapsölkraftstoff und 48,6 % auf den Presskuchen.

Die der Bilanz zugrunde gelegten Aktivitätsdaten zur Rapserzeugung und dezentralen Ölgewinnung repräsentieren das Erntejahr 2013 bzw. das Wirtschaftsjahr 2014. Soweit nicht anders angegeben, wurden die Aktivitätsdaten aus den Aufzeichnungen oder durch Befragung der Betriebsleiter vor Ort auf dem landwirtschaftlichen Betrieb bzw. der dezentralen Ölmühle erhoben. Die Bilanzergebnisse repräsentieren den Boden-Klima-Raum Albflächen und Ostbayerisches Hügelland nach ROßBERG et al. (2007) [75]. Die genannten Grundannahmen sowie die Festlegung der zu bilanzierenden Prozessgruppen und Prozesse zeigt die Systemdarstellung in Abbildung 5.

Bezeichnung Produktsystem: Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung			
Rohstoffgewinnung	Produktion	Anwendung	Reststoff- und Abfallbehandlung
<p><input checked="" type="checkbox"/> [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [A1] Bestandesbegründung <input checked="" type="checkbox"/> [A1.1] Bodenaufbereitung <input checked="" type="checkbox"/> [A1.2] Pflanzen/Aussaat <input checked="" type="checkbox"/> [A1.3] sonstige Flächenvorbereitung</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [A2] Bestandesführung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand <input checked="" type="checkbox"/> [A2.2] Ackerbau <input checked="" type="checkbox"/> [A2.3] Düngung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.4] Kalkung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [A3] Ernte <input checked="" type="checkbox"/> [A3.1] Ernte Biomasse <input checked="" type="checkbox"/> [A3.2] Vorliefern zur Staube <input checked="" type="checkbox"/> [A3.3] Aufbereitungsprozesse nach Ernte <input checked="" type="checkbox"/> [A3.4] Aufladen auf LKW/Traktor</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [A4] nicht-zuordenbar <input checked="" type="checkbox"/> [A4.1] C-Speicher Fläche <input checked="" type="checkbox"/> [A4.2] N₂O <input checked="" type="checkbox"/> [A4.3] andere Feldmaschinen <input checked="" type="checkbox"/> [A4.4] Unterbringung von Personal</p> <p><input type="checkbox"/> [A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [B] Transformation</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [B1] Lagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.1] Biomasselagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.2] Produktlagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.3] Ent- und Beladung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.4] Verpacken</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [B2] Vorbehandlung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.1] Feinreinigung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.2] Zerkleinern <input checked="" type="checkbox"/> [B2.3] Trocknung</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [B3] Umwandlung <input checked="" type="checkbox"/> [B3.1] chemische Transformation <input checked="" type="checkbox"/> [B3.2] mechanische Transformation <input checked="" type="checkbox"/> [B3.3] biologische Transformation</p>	<p><input type="checkbox"/> [C] Konversion</p> <p><input type="checkbox"/> [C1] Stromerzeugung <input type="checkbox"/> [C2] Wärmeerzeugung <input type="checkbox"/> [C3] Kombinierte Strom und Wärmeerzeugung <input type="checkbox"/> [C4] Bereitstellung Antriebsenergie (z. B. für Mobilität) <input type="checkbox"/> [C5] Abgasreinigung</p> <p><input type="checkbox"/> [D] Nutzung</p> <p><input type="checkbox"/> [D1] C-Speicher Produkt <input type="checkbox"/> [D2] Energiespeicherung</p> <p><input type="checkbox"/> [E] Abfallbewirtschaftung</p> <p><input type="checkbox"/> [E1] Vorbereitung zur Wiederverwendung <input type="checkbox"/> [E2] stoffliche Verwertung <input type="checkbox"/> [E3] energetische Verwertung <input type="checkbox"/> [E4] Beseitigung</p>	<p><input type="checkbox"/> [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze</p> <p><input type="checkbox"/> [F1] Gutschriften für vermiedene Lasten <input type="checkbox"/> [F2] Direkte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F3] Indirekte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F4] Gutschriften für vermiedenes Referenzsystem Koppelprodukte</p> <p><input type="checkbox"/> [F5] Gutschriften für vermiedene Roh- und Brennstoffe durch Abfallbewirtschaftung</p>
<p><input type="checkbox"/> [L] Betriebliche Logistik</p> <p><input type="checkbox"/> [L1] außerbetrieblicher Transport <input type="checkbox"/> [L2] innerbetrieblicher Transport</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [T] Transporte</p> <p><input type="checkbox"/> [T1] Transport Biomasse <input type="checkbox"/> [T2] Transport Zwischenprodukte <input type="checkbox"/> [T3] Transport Endprodukte <input type="checkbox"/> [T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [V] Vorleistungen</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten <input checked="" type="checkbox"/> [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur <input checked="" type="checkbox"/> [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut <input checked="" type="checkbox"/> [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen <input checked="" type="checkbox"/> [V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien <input checked="" type="checkbox"/> [V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern <input checked="" type="checkbox"/> [V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln <input checked="" type="checkbox"/> [V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien</p>	<p><input type="checkbox"/> [G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems</p> <p><input type="checkbox"/> [G1] Referenzsystem Hauptprodukt</p>
<p>Geographische Repräsentativität: Boden-Klima-Raum (BKR) nach Roßberg et al. (2007): Abtälchen und Ostbayerisches Hügelland (BKR-Nr. 114)</p>	<p>Zeitliche Repräsentativität: Erntejahr Rapsaat: 2013 Verarbeitungsjahr Rapsaat: 2013/2014</p>	<p>Anmerkungen: Umgang mit Koppelprodukt (Rapspresskuchen): Allokation nach Heizwert Heizwert von Rapsölkraftstoff = 37,5 MJ/kg Heizwert von Rapspresskuchen = 20,7 MJ/kg</p>	

Abbildung 5: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung

7.1.2 Festlegung der Bilanzkenngrößen

Nachfolgend werden die festzulegenden Bilanzkenngrößen zur produktspezifischen Sachbilanzierung von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung aufgeführt, analog zu der in Kapitel 3 dargelegten Vorgehensweise. Dabei werden die relevanten Prozessgruppen [A], [B] und [T] getrennt voneinander betrachtet (vgl. Abbildung 5).

Tabelle 27 bis Tabelle 30 zeigen die Bilanzkenngrößen für Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse.²⁾ berechnet

Tabelle 31 zeigt die festgelegten Bilanzkenngrößen für Prozessgruppe [B] Transformation. Die bilanzierte Ölmühle hat eine Presskapazität von 800 kg Rapssaat pro Stunde. Im Verarbeitungsjahr 2013/2014 war die Anlage an durchschnittlich 110 Tagen im kontinuierlichen Betrieb (24 Stunden am Tag). Die weitere Behandlung des Presskuchens (z. B. Förderung, Absaugung, Lagerung) liegt aufgrund der Allokation außerhalb der Systemgrenze des untersuchten Produktsystems und wird dementsprechend nicht bilanziert.

Tabelle 31 beinhaltet somit nur die Kenngrößen, die für die Bilanzierung des Rapsölkraftstoffs erforderlich sind, und zeigt damit nicht den vollständigen Verarbeitungsprozess der dezentralen Ölgewinnung auf.

Tabelle 32 zeigt die Bilanzkenngrößen für Prozessgruppe [T] Transporte. Der Transport der Rapssaat (Feld bis Ölmühle) erfolgt durch einen Traktor mit Dreiseitenkipper, zweiachsig (Doppelzug).

Tabelle 27: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A1] Bestandesbegründung

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[A1.1]	Bodenaufbereitung			
[A1.1]	Maßnahmen			
	Stoppelbearbeitung:			
	Anzahl Maßnahmen	1		vor Ort
	Dieserverbrauch je ha	10	l	[58]
	Arbeitszeitbedarf je ha	0,59	h	[58]
	Grundbodenbearbeitung:			
	Anzahl Maßnahmen	1		vor Ort
	Dieserverbrauch je ha	16	l	[58]
	Arbeitszeitbedarf je ha	0,83	h	[58]

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[V1] Traktor	Stoppelbearbeitung:			
	Leergewicht	6.525	kg	vor Ort
	Maschinenzeit je ha	0,59	h	[58]
	technisches Nutzungspotential	10.000	h	[57]
	Grundbodenbearbeitung:			vor Ort
	Leergewicht	7.400	kg	[58]
	Maschinenzeit je ha	0,83	h	[57]
	technisches Nutzungspotential	10.000	h	
[V1] Anbaugerät	Stoppelbearbeitung:			
	Leergewicht	1.870	kg	vor Ort
	technisches Nutzungspotential	3.000	ha	[57]
	Grundbodenbearbeitung:			vor Ort
	Leergewicht	1.870	kg	[57]
	technisches Nutzungspotential	3.000	ha	
[V4] Diesel	Dieselpreispflicht je ha	26	l	[58]
[A1.2] Pflanzen/Aussaat				
[A1.2] Maßnahmen	Aussaat:			
	Anzahl Maßnahmen	1		vor Ort
	Dieserverbrauch je ha	9	l	[58]
	Arbeitszeitbedarf je ha	0,57	h	[58]
	Anwalzen:			
	Anzahl Maßnahmen	1		vor Ort
	Dieserverbrauch je ha	4	l	[58]
	Arbeitszeitbedarf je ha	0,41	h	[58]
[V1] Traktor	Aussaat:			
	Leergewicht	7.400	kg	vor Ort
	Maschinenzeit je ha	0,57	h	[58]
	technisches Nutzungspotential	10.000	h	[57]
	Anwalzen:			vor Ort
	Leergewicht	5.170	kg	[58]
	Maschinenzeit je ha	0,41	h	[57]
	technisches Nutzungspotential	10.000	h	
[V1] Anbaugerät	Aussaat:			
	Leergewicht	2.500	kg	vor Ort
	technisches Nutzungspotential	3.000	ha	[57]
	Anwalzen:			vor Ort
	Leergewicht	3.500	kg	[57]
	technisches Nutzungspotential	3.600	ha	
[V3] Raps-Saatgut	Masse je ha	2,5	kg	vor Ort
[V4] Diesel	Dieselpreispflicht je ha	13	l	[58]

Tabelle 28: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A2] Bestandesführung

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[A2.3]	Düngung			
[A2.3]	Maßnahmen	Organische Düngung: Anzahl Maßnahmen	1	vor Ort
		Dieserverbrauch je ha	12	l
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,67	h
		Mineraldüngung: Anzahl Maßnahmen	2	vor Ort
		Dieserverbrauch je ha	1	l
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,13	h
[V1]	Traktor	Organische Düngung: Leergewicht	7.400	kg
		Maschinenzeit	0,67	h
		technisches Nutzungspotential	10.000	h
		Mineraldüngung: Leergewicht	5.170	kg
		Maschinenzeit je ha	0,26	h
		technisches Nutzungspotential	10.000	h
[V1]	Anbaugerät	Organische Düngung: Leergewicht	6.500	kg
		technisches Nutzungspotential	180.000	m ³
		Mineraldüngung: Leergewicht	500	kg
		technisches Nutzungspotential	7.500	t
[V4]	Diesel	Dieserbereitstellung je ha	14	l
[V6]	Mineraldünger	Ammoniumsulfat-Harnstoff (Piamon [®] 33-S)	600	kg ha ⁻¹
[A2.5]	Pflanzenschutz und Unkrautregulierung			
[A2.5]	Maßnahme	Ausbringen von PSM: Anzahl Maßnahmen	3	vor Ort
		Dieserverbrauch je ha	1,3	l
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,19	h
[V1]	Traktor	Leergewicht	5.170	kg
		Maschinenzeit je ha	0,57	h
		technisches Nutzungspotential	10.000	h
[V1]	Anbaugerät	Leergewicht	1.500	l
		technisches Nutzungspotential	8.400	ha

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle	
[V4]	Diesel	Dieselpreispflicht je ha	4	l	[58]
[V7]	Pflanzenschutzmittel (PSM)	Beizmittel (Elado [®] + TMTD [®])	0,04	kg ha ⁻¹	vor Ort
		Molluskizid	3	kg ha ⁻¹	vor Ort
		Herbizid (Butisan Gold [®])	2,5	kg ha ⁻¹	vor Ort
		Fungizid (Folicur [®])	0,6	kg ha ⁻¹	vor Ort
		Insektizid (Trebon [®])	0,2	kg ha ⁻¹	vor Ort
		Insektizid (Plenum [®] WG)	0,15	kg ha ⁻¹	vor Ort

Tabelle 29: Dokumentation von Bilanzkenngroßen in Prozessgruppe [A3] Ernte

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle	
[A3.1]	Ernte Biomasse				
[A3.1]	Maßnahme	Ernten von Rapssaat: FM-Ertrag Rapssaat mit 9 % Wassergehalt	49,58	dt ha ⁻¹	vor Ort
		Anzahl Maßnahmen	1		
		Dieserverbrauch je ha	26	l	[58]
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,88	h	[58]
[V1]	Mähdrescher	Leergewicht	13.000	kg	vor Ort
		Maschinenzeit je ha	0,88	h	[58]
		technisches Nutzungspotential	3.000	h	[57]
[V4]	Diesel	Dieselpreispflicht je ha	26	l	[58]

Tabelle 30: Dokumentation von Bilanzkenngroßen in Prozessgruppe [A4] nicht-zuordenbar

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle	
[A4.2]	N ₂ O-Feldmissionen	N-Mineraldüngereinsatz je ha	198	kg	vor Ort
		Organischer N-Düngereinsatz je ha	54	kg	vor Ort
		N aus Ernte-Wurzelrückständen je ha	85	kg	²⁾ [74]

²⁾ berechnet

Tabelle 31: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [B] Transformation

