

50

Berichte aus dem TFZ

Rapsölkraftstoff- produktion in Bayern

Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode

in Zusammenarbeit mit:

HOCHSCHULE
WEIHENSTEPHAN-TRIESDORF
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern



Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern

Analyse und Bewertung ökologischer und
ökonomischer Wirkungen nach der
ExpResBio-Methode

Dr.-Ing. Daniela Dressler
Karsten Engelmann
Martina Serdjuk
Dr. Edgar Remmele

in Zusammenarbeit mit



Berichte aus dem TFZ 50

Straubing, Dezember 2016

Titel: Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode

Gesamtprojektleiter: Dr. Edgar Remmele²

Projektleiter TFZ: Dr. Edgar Remmele²

Projektleiter HSWT: Prof. Dr. Peter Zerle¹

Autoren: Dr.-Ing. Daniela Dressler², Karsten Engelmann², Martina Serdjuk¹, Dr. Edgar Remmele²

Bearbeiter: Dr.-Ing. Daniela Dressler², Karsten Engelmann², Martina Serdjuk¹, Rita Haas²

¹ Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) • Fachgebiet für Ökonomie Nachwachsender Rohstoffe • Hofgarten 1 • 85354 Freising

² Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) • Schulgasse 18 • 94315 Straubing

Das diesem Bericht zugrunde liegende 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, Rita Haas, Stephanie Neumeier

Verlag: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2016

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

Fotonachweis: Technologie- und Förderzentrum (Ulrich Eidenschink)

Vorwort

Unser Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung der Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern (ExpRessBio). Insbesondere möchten wir uns bei Herrn Dr.-Ing. Werner Ortinger und seinen Mitarbeitern sowie Herrn Dr. Rupert Schäfer für das entgegengebrachte Vertrauen und die gute Zusammenarbeit bedanken.

Weiterhin danken wir Landwirten sowie den Ölmühlenbetreibern für die Bereitschaft und die Unterstützung bei der Erhebung spezifischer Aktivitätsdaten für die Ökobilanzen.

Unser weiterer Dank gilt dem gesamten Expertenteam für die kollegiale Zusammenarbeit. Das Expertenteam besteht aus:

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft – Institut für Landtechnik und Tierhaltung
- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
- Hochschule Weihenstephan-Triesdorf – Fachgebiet für Ökonomie Nachwachsender Rohstoffe
- Hochschule Weihenstephan-Triesdorf/Wissenschaftszentrum Straubing – Betriebswirtschaftslehre Nachwachsender Rohstoffe
- Technische Universität München – Holzforschung München
- Technische Universität München – Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme
- Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe.

Bei dem vorliegenden TFZ-Bericht Nr. 50 handelt es sich um einen Auszug der Ergebnisse zum Thema „Rapserzeugung und dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion“ aus dem Forschungsvorhaben ExpRessBio.

Der Abschlussbericht des Gesamtprojektes ist als Langfassung mit dem Titel „ExpRessBio – Ergebnisse: Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen“ unter www.tfz.bayern.de zum Download bereitgestellt. Die Kurzfassung des Abschlussberichtes ist in der Reihe „TFZ-Wissen“ veröffentlicht.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	13
Formelzeichen und Abkürzungen	15
1 Einleitung und Problemstellung	17
2 Zielstellung	19
3 Stand des Wissens.....	21
3.1 Rapszerzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern	21
3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	22
3.3 Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Rapszerzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion	26
3.3.1 Bewertung ökologischer Wirkungen	26
3.3.2 Bewertung ökonomischer Wirkungen.....	27
3.4 Harmonisierte Bilanzierungsmethode ExpResBio.....	29
3.4.1 Zieldefinition.....	29
3.4.2 Untersuchungsrahmen	29
3.4.2.1 Systemdarstellung	30
3.4.2.2 Systemgrenzen.....	33
3.4.2.3 Funktionelle Einheit/Bezugsgröße.....	33
3.4.2.4 Umgang mit Koppelprodukten	33
3.4.2.5 Datenqualität und Datenherkunft.....	37
3.4.2.6 Festlegung wichtiger Kenngrößen.....	38
3.4.3 Produktspezifische Sachbilanzierung.....	38
3.4.4 Umweltwirkungskategorien und ökonomische Kennzahlen	39
3.4.4.1 Umweltwirkungskategorien.....	39
3.4.4.2 Ökonomische Kennzahlen.....	40
3.4.5 Referenzsysteme.....	41
3.4.6 Ergebnisdarstellung	41
4 Methodische Vorgehensweise	45
4.1 Zieldefinition	45
4.2 Systemdarstellung und Systemgrenzen	45
4.3 Bezugsgrößen/funktionelle Einheiten	48
4.4 Beschreibung des Produktsystems	48
4.5 Datenqualität und Datenherkunft.....	51
4.6 Umgang mit Koppelprodukten	58
4.6.1 Allokation nach dem Energiegehalt	58
4.6.2 Substitutions- bzw. Gutschriftenmethode.....	59
4.6.3 Ökonomische Bewertung der Koppelprodukte.....	62