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[B]	Ölgewinnung				
[B]	Auslastung	Presskapazität	800	kg h ⁻¹	vor Ort
		Anzahl Presstage (Maschinenzeit)	110	d a ⁻¹	vor Ort
[V2]	Gebäude	Flächenbedarf	450	m ²	vor Ort
		Nutzungsdauer	20	a	[88]
		Nutzungszeit	365	d a ⁻¹	vor Ort
[V5]	Strom	Menge je t Rapssaat	62,4	kWh	vor Ort
[B2.1]	Reinigung Rapssaat				
	Reinigung Rapssaat	Reinigungsverluste	1,5	Masse-%	vor Ort
[V1]	Elevator	Durchsatz	22.000	kg h ⁻¹	[88]
		Leergewicht	330	kg	[88]
		Nutzungsdauer	14	a	[88]
		Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[V1]	Trommelsieb	Durchsatz	12.000	kg h ⁻¹	[88]
		Leergewicht	340	kg	[88]
		Nutzungspotential	100.800	h	[88]
		Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[B2.3]	Trocknung Rapssaat				
	Trocknung	Anteil Trocknung	0	Masse-%	vor Ort
	Rapssaat	Trocknungsverluste	0	Masse- %	vor Ort
[V1]	Getreidetrockner	Durchsatz	10.000	t a ⁻¹	[67]
		Leergewicht	5.000	kg	[67]
		Nutzungsdauer	25	a	[67]
		Maschinenzeit	0	d a ⁻¹	vor Ort
[V4]	Heizöl, extra leicht	Heizölbereitstellung je t	0,151	MJ	[67]
[B1.1]	Biomasselagerung (Vorratslagerung Rapssaat)				
[V1]	Silo	Fassungsvolumen	2.300	m ³	vor Ort
		Höhe	15	m	vor Ort
		abgeleitete Stahlmenge	15.250	kg	
		Nutzungsdauer	14	a	[88]
		Nutzungszeit	365	d a ⁻¹	vor Ort
[B1.1]	Biomasselagerung (Zwischenlagerung Rapssaat)				
[V1]	Förderschnecke	Anzahl	3	Stück	vor Ort
		Durchsatz	500	kg h ⁻¹	[88]
		Leergewicht	21	kg	[88]
		Nutzungsdauer	14	a	[88]
		Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[V1] Vorratslager	Fassungsvolumen	2.000	m ³	vor Ort	
	Höhe	10	m	vor Ort	
	abgeleitete Stahlmenge	14.250	kg		
	Nutzungsdauer	14	a	[88]	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort	
[B2.1] Feinreinigung Rapssaat					
	Feinreinigung	Reinigungsverluste	0,5	Masse-%	vor Ort
[V1] Förderschnecke	Anzahl		Stück	vor Ort	
	Durchsatz	2	kg h ⁻¹	[88]	
	Leergewicht	500	kg	[88]	
	Nutzungsdauer	14	a	[88]	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort	
[V1] Trommelsieb	Durchsatz	8.000	kg h ⁻¹	[88]	
	Leergewicht	340	kg	[88]	
	Nutzungsdauer	14	a	[88]	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort	
[B1.1] Biomasselagerung (Tagesvorratslagerung Rapssaat)					
[V1] Förderschnecke	Anzahl	2	Stück	vor Ort	
	Durchsatz	500	kg h ⁻¹	[88]	
	Leergewicht	21	kg	[88]	
	Nutzungsdauer	14	a	[88]	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort	
[V1] Vorratslager	Fassungsvolumen	26	m ³	vor Ort	
	Hohe	3	m	vor Ort	
	abgeleitete Stahlmenge	790	kg	[88]	
	Nutzungsdauer	14	a	Vor Ort	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹		
[B3.2] Mechanische Transformation (Ölpressung)					
Ölpressung	Ölausbeute	0,365	kg kg ⁻¹	vor Ort	
	Heizwert Rapsöl	37,5	MJ kg ⁻¹	[73]	
	Rapspresskuchen	0,625	kg kg ⁻¹	vor Ort	
	Heizwert Presskuchen	20,7	MJ kg ⁻¹	[73]	
	Verluste	0,010	kg kg ⁻¹	vor Ort	
[V1] Förderschnecke	Durchsatz	300	kg h ⁻¹	[88]	
	Leergewicht	21	kg	[88]	
	Nutzungsdauer	14	a	[88]	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort	
[V1] Presse 1	Durchsatz	300	kg h ⁻¹	vor Ort	
	Leergewicht	1.800	kg	[88]	
	Nutzungsdauer	14	a	[88]	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort	
[V1] Förderschnecke	Durchsatz	300	kg h ⁻¹	[88]	
	Leergewicht	21	kg	[88]	
	Nutzungsdauer	14	a	[88]	
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort	

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[V1] Presse 2	Durchsatz	500	kg h ⁻¹	vor Ort
	Leergewicht	3.950	kg	[88]
	Nutzungsdauer	14	a	[88]
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[B1.2] Produktlagerung (Lagerung Trüböl)				
[V1] Trübölpumpe	Durchsatz	102	l min ⁻¹	[88]
	Leergewicht	16	kg	[88]
	Nutzungsdauer	5	a	[88]
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[V1] Trüböllager	Fassungsvolumen	8	m ³	vor Ort
	Höhe	2	m	vor Ort
	abgeleitete Stahlmenge	350	kg	
	Nutzungsdauer	14	a	[88]
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[B3.2] Mechanische Transformation (Filtration)				
[V1] Vertikaldruck- plattenfilter	Durchsatz	600	kg h ⁻¹	[88]
	benötigte Druckluft je kg Trüböl	0,205	m ³	be- rechnet
	Leergewicht	1.400	kg	[88]
	Nutzungsdauer	10	a	[88]
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[V1] Kompressor	Leistung	10	kW	[88]
	Leergewicht	300	kg	[88]
	Nutzungsdauer	7	a	[88]
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[V8] Bleicherde	Menge je t Rapsölkraftstoff	80	kg	vor Ort
[B1.2] Produktlagerung (Lagerung Rapsölkraftstoff)				
[V1] Reinölpumpe	Durchsatz	250	l h ⁻¹	[88]
	Leergewicht	21	kg	[88]
	Nutzungsdauer	5	a	[88]
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort
[V1] Reinöllager	Anzahl	3	Stück	vor Ort
	Fassungsvolumen	135	m ³	vor Ort
	Leergewicht (glasfaser- verstärkter Kunststoff)	1.230	kg	[88]
	Nutzungsdauer	14	a	[88]
	Maschinenzeit	110	d a ⁻¹	vor Ort

Tabelle 32: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [T] Transporte

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[T1]	Transport Biomasse				
[T1]	Transport Rapssaat	Gesamtmasse Rapssaat	179	t	vor Ort
		einfache Transportdistanz	37	km	vor Ort
		Geschwindigkeit (Durchschnitt leer und beladen)	30	km h ⁻¹	¹⁾
[V1]	Traktor	Leergewicht	6.000	kg	vor Ort
		Maschinenzeit	14,6	h	²⁾
		technisches Nutzungspotential	10.000	h	[57]
[V1]	Dreiseitenkipper, zweiachsig (Doppelzug)	Leergewicht	7.000	kg	vor Ort
		technisches Nutzungspotential	78.000	t	[57]
		Ladekapazität	18	t	vor Ort
[V4]	Diesel	Volumen je h (Durchschnitt aus leer und beladen)	18	l	¹⁾
[V8]	Schmieröl	Wechselintervall	500	h	¹⁾
		Volumen je Wechselintervall	30	l	¹⁾

¹⁾ Expertenschätzung

²⁾ berechnet (Maschinenzeit = einfache Transportdistanz / (Geschwindigkeit (leer) + einfache Geschwindigkeit (beladen)) × Gesamtmasse Rapssaat / Ladekapazität)

7.1.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung dargestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt sowohl aggregiert (auf Prozessgruppenebene) als auch disaggregiert (auf Prozessebene). Hierdurch wird sowohl ein prägnanter Ergebnisüberblick gegeben als auch die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bilanzergebnisse gewährleistet.

Die Ergebnisdarstellung für die Umweltwirkungen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung wird am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente gezeigt.

Die aggregierte Ergebnisdarstellung in Tabelle 33 zeigt, dass bei Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung der größte Teil der CO₂-Äquivalente auf der Stufe der Rapsverarbeitung entstehen (92,5 %). Haupteinflussgrößen sind hierbei der Vorleistungsprozess [V6] Bereitstellung von Mineraldünger (18,2 %) im Prozess [A3.2] Düngung sowie der Prozess [4.2] N₂O-Feldemissionen (63,7 %) (Tabelle 34). Der Einfluss des Transports der Rapssaat vom Feldrand zur Ölmühle (1,3 %) sowie deren Transformation zu Rapsölkraftstoff (6,2 %) auf die Bilanz der CO₂-Äquivalente sind vergleichsweise gering.

Tabelle 33: Aggregierte Ergebnisdarstellung für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse	23,7	92,5
[B] Transformation	1,6	6,2
[T] Transporte	0,3	1,3
Gesamt	25,7	100

Tabelle 34: Disaggregierte Ergebnisdarstellung für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse		
[A1] Bestandesbegründung		
[A1.1] Bodenaufbereitung		
[A1.1] Dieselverbrauch	0,4596	1,8
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0719	0,3
[V4] Diesel	0,0744	0,3
[A1.2] Pflanzen/Aussaat		
[A1.2] Dieselverbrauch	0,2705	1,1
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0902	0,4
[V3] Raps-Saatgut	0,0342	0,1
[V4] Diesel	0,0438	0,2
[A1.3] sonstige Flächenvorbereitung	nicht relevant	
[A2] Bestandesführung		
[A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand	nicht relevant	
[A2.2] Zaunbau	nicht relevant	
[A2.3] Düngung		
[A2.3] Dieselverbrauch	0,2825	1,1
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,2959	1,2
[V4] Diesel	0,0459	0,2
[V6] Mineraldünger	4,6733	18,2

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[A2.4] Kalkung	nicht bilanziert	
[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung		
[A2.5] Dieserverbrauch	0,0821	0,3
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0302	0,1
[V4] Diesel	0,0133	0,1
[V7] Pflanzenschutzmittel	0,1521	0,6
[A3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse		
[A3.1] Dieserverbrauch	0,5401	2,1
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,1358	0,5
[V4] Diesel	0,0881	0,3
[A4] nicht-zuordenbar		
[A4.1] C-Speicher Fläche	nicht relevant	
[A4.2] N ₂ O-Feldemissionen	16,3451	63,7
[A4.3] andere Feldemissionen	nicht relevant	
[A4.4] Unterbringung von Personal	nicht relevant	
[A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen	nicht relevant	
[B] Transformation		
[B] Ölgewinnung		
[V2] Gebäude	0,1121	0,4
[V5] Strom	1,0341	4,0
[B1] Lagerung		
[B1.1] Biomasselagerung (Rapssaat)		
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz/Lagerbehälter	0,2926	1,1
[B1.2] Produktlagerung (Trub- und Reinöl)		
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz/Lagerbehälter	0,1104	0,4
[B1.3] Ent- und Beladung	nicht relevant	
[B1.4] Verpacken	nicht relevant	
[B2] Vorbehandlung		
[B2.1] Reinigung		
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0002	0
[B2.2] Zerkleinerung	nicht relevant	

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[B2.3] Trocknung		
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0	0
[V4] Heizöl	0	0
[B3] Umwandlung		
[B3.1] chemische Transformation	nicht relevant	
[B3.2] mechanische Transformation (Pressen und Filtern)		
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0172	0,1
[V8] Bleicherde	0,0341	0,1
[B3.3] biologische Transformation	nicht relevant	
[C] Konversion	nicht bilanziert	
[D] Nutzung	nicht relevant	
[E] Abfallbewirtschaftung	nicht relevant	
[T] Transporte		
[T1] Transport Biomasse (Rapssaar)		
[T1] Dieserverbrauch	0,2560	1,0
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0384	0,1
[V4] Diesel	0,0413	0,2
[V8] Schmieröl	0,0013	0,0
[T2] Transport Zwischenprodukte	nicht relevant	
[T3] Transport Endprodukte	nicht relevant	
[T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle	nicht relevant	
[F] Effekte außerhalb der Systemgrenze	nicht relevant	

Als betriebswirtschaftliche Kennzahlen werden die Rohstoffbereitstellungskosten und die Gestehungskosten für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in € MJ⁻¹ sowie die Unternehmerrgewinne für den Rapsrzeuger und die Ölmühle in € MJ⁻¹ dargestellt. Als volkswirtschaftliche Kennzahlen werden die THG-Vermeidungskosten in € t⁻¹, der Brutto-Beschäftigungseffekt in AK a⁻¹ und die regionale Wertschöpfung als Summe der Unternehmerrgewinne von Rapsrzeuger und Ölmühle in € MJ⁻¹ dargestellt.

Die Kostenkalkulation für die Rohstoffbereitstellung (Rapsrzeugung inklusive Transport der Rapssaar vom Feldrand zur Ölmühle) und für die Verarbeitung (Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung) erfolgt in zwei Schritten, da diese Prozesse nicht in einem Betrieb stattfinden, sondern durch einen Markt getrennt sind.

Die Kostenkalkulation für die Rapsrzeugung erfolgt zunächst flächenbezogen (1.393 € ha⁻¹). Zur Berechnung der Rohstoffbereitstellungskosten (Rapsrzeugung inklu-

sive Transport der Rapssaat vom Feldrand zur Ölmühle) müssen die Kosten der Raps-erzeugung auf den Frischmasse-Ertrag (FM-Ertrag) bezogen werden ($0,28 \text{ € kg}^{-1}$). Zur Ergebnisdarstellung der Rohstoffbereitstellungskosten in € MJ^{-1} Rapsölkraftstoff müssen diese zusätzlich mit dem Rapssaatbedarf der Ölmühle für 1 MJ Rapsölkraftstoff verrechnet werden. Im hier vorliegenden Anwendungsbeispiel liegt der Rapssaatbedarf für 1 MJ Rapsölkraftstoff bei $0,07 \text{ kg MJ}^{-1}$.

Die Rohstoffbereitstellungskosten des Rapserezeugers liegen bei $0,0208 \text{ € MJ}^{-1}$ (Tabelle 35). Da die Ölmühle jedoch einen Rapssaatpreis von $0,0266 \text{ € MJ}^{-1}$ ausgezahlt hat, ergibt sich für den Rapserezeuger ein Unternehmergeinn von $0,0058 \text{ € MJ}^{-1}$. Unter Berücksichtigung der EU-Direktzahlungen (Betriebsprämie) in Höhe von $0,0050 \text{ € MJ}^{-1}$ erhöht sich der Unternehmergeinn auf $0,0108 \text{ € MJ}^{-1}$.

Tabelle 35: Disaggregierte Ergebnisdarstellung der Rohstoffbereitstellungskosten von Rapssaat für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung

Prozess	Rohstoffbereitstellungskosten	
	in € MJ^{-1}	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse		
[A1] Bestandesbegründung		
[A1.1] Bodenaufbereitung	0,0020	9,6
[A1.2] Pflanzen/Aussaat	0,0018	8,9
[A2] Bestandesführung		
[A2.3] Düngung	0,0048	23,2
[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung	0,0026	12,5
[A.3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse	0,0028	13,3
[A4] nicht-zuordenbar		
[A4] Flächenkosten	0,0048	23,1
[A4] Sonstige Kosten	0,0014	6,9
[T] Transport		
[T1] Transport Rapssaat	0,0005	2,5
Gesamt	0,0208	100

Bei der Kostenkalkulation für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung stellen die Rohstoffbereitstellungskosten mit ca. 85 % den größten Anteil dar. Weitere Kosten fallen für die Biomasse- bzw. Produktlagerung und die mechanische Transformation (Pressung und Filterung) an. Nach Abzug der Erlöse für den Rapspresskuchen ($0,0112 \text{ € MJ}^{-1}$) ergeben sich Gesamtkosten in Höhe von $0,0199 \text{ € MJ}^{-1}$ (Tabelle 36). Bei dem von der Öl-

mühle angegebenen Rapsölkraftstoffpreis von $0,0260 \text{ € MJ}^{-1}$ konnte die Ölmühle einen Unternehmerngewinn von $0,0061 \text{ € MJ}^{-1}$ erzielen.

Tabelle 36: Disaggregierte Ergebnisdarstellung der Gestehungskosten für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung

Prozess		Gestehungskosten	
		in € MJ^{-1}	in %
[A]	Rohstoffbereitstellungskosten (Rapssaat)	0,0266	85,5
[B]	Transformation		
[B1]	Lagerung		
[B1.1]	Biomasselagerung	0,0007	2,3
[B3]	Umwandlung		
[B3.2]	mechanische Transformation	0,0038	12,2
Gesamt		0,0311	100
Erlöse für Rapspresskuchen		0,0112	
Gesamt nach Abzug der Erlöse für Rapspresskuchen		0,0199	

Mit den Ergebnissen der THG-Bilanz und den Gestehungskosten für das untersuchte Produktsystem sowie den Werten des Referenzsystems können die THG-Vermeidungskosten ermittelt werden. Im dargestellten Anwendungsbeispiel wurden für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung CO_2 -Äquivalente in Höhe von $0,0000257 \text{ t MJ}^{-1}$ (Tabelle 33) und Gestehungskosten in Höhe von $0,0199 \text{ € MJ}^{-1}$ (Tabelle 36) berechnet. Für das Referenzsystem fossiler Dieselmkraftstoff betragen die CO_2 -Äquivalente $0,0000838 \text{ t MJ}^{-1}$ und die Gestehungskosten $0,0128 \text{ € MJ}^{-1}$ (Abschnitt 5.1). Hieraus ergibt sich für das vorliegende Anwendungsbeispiel, dass für die Bereitstellung von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung im Vergleich zu fossilem Dieselmkraftstoff je vermiedene Tonne CO_2 -Äquivalente Kosten in Höhe von 122 € verursacht werden (Formel (7.1)).

$$\text{THG - Vermeidungskosten} = \frac{0,0199 \text{ € MJ}^{-1} - 0,0128 \text{ € MJ}^{-1}}{0,0000838 \text{ t MJ}^{-1} - 0,0000257 \text{ t MJ}^{-1}} = 122 \text{ € t}^{-1} \quad (7.1)$$

Für die in Kapitel 7.1.2 beschriebene Rapserzeugung und den Transport der Rapssaat vom Feldrand zur Ölmühle werden $0,117 \text{ h dt}^{-1}$ Rapssaat benötigt. Für die Transformation (dezentrale Ölgewinnung, 110 Presstage) werden $0,051 \text{ h dt}^{-1}$ (FM Rapssaat) benötigt. Insgesamt wurden 21.120 dt FM Rapssaat von 763 t Rapsölkraftstoff verarbeitet.

Der Brutto-Beschäftigungseffekt liegt demnach bei $1,9 \text{ AK a}^{-1}$. Die Arbeitskraft (AK) ist definiert mit 1.840 h a^{-1} .

Tabelle 37: Arbeitszeitbedarf für Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung

Prozess	Arbeitszeitbedarf	
	in h dt^{-1}	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse		
[A1] Bestandesbegründung		
[A1.1] Bodenaufbereitung	0,033	19,8
[A1.2] Pflanzen/Aussaat	0,011	6,6
[A2] Bestandesführung		
[A2.3] Düngung	0,029	17,4
[A2.5] Pflanzenschutz	0,015	9,0
[A.3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse	0,019	11,4
[T] Transport		
[T1] Transport Biomasse		
[T1.3] Ort der Ernte zur Transformation	0,009	5,4
[B] Transformation	0,051	30,5
Gesamt	0,168	100

Die Ölmühle konnte einen Unternehmergewinn von $0,0061 \text{ € MJ}^{-1}$ erzielen. Zusammen mit dem Unternehmergewinn des Landwirtes in Höhe von $0,0108 \text{ € MJ}^{-1}$ ergibt sich eine regionale Wertschöpfung von $0,0169 \text{ € MJ}^{-1}$. Nach Multiplikation mit der tatsächlich verarbeiteten Rapssaat (21.120 dt FM Rapssaat) ergibt sich für das Erntejahr 2013 bzw. das Verarbeitungsjahr 2013/2014 eine regionale Wertschöpfung in Höhe von circa 483.300 €.

7.2 Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas

Im Folgenden wird die Anwendung der entwickelten Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen beispielhaft für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas dargestellt. Hierbei wird auf die getroffenen Grundannahmen zum Untersuchungsrahmen (Abschnitt 7.2.1), die festzulegenden Bilanzkenngrößen (Abschnitt 7.2.2) sowie auf die Bilanzergebnisse (Abschnitt 7.2.3) getrennt voneinander eingegangen.

7.2.1 Untersuchungsrahmen und Systemdarstellung

Die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas erfolgt in einem landwirtschaftlichen Betrieb. Alle eingesetzten Biogassubstrate (Silomais, Getreide-GPS, CCM und Schweinegülle) stammen aus diesem landwirtschaftlichen Biogasbetrieb. Für die Bilanzierung werden die Biogassubstraterzeugung (Prozessgruppe [A]), die Biogasproduktion (Prozessgruppe [B]), die Stromerzeugung (Prozess-Untergruppe [C1]), der Transport der Biogassubstrate (Prozessgruppe [T]) sowie die betrieblichen Logistik- und Vorleistungsprozesse berücksichtigt. Als Bezugsgröße wird die elektrische Energie mit der funktionellen Einheit 1 MJ festgelegt. Neben dem Hauptprodukt Strom werden die Koppelprodukte Gärrest und Wärme erzeugt. Dem während der Biogasproduktion anfallenden Gärrest werden keine Emissionen zugeordnet. Die Zuordnung der Emissionen zwischen Strom und Wärme erfolgt durch Allokation nach Exergie. Demnach fallen 82 % aller Aufwendungen bis zur Stromerzeugung auf den Strom und 18 % auf die Wärme. Die der Bilanz zugrunde gelegten Aktivitätsdaten zur Biogassubstraterzeugung sowie der Biogasproduktion und -verwertung repräsentieren das Erntejahr bzw. Wirtschaftsjahr 2014. Soweit nicht anders angegeben wurden die Aktivitätsdaten aus den Aufzeichnungen oder durch Befragung des Betriebsleiters vor Ort auf dem landwirtschaftlichen Biogasbetrieb erhoben. Der Biogas- bzw. Methanertrag wurde berechnet. Die Bilanzergebnisse repräsentieren den Boden-Klima-Raum Albflächen und Ostbayerisches Hügelland nach ROßBERG et al. (2007) [75]. Diese genannten Grundannahmen sowie die Festlegung der zu bilanzierenden Prozessgruppen und Prozesse zeigt die Systemdarstellung in Abbildung 6.

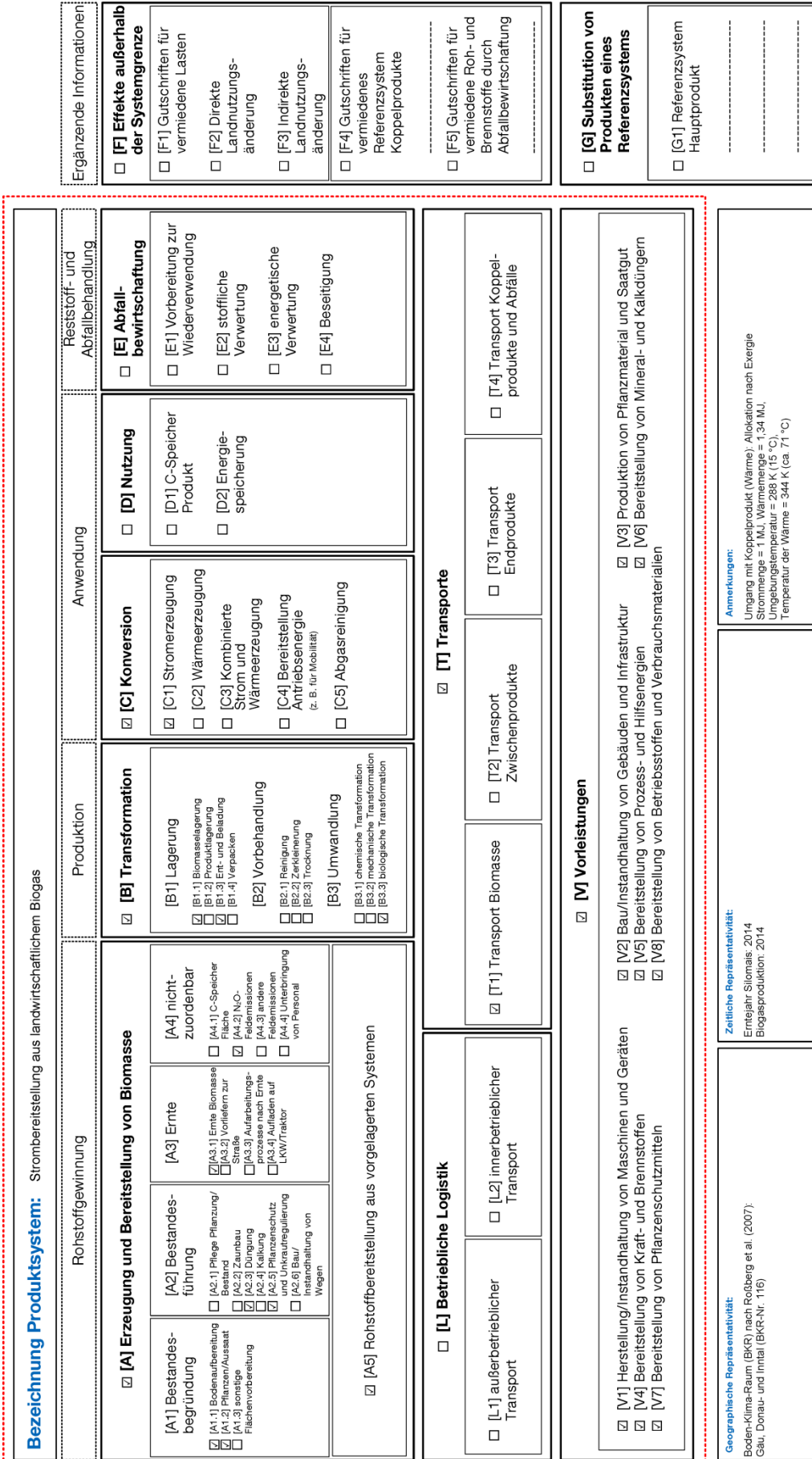


Abbildung 6: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas

7.2.2 Festlegung der Bilanzkenngrößen

Für die Bilanzierung von Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung der Biogas-substrate werden beispielhaft Bilanzkenngrößen für den Silomais aufgeführt (siehe Tabelle 38 bis Tabelle 41). Die Vorgehensweise für die Bilanzierung der weiteren Biogas-substrate (Getreide-GPS und CCM) ist vergleichbar. Die Schweinegülle wird mit null bewertet, da diese aus dem eigenen Betrieb stammt (Tabelle 42).

In Tabelle 43 sind die verwendeten Bilanzkenngrößen für Prozessgruppe [B] Transformation (Biogasproduktion) aufgeführt. Hierbei sind auch die eingesetzten Frischmassen der Biogassubstrate in $t a^{-1}$ sowie deren TM-Gehalte angegeben.

Tabelle 44 zeigt die Bilanzkenngrößen der Prozessgruppe [C] Konversion (Stromerzeugung). Die Biogasanlage besitzt ein BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 207 kW. Die erzeugte elektrische Energie wird komplett in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Der Eigenstrombedarf der Anlage wird aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen.

Der Silomais-Transport (Feld bis Fahrsilo) erfolgt durch einen Traktor mit Heckkipper, Tridemachse (Tabelle 45).

Tabelle 38: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A1] Bestandesbegründung

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[A1.1]	Bodenaufbereitung			
[A1.1]	Maßnahme	Pflügen:		
		Anzahl Maßnahmen	1	vor Ort
		Dieserverbrauch	27	l vor Ort
		Arbeitszeitbedarf je ha	2,17	h [58]
[V1]	Traktor	Leergewicht	7.000	kg vor Ort
		Maschinenzeit je ha	1	h [58]
		technisches Nutzungspotential	10.000	h [57]
[V1]	Anbaugerät	Leergewicht	1.500	kg vor Ort
		technisches Nutzungspotential	2.000	ha [57]
[V4]	Diesel	Volumen je ha	27	l vor Ort
[A1.2]	Pflanzen/Aussaat			
[A1.2]	Maßnahme	Aussaat:		
		Anzahl Maßnahmen	1	vor Ort
		Dieserverbrauch	11	l vor Ort
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,69	h [58]

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle	
[V1]	Traktor	Leergewicht	7.000	kg	vor Ort
		Maschinenzeit je ha	0,69	h	[58]
		technisches Nutzungspotential	10.000	h	[57]
[V1]	Anbaugerät	Leergewicht	2.000	kg	vor Ort
		technisches Nutzungspotential	1.100	ha	[57]
[V3]	Mais-Saatgut	Masse je ha	38	kg	vor Ort
[V4]	Diesel	Volumen je ha	11	l	vor Ort

Tabelle 39: Dokumentation von Bilanzkenngroßen in Prozessgruppe [A2] Bestandesführung

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle	
[A2.3]	Düngung				
[A2.3]	Maßnahme	Mineraldüngung:			
		Anzahl Maßnahmen	1	vor Ort	
		Dieserverbrauch je ha	1,4	l vor Ort	
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,2	h [58]	
[V1]	Traktor	Leergewicht	7.000	kg	vor Ort
		Maschinenzeit je ha	0,2	h	[58]
		technisches Nutzungspotential	10.000	h	[57]
[V1]	Anbaugerät	Leergewicht	500	kg	vor Ort
		technisches Nutzungspotential	2.000	t	[57]
[V4]	Diesel	Volumen je ha	1,4	l	vor Ort
[V6]	Mineraldünger	Ammonsulfatsalpeter je ha	600	kg	vor Ort
[A2.5]	Pflanzenschutz und Unkrautregulierung				
[A2.5]	Maßnahme	Ausbringen von PSM:			
		Anzahl Maßnahmen	1	vor Ort	
		Dieserverbrauch je ha	1,7	l vor Ort	
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,25	h [58]	
[V1]	Traktor	Leergewicht	7.000	kg	vor Ort
		Maschinenzeit je ha	0,25	h	[58]
		technisches Nutzungspotential	10.000	h	[57]
[V1]	Anbaugerät	Leergewicht	800	kg	vor Ort
		technisches Nutzungspotential	2.400	ha	[57]
[V4]	Diesel	Volumen je ha	1,7	l	vor Ort
[V7]	Herbizid (PSM)	Masse je ha	4	kg	vor Ort

Tabelle 40: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A3] Ernte

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[A3.1]	Ernte Biomasse				
[A3.1]	Maßnahme	Ernten von Silomais: FM-Ertrag Silomais (32 % TM) je ha	500	dt	vor Ort
		Anzahl Maßnahme	1		vor Ort
		Dieserverbrauch je ha	25,8	l	[58]
		Arbeitszeitbedarf je ha	0,65	h	[58]
[V1]	Feldhäcksler	Leergewicht	18.000	kg	vor Ort
		Maschinenzeit je ha	0,65	h	[58]
		technisches Nutzungspotential	3.000	h	[57]
[V4]	Diesel	Volumen je ha	25,8	l	[58]

Tabelle 41: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A4] nicht-zuordenbare Prozesse innerhalb Prozessgruppe [A]

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[A4.2]	N ₂ O-Feldemissionen	N-Mineraldüngereinsatz je ha	156	kg	vor Ort
		Organischer N-Düngereinsatz je ha	0	kg	vor Ort
		N aus Ernte-Wurzelrückständen je ha	25	kg	²⁾ [74]

²⁾ berechnet

Tabelle 42: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[A5]	Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen	Rohstoffart	Schweinegülle	vor Ort	
		Rohstoffherkunft	eigener Betrieb	vor Ort	
		eingesetzte Frischmasse je Jahr	1.411	t	vor Ort

Tabelle 43: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [B] Transformation

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[B1.1]	Biomasselagerung			
[B1.1]	Maßnahme	Silieren von Silomais:		
		Dieserverbrauch je ha	5,88	l [58]
		Arbeitszeitbedarf je ha	1,28	h [58]
[V1]	Radlader	Leergewicht	20.000	kg vor Ort
		Maschinenzeit je ha	1,28	h [58]
		technisches Nutzungspotential	10.000	h [57]
[V2]	Fahrsilo	Anzahl	1	Stück vor Ort
		Fassungsvolumen	2.400	m ³ vor Ort
		Nutzungsdauer	20	a vor Ort
[V4]	Diesel	Volumen je ha	5,88	l [58]
[B1.3]	Ent- und Beladung			
[B1.3]	Biogassubstrateintrag	Silomais (35 % TM) je Jahr	2.038	t vor Ort
		Getreide-GPS (35 % TM) je Jahr	293	t vor Ort
		CCM (65 % TM) je Jahr	162	t vor Ort
		Schweinegülle (6 % TM) je Jahr	1.411	t vor Ort
[V1]	Eintragstechnik: Radlader	Leergewicht	10.000	kg vor Ort
		Maschinenzeit pro Beladung	0,5	h vor Ort
		technisches Nutzungspotential	10.000	h [58]
	Beschickungsautomat	Anzahl	1	vor Ort
		Gewicht	3.400	kg vor Ort
		Nutzungsdauer	10	a vor Ort
	Mischmotor	Anzahl	2	vor Ort
		Einzelgewicht	200	kg vor Ort
		Nutzungsdauer	10	a vor Ort
	Stopfschnecke	Anzahl	2	vor Ort
		Einzelgewicht	300	kg vor Ort
		Nutzungsdauer	10	a vor Ort
[V4]	Diesel	Masse je Jahr	1.266	kg vor Ort
[B3.3]	Biologische Transformation			
[B3.3]	Vergärung	Norm-Biogasertrag je t FM		
		Silomais	216,1	m ³ [59]
		Getreide-GPS	206,1	m ³ [59]
		CCM	465,0	m ³ [59]
		Schweinegülle	20,2	m ³ [59]