4.7	Weitere Festlegungen	62
4.8	Indikatorenberechnung	63
4.9	Bilanzierungs- und Bewertungsmodelle der ökologischen Analyse	63
4.9.1	Modellierung der Rapserzeugung	63
4.9.2	Modellierung der Transportprozesse	66
4.9.3	Modellierung der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion	67
4.10	Bilanzierungs- und Bewertungsmodelle der ökonomischen Analyse	71
4.10.1	Rapserzeugung	71
4.10.2	Dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion	74
5	Ergebnisse	77
5.1	Ökologische und ökonomische Wirkungen der Rapserzeugung	77
5.1.1	Ökologische Wirkungen	77
5.1.2	Ökonomische Wirkungen	89
5.2	Ökologische und ökonomische Wirkungen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion	92
5.2.1	Ökologische Wirkungen	92
5.2.2	Ökonomische Wirkungen	100
5.3	Sensitivitätsanalysen	103
5.3.1	Sensitivitätsanalysen der Rapserzeugung.....	103
5.3.2	Sensitivitätsanalysen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion	105
6	Diskussion	113
6.1	Methodenvergleich: Berechnung von N₂O-Feldemissionen	113
6.2	Methodenvergleich: Umgang mit Koppelprodukten	116
6.3	Einordnung der Gesamtergebnisse	119
6.3.1	Ökologische Analyse.....	119
6.3.2	Ökonomische Analyse	122
6.4	Optimierung des Produktsystems	123
7	Handlungsempfehlungen	129
8	SWOT-Analyse der Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern	131
	Zusammenfassung	139
	Abstract	143
	Quellenverzeichnis	145
	Glossar	157

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verbraucherpreisentwicklung von Rapsölkraftstoff und Diesel unter Berücksichtigung der Steuerentlastung bzw. -befreiung [113]	28
Abbildung 2:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen.....	32
Abbildung 3:	Herstellung der Nutzengleichheit bei der Systemraumerweiterung durch Subtraktion eines Referenzsystems, verändert nach [77][40].....	36
Abbildung 4:	Grafische Ergebnisdarstellung (beispielhaft) für ein Produktsystem aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Wirkungsindikator CO ₂ -Äquivalente in g MJ ⁻¹	42
Abbildung 5:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung (Basisvariante).....	46
Abbildung 6:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung (Substitutionsmethode).....	47
Abbildung 7:	Lage der untersuchten dezentralen Ölmühlen und landwirtschaftlichen Praxisbetriebe innerhalb der Boden-Klima-Räume in Bayern sowie Standort des LVFZ Almesbach.....	52
Abbildung 8:	GaBi-Bilanzierungsmodell für die Rapserzeugung am Beispiel des LVFZ Almesbach für das Erntejahr 2013.....	64
Abbildung 9:	GaBi-Bilanzierungsmodell für den Arbeitsprozess [A1.1] Bodenaufbereitung (Stoppelbearbeitung) des LVFZ Almesbach	65
Abbildung 10:	GaBi-Bilanzierungsmodell für den Rapstransport mit einem Traktor und Doppelzug am Beispiel des LVFZ Almesbach für das Erntejahr 2013	67
Abbildung 11:	GaBi-Bilanzierungsmodell für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion in Ölmühle Y	68
Abbildung 12:	Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente gegliedert nach Boden-Klima-Räumen in den Erntejahren 2013 bis 2015.....	77
Abbildung 13:	Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger bezogen auf die eingesetzte N-Menge in den 15 landwirtschaftlichen Praxisbetrieben sowie im LVFZ Almesbach	80
Abbildung 14:	Einzelbetriebliche N-Effizienz der Rapserzeugung in Abhängigkeit des Anteils von Wirtschaftsdünger an der N-Düngung gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015).....	83