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
	Methangehalt			
	Silomais	52	%	[59]
	Getreide-GPS	53	%	[59]
	CCM	52	%	[59]
	Schweinegülle	60	%	[59]
	Methanverlustanteil	1	%	[38]
	Gärrestmenge	3.104	m ³	[1]
[V1]	Paddelrührwerk	Anzahl	3	vor Ort
		Einzelgewicht	1.100	kg
		Nutzungsdauer	10	a
[V2]	Fermenter	Anzahl	2	vor Ort
		Fassungsvolumen	1.200	m ³
		Nutzungsdauer	20	a
[V2]	Gärrestbehälter	Anzahl	1	vor Ort
		Fassungsvolumen	1.000	m ³
		Nutzungsdauer	20	a
[V5]	Prozess- und Hilfsenergien	Eigenstrombedarf	10	%
		Prozesswärmebedarf	28	%

Tabelle 44: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [C] Konversion

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[C1]	Stromerzeugung	Installierte elektrische Nennleistung (BHKW)	207	kW	vor Ort
		Elektrischer Wirkungsgrad	36,7	%	[59]
		Thermischer Wirkungsgrad	49,1	%	[59]
		Methanschluß	1,5	%	[59]
[V1]	BHKW	Maschinenzeit je Jahr	8.000	h	[59]
		Nutzungsdauer	10	a	
[V8]	Schmierstoffe	Masse je Jahr	1.200	kg	vor Ort

Tabelle 45: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [T] Transporte

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[T1]	Transport Biomasse				
[T1]	Transport Silomais	Gesamtmasse Silomais	2.038	t	vor Ort
		einfache Transportdistanz	2	km	vor Ort
		Geschwindigkeit (Durchschnitt leer und beladen)	25	km h ⁻¹	vor Ort

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle
[V1] Traktor	Leergewicht	7.000	kg	vor Ort
	Maschinenzeit	18,1	h	2)
	technisches Nutzungspotential	10.000	h	[58]
[V1] Heckkipper, Tridemachse, 40 km/h	Leergewicht	7.500	kg	vor Ort
	technisches Nutzungspotential	88.000	t	[58]
	Ladekapazität	18	t	vor Ort
[V4] Diesel	Volumen je h (Durchschnitt aus leer und beladen)	21,6	l	vor Ort
[V8] Schmieröl	Wechselintervall	500	h	1)
	Volumen je Wechselintervall	30	l	1)

¹⁾ Expertenschätzung

²⁾ berechnet (Maschinenzeit = einfache Transportdistanz / (Geschwindigkeit (leer) + einfache Geschwindigkeit (beladen)) × Gesamtmasse Silomais / Ladekapazität)

7.2.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas dargestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt sowohl aggregiert (auf Prozessgruppenebene) als auch disaggregiert (auf Prozessebene). Hierdurch wird sowohl ein prägnanter Ergebnisüberblick gegeben als auch die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bilanzergebnisse gewährleistet.

Die Ergebnisdarstellung für die Umweltwirkungen der Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas wird am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente gezeigt.

Tabelle 46: Aggregierte Ergebnisdarstellung für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse	52,0	46,9
[B] Transformation	35,6	32,1
[C] Konversion	22,8	20,6
[T] Transporte	0,4	0,4
Gesamt	110,9	100

Tabelle 47: Disaggregierte Ergebnisdarstellung für Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Getreide-GPS und CCM	14,7660	13,3
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Silomais		
[A1] Bestandesbegründung		
[A1.1] Bodenaufbereitung		
[A1.1] Dieserverbrauch	0,5921	0,5
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,2058	0,2
[V4] Diesel	0,1127	0,1
[A1.2] Pflanzen/Aussaat		
[A1.2] Dieserverbrauch	0,2378	0,2
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0520	0,1
[V3] Saatgut	0,6084	0,5
[V4] Diesel	0,0452	0,0
[A2] Bestandesführung		
[A2.3] Düngung		
[A2.3] Dieserverbrauch	0,0300	0
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0129	0
[V4] Diesel	0,0057	0
[V6] Mineraldünger	25,0367	22,6
[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung		
[A2.5] Dieserverbrauch	0,0380	0
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,0098	0
[V4] Diesel	0,0072	0
[7] Pflanzenschutzmittel	0,2242	0,2
[A3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse		
[A2.5] Dieserverbrauch	0,5649	0,5
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,1235	0,1
[V4] Diesel	0,1077	0,1

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[A4] nicht-zuordenbar		
[A4.1] C-Speicher Fläche		nicht relevant
[A4.2] N ₂ O-Feldemissionen	9,2106	8,6
[A4.3] andere Feldemissionen		nicht relevant
[A4.4] Unterbringung von Personal		nicht relevant
[A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen		
Bereitstellung von Schweinegülle	0	0
[B] Transformation		
[B1] Lagerung		
[B1.1] Biomasselagerung		
[B1.1] Dieserverbrauch	0,1287	0,1
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,1293	0,1
[V2] Fahrsilo	2,8869	2,6
[V4] Diesel	0,0245	0,0
[B1.3] Ent- und Beladung		
[B1.3] Dieserverbrauch	0,7920	0,7
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,1903	0,2
[V4] Diesel	0,1281	0,1
[B2] Vorbehandlung		nicht relevant
[B3] Umwandlung		
[B3.3] Biologische Transformation (Vergärung)		
[B3.3] Methanverlust	10,3703	9,4
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,1687	0,2
[V2] Fermenter	0,1198	0,1
[V5] Prozess- und Hilfsenergie	20,6793	18,6
[C] Konversion		
[C1] Stromerzeugung		
[C1] Methanschlupf	15,5554	14,0
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	6,3400	5,7
[V8] Betriebsstoffe	0,9273	0,8
[C2] Wärmeerzeugung		nicht relevant
[C3] Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung		nicht relevant
[C4] Bereitstellung Antriebsenergie (z. B. für Mobilität)		nicht relevant
[C5] Abgasreinigung		nicht relevant

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[D] Nutzung	nicht relevant	
[E] Abfallbewirtschaftung	nicht relevant	
[T] Transporte		
[T1] Transport Biomasse (Silomais)		
[T1] Dieserverbrauch	0,2060	0,2
[V1] Maschinen- und Geräteeinsatz	0,2007	0,2
[V4] Diesel	0,0333	0,0
[V8] Schmieröl	0,0056	0,0
[T2] Transport Zwischenprodukte	nicht relevant	
[T3] Transport Endprodukte	nicht relevant	
[T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle	nicht relevant	
[F] Effekte außerhalb der Systemgrenze	nicht relevant	

Als betriebswirtschaftliche Kennzahlen werden die Rohstoffbereitstellungskosten von Silomais und die Gestehungskosten für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas in € MJ⁻¹ dargestellt. Als volkswirtschaftliche Kennzahlen werden die THG-Vermeidungskosten in € t⁻¹ sowie die regionale Wertschöpfung anhand des Unternehmergewinns der Biogasanlage dargestellt. Das Vorgehen bei der Bewertung des Brutto-Beschäftigungseffekts kann aus Abschnitt 7.1.3 von der Rapsölkraftstoffproduktion übernommen werden.

Alle Biogassubstrate werden in der hofeigenen Biogasanlage verwendet, somit steht kein Markt zwischen Rohstoffbereitstellung und Vergärung. Bei der Rohstoffbereitstellung fällt daher kein Unternehmergewinn bzw. -verlust an. Der Unternehmergewinn bezieht sich auf die gesamte Kette von der Rohstoffherzeugung bis zur Strombereitstellung.

Die Kostenkalkulation für die Silomaiserzeugung erfolgt zunächst flächenbezogen (1.705 € ha⁻¹). Zur Berechnung der Rohstoffbereitstellungskosten (Erzeugung inklusive Transport zum Silo, ohne Festfahren) müssen die Kosten der Silomaiserzeugung auf den FM-Ertrag bezogen werden (34 € t⁻¹). Zur Ergebnisdarstellung der Rohstoffbereitstellungskosten in € MJ⁻¹ Strom müssen diese mit der Einsatzmenge in der Biogasanlage (2.038 t FM) und dem daraus produzierten Strom (ca. 1.640 MWh) verrechnet werden.

Die Kosten von Prozessgruppe [A] setzen sich aus den Bereitstellungskosten von Silomais (2.038 t FM), Getreide-GPS (239 t FM) und CCM (162 t FM) zusammen. Die Schweinegülle steht kostenfrei zur Verfügung. Für diese Substratmengen fallen eigenbetriebliche Bereitstellungskosten in Höhe von 0,0137 € MJ⁻¹ an. Davon entfallen 0,0118 € MJ⁻¹ auf die Bereitstellung von Silomais (siehe Tabelle 48).

Tabelle 48: Disaggregierte Ergebnisdarstellung der Rohstoffbereitstellungskosten von Silomais für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas

Prozess	Rohstoffbereitstellungskosten	
	in € MJ ⁻¹	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Silomais		
[A1] Bestandesbegründung		
[A1.1] Bodenaufbereitung	0,0008	7,2
[A1.2] Pflanzen/Aussaat	0,0021	17,5
[A2] Bestandesführung		
[A2.3] Düngung	0,0021	18,1
[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung	0,0010	8,2
[A.3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse	0,0028	11,3
[A4] nicht-zuordenbar		
[A4] Flächenkosten	0,0028	23,7
[A4] Sonstige Kosten	0,0008	6,6
[T] Transport		
[T1] Transport zum Silo	0,0009	7,5
Gesamt	0,0118	100

Tabelle 49: Aggregierte Ergebnisdarstellung der Gestehungskosten für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas

Prozess	Gestehungskosten	
	in € MJ ⁻¹	in %
[A] Rohstoffbereitstellungskosten (Silomais, GPS, CCM)	0,0137	30,8
[B] Transformation	0,0206	46,2
[C] Konversion	0,0102	23,0
Gesamt	0,0479	100
Erlöse für Wärme	0,0038	
Gesamt nach Abzug der Erlöse für Wärme	0,0407	

Für die Biomasselagerung und Vergärung entstehen bei dieser Beispiel-Biogasanlage 0,0206 € MJ⁻¹. Für die Verstromung fallen 0,0102 € MJ⁻¹ an. Die Hälfte der produzierten Wärme (ca. 1.100 MWh) wird bei der Beispiel-Biogasanlage mit einem Wärmepreis von 0,02 € MWh⁻¹ verkauft. Daraus ergeben sich Erlöse von 22.130 € a⁻¹ bzw. 0,0038 € MJ⁻¹.

Nach Abzug der Erlöse von den Gesamtkosten entstehen Stromproduktionskosten in Höhe von $0,0407 \text{ € MJ}^{-1}$ bzw. 239.832 € a^{-1} (Tabelle 49).

Mit den Ergebnissen der THG-Bilanz und den Gestehungskosten für das untersuchte Produktsystem sowie den Werten des Referenzsystems können die THG-Vermeidungskosten ermittelt werden. Im dargestellten Anwendungsbeispiel wurden für die Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas CO_2 -Äquivalente in Höhe von $0,0001074 \text{ t MJ}^{-1}$ (Tabelle 46) und Gestehungskosten in Höhe von $0,0407 \text{ € MJ}^{-1}$ (Tabelle 49) berechnet. Als Referenzsystem wird der Strommix aus Braunkohle, Steinkohle und Erdgas verwendet. Die Gewichtung erfolgt gemäß ihrem Anteil an der deutschen Bruttostromerzeugung (siehe Tabelle 23) bezogen auf 100 %. Die CO_2 -Äquivalente betragen dabei $0,000266 \text{ t MJ}^{-1}$ und die Stromgestehungskosten $0,0177 \text{ € MJ}^{-1}$ (Abschnitt 5.2). Hieraus ergibt sich für das vorliegende Anwendungsbeispiel, dass bei der Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas im Vergleich zum Strommix aus Braunkohle, Steinkohle und Erdgas je vermiedene Tonne CO_2 -Äquivalent Kosten in Höhe von 148 € verursacht werden (Formel (7.2)).

$$\text{THG} - \text{Vermeidungskosten} = \frac{0,0407^{-1} - 0,0177 \text{ € MJ}^{-1}}{0,000266 \text{ t MJ}^{-1} - 0,000111 \text{ t MJ}^{-1}} = 148 \text{ € t}^{-1} \quad (7.2)$$

Der Unternehmergewinn der Beispielbiogasanlage ergibt sich aus den Stromproduktionskosten in Höhe von 239.832 € a^{-1} und der Stromvergütung (EEG 2012) inklusive Boni in Höhe von 322.600 € a^{-1} ($0,197 \text{ € kWh}^{-1}$). Als regionale Wertschöpfung ergibt sich somit ein Unternehmergewinn in Höhe von 82.769 € a^{-1} bzw. $0,0140 \text{ € MJ}^{-1}$ Strom.

7.3 Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz

Im Folgenden wird die Anwendung der entwickelten Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen beispielhaft für die Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz dargestellt. Hierbei wird auf die getroffenen Grundannahmen zum Untersuchungsrahmen (Abschnitt 7.3.1), die festzulegenden Bilanzkenngrößen (Abschnitt 7.3.2) sowie auf die Bilanzergebnisse (Abschnitt 7.3.3) getrennt voneinander eingegangen.

7.3.1 Untersuchungsrahmen und Systemdarstellung

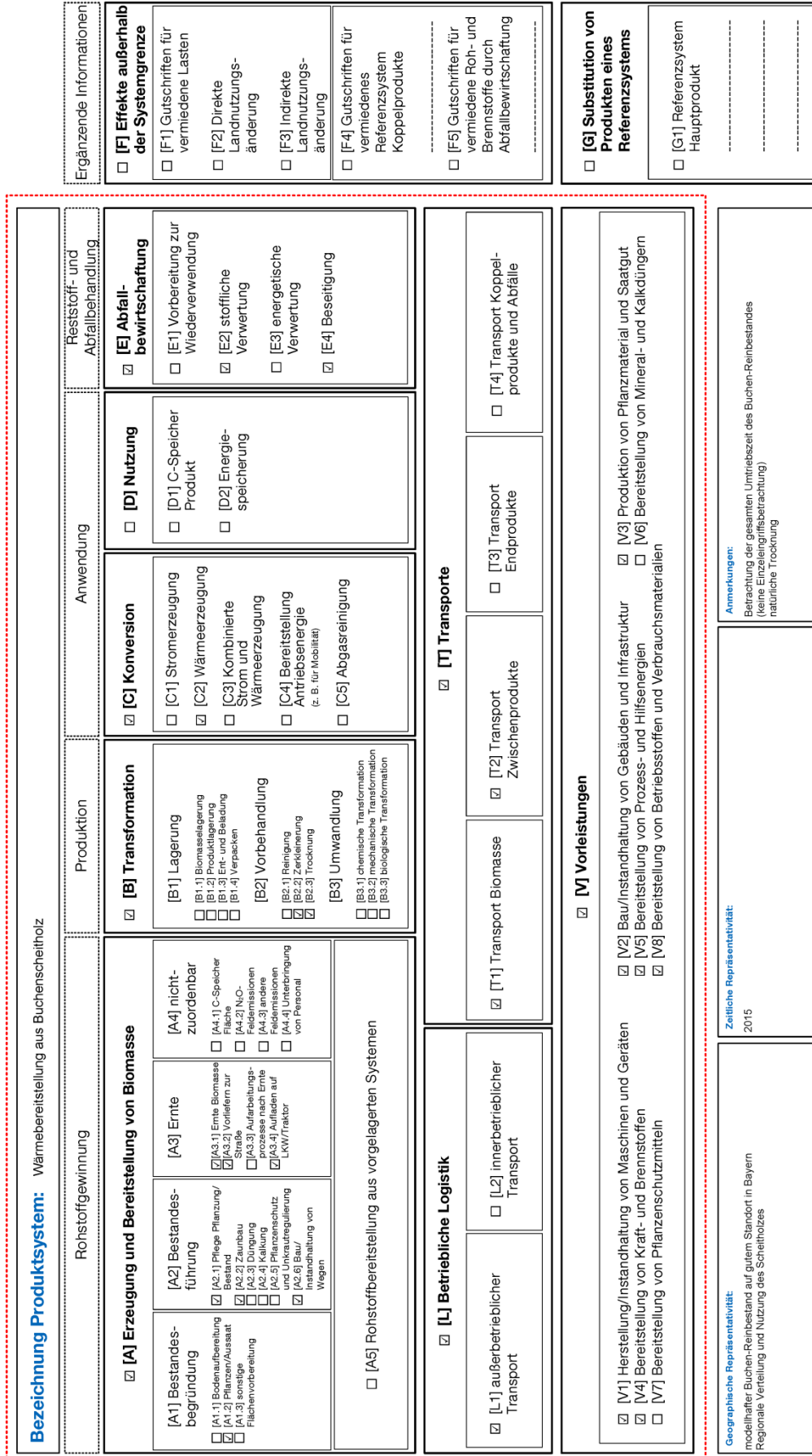


Abbildung 7: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz

7.3.2 Festlegung der Bilanzkenngößen

Nachfolgend werden die festzulegenden Bilanzkenngößen zur produktspezifischen Sachbilanzierung von Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz aufgeführt, analog zu der in Kapitel 3 dargelegten Vorgehensweise. Dabei werden die relevanten Prozessgruppen [A], [B], [C], [E] und [T] getrennt voneinander betrachtet (vgl. Abbildung 7).