Abbildung 15: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente in Abhängigkeit der N-Effizienz gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)	84
Abbildung 16: Regionale THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015 von je fünf Betrieben).....	87
Abbildung 17: Relative Anteile der Kosten der Rapserzeugung der 15 landwirtschaftlichen Praxisbetriebe sowie des LVFZ Almesbach	89
Abbildung 18: Einzelbetriebliche Kosten der Rapserzeugung der 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe sowie des LVFZ Almesbach gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015).....	90
Abbildung 19: Unternehmergewinne, Direktzahlungen sowie Erträge der Rapserzeugung der 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe sowie des LVFZ Almesbach gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015).....	92
Abbildung 20: Einzelbetriebliche THG-Emissionen des Rapssaattransportes vom Hof zur Ölmühle als CO ₂ -Äquivalente (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015) gegliedert nach Boden-Klima-Räumen	93
Abbildung 21: Relative Verteilung der THG-Emissionen der Rapssaatverarbeitung zu Rapsölkraftstoff in den drei untersuchten Ölmühlen	96
Abbildung 22: Aufteilung der Bauvorleistungen [V1] auf die einzelnen Verarbeitungsprozesse der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Ölmühle Y	97
Abbildung 23: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in Bayern als CO ₂ -Äquivalente im Vergleich zum fossilem Referenzwert und dem RED-Standardwert für reines Rapsöl	99
Abbildung 24: Anteile der Jahreskosten der Ölmühle Y im Verarbeitungsjahr 2013/14	100
Abbildung 25: Arbeitskräftebedarf für die Rapserzeugung der fünf untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe im Boden-Klima-Raum B und des LVFZ Almesbach(Erntejahr 2013) sowie der Rapsölkraftstoffproduktion in Ölmühle Y bezogen auf 1 dt Rapssaat...	102
Abbildung 26: THG-Emissionen von Diesel- und Rapsölkraftstoff in der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente (Mittelwerte der 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe in den Erntejahren 2013 bis 2015).....	103
Abbildung 27: Einfluss der Auslastung der Ölmühle auf die THG-Emissionen der Prozessgruppe [B] Transformation – Wertebereich von 10 bis 100 %.....	106
Abbildung 28: Einfluss der Ölausbeute auf die THG-Emissionen der Rapsölkraftstoffproduktion	108

Abbildung 29: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff von Ölmühle Y in den Verarbeitungsjahren 2013/14 und 2014/15 mit und ohne Eigenstromnutzung	111
Abbildung 30: Produktionskosten von Rapsölkraftstoff von Ölmühle Y in den Verarbeitungsjahren 2013/14 und 2014/15 mit und ohne Eigenstromnutzung	111
Abbildung 31: N ₂ O-Feldmissionen in den drei bayerischen Boden-Klima-Räumen und dem LVFZ Almesbach in Abhängigkeit der Methode zur Berechnung der N ₂ O-Feldmissionen	115
Abbildung 32: THG-Einsparung von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung im Vergleich zu fossilem Dieselmkraftstoff in Abhängigkeit der Methode zur Bewertung des Rapspresskuchens	117
Abbildung 33: THG-Einsparung von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung im Vergleich zu fossilem Dieselmkraftstoff in Abhängigkeit der Methode zur Bewertung des Rapspresskuchens und des Vorfruchtwertes von Raps	119
Abbildung 34: THG-Vermeidungsleistung und Kostendifferenz für die Basisvarianten und Optimierungsszenarien von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu fossilem Dieselmkraftstoff	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Physikalische und chemische Kenngrößen ausgewählter Energieträger	38
Tabelle 2:	Ausgewählte Wirkungskategorien mit Methoden zur Berechnung der jeweiligen Umweltwirkungsindikatoren nach ILCD [47]	40
Tabelle 3:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung entsprechend dem Schema der Systemdarstellung	43
Tabelle 4:	Emissionsfaktoren (EF) in kg N ₂ O-N und relative Anteile der N-Verluste durch Oberflächenabfluss/Auswaschung bzw. Ausgasung (Frac) in % nach IPCC [67]	49
Tabelle 5:	Natürliche Standortbedingungen, Betriebsstrukturen und Eingangsdaten für die Rapsrerzeugung der 15 landwirtschaftlichen Praxisbetriebe gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte, Minima und Maxima aus den Erntejahren 2013 bis 2015)	54
Tabelle 6:	Eingangsdaten für die Rapsölkraftstoffproduktion der drei untersuchten dezentralen Ölmühlen	55
Tabelle 7:	Kalkulationsdaten der Betriebsmittel bei der Rapsrerzeugung	56
Tabelle 8:	Einkaufspreise der Rapssaat für die Rapsölkraftstoffproduktion der drei untersuchten dezentralen Ölmühlen	57
Tabelle 9:	Ökonomische Eingangsdaten für die Rapsölkraftstoffproduktion der dezentralen Ölmühle Y	58
Tabelle 10:	Mengen und Anteile des im Jahr 2013 importierten Sojaschrotes nach Deutschland [105]	59
Tabelle 11:	Mengen und Anteile der im Jahr 2013 importierten Sojabohnen nach Deutschland [105]	60
Tabelle 12:	Mengen und Anteile des im Jahr 2013 importierten Sojaschrotes in die Niederlande [53]	60
Tabelle 13:	Mengen und Anteile der im Jahr 2013 importierten Sojabohnen in die Niederlande [53]	61
Tabelle 14:	Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapsrerzeugung als CO ₂ -Äquivalente sowie relativer Anteil der bilanzierten Prozesse (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)	78
Tabelle 15:	Einzelbetriebliche N-Abfuhr, N-Zufuhr sowie N-Effizienz (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)	82
Tabelle 16:	Regionale Verwendung von N-Mineraldünger in der Rapsrerzeugung bezogen auf die eingesetzte N-Menge	86
Tabelle 17:	Regionale THG-Emissionen der Rapsrerzeugung als CO ₂ -Äquivalente sowie relativer Anteil der bilanzierten Prozesse	88

Tabelle 18:	Regionale und einzelbetriebliche Kosten der Rapserzeugung sowie ihre relative Verteilung auf die bilanzierten Prozesse (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015).....	91
Tabelle 19:	Relative Verteilung der THG-Emissionen des Rapssaattransports vom Hof zur Ölmühle als CO ₂ -Äquivalente (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015), gegliedert nach Boden-Klima-Räumen sowie für das LVFZ Almesbach	94
Tabelle 20:	THG-Emissionen für die Prozessgruppe [B] Transformation – dezentrale Rapssaatverarbeitung zu Rapsölkraftstoff in den drei untersuchten Ölmühlen als CO ₂ -Äquivalente.....	95
Tabelle 21:	THG-Emissionsfaktoren ausgewählter Mineraldünger bezogen auf 1 kg Nährstoff und 1 kg N (berechnet mit ecoinvent database v2.2 [111])	105
Tabelle 22:	Auslastung der Ölmühlen in den Verarbeitungsjahren 2013/2014 und 2014/2015 (Basisvariante)	106
Tabelle 23:	Kenndaten zur Strom- und Wärmeerzeugung in Ölmühle Y.....	109
Tabelle 24:	Zuordnung der standortspezifischen Parameter für die untersuchten Betriebe nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) [107] mittels GNOC [78]	114
Tabelle 25:	THG-Vermeidungsleistung und Kostendifferenz für die Basisvarianten und Optimierungsszenarien von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff	127
Tabelle 26:	SWOT-Analyse der Erzeugung von Rapssaat für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion	132
Tabelle 27:	SWOT-Analyse der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion	134
Tabelle 28:	SWOT-Analyse der Nutzung von dezentral produziertem Rapsölkraftstoff in land- und forstwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen ...	136

Formelzeichen und Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
ct	Eurocent
dLUC	Direct Land Use Change (direkte Landnutzungsänderung)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Frac	Fraction
GWP	Global Warming Potential
iLUC	Indirect Land Use Change (indirekte Landnutzungsänderung)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MAX	Maximum
MIN	Minimum
n	Anzahl
n. b.	nicht berücksichtigt
NH ₃	Ammoniak
NO ₃ ⁻	Nitrat
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
N ₂ O-N	Distickstoffmonoxid (Lachgas)-Stickstoff
NPK	Pflanzendünger (Volldünger), die Stickstoff (N), Phosphat (P) und Kalium (K) enthalten
PCF	Product Carbon Footprint
PEF	Product Environmental Footprint
R ²	Bestimmtheitsmaß
RED	Renewable Energy Directive
t	Tonne
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
w	Wassergehalt
\bar{x}	Mittelwert

1 Einleitung und Problemstellung

Klima- und Ressourcenschutz zählen zu den wichtigsten gesellschaftlichen Aufgaben im 21. Jahrhundert. In seinem fünften Sachstandsbericht warnt der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) erneut vor den Folgen eines ungebremsen globalen Klimawandels. Nur ein rascher, ambitionierter und nachhaltiger Klimaschutz könne die Gefahr vor abrupten und unumkehrbaren Klimaänderungen vermeiden. Mit dem Aktionsplan Klimaschutz 2020 hat die Bundesregierung Deutschlands bereits im Jahr 2014 konkrete Maßnahmen festgelegt, um bis zum Jahr 2020 im Vergleich zum Referenzjahr 1990 den Ausstoß von Treibhausgasen um 40 % nachhaltig zu reduzieren [20]. Im Dezember 2015 wurden die Bemühungen zum weltweiten Klimaschutz auf der 21. UN-Klimakonferenz in Paris (COP21) verstärkt. Ziel des weltweiten Klimaschutzabkommens ist, die globale Klimaerwärmung auf maximal 2 °C zu halten. Um dieses 2 °C-Ziel zu erreichen, sollen Industriestaaten wie Deutschland ihren Ausstoß an Treibhausgasen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 um 80 % reduzieren. Im Oktober 2016 ist die Bundesrepublik Deutschland dem Klimaschutzabkommen von Paris beigetreten [19] und hat dem Klimaschutzplan 2050 weitere Maßnahmen für eine nachhaltige THG-Minderung in Deutschland vorgeschlagen [18].