Für die Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse wird ein Buchen-Reinbestand in Privatbesitz von 1 ha auf einem guten Standort mit einer Gesamtwuchsleistung von ca. 1.340 Efm mR (genutzter Anteil) angenommen. Auf das Sortiment Scheitholz entfallen über die gesamte Umtriebszeit von 160 Jahren (zeitliche Systemgrenze, Betrachtungszeitraum) in regelmäßigen Abständen ca. 700 Efm mR (52 %). Für die Bewirtschaftung der Fläche werden folgende Annahmen getroffen:

- keine Bodenaufbereitung zur Unkrautbekämpfung vor der Pflanzung,
- Bestandesbegründung durch manuelle Pflanzung,
- Einzäunung der gesamten Fläche von 1 ha,
- drei Pflegemaßnahmen bis zur ersten Durchforstung im Alter von 25 Jahren (Kulturpflege, Jungbestandspflege, selektive Läuterung),
- regelmäßige Wegepflege und Instandsetzung der Forststraße,
- keine Kalkung,
- motormanuelle Ernte der Scheitholzrollen mit 1 m Länge,
- Vorliefern per Hand,
- Aufladen des Scheitholzes auf einen Anhänger per Hand,
- Transport per Traktor zur Weiterverarbeitung zum Hof.

Tabelle 50 bis Tabelle 56 zeigen alle für die Bilanzierung des Anwendungsbeispiels notwendigen Grundannahmen zur Umsetzung der Bilanzierung, beispielsweise mit einer speziellen Bilanzierungssoftware in Verbindung mit Bilanzdatenbanken, die die notwendigen Hintergrunddaten liefern (z. B. Aufwendungen bei der Bereitstellung von Kraftstoff). Bilanzkenngößen, die abweichend von Kapitel 3 nicht dargestellt werden, sind für das konkrete Anwendungsbeispiel nicht relevant bzw. es entstehen keine THG-Emissionen. Dennoch können Bilanzkenngößen, die keine THG-Emissionen erzeugen, Kosten verursachen und erscheinen daher in der ökonomischen Ergebnisdarstellung. Beispiele hierfür sind die manuelle Pflanzung oder der Zaunbau.

Die Bilanzergebnisse von Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse beziehen sich auf die Bezugsgröße Volumen mit der funktionellen Einheit Efm mR. Für die Weitergabe dieser Bilanzergebnisse an Prozessgruppe [B] Transformation muss daher anhand des spezifischen Heizwerts ($H_i = 9.702 \text{ MJ Efm mR}^{-1}$), des Wassergehalts ($w = 20 \%$) sowie des Jahresnutzungsgrads ($\eta = 78 \%$) eine entsprechende Umrechnung

auf die funktionelle Einheit 1 MJ bereitgestellte Wärme durchgeführt werden. Bei der Umrechnung der Bilanzergebnisse in Prozessgruppe [B] werden zudem Holzverluste von 7,5 % veranschlagt.

Für die Prozessgruppe [B] Transformation wird eine Aufarbeitung des Scheitholzes am Ort der Transformation dargestellt. Nach vorangegangenem Transport der Biomasse (siehe Abschnitt zur Prozessgruppe [T]) wird das Buchenscheitholz, welches in Form von 1 m langen Rollen an den Transformationsort geliefert wird, mithilfe eines großen Diesel betriebenen Senkrechtpalters gespalten und anschließend per Elektro-Brennholzkreissäge in 33-cm-Scheite abgelängt. Des Weiteren wird eine natürliche Lufttrocknung auf einen Wassergehalt von 20 % angenommen. Für die Prozesse [B2.3] Trocknung und [B2.2] Zerkleinerung werden Holzverluste von 2 Volumen-% bzw. 5,5 Masse-% angesetzt.

Für die Prozessgruppe [C] Konversion wird die thermische Verwertung des Scheitholzes in einem handelsüblichen Scheitholzofen (Einzelofen) angenommen. Das Scheitholz wird mit einem Heizwert (H_i) von $13,9 \text{ MJ kg}^{-1}$ und einem Jahresnutzungsgrad (η) von 78 % verwertet.

Die Prozessgruppe [D] Nutzung entfällt, da es sich um eine energetische Verwertung der Biomasse handelt und somit bezogen auf die beispielhafte Wirkungskategorie Globale Erwärmung keine C-Speichereffekte [D1] auftreten. Zudem ist die Energiespeicherung [D2] nicht Teil des Untersuchungssystems.

Für die Prozessgruppe [E] werden eine 50%ige Entsorgung in der Müllverbrennung sowie eine 50%ige Nutzung der Holzasche auf landwirtschaftlichen Flächen angenommen. Der finanzielle Aufwand für die Holzascheentsorgung schlägt sich in Arbeitskosten nieder. Bei privaten Kleinanlagen ohne eine Wärmelieferung an Dritte können diese Kosten jedoch nicht angesetzt werden [39].

Für die Prozessgruppe [T] werden insgesamt zwei Transportprozesse mit je 15 km einfache Strecke dargestellt. Dies sind der Transport der Scheitholzrollen per Traktor zum Hof [T1] sowie der Transport des Scheitholzes per Traktor zur Konversion [T2].

Die Prozessgruppe [F] wird für das Anwendungsbeispiel nicht berücksichtigt.

Die ökonomische Bilanzierung erfolgt analog zu den oben genannten Rahmenbedingungen. Darüber hinaus entstehen Arbeitserledigungskosten. Diese werden mit verschiedenen Lohnansätzen verrechnet. Da es sich in diesem Anwendungsbeispiel um Privatwaldbesitz handelt, werden sämtliche Prozessschritte, die vom Waldbesitzer durchgeführt werden können, mit einer Eigenleistung von $11,88 \text{ € h}^{-1}$ angesetzt. Diese Prozesse umfassen [A1.2] Pflanzen/Aussaat, [A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand, [A2.2] Zaunbau, [A3] Ernte, [T] Transporte für Produkte und Co-Produkte sowie [B] Transformation. Bei dem Prozess [A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen wird von einem Lohnunternehmerinsatz ausgegangen. In diesem Fall werden die Lohnkosten mit $29,70 \text{ € h}^{-1}$ kalkuliert. Die Personalkosten beim Transport des Wegebaumaterials [L1] werden mit $17,91 \text{ € h}^{-1}$ angesetzt.

Tabelle 50: *Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A1] Bestandesbegründung*

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[A1.2]	Pflanzen/Aussaat				
[A1.2]	Pflanzen	Arbeitszeitbedarf	130	h	[60]
[L1]	außerbetrieblicher Transport Pflanzmaterial	einfache Transportdistanz Art/Bedarf des Transportmittels	15	km	¹⁾
		Benzinverbrauch je 100 km	7,5	l	[84]
[V3]	Produktion Pflanzmaterial	Anzahl je ha	6.500	Stück	[2]

¹⁾ ExpertenschätzungTabelle 51: *Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A2] Bestandesführung*

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle	
[A2.1]	Pflege Pflanzung/Bestand				
[A2.1]	Maßnahmen	Benzinverbrauch je h	1,7	l	[84]
		Arbeitszeitbedarf je ha	30	h	[78]
[V1]	Freischneider	Leergewicht	7	kg	[84]
		Maschinenzeit je ha	30	h	[78]
		technisches Nutzungspotential	2.500	h	[84]
[V4]	Benzin	Volumen je ha	42	l	²⁾ [84]
[V8]	Schmieröl	Volumen je ha	19	l	²⁾ [84]
[A2.2]	Zaunbau				
[A2.2]	Zaunbau	Arbeitszeitbedarf	120	h	[61]
[L1]	außerbetrieblicher Transport Zaunmaterial	einfache Transportdistanz Art/Bedarf des Transportmittels	15	km	¹⁾
		Benzinverbrauch je 100 km	7,5	l	[84]
[V8]	Zaunmaterial	Masse je ha	140	kg	²⁾
[A2.6]	Bau/Instandhaltung von Wegen				

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[A2.6] Maßnahmen	Wegelänge je ha	35	m	BaySF
	Wegepflege:			
	Anzahl Maßnahmen je Jahr	4		BaySF
	Dieserverbrauch je Maßnahme	0,1	l	²⁾ [42] [84]
	Arbeitszeitbedarf je Maßnahme	0,02	h	²⁾ [42] [84]
	Instandsetzung:			
	Anzahl Maßnahmen je Umtriebszeit	10		BaySF ²⁾
	Dieserverbrauch je Maßnahme	4	l	[87] [84]
[L1] außerbetrieblicher Transport Schotter (Instandsetzung)	Arbeitszeitbedarf je Maßnahme	0,2	h	
	Transportdistanz	25	km	¹⁾
	Art des Transportmittels	Lkw		
	Dieserverbrauch je 100 km	46	l	[84]
	Geschwindigkeit (Durchschnitt leer und beladen)	46,8	km h ⁻¹	²⁾
[V1] Baumaschine (Instandsetzung)	Arbeitszeitbedarf	0,5	h	
	Leergewicht	5.000	kg	[84]
	Maschinenzeit je Maßnahme	0,2	h	²⁾ [84]
[V1] Zugmaschine (Wegepflege)	technisches Nutzungspotential	10.000	h	[84]
	Leergewicht	7.000	kg	[84]
	Maschinenzeit je Maßnahme	0,02	h	²⁾ [84]
[V1] Anbaugerät (Wegpflege)	technisches Nutzungspotential	3000	h	[84]
	Leergewicht	1.000	kg	[84]
	technisches Nutzungspotential	1.000	h	[84]
[V4] Diesel	Leergewicht	1.000	kg	[84]
	technisches Nutzungspotential	1.000	h	[84]
[V8] Schmieröl	Volumen je Maßnahme	0,7	l	²⁾ [84]
	Volumen je Maßnahme	0,1	l	²⁾ [84]
[V8] Schotter (Instandsetzung)	Instandsetzung	4	l	
[V8] Schotter (Instandsetzung)	Masse je m	500	kg	[87]

¹⁾ Expertenschätzung, ²⁾ berechnet

Tabelle 52: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [A3] Ernte

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[A3.1]	Ernte Biomasse			
[A3.1]	Maßnahme	Gesamtvolumen Erntemenge für Sortiment Scheitholz	702	Efm mR ³⁾ [3]
		Anzahl Maßnahmen je Umtriebszeit	28	[63]
		Arbeitszeitbedarf je Umtriebszeit	435	h
[V1]	Motorsäge	Leergewicht	7	kg [84]
		Produktivität je h über Umtriebszeit	2,3	Efm mR ²⁾ [62]
		technisches Nutzungspotential	2.500	h [84]
[V4]	Benzin	Volumen je h	1,7	l [84]
[V8]	Schmieröl	Volumen je h	0,7	l [84]
[A3.2]	Vorliefern zur Straße	keine THG-Emissionen		
[A3.4]	Aufladen auf Traktor			
[A3.4]	Maßnahme	Arbeitszeitbedarf	15,6	h ²⁾ [41]
[V1]	Anhänger	Leergewicht	1.000	kg [57]
		technisches Nutzungspotential	9.000	t [57]

²⁾ berechnet, ³⁾ modelliert

Tabelle 53: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [B] Transformation

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[B2.2]	Zerkleinerung			
[B2.2]	Zerkleinerung	Zerkleinerungsverluste	5,5	Masse-% [41]
		Arbeitszeitbedarf je Efm mR für:		
		Senkrechtpalter	0,59	h [41]
		Brennholzkreissäge	0,71	h [41]
[V1]	Senkrechtpalter	Produktivität je h	1,7	Efm mR [41]
		technisches Nutzungspotential	10.000	h
[V4]	Diesel	Volumen je Efm mR	1,2	l [41]

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle	
[V1]	Brennholzkreissäge	Produktivität je h technisches Nutzungspo- tential	1,4 10.000	Efm mR h	[41]
[V5]	Strom	Energie je Efm mR	0,83	kWh	[41]
[B2.3]	Trocknung				
[B2.3]	Trocknung	Trocknungsverluste	2	Masse-%	[53]

Tabelle 54: Dokumentation von Bilanzkenngroßen in Prozessgruppe [C] Konversion

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle
[C2]	Wärmeerzeugung			
[C2]	Verbrennung	Wassergehalt Scheitholz	20	% ¹⁾
		Raumdichte Buche	558	kg Efm mR ⁻¹ [52]
		Heizwert (H _i) des Holzes	13,9	MJ kg ⁻¹ [52]
		Jahresnutzungsgrad Ofen	78	% ²⁾ [83]
[V1]	Einzelofen	Leergewicht	108	kg
		technisches Nutzungspo- tential	20.000	h

¹⁾ Expertenschätzung

²⁾ berechnet

Tabelle 55: Dokumentation von Bilanzkenngroßen in Prozessgruppe [E] Abfallbewirt-
schaftung

Prozess	Bilanzkenngroße	Wert	Einheit	Quelle
[E4]	Beseitigung			
[E4]	Ascheentsorgung	Aschegehalt Buchen- scheitholz	1	Masse-% [83]
		Anteil Asche zur Kehricht- verbrennung	50	Masse-%
		Anteil Asche zur Ausbrin- gung	50	Masse-%

Tabelle 56: Dokumentation von Bilanzkenngrößen in Prozessgruppe [T] Transporte

Prozess	Bilanzkenngröße	Wert	Einheit	Quelle
[T1]	Transport Biomasse			
[T1]	Transport Scheitholzrollen	Gesamtvolumen Scheitholzrollen	702	Efm mR
		einfache Transportdistanz	10	km
		Geschwindigkeit (leer)	35	km h ⁻¹
		Geschwindigkeit (beladen)	25	km h ⁻¹
[V1]	Traktor	Leergewicht	3.000	kg
		Maschinenzeit	75	h
		technisches Nutzungspotential	10.000	h
				[57] ²⁾
[V1]	Anhänger	Leergewicht	1.000	kg
		technisches Nutzungspotential	9.000	t
		Ladekapazität	6,42	Efm mR
				[57]
[V4]	Diesel	Volumen je h (leer)	7	l
		Volumen je h (beladen)	9	l
[V8]	Schmieröl	Wechselintervall	500	h
		Volumen je Wechselintervall	30	l
				1)
				1)
[T2]	Transport Zwischenprodukte			
[T2]	Transport Scheitholz	Gesamtvolumen Scheitholz	702	Efm mR
		einfache Transportdistanz	10	km
		Geschwindigkeit (leer)	35	km h ⁻¹
		Geschwindigkeit (beladen)	25	km h ⁻¹
[V1]	Traktor	Leergewicht	3.000	kg
		Maschinenzeit	75	h
		technisches Nutzungspotential	10.000	h
				[57] ²⁾
[V1]	Dreiseitenkipper, einachsiger, 40 km/h	Leergewicht	1.000	kg
		technisches Nutzungspotential	9.000	t
		Ladekapazität	6,42	Efm mR
				[57]
[V4]	Diesel	Volumen je h (leer)	7	l
		Volumen je h (beladen)	9	l
[V8]	Schmieröl	Wechselintervall	500	h
		Volumen je Wechselintervall	30	l
				1)
				1)

1) Expertenschätzung

2) berechnet (Maschinenzeit = einfache Transportdistanz / (Geschwindigkeit (leer) + einfache Geschwindigkeit (beladen)) × Gesamtvolumen Scheitholzrollen bzw. Scheitholz / Ladekapazität)

7.3.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz dargestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt sowohl aggregiert (auf Prozessgruppenebene) als auch disaggregiert (auf Prozessebene). Hierdurch wird sowohl ein prägnanter Ergebnisüberblick gegeben als auch die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bilanzergebnisse gewährleistet.

Die Ergebnisdarstellung für die Umweltwirkungen der Strombereitstellung aus landwirtschaftlichem Biogas wird am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Indikator CO₂-Äquivalente gezeigt.

Tabelle 57: Aggregierte Ergebnisdarstellung für Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit Indikator CO₂-Äquivalente

Prozess		CO ₂ -Äquivalente	
		in g MJ ⁻¹	in %
[A]	Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse	0,95	12,3
[B]	Transformation	1,17	15,2
[C]	Konversion	4,34	56,2
[E]	Abfallbewirtschaftung	0,01	0,1
[T]	Transporte	1,25	16,2
Gesamt		7,72	100

Tabelle 58: Disaggregierte Ergebnisdarstellung für Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit Indikator CO₂-Äquivalente

Prozess		CO ₂ -Äquivalente	
		in g MJ ⁻¹	in %
[A]	Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse		
[A1]	Bestandesbegründung		
[A1.1]	Bodenaufbereitung	nicht relevant	
[A1.2]	Pflanzen/Aussaat		
[A1.2]	Pflanzung	0	0
[L1]	außerbetrieblicher Transport Pflanzmaterial	0,0008	0,01
[V3]	Produktion von Pflanzmaterial	0,0703	0,91
[A1.3]	sonstige Flächenvorbereitung	nicht relevant	

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[A2] Bestandesführung		
[A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand		
[A2.1] Benzinverbrauch	0,0176	0,23
[V1] Freischneider	0,0010	0,01
[V4] Benzin	0,0034	0,04
[V8] Schmieröl	0,0046	0,06
[A2.2] Zaunbau		
[A2.2] Zaunbau	0	0
[L1] außerbetrieblicher Transport Zaunmaterial	0,0008	0,01
[V8] Zaunmaterial	0,0770	1,00
[A2.3] Düngung	nicht relevant	
[A2.4] Kalkung	nicht relevant	
[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung	nicht relevant	
[A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen		
[A2.6] Dieserverbrauch	0,0332	0,43
[L1] außerbetrieblicher Transport Schotter	0,0965	1,25
[V1] Baumaschine (Instandsetzung)	0,0006	0,01
[V1] Traktor (Wegepflege)	0,0031	0,04
[V1] Anbaugerät (Wegepflege)	0,0014	0,02
[V4] Diesel	0,0054	0,07
[V8] Schmieröl	0,0009	0,01
[V8] Schotter	0,2948	3,82
[A3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse		
[A3.1] Benzinverbrauch	0,2110	2,73
[V1] Motorsäge	0,0028	0,04
[V4] Benzin	0,0579	0,75
[V8] Schmieröl	0,0594	0,77
[A3.2] Vorliefern zur Straße	0	0
[A3.3] Aufarbeitungsprozesse nach Ernte	nicht relevant	
[A3.4] Aufladen auf Lkw		
[V1] Anhänger	0,0084	0,11
[A4] nicht-zuordenbar	nicht relevant	
[A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen	nicht relevant	

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[B] Transformation		
[B1] Lagerung		nicht relevant
[B2] Vorbehandlung		
[B2.1] Reinigung		nicht relevant
[B2.2] Zerkleinerung		
[B2.2] Dieserverbrauch	0,5710	7,39
[V1] Senkrechtpalter und Holzkreissäge	0,5290	6,85
[V5] Diesel und Strom	0,0730	0,95
[B2.3] Trocknung	0	0
[B3] Umwandlung		nicht relevant
[C] Konversion		
[C1] Stromerzeugung		nicht relevant
[C2] Wärmeerzeugung		
[C2] Verbrennung	3,6550	47,32
[V1] Einzelofen	0,6860	8,87
[C3] Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung		nicht relevant
[C4] Bereitstellung Antriebsenergie (z. B. für Mobilität)		nicht relevant
[C5] Abgasreinigung		nicht relevant
[D] Nutzung		nicht relevant
[E] Abfallbewirtschaftung		
[E1] Vorbereitung zur Wiederverwendung		nicht relevant
[E2] stoffliche Verwertung	0	0
[E3] energetische Verwertung		nicht relevant
[E4] Beseitigung		
[E4] Ascheentsorgung	0,0100	0,12
[T] Transporte		
[T1] Transport Biomasse (Scheitholzrollen)		
[T1] Dieserverbrauch	0,4595	5,95
[V1] Traktor und Anhänger	0,0785	1,02
[V4] Diesel	0,0743	0,96
[V8] Schmieröl	0,0124	0,16

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g MJ ⁻¹	in %
[T2]	Transport Zwischenprodukte (Scheitholz)	
[T2]	Dieserverbrauch	0,4595 5,95
[V1]	Traktor und Anhänger	0,0785 1,02
[V4]	Diesel	0,0743 0,96
[V8]	Schmieröl	0,0124 0,16
[T3]	Transport Endprodukte	nicht relevant
[T4]	Transport Koppelprodukte und Abfälle	nicht relevant
[F]	Effekte außerhalb der Systemgrenze	nicht relevant

Im Folgenden sind die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung bei der Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz in einer Einzelraumfeuerung dargestellt. Die tabellarische Gliederung der Kosten in € MJ⁻¹ erfolgt auf Basis von Prozessgruppen und Prozessen. Aufgrund dieser Art der Darstellung ist der Vergleich von Kosten und der Wirkungskategorie Globale Erwärmung auch auf einem hohen Detailgrad möglich.

Tabelle 59: Aggregierte Ergebnisdarstellung der Gestehungskosten für die Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz

Prozess	Gestehungskosten	
	in € MJ ⁻¹	in %
[A]	Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse	0,00975 33,9
[B]	Transformation	0,00386 13,4
[C]	Konversion	0,01452 50,5
[E]	Abfallbewirtschaftung	0,00000 0,0
[T]	Transporte	0,00062 2,2
	Gesamt	0,02875 100

Tabelle 60: Disaggregierte Ergebnisdarstellung für die Kosten der Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz

Prozess	Gestehungskosten	
	in € MJ ⁻¹	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse		
[A1] Bestandesbegründung		
[A1.1] Bodenaufbereitung		nicht relevant
[A1.2] Pflanzen/Aussaat		
[A1.2] Pflanzung	0,00471	16,38
[L1] außerbetrieblicher Transport Pflanzmaterial	0,00001	0,03
[A1.3] sonstige Flächenvorbereitung		nicht relevant
[A2] Bestandesführung		
[A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand	0,0004	1,39
[A2.2] Zaunbau		
[A2.2] Zaunbau	0,00095	3,30
[L1] außerbetrieblicher Transport Zaunmaterial	0,00001	0,03
[A2.3] Düngung		nicht relevant
[A2.4] Kalkung		nicht relevant
[A2.5] Pflanzenschutz		nicht relevant
[A2.6] Bau/Instandhaltung von Wegen	0,00031	1,08
[L1] außerbetrieblicher Transport Schotter	0,00003	0,10
[A3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse	0,00188	6,54
[A3.2] Vorliefern zur Straße	0,00094	3,27
[A3.3] Aufarbeitungsprozesse nach Ernte		nicht relevant
[A3.4] Aufladen auf Lkw	0,00051	1,77
[A4] nicht-zuordenbare Prozesse		nicht relevant
[A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen		nicht relevant
[B] Transformation		
[B1] Lagerung	0,00105	3,65
[B2] Vorbehandlung		
[B2.1] Reinigung		nicht relevant
[B2.2] Zerkleinerung	0,00281	9,77
[B2.3] Trocknung	0	0
[B3] Umwandlung		nicht relevant

Prozess		Gestehungskosten	
		in € MJ ⁻¹	in %
[C]	Konversion		
[C1]	Stromerzeugung		nicht relevant
[C2]	Wärmeerzeugung	0,01452	50,50
[C3]	Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung		nicht relevant
[C4]	Bereitstellung Antriebsenergie (z. B. für Mobilität)		nicht relevant
[C5]	Abgasreinigung		nicht relevant
[D]	Nutzung		nicht relevant
[E]	Abfallbewirtschaftung		
[E1]	Vorbereitung zur Wiederverwendung		nicht relevant
[E2]	stoffliche Verwertung		nicht relevant
[E3]	energetische Verwertung		nicht relevant
[E4]	Beseitigung		
[E4]	Ascheentsorgung	0	0
[T]	Transporte		
[T1]	Transport Biomasse (Scheitholzrollen)	0,00031	1,08
[T2]	Transport Zwischenprodukte (Scheitholz)	0,00031	1,08
[T3]	Transport Endprodukte		nicht relevant
[T4]	Transport Koppelprodukte und Abfälle		nicht relevant
[F]	Effekte außerhalb der Systemgrenze		nicht relevant

THG-Vermeidungskosten

Mit den Ergebnissen der THG-Bilanz und den Gestehungskosten für das untersuchte Produktsystem sowie den Werten des Referenzsystems können die THG-Vermeidungskosten ermittelt werden. Im dargestellten Anwendungsbeispiel wurden für die Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz CO₂-Äquivalente in Höhe von 0,000008 t MJ⁻¹ und Gestehungskosten in Höhe von 0,029 € MJ⁻¹ berechnet. Für das Referenzsystem Heizöl betragen die CO₂-Äquivalente 0,000085 t MJ⁻¹. Unter den Annahmen eines Heizölpreises von 0,44 € l⁻¹, Investitionskosten für die Ölheizung von 1.500 € und einem Jahresnutzungsgrad von 80 % betragen die Gestehungskosten für die Wärmebereitstellung durch eine Ölheizung 0,025 € MJ⁻¹. Im Folgenden sind diese Ergebnisse in die Vermeidungskostengleichung eingesetzt.

$$THG - Vermeidungskosten = \frac{0,029 \text{ € MJ}^{-1} - 0,025 \text{ € MJ}^{-1}}{0,000085 \text{ t MJ}^{-1} - 0,000008 \text{ t MJ}^{-1}} = 52 \text{ € t}^{-1} \quad (7.3)$$

Hieraus ergibt sich für das vorliegende Anwendungsbeispiel, dass bei der Wärmebereitstellung aus Buchenscheitholz im Vergleich zur Wärmebereitstellung aus Heizöl jede vermiedene Tonne CO₂-Äquivalent Kosten in Höhe von 52 € verursacht (Formel (7.3)).

Zusammenfassung

Die Entwicklung einer biobasierten Wirtschaft bietet ein Potential für mehr Beschäftigung, Wertschöpfung und Umweltschutz. Diese Option findet sich zunehmend auch in nationalen und internationalen Politikstrategien wieder [6][25]. Die nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung land- und forstwirtschaftlicher Rohstoffe sowie deren stoffliche und energetische Nutzung in effizienten Produktions- und Verarbeitungsverfahren gehören dabei zu den wichtigsten Handlungsfeldern. Für eine aussagekräftige Analyse und Bewertung von Produktions- und Verarbeitungsverfahren sind vollständige Prozessketten („Lebenszyklen“) zu betrachten und die dabei anfallenden Koppelprodukte sowie die Abfallbewirtschaftung einzubeziehen. Die Umweltwirkungen können beispielsweise mithilfe der Ökobilanzmethode umfassend analysiert und bewertet werden. Grundsätze und Regeln zur Durchführung von Ökobilanzen wurden in internationalen Standards festgelegt und in die deutschen Normenwerke DIN EN ISO 14040 [13] und DIN EN ISO 14044 [12] übertragen. Darauf aufbauend wurden auf internationaler und europäischer Ebene weitere Normen, Standards und Initiativen zur Umweltbewertung von Produkten erarbeitet [16][32][64]. Spezifische methodische Fragestellungen zu Ökobilanzen bzw. Treibhausgasbilanzen (THG-Bilanzen) für Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen bleiben jedoch häufig offen.

Mit Inkrafttreten der Erneuerbare-Energien-Richtlinie [28] wurde für Biokraftstoffe und Strom aus flüssigen Biobrennstoffen erstmals eine Methode zur THG-Bilanzierung ordnungspolitisch vorgeschrieben. Ein Trend, der sich auch in anderen Sektoren der Bioenergiebereitstellung und bei der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, aber auch bei der Erzeugung von Nahrungsmitteln und Futtermitteln fortsetzen kann. Aus diesem Grund wird die Entwicklung geeigneter Methoden zur ökologisch-ökonomischen Analyse, Bewertung und Optimierung von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen zukünftig von großer Bedeutung sein. Entsprechende Arbeiten zur Bioenergie [15][20][86], zur stofflichen Nutzung [14][17][18][19][76] sowie zur Nahrungsmittelerzeugung [66] wurden sowohl im öffentlichen als auch im privatwirtschaftlichen Bereich begonnen.

Trotz einer Vielzahl methodischer Vorschläge zur Bewertung von Produkten aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen zeigen z. B. Literaturrecherchen zu Ökobilanzen für Biogaserzeugung [40], Forstwirtschaft [50] und energetische Holznutzung [95], dass sich Studien hinsichtlich der gewählten Systemgrenzen, Bezugsgrößen und funktionellen Einheiten, der berücksichtigten Prozesse, der zugrunde gelegten Datenbasis, der Auswahl der Wirkungskategorien und Methoden zur Berechnung der Wirkungsindikatoren, des Umgangs mit Koppelprodukten als auch der Ergebnisaufbereitung bzw. -darstellung (aggregiert, teilweise aggregiert oder nach Prozessen stratifiziert) stark voneinander unterscheiden. Aufgrund der methodischen Unterschiede weisen die Ergebnisse in den ausgewerteten Studien, beispielsweise für THG-Emissionen, einen breiten Wertebereich auf. Eine abgestimmte Methodik ist folglich eine wichtige Voraussetzung für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen. Weiterhin müssen für die Ableitung praktisch umsetzbarer Minderungsstrategien, beispielsweise zur THG-Minderung, konkrete Produktionsbe-

dingungen berücksichtigt werden. Bisher werden Ökobilanzen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen jedoch überwiegend für mittlere Produktionsbedingungen berechnet. Standort- und Bewirtschaftungseinflüsse (Böden, Klima, Ertragspotentiale, standortspezifische Produktionsverfahren, Fruchtfolgen, Baumartenzusammensetzung, Umtriebszeiten und Betriebssysteme) werden noch zu wenig in Ökobilanzen einbezogen, obwohl sie erheblichen Einfluss haben.

Vor diesem Hintergrund entwickelt die Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern – ExpRessBio eine harmonisierte Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Biomasseerzeugung für Nahrungs- und Futtermittel sowie für die stoffliche Nutzung und Energiebereitstellung. Das vorliegende Methodenhandbuch stellt eine Empfehlung dar, wie bei der Bilanzierung von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen vorgegangen werden soll, um zumindest bayernweit vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Der Schwerpunkt der Methodenbeschreibung liegt dabei zunächst auf dem Bereich der Biomasseerzeugung sowie ihrer energetischen Nutzung. Gleichwohl wurden bei der Erarbeitung der harmonisierten Bilanzierungsmethode die besonderen Aspekte der stofflichen Nutzung berücksichtigt. Eine umfassende Validierung hierfür steht jedoch noch aus. Zur Prüfung und Weiterentwicklung dieser Bilanzierungsmethode werden verfahrens- und regional-spezifische Produktsysteme auf der Grundlage von Feldversuchen, Praxis- und Modellbetrieben analysiert.