Vor diesem Hintergrund und da der energetischen und stofflichen Nutzung von Biomasse ein hohes THG-Minderungspotenzial zugeschrieben wird, wird das Wissen um die Entstehung von Treibhausgas (THG)-Emissionen aus den Bereitstellungsketten von Produkten auf Basis nachwachsender Rohstoffe immer wichtiger. Mit der EU-Richtlinie zur Förderung Erneuerbarer Energien (Richtlinie 2009/28/EG [42]) sowie der daraus abgeleiteten Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV 2009) [13] bzw. der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV 2009) [21] wird bereits heute für die Herstellung von Strom aus flüssiger Biomasse und von Kraftstoffen aus fester, flüssiger oder gasförmiger Biomasse eine nachhaltige Produktion mit einem Mindestmaß an THG-Einsparung ordnungspolitisch vorgeschrieben.

In der Richtlinie 2009/28/EG sind auch Standardwerte zur THG-Minderung verschiedener Biokraftstoffe, wie zum Beispiel von reinem Rapsöl, veröffentlicht [42]. Allerdings ist bei der Herleitung dieser Standardwerte von mittleren Produktionsbedingungen ausgegangen worden. Unterschiede in den Produktionsverfahren (z. B. bei der Ölgewinnung) bleiben ebenfalls unberücksichtigt. Standort- und Bewirtschaftungseinflüsse (Böden, Klima, Ertragspotenziale, standortspezifische Produktionsverfahren oder Fruchtfolgen) können jedoch einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis einer Klimagasbilanz und damit auf die Höhe der THG-Minderung haben. Folglich sollten die Ableitung praktisch umsetzbarer THG-Minderungsstrategien sowie eine regionale und einzelbetriebliche Beratung in Bezug auf eine THG-minimierte Produktion auf Basis regionalspezifischer Daten sowie konkreter Produktionsbedingungen erfolgen.

Problemstellung

Bei bisherigen THG-Bilanzen von nachwachsenden Rohstoffen oder Bioenergieträgern wie den Biokraftstoffen sind häufig weder die Methodik noch die Datenbasis der Berechnungen ausreichend dokumentiert. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf regional-

spezifische Verhältnisse kann dadurch nicht beurteilt und die Belastbarkeit der Ergebnisse nicht überprüft werden. Nur in seltenen Fällen ist die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen einzelner Verfahrensketten möglich. Zum Verfahrenvergleich werden bislang in vielen Fällen [13][21] allenfalls THG-Emissions-Standardwerte herangezogen. Spezifische und regionaltypische Daten für die Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse für die Bilanzierung von Treibhausgasen, die Beurteilung der Energieeffizienz und die ökonomische Bewertung sind in Bayern bislang nicht in ausreichendem Umfang vorhanden. Erst mit der Generierung dieser Daten und auf Basis spezifischer THG-Bilanzen lassen sich Handlungsempfehlungen für die regionale und einzelbetriebliche Beratung in Bayern in Richtung einer nachhaltigen und THG-minimierten Produktion ableiten.

2 Zielstellung

Um die Land- und Forstwirtschaft bei der Bewältigung dieser Herausforderungen zu unterstützen, wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten bereits im Jahr 2012 im Rahmen der Umsetzung des bayerischen Energiekonzepts „Energie Innovativ“ [7] am Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe in Straubing eine „Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern – ExpResBio“ ins Leben gerufen.

Mit „ExpResBio“ werden in Bayern vorhandene Kompetenzen aus den Bereichen land- und forstwirtschaftliche Produktion, Umweltwirkungen und Ressourceneffizienz sowie Technologie und Ökonomie Nachwachsender Rohstoffe vernetzt, um übergreifende Zielstellungen bearbeiten zu können und eine Anlaufstelle für Politik, Gesellschaft und Beratung zu schaffen. Die Aufgabenstellung für die Expertengruppe ist langfristig geplant.

Die übergeordneten, langfristigen Ziele sind:

- Reduktion der THG-Emissionen in Bayern durch Analyse (Energie- und Stoffströme) und Optimierung der land- und forstwirtschaftlichen Produktion von Biomasse in Bayern in Abwägung mit anderen wichtigen Umweltwirkungen zur Bereitstellung von Rohstoffen für Nahrungs- und Futtermittel, für die stoffliche Nutzung sowie für die Energieumwandlung.
- Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Bewertung optimierter Verfahrensketten auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen.
- Möglichst nachhaltige Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Ressourcen in Bayern.

Zu diesem Zweck werden von der Expertengruppe harmonisierte Methoden zur THG-Bilanzierung von Biomasse aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion in Bayern (Produktsysteme, Systemgrenzen, Datenbasis etc.) festgelegt [122]. Darauf aufbauend werden verschiedene Produktsysteme aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen analysiert und bewertet. Dafür sollen relevante Daten (Energie- und Stoffströme, THG-Emissionen) – regionalspezifisch und einzelbetrieblich – für Anbau, Konversion, Logistik und Nutzung erhoben werden.

Das Produktsystem dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion wird in dem vorliegenden Bericht näher untersucht. Ein wesentliches Ziel der Analyse und Bewertung der Raps-erzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern ist die Erarbeitung regionaltypischer und spezifischer Ökobilanzdaten. Darauf aufbauend werden unter Berücksichtigung der ökonomischen Bewertung praktisch umsetzbare THG-Minderungsstrategien ausgearbeitet. Aus diesen werden Handlungsempfehlungen für die regionale und einzelbetriebliche Beratung in Bayern zur nachhaltigen und THG-optimierten Produktion abgeleitet. Weiterhin zeigt eine SWOT-Analyse die Stärken und Schwächen sowie die Chancen und Risiken der Raps-erzeugung, der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion und der Kraftstoffnutzung auf.

Darüber hinaus werden auch methodische Aspekte der Bilanzierung und ihre Auswirkungen auf die Ergebnisse der Treibhausgasbilanz untersucht und diskutiert, wie zum Beispiel der Einfluss der Methode zur Bewertung des Koppelprodukts Rapspresskuchen. Hierbei wird die nach der Richtlinie 2009/28/EG [42] festgelegte Energie-Allokation mit der Substitutionsmethode verglichen. Durch die zusätzliche Anwendung der Substitutionsmethode wird die tatsächliche Verwendung des Koppelprodukts Rapspresskuchen als Eiweißfutter berücksichtigt.

3 Stand des Wissens

In diesem Kapitel wird ein umfassender Überblick über den Stand des Wissens zur Raps-erzeugung und Rapsöl-kraftstoffproduktion in Bayern und zu deren ökologischen und ökonomischen Wirkungen dargelegt. In diesem Zusammenhang werden auch die geltenden politischen Rahmenbedingungen zur Produktion und Nutzung von Biokraftstoffen sowie der wissenschaftliche Standard zur Analyse und Bewertung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen vorgestellt.

3.1 Raps-erzeugung und Rapsöl-kraftstoffproduktion in Bayern

Die Anbaufläche von Winterraps in Bayern betrug im Erntejahr 2015 103.800 ha und ist damit im Vergleich zu den Erntejahren 2014 (122.200 ha) [106] und 2013 (129.600 ha) [103] nochmals gesunken. Die Anbaufläche von Winterraps bleibt damit weiterhin unter dem Durchschnittswert der Erntejahre 2007 bis 2012 (150.000 ha) [103]. Vor allem in Südbayern haben kleinere Betriebe den Rapsanbau aufgegeben. Andererseits werden in Unterfranken, der wichtigsten Rapsanbauregion Bayerns, fast 30.000 ha Raps angebaut. Gerade in größeren Ackerbaubetrieben hat der Raps aus Fruchtfolgegründen weiterhin eine wichtige Bedeutung. Auf Basis der Proben für die Besondere Ernteermittlung (BEE) wurden für Bayern in den Erntejahren 2013, 2014 und 2015 durchschnittliche Winterraps-erträge von 37,5, 45,0 und 40,0 dt ha⁻¹ mit einem Wassergehalt von 6,5, 6,8 bzw. 6,3 % ermittelt. Die regionale Auswertung zeigt jedoch große Ertragsunterschiede zwischen den bayerischen Regierungsbezirken. Während in Schwaben, Nieder- und Oberbayern aufgrund der günstigen klimatischen Bedingungen der südbayerischen Anbauggebiete mit durchschnittlich 44,8, 43,2 bzw. 42,4 dt ha⁻¹ die höchsten Winter-raps-erträge geerntet werden konnten, fielen die Winterraps-erträge in Oberfranken mit 38,6 dt ha⁻¹ am geringsten aus [1][2][3].

Aus Rapssaat kann sowohl in industriellen Ölmühen (zentrale Ölmühen, Großanlagen) mit Verarbeitungskapazitäten bis zu 4.000 t Rapssaat pro Tag als auch in dezentralen Kleinanlagen (dezentrale Ölmühen) mit typischen Verarbeitungskapazitäten zwischen 0,5 und 25 t Rapssaat pro Tag Rapsöl produziert werden. Bei Rapsöl aus industriellen Ölmühen handelt es sich in der Regel um heißgepresstes, mit Lösungsmittel extrahiertes und (voll)raffiniertes Öl, während in dezentralen Ölmühen durch schonende Rapssaatverarbeitung sogenanntes kaltgepresstes Rapsöl hergestellt wird, das keine Raffinationsschritte durchläuft. Die Rapssaatqualität, der Abpressvorgang und die Ölreinigung (Fest-flüssig-Trennung) nehmen deshalb bei der dezentralen Rapssaatverarbeitung großen Einfluss auf die Ölqualität. Zwischen den beiden oben genannten Verfahren der Rapssaatverarbeitung bestehen wesentliche Unterschiede in der Komplexität, dem Aufwand an Energie (Strom und Wärme), Lösungsmitteln, Chemikalien und Wasser, dem Anfall von Abwasser und Abfallstoffen sowie den Transportentfernungen. Dezentrale Ölmühen beziehen den überwiegenden Teil ihrer Rapssaat von Landwirten aus der Region und vermarkten den Großteil ihrer Produkte (Rapsöl und Rapspresskuchen) in der Region. Ein weiterer wesentlicher Unterschied der beiden Verfahren liegt in der