Ausgehend von einer Zieldefinition und der Festlegung des Untersuchungsrahmens wird dem Anwender mit der Systemdarstellung ein Instrument an die Hand gegeben, mit dem er sein Produktsystem in einzelne Prozesse strukturieren kann. Gleichzeitig erhält der Anwender methodische Empfehlungen für die Durchführung einer produktspezifischen Sachbilanzierung. Es folgen Hinweise auf zu berücksichtigende Umweltwirkungen und wichtige betriebs- und volkswirtschaftliche Kennzahlen. Außerdem werden Referenzsysteme definiert. Durch die empfohlene Ergebnisdarstellung in nicht-aggregierter Form wird ein transparenter Vergleich unterschiedlicher Produktions- und Konversionsverfahren ermöglicht. Hierdurch können regionalspezifische und einzelbetriebliche Handlungsempfehlungen für Optimierungsmaßnahmen einzelner Verfahrensketten abgeleitet werden. Die abschließende Darstellung von drei Anwendungsbeispielen veranschaulicht die praktische Umsetzung der beschriebenen Methoden.

Abstract

Based on international standards for life cycle assessment (LCA) this handbook presents a harmonized method for analyzing and assessing environmental and economic effects of biomass systems. Several Bavarian research institutes have developed and applied this harmonized balancing method at the level of field trials as well as economical producers of bioenergy within the state of Bavaria. Thereby regional conditions of biomass production and specific processing methods are considered. Following this methodological approach the user of this handbook is enabling to compare all results calculated and to derive recommendation for actions e.g. strategies of GHG mitigation. Based on definition of the goal and the scope, a system scheme will be provided as a tool for the user to structure the product system in single process steps. At the same time the user receives methodical recommendations for the implementation of product specific life cycle inventory analysis. Furthermore, information is given regarding environmental impacts that need to be considered. Additionally business as well as economy related key figures are provided and reference systems are defined. By not aggregated result presentation as recommended, a transparent comparison is possible between various production and conversion processes. Through these recommendations, optimization measures of single process chains on a regional and farm level can be conducted. The final three application examples demonstrate the practical implementation of the introduced method.

Glossar

Abfall

Abfälle im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [9] sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung.

Abpressgrad

Prozentualer Anteil des gewonnenen Öls am Ölgehalt der Rapssaat [73].

Arbeitszeitbedarf

Zeitbedarf für Arbeitskräfte oder Dienstleister, z. B. durch einen Lohnunternehmer, zur Durchführung eines spezifischen Prozesses inklusive der Rüstzeit für Maschinen.

Allokation

Zuordnung der über den Lebensweg auftretenden Umweltbelastungen auf mehrere in einem Produktionsprozess entstehende Produkte gemäß einem physikalischen oder ökonomischen Zusammenhang [90].

Allokationsfaktor

Die Größe für die Zuordnung der Umweltlasten (→ Allokation) über einen physikalischen oder ökonomischen Zusammenhang auf mehrere Produkte wird als Allokationsfaktor bezeichnet (→ Abschnitt 2.2.4).

Basisvariante

Die Basisvariante ist ein definiertes Bezugssystem und bildet die Grundlage für die Ableitung und Definition von Szenarien, anhand derer Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden können. Die Basisvariante beschreibt z. B. das untersuchte Produktsystem auf Grundlage von Feldversuchen, betriebsspezifischen Erhebungen, definierten Fallbeispielen und Varianten sowie weiteren Festlegungen zum Untersuchungsrahmen (z. B. Allokation bei Koppelprodukten).

Brennwert

Der Brennwert (H_s) ist die Wärmemenge, die bei vollständiger Oxidation eines Brennstoffs, inklusive der Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wasserdampfs nutzbar gemacht wird.

Endenergie

Energieformen, die der Endverbraucher bezieht (z. B. Heizöl, Rapsöl, Hackschnitzel, Fernwärme), welche aus Sekundärenergieträgern oder ggf. aus Primärenergieträgern vermindert um Umwandlungs- und Verteilverluste, den Eigenverbrauch und den nicht energetischen Verbrauch entstehen.

Erntefestmeter

Ein Erntefestmeter beschreibt einen Kubikmeter geerntetes Holz, mit oder ohne Rinde,

bei dem Ernteverluste und gegebenenfalls Rinde bereits abgezogen sind. Im Gegensatz dazu beschreibt ein Vorratsfestmeter einen Kubikmeter Holz im Waldbestand.

Heizwert

Der Heizwert (H_i) ist die Wärmemenge, die bei vollständiger Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wasserdampfs freigesetzt wird

Holzfeuchte

Verhältnis des Wasseranteils eines Stoffs zu dessen Trockengewicht

Jahresnutzungsgrad

Der Jahresnutzungsgrad setzt die mit einem Wärmeträgermedium (z. B. Dampf) abgeführte Wärmeenergie in Beziehung zur zugeführten Brennstoffenergie über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr.

Kaskadennutzung

Unter Kaskadennutzung versteht man die mehrmalige, nacheinander stattfindende Verwendung von Ressourcen zur Herstellung von Produkten, gefolgt von einer abschließenden energetischen Verwertung oder Entsorgung.

Kesselwirkungsgrad

Der Kesselwirkungsgrad ist die mit einem Wärmeträgermedium (z. B. Dampf) abgeführte Wärmeenergie in Beziehung zur zugeführten Brennstoffenergie

Koppelprodukt

Fällt ein Stoff oder Gegenstand bei einem Herstellungsverfahren an, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieses Stoffs oder Gegenstands gerichtet ist, ist er als Koppelprodukt und nicht als Abfall anzusehen, wenn

1. sichergestellt ist, dass der Stoff oder Gegenstand weiter verwendet wird,
2. eine weitere, über ein normales industrielles Verfahren hinausgehende Vorbehandlung hierfür nicht erforderlich ist,
3. der Stoff oder Gegenstand als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt wird und
4. die weitere Verwendung rechtmäßig ist; dies ist der Fall, wenn der Stoff oder Gegenstand alle für seine jeweilige Verwendung anzuwendenden Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllt und insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt führt.

Kraft-Wärme-Kopplung

Die gleichzeitige Bereitstellung von Strom und Wärme aus einem Energiewandlungsprozess, z. B. in Blockheizkraftwerken.

Maschinenzeit

Zeitbedarf für eigene Arbeitsmittel (Maschinen, Geräte, technische Anlagen) zur Durchführung eines spezifischen Prozesses

Nachwachsende Rohstoffe

Land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel Verwendung finden, sondern stofflich oder zur Umwandlung in Strom, Wärme oder Kraftstoffe genutzt werden.

Nutzenergie

Als Nutzenergie wird die Energie bezeichnet, die nach der letzten Umwandlung in den Geräten des Verbrauchers für die Befriedigung der jeweiligen Bedürfnisse (z. B. Raumtemperierung) zur Verfügung steht. Sie wird gewonnen aus Endenergieträgern vermindert um die Verluste dieser letzten Umwandlung.

Nutzungsgrad

Der Nutzungsgrad setzt die mit einem Wärmeträgermedium (z. B. Dampf) abgeführte Wärmeenergie in Beziehung zur zugeführten Brennstoffenergie über einen längeren Betrachtungszeitraum (z. B. Heizperiode).

Nutzungspotential, technisches

Anzahl der Nutzungseinheiten, nach deren Ablauf/Ausstoß die Maschine durch Nutzung verschlissen ist, gemessen in maschinenspezifischen Nutzungseinheiten (h, ha, t, m³ ...) [57].

Primärenergie

Energieformen, die noch keiner technischen Umwandlung unterworfen wurden, wie beispielsweise Rohsteinkohle, Roherdöl, Rohbiomasse, Windkraft, Solarstrahlung).

Produktsystem

Beschreibt den Lebenszyklus eines land- oder forstwirtschaftlichen Rohstoffs von der Erzeugung, inklusive dessen stofflicher oder energetischer Nutzung, bis hin zur Verwertung bzw. Beseitigung der anfallenden Abfallstoffe.

Prozessgruppe

Definierter Lebenszyklusabschnitt eines Produktsystems z. B. nach Systemdarstellung (siehe Abschnitt 2.2.1).

Prozess-Untergruppe bzw. Prozess

Definierte Vorgänge innerhalb der Lebenszyklusabschnitte eines Produktsystems z. B. nach Systemdarstellung (siehe Abschnitt 2.2.1).

Referenzsystem

(Fossile) Vergleichssysteme, die einen funktionell gleichen Nutzen zum Untersuchungssystem bereitstellen.

Reststoff

Der Begriff Reststoff wird in der entwickelten Bilanzierungsmethode nicht verwendet. Reststoffe sind entweder Koppelprodukte oder wiederzuverwendende, wiederzuverwertende oder zu beseitigende Abfälle.

Sensitivitätsanalyse

Mit der Sensitivitätsanalyse werden unterschiedliche Szenarien in Bezug auf die Basisvarianten untersucht. Sie beschreibt somit die Veränderungen der Umweltwirkungen und Kosten aufgrund unterschiedlicher Annahmen innerhalb einer Bereitstellungskette. Verändert werden dabei z. B. die Produktivität von Maschinen bzw. von Prozessen, der Kraftstoffverbrauch, die Kraftstoffart oder die Nutzungspotentiale von Maschinen und Aggregaten.

Sekundärenergie

Energieträger, der durch technische Umwandlung aus Primär- oder anderen Sekundärenergieträgern hergestellt wird. Es kommt dabei zu Umwandlungs- und Verteilverlusten.

Substitutionsfaktor

Der Substitutionsfaktor gibt an, in welchem Umfang ein Koppelprodukt (bezogen auf die Bezugsgröße/funktionelle Einheit; → Abschnitt 2.2.3) ein anderes Produkt (Referenzprodukt) substituieren kann. Dabei ist die gleiche Wertigkeit von Koppelprodukt und Referenzprodukt zu berücksichtigen. Der Substitutionsfaktor ist damit eine entscheidende Größe zur Bestimmung der Gutschriftenhöhe bei einer Systemraumerweiterung mit Substitutionspotential und Gutschriften (→ Abschnitt 2.2.4).

Szenarien

Szenarien sind Veränderungen der Basisvariante(n), wobei die Veränderungen innerhalb der Bereitstellungskette liegen (z. B. Veränderungen der Produktivität von Maschinen bzw. von Prozessen, des Kraftstoffverbrauchs sowie der Kraftstoffart (Biokraftstoff anstatt fossilen Kraftstoffs)). Anhand definierter Szenarien in Bezug auf die Basisvariante lassen sich Sensitivitätsanalysen durchführen.

Variantenanalyse

Die Variantenanalyse beschreibt die Darstellung von Umweltwirkungen und Kosten verschiedener Bereitstellungsketten sowie daraus abgeleitete Unterschiede zwischen den Ketten. Folglich dient sie dem Vergleich verschiedener Basisvarianten untereinander.

Wassergehalt

Verhältnis des Wasseranteils eines Stoffs zu dessen Nassgewicht, also dem Gesamtgewicht des trockenen Stoffs sowie des Wassers.

Wirkungsindikator

Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie. Eigentlich Wirkungskategorie-Indikator. Die Kurzbezeichnung „Wirkungsindikator“ wird zur besseren Lesbarkeit auch gemäß der ISO-Normen 14040 und 14044 verwendet [12][13].

Wirkungskategorie

Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können [12][13].

Quellenverzeichnis

- [1] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2015): Programm zur Berechnung des Biogasgärrestes. URL: <http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/031516/> (Stand: Oktober 2015)
- [2] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2010): Kulturbegründung und Jungwuchspflege: Wegweiser für bayerische Waldbesitzer. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 47 Seiten
- [3] BIBER, P.; DURSKY, J.; POMMERENING, A.; PRETZSCH, H.; SEIFERT, E.; SEIFERT, T. (2000): Silva 2.2 Benutzerhandbuch. München: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München, 179 Seiten
- [4] BRIEM, S.; BLESL, M.; FAHL, U.; OHL, M.; MOERSCHNER, J.; ELTROP, L.; VOß, A.; BIEBAHN, P.; KREWITT, W.; GÜRZENICH, D.; TRYFOUNIDIOU, R.; WAGNER, H.; CORRADINI, R.; RICHTER, S. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Ein Forschungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. München u. a.: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 341 Seiten
- [5] BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN (2010): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV) vom 30. September 2009, die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. Juni 2010 (BGBl. I, S. 814) geändert worden ist, Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 65, S. 3183–3212
- [6] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMEL) (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. URL: http://www.bmbf.de/pubRD/Politikstrategie_Biooekonomie_barrierefrei.pdf (Stand: 21.07. 2015)
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT/BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALORDNUNG (2002): Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung – AltholzV) vom 15. August 2002, die zuletzt durch Artikel 96 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I, S. 1474) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 59, S. 3302–3317
- [8] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009, die zuletzt durch Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I, S. 973) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 22, S. 900–950
- [9] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT; BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012, das zuletzt durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I, S. 1324) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 10, S. 212–264

- [10] DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E. V. (DLG) (2012): Datenblatt DLG-PowerMix, Fendt 274 Vario SCR. URL: http://www.dlg-test.de/tests/Fendt-724-SCR_de.pdf (Stand Oktober 2015)
- [11] DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E. V. (DLG) (2011): Die neue Betriebszweigabrechnung – Ein Leitfaden für die Praxis. Arbeiten der DLG, Nr. 197, 3. Aufl. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 124 Seiten, ISBN 978-3-7690-3163-8
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2006): DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Oktober 2006. Berlin: Beuth-Verlag, 84 Seiten
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2009): DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. November 2009. Berlin: Beuth-Verlag, 40 Seiten
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2012): DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. April 2012. Berlin: Beuth-Verlag, 52 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2013): DIN EN 16214-4: Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen für Energieanwendungen – Grundsätze, Kriterien, Indikatoren und Prüfer – Teil 4: Berechnungsmethoden der Treibhausgasemissionsbilanz unter Verwendung einer Ökobilanz. April 2013. Berlin: Beuth-Verlag, 44 Seiten
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN CEN ISO/TS 14067: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung und Kommunikation (ISO/TS 14067:2013). September 2014. Berlin: Beuth-Verlag, 104 Seiten
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN 16485: Rund- und Schnittholz – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen. Juli 2014. Berlin: Beuth-Verlag, 27 Seiten
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN 16751: Biobasierte Produkte – Nachhaltigkeitskriterien. Norm-Entwurf. Juli 2014. Berlin: Beuth-Verlag, 21 Seiten
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN 16760: Biobasierte Produkte – Ökobilanzen. Norm-Entwurf. August 2014. Berlin: Beuth-Verlag, 36 Seiten
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN ISO 13065: Nachhaltigkeitskriterien für Bioenergie. Norm-Entwurf. Oktober 2014. Berlin: Beuth-Verlag, 66 Seiten
- [21] DOCKERY, D. W.; POPE, C. A. (1994): Acute respiratory effects of particulate air pollution. Annual Review of Public Health, Jg. 15, S. 107–132
- [22] DREIER, T. (2000): Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München. Dissertation, München: Technische Universität München, 134 Bl.