Ölausbeute und damit auch im Restfettgehalt des Presskuchens beziehungsweise des Extraktionsschrotes [91]. Unabhängig vom Herstellungsverfahren findet Rapsöl als Speise- und Futteröl sowie in der Umesterung zu Biodiesel Verwendung. Die Bereitstellung von Rapsölkraftstoff für land- und forstwirtschaftliche Maschinen hat für dezentrale Ölmühlen eine besondere Bedeutung. Der erzeugte Presskuchen bzw. das Extraktionsschrot werden zu fast 100 % als hochwertiges Eiweißfuttermittel in der Tierernährung eingesetzt. Eine umfassende Beschreibung der Pflanzenölgewinnung, der Weiterverarbeitung von Pflanzenölen sowie der Produkte und deren energetischer Nutzung ist unter anderem in KALTSCHMITT et al. (2016) zu finden [75].

Laut einer Umfrage von HAAS und REMMELE (2013) [61] ging die Anzahl der dezentralen Ölmühlen in Deutschland von 585 im Jahr 2007 auf 241 in Betrieb befindliche Ölmühlen im Jahr 2013 zurück. Dabei produzierten im Jahr 2012 nur noch 28 % der dezentralen Ölmühlen in Deutschland schwerpunktmäßig Rapsölkraftstoff. In den Jahren 2007 und 2011, also noch vor der vollständigen Besteuerung der Biokraftstoffe ab 1. Januar 2013, lag der Anteil der Rapsölkraftstoff produzierenden dezentralen Ölmühlen noch bei 72 % (2006) bzw. 56 % (2010).

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Da erneuerbare Energien – insbesondere Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe – in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert werden (z. B. Teller-oder-Tank-Diskussion), wird nachfolgend ein kurzer Überblick über die derzeit geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen zu den Nachhaltigkeitsregelungen für die Produktion und die Verwendung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen gegeben.

Richtlinie für Erneuerbare Energien 2009/28/EG (RED)

Den wichtigsten rechtlichen Rahmen für erneuerbare Energien im Allgemeinen und für Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe im Speziellen stellt die Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen („Renewable Energy Directive – RED“) [42] dar. Die Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] des Europäischen Parlaments und des Rats bildet den übergeordneten rechtlichen Rahmen für erneuerbare Energien in allen 28 EU-Mitgliedsstaaten. Sie stellt demnach die politische Position der Europäischen Union zu diesem Thema dar. Die Umsetzung obliegt der jeweils nationalen Gesetzgebung. In Deutschland ist die Richtlinie 2009/28/EG (RED) in Form der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV 2009) [13] sowie der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV 2009) [21] umgesetzt (s. u.). In der Richtlinie 2009/28/EG (RED) sind u. a. verbindliche nationale Ziele für den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch für jeden Mitgliedsstaat festgeschrieben, um das Gesamtziel der Europäischen Union eines 20-prozentigen Anteils erneuerbarer Energie am Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 zu erreichen. Die Mitgliedsstaaten sind verpflichtet, erforderliche Maßnahmen zur Erreichung der Zielvorgaben zu ergreifen, beispielsweise in Form von Fördermodellen, wie sie in Deutschland im Gesetz für den

Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) oder im Biokraftstoffquotengesetz [25] bzw. im Bundes-Immissionsschutzgesetz (§ 37a Mindestanteil von Biokraftstoffen an der Gesamtmenge des in Verkehr gebrachten Kraftstoffs; Treibhausgasminderung [27]) festgeschrieben sind.

Die nachhaltige energetische Nutzung von Biomasse soll auch im Hinblick auf die Klimaschutzziele der Europäischen Union gefördert werden. Nachhaltigkeit im Sinne der Richtlinie 2009/28/EG (RED) bedeutet, dass für Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe folgende Nachhaltigkeitskriterien erfüllt werden müssen:

- THG-Einsparungen gegenüber fossilen Referenzsystemen unter Einbeziehung der gesamten Herstellungs- und Lieferkette,
- keine Verwendung von Biomasse von
 - Flächen mit hoher biologischer Vielfalt (z. B. artenreiches Grünland),
 - ausgewiesenen Flächen des Naturschutzes,
 - Primärwald,
 - Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand (z. B. Feuchtgebiete, bestimmte kontinuierlich bewaldete Gebiete),
 - Torfmoorflächen,
- definierte Mindestanforderungen an guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand,
- Berichtspflichten zu einzelstaatlichen Maßnahmen zur Einhaltung der Nachhaltigkeitskriterien.