- [23] DRESSLER, D. (2015): Einfluss regionaler und standortspezifischer Faktoren auf die Allgemeingültigkeit ökologischer und primärenergetischer Bewertungen von Biogas. Dissertation. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock, Nr. 51, 230 Seiten, ISBN 978-3-86009-424-2
- [24] EBERTSEDER, T.; ENGELS, C.; HEYN, J.; REINHOLD, J.; BROCK, C.; FÜRSTENFELD, F.; HÜLSBERGEN, K.-J.; ISERMANN, K.; KOLBE, H.; LEITHOLD, G.; SCHMID, H.; SCHWEITZER, K.; WILLMS, M.; ZIMMER, J. (2014): Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA). Speyer: Selbstverlag, 21 Seiten
- [25] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010): EUROPA 2020 – Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum. Mitteilung der Kommission, 40 Seiten, URL: <http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20%20DE%20SG-2010-80021-06-00-DE-TRA-00.pdf> (Stand: 05.08. 2015)
- [26] EUROPÄISCHE UNION (1998): Richtlinie 97/68/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 41, L 59, S. 1-85
- [27] EUROPÄISCHE UNION (2007): Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typp Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro5 und Euro6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 50, L 171, S. 1-16
- [28] EUROPÄISCHE UNION (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. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 52, L 140, S. 16–62
- [29] EUROPÄISCHE UNION (2009): Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des europäischen Parlaments und Rates vom 18. Juni 2009 über die Typp Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 und der Richtlinie 2007/46/EG sowie zur Aufhebung der Richtlinien 80/1269/EWG, 2005/55/EG und 2005/78/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 52, L 188, S. 1-13
- [30] EUROPÄISCHE UNION (2012): Richtlinie 2012/46/EU der Kommission vom 6. Dezember 2012 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 55, L 353, S. 80-127
- [31] EUROPÄISCHE UNION (2012): Verordnung (EU) Nr. 459/2012 der Kommission vom 29. Mai 2012 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlamentes und des Rates und der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6). Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 55, L 142, S. 16-24

- [32] EUROPEAN COMMISSION (2011): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context – based on existing environmental impact assessment models and factors. First edition. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 143 Seiten. JRC 61049, EUR 24571 EN, ISBN 978-92-79-17451-3, ISSN 1018-5593, DOI: 10.278/33030
- [33] FINKBEINER, M. (2013): Indirekte Landnutzungsänderungen in Ökobilanzen – Wissenschaftliche Belastbarkeit und Übereinstimmung mit internationalen Standards. Technische Universität Berlin, Institut für technischen Umweltschutz, Lehrstuhl Sustainable Engineering, Berlin, 67 Seiten
- [34] FRITSCH, U.; WIEGMANN, K. (2008): Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WGBU), Berlin 2008, 82 Seiten
- [35] GRUBER, M. (2014): Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von Nahwärme im Vergleich zu konventionellen Einzellösungen. Masterarbeit am Fachgebiet Betriebswirtschaftslehre Nachwachsender Rohstoffe an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 85 Seiten.
- [36] GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; VOET, E. (2009): A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications. The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 14, Nr. 4, S. 328–339
- [37] HAHN, J.; SCHARDT, M.; SCHULMEYER, F.; MERGLER, F. (2014): Der Energieinhalt von Holz. LWF-Merkblatt 12, Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 4 Seiten
- [38] HÄRING, G.; SONNLEITNER, M.; ZÖRNER, W.; BRÜGGING, E.; BÜCKER, C.; WETTER, C.; VOGT, R. (2011): Ökologische und ökonomische Optimierung von bestehenden und zukünftigen Biogasanlagen. Abschlussbericht zum Vorhaben „BGA_OPT“ im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 221 Seiten
- [39] HARTMANN, H.; REISINGER, K.; TUROWSKI, P. (2013): Kosten der Festbrennstoffnutzung. In: HARTMANN, H.; FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. 3. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), S. 142–153, ISBN 3-00-011041-0
- [40] HIJAZI, O.; MUNRO, S.; ZERHUSEN, B.; EFFENBERGER, M. (2016): Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 54, S. 1291–1300
- [41] HÖLDRICH, A.; HARTMANN, H.; DECKER, T.; REISINGER, W.; SCHARDT, M.; SOMMER, K.; WITTKOPF, S.; OHRNER, G. (2006): Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren. Berichte aus dem TFZ, Nr. 11. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 274 Seiten, ISSN 1614-1008
- [42] HÖLLDORFER, B. (2007): Einfach, aber wirkungsvoll – das R-2005-Gerät. LWF aktuell, Jg. 59, S. 30–31
- [43] HUMBERT, S. (2009): Geographically Differentiated Life-cycle Impact Assessment of Human Health. UC Berkeley: Civil and Environmental Engineering. URL: <https://escholarship.org/uc/item/1xv927gv>. (Stand: 06.08. 2015)

- [44] INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2007): The Physical Science Basis. Cambridge, England: Cambridge University Press (Climate change 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, 1), 996 Seiten
- [45] INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_FrontCover.pdf, 1535 Seiten
- [46] JOLLIET, O.; MULLER-WENK, R.; BARE, J.; BRENT, A.; GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; ITSUBO, N.; PENA, C.; PENNINGTON, D.; POTTING J.; REBITZER G.; STEWART M.; DE HAES H. U.; WEIDEMA, B. P. (2004): The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 9, S. 394–404
- [47] JUNGBLUTH, N. (2007): Erdöl. In: DONES, R. (Hrsg.): *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Ecoinvent report Nr. 6, Duebendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Teil IV, 315 Seiten
- [48] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Aufl. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer-Verlag, 1030 Seiten, ISBN 978-3-540-85094-6
- [49] KLEIN, D.; HÖLLERL, S.; BLASCHKE, M.; SCHULZ, C. (2013): The Contribution of Managed and Unmanaged Forests to Climate Change Mitigation – A Model Approach at Stand Level for the Main tree Species in Bavaria. *Forests*, Jg. 4, Nr. 1, S. 43–69
- [50] KLEIN, D.; WOLF, C.; SCHULZ, C.; WEBER-BLASCHKE, G. (2015): 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 20, Nr. 4, S. 556–575
- [51] KLÖPFFER, W.; GRAHL, B. (2009): *Ökobilanz (LCA)*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 426 Seiten
- [52] KOLLMANN, F. (1982): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Band 1. 2. Aufl., Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1050 Seiten
- [53] KÖNIG, A. (2009): *Ganzheitliche Analyse und Bewertung konkurrierender energetischer Nutzungspfade für Biomasse im Energiesystem Deutschland bis zum Jahr 2030*. Dissertation. Forschungsbericht aus dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Nr. 104. Stuttgart: Universität, 163 Seiten, ISSN 0938-1228
- [54] KOST, C.; MAYER J. N.; THOMSEN, J.; HARTMANN, N.; SENKPIEL, C.; PHILPPS, S.; NOLD, S.; LUDE, S.; SCHLEGL, T. (2013): *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien*. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg, 45 Seiten
- [55] KUCHLING, H. (1996): *Taschenbuch der Physik*. 16. Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag, ISBN 3-446-18692-1, 708 Seiten
- [56] KUHLMANN, F. (2003): *Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft*. 2. Aufl. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 603 Seiten, ISBN 978-3-7690-0613-1

- [57] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2014): Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15. 24. Aufl. Darmstadt: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 832 Seiten, ISBN 978-3-941583-93-1
- [58] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2014): KTBL-Feldarbeitsrechner. Darmstadt: KTBL URL: <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html> (Stand: Oktober 2015)
- [59] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2014): Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. Darmstadt: KTBL URL: <http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do?zustandReq=19&selectedAction=showMona#start> (Stand: Oktober 2015)
- [60] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (1997): Aktuelle Pflanzverfahren. KWF-Merkblatt Nr. 10. Groß-Umstadt: KWF, 47 Seiten
- [61] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2010): Schutzmaßnahmen gegen Wildschäden im Wald. Verfahren – Technik – Kosten. KWF-Merkblatt Nr. 16, Groß-Umstadt: KWF, 41 Seiten
- [62] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2015): Der erweiterte Sortentarif (EST). URL: <http://www.kwf-online.org/mensch-und-arbeit/tdl/lohnmodelle/est.html> (Stand: September 2015)
- [63] KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK E. V. (KWF) (2015): Zeitbedarfstabellen für die motormanuelle Holzernte URL: http://www.kwf-online.org/file-admin/dokumente/Mensch_Arbeit/TdL/Lohnentwicklung/MoFz/zeitbedarfstabellen.pdf (Stand: September 2015)
- [64] MANFREDI, S.; ALLACKER, K.; CHOMKHAMRSRI, K.; PELLETIER, N.; MAIA DE SOUZA, D. (2012): Product Environmental Footprint (PEF) Guide. Deliverable 2 and 4A of the Administrative Arrangement between DG Environment and the Joint Research Centre No N 070307/2009/552517, including Amendment No 1 from December 2010. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (JRC IES); Ispra, Italy: Ref. Ares(2012)873782 – 17/07/2012, 160 Seiten
- [65] MEMMLER, M.; SCHREMPF, L.; HERMANN, S.; SCHNEIDER, S.; PABST, J.; DREHER, M. (2014): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013. Climate Change 29. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 145 Seiten
- [66] MÜLLER-LINDENLAUF, M.; CORNELIUS, C.; GÄRTNER, S.; REINHARDT, G.; RETTENMAIER, N.; SCHMIDT, T. (2014): Umweltbilanz von Milch und Milcherzeugnissen – Status quo und Ableitung von Optimierungspotenzialen. Abschlussbericht. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu), 116 Seiten
- [67] NEMECEK, T.; KÄGI, T. (2007): Life Cycle Inventories of Agriculture Production Systems. Data v. 2.0, ecoinvent report No. 15, Zürich, Duebendorf: Agrosoppe Reckenholz-Tänikon Research Station ART, 360 Seiten
- [68] NEUGEBAUER, S.; FINKBEINER, M. (2012): Ökobilanz nach ISO 14040/44 für das Multi-recycling von Stahl. Finaler Abschlussbericht im Auftrag von Wirtschaftsvereinigung Stahl/Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf. Berlin: Technische Universität, Fachbereich Sustainable Engineering, 69 Seiten

- [69] O'SULLIVAN, M.; EDLER, D.; BICKEL, P.; LEHR, U.; PETER, F.; SAKOWSKI, F. (2014): Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland im Jahr 2013 – eine erste Abschätzung. Forschungsvorhaben im Auftrag des BUNDESMINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWI) (Hrsg.): Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland: Ausbau und Betrieb – heute und morgen, dritter Bericht zur Bruttobeschäftigung (FKZ 0324052B). URL: <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=640122.html>, 20 Seiten (Stand: 05.08. 2015)
- [70] PETERS, A.; RÜCKERL, R.; CYRYS, J. (2011): Lessons from air pollution epidemiology for studies of engineered nanomaterials. *Journal of occupational and environmental medicine / American College of Occupational and Environmental Medicine*, Jg. 53, (6 Suppl), S. S8–S13. DOI: 10.1097/JOM.0b013e31821ad5c0
- [71] PREISSINGER, W.; OBERMAIER, A.; HITZELSPERGER, L.; MAIERHOFER, R. (2004): Zum Einsatz von Rapskuchen in der intensiven Bullenmast. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft, Poing-Grub, 6 Seiten
- [72] RABL, A.; SPARDO, J. V. (2004): The RiskPoll software, version is 1.051 (dated August 2004). URL: <http://www.arirabl.com>
- [73] REMMELE, E. (2009): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. 2. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 88 Seiten, ISBN 978-3-9803927-9-2
- [74] RÖSEMANN, C.; HAENEL, H.-D.; DÄMMGEN, U.; FREIBAUER, A.; WULF, S.; EURICH-MENDEN, B.; DÖHLER, H.; SCHREINER, C.; BAUER, B.; OSTERBURG, B. (2015): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990–2013 – Report on methods and data (RMD). Submission 2015. Thünen Report, Nr. 27. Braunschweig: Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut, 372 Seiten
- [75] ROßBERG, D.; MICHEL, V.; GRAF, R.; NEUKAMPF, R. (2007): Definition von Bodenklima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, Jg. 59, Nr. 7, Stuttgart: Eugen Ulmer KG, S. 155–161
- [76] ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS (RSB) (2015). URL: <http://rsb.org/sustainability/rsb-sustainability-standards/> (Stand: 31.07.2015)
- [77] SCHMITZ, N.; HENKE, J.; KLEPPER, G. (2009): Biokraftstoffe. Eine vergleichende Analyse. Gülzow: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 165 Seiten
- [78] SCHWEINLE, J. (2000): Analyse und Bewertung der forstlichen Produktion als Grundlage für weiterführende forst- und holzwirtschaftliche Produktlinien-Analyse. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, Nr. 184. Hamburg: Wiedebusch, 131 Seiten
- [79] SEPPÄLÄ, J.; POSCH, M.; JOHANSSON, M.; HETTELINGH, J. P. (2006): Country-dependent characterisation factors for acidification and terrestrial eutrophication based on accumulated exceedance as an impact category indicator. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 11, Nr. 1, S. 49–54
- [80] STATISTISCHES BUNDESAMT (DESTATIS) (2015): Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis Juni 2015. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 54 Seiten

- [81] STEINHAUSER, H.; LANGBEN, C.; PETERS, U. (1992): Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre. Band 1: Allgemeiner Teil. Produktionsgrundlage, Produktionstheorie und Rechnungssysteme. 5. Aufl. Stuttgart: Eugen-Ulmer-Verlag, 339 Seiten, ISBN 3-8252-0113-9
- [82] STRUIJS, J.; BEUSEN, A.; JAARSVELD, H. v.; HUIJBREGTS, M. A. J. (2009): Aquatic eutrophication. In: GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M. A. J.; SCHRYVER, A. D.; STRUIJS, J.; ZELM, R. v. (Hrsg.): ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation factors, 1. Aufl. Den Haag: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM), 132 Seiten
- [83] STUIBLE, A.; SPERBER, E.; NAST, M.; HARTMANN, H.; REISINGER, K.; BRUHN, K.; BUDIG, E.; OROZALIEV, J.; PAG, F.; VAJEN, K.; ERLER, R.; JANCZIK, S.; HERMELINK, A.; JOHN, A.; OFFERMANN, M.; SCHIMSCHAR, S.; STRYI-HIPP, G. (2014): Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2012 bis 2014. Evaluierung des Förderjahres 2013. Ausarbeitung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Stuttgart: Fichtner GmbH & Co. KG, 82 Seiten
- [84] SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2013): Ecoinvent Database
- [85] Thinkstep AG (2015): GAbi Software and database contents for Life Cycle Assessment. Leinfelden-Echterdingen: Thinkstep AG, (Stand: Juni 2015)
- [86] THRÄN, D.; PFEIFFER, D. (2013): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagasemissionen. Methoden zur Bestimmung von Technologiekenwerten, Gestehungskosten und Klimagasemissionen von Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“. Version 4 (Oktober 2013). Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Nr. 04. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), 159 Seiten
- [87] THÜRINGER MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, NATURSCHUTZ UND UMWELT (2009): Bodenschutz und Walderschließung. Leitfaden für den Praktiker. Erfurt: Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (TMLNU), 32 Seiten
- [88] UHL, A.; HAAS, R.; REMMELE, E. (2009): Pflanzenölanlagen – Investitionsbedarf und Betriebskosten. Im Auftrag des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Unveröffentlichter Abschlussbericht. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 22 Seiten
- [89] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (1997): VDI 4600. Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), u. Berlin: Beuth-Verlag, 22 Seiten
- [90] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (2000): VDI 2067 Blatt 1. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Grundlagen und Kostenberechnung. September 2000. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), 52 Seiten
- [91] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (2012): VDI-Richtlinie. VDI 6025 Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. November 2012. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI), 152 Seiten

- [92] WAGNER, U.; DREIER, T.; TZSCHEUTSCHLER, P. (2000): Ganzheitliche Systemanalyse für die Erzeugung und Anwendung von Biodiesel und Naturdiesel im Verkehrssektor. Dezember 2000. München: Technische Universität München (TUM), 74 Seiten
- [93] WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT AGRARPOLITIK (2007): Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. Verabschiedet im November 2007. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 242 Seiten
- [94] WOLF, C.; KLEIN, D.; RICHTER, K.; WEBER-BLASCHKE, G. (2015): The Bavarian Heating Mix – Development of Environmental Impacts through an Incremental Use of Wood for Energetic Purposes. *Journal of Environmental Management* (submitted)
- [95] WOLF, C.; KLEIN, D.; WEBER-BLASCHKE, G.; RICHTER, K. (2015): Systematic Review and Meta-Analysis of Life Cycle Assessments for Wood Energy Services. *Journal of Industrial Ecology* (im Druck. DOI: 10.1111/jiec.12321)

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell

18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauzenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat

38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets – Europaweites Holzpelletscreening mit Fokus auf den deutschen Pelletmarkt
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Emissionsstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio – Methoden Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen



ISSN 1614-1008