Ein Nachhaltigkeitskriterium, das Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe erfüllen müssen, ist das Erreichen bestimmter THG-Emissionseinsparungen. Die THG-Einsparungen bei Biokraftstoffen gegenüber fossilen Referenzsystemen müssen derzeit mindestens 35 % betragen. Ab dem 1. Januar 2017 sind für Neuanlagen mindestens 50 % gefordert, ab 1. Januar 2018 mindestens 60 %. Diese in der Richtlinie 2009/28/EG festgelegten Ziele wurden mit der Richtlinie 2015/1513/EG [44] (Änderungsrichtlinie der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] und der Richtlinie 98/70/EG (FQD) [43]) geändert. Die Mindestanforderungen der THG-Emissionsminderung betragen demnach für Anlagen, die vor dem 05. Oktober 2015 in Betrieb genommen wurden, weiterhin 35 % und werden ab dem 1. Januar 2018 auf 50 % angehoben. Anlagen, die nach dem 5. Oktober 2015 in Betrieb genommen wurden, müssen eine THG-Emissionsminderung von 60 % im Vergleich zum fossilen Referenzwert erreichen. Eine Umsetzung dieser Vorgaben in deutsches Recht muss bis April 2017 erfolgen [44].

Unter bestimmten Voraussetzungen können THG-Einsparungen mit Standardwerten (Default-Werten) ermittelt werden. Zu beachten ist, dass die THG-Emissionen der fossilen Referenzsysteme ebenfalls einem stetigen Wandel unterworfen sind. So zeigt eine Untersuchung der EMPA (2012) [41], dass die Gewinnung von Erdöl aus unkonventionellen Quellen (Ölsande, Ölschiefer) dessen THG-Bilanz deutlich verschlechtert. Diesem Aspekt wurde mit der Richtlinie 2015/625/EG Rechnung getragen. Hier sind die Berech-

nungsverfahren und Berichterstattungspflichten für fossilen Otto- und Dieselmotorkraftstoff festgelegt. In diesem Zusammenhang wurde der Referenzwert für fossilen Kraftstoff angepasst. Bislang liegt der Referenzwert nach Richtlinie 2009/28/EG bzw. 98/707EG (FQD) bei $83,8 \text{ g MJ}^{-1}$ für fossilen Otto- und Dieselmotorkraftstoff. Mit der Umsetzung der Richtlinie 2015/625/EG werden erstmalig differenzierte Referenzwerte herausgegeben. Diese liegen für Ottomotorkraftstoff bei $93,3 \text{ g MJ}^{-1}$ und für Dieselmotorkraftstoff bei $95,1 \text{ g MJ}^{-1}$. Eine Umsetzung der genannten Vorgaben in deutsches Recht muss bis April 2017 erfolgen [45].

Für Betriebe, die nicht die vorgegebenen Standardwerte der Richtlinie 2009/28/EG benutzen, sondern die Berechnungen selbstständig und standortspezifisch durchführen wollen, legt die Richtlinie 2009/28/EG Berechnungsgrundlagen fest. Allerdings bleibt einiger Spielraum, da z. B. für den landwirtschaftlichen Anbau keine detaillierten Vorschriften gemacht werden, welche Prozesse wie berechnet werden sollen oder welche Anforderungen die benutzten Emissionsfaktoren erfüllen müssen. In der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] werden weder Emissionsfaktoren noch Aktivitätsdaten offengelegt, die bei der Berechnung der in der Richtlinie enthaltenen Standardwerte herangezogen wurden. Informationen zur Herleitung der Standardwerte der Richtlinie 2009/28/EG (RED) finden sich dagegen im Excel-Rechentool BioGrace [65], das Systemgrenzen, Methoden, Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren transparent offenlegt und zudem erlaubt, eigene Berechnungen anhand individueller Aktivitätsdaten selbst vorzunehmen. Damit sollen zum einen eine vereinheitlichte Berechnung der THG-Emissionen von Biokraftstoffen und zum anderen die Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht unterstützt werden. Ein weiteres Excel-Rechentool ist in diesem Zusammenhang der THG-Rechner für Biokraftstoffe und flüssige Bioenergieträger ENZO₂ [66]. Sowohl BioGrace als auch ENZO₂ sind von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) gemäß Biokraft-NachV anerkannt.

Die einheitliche Berechnung von THG-Bilanzen nach den Anforderungen der Richtlinie 2009/28/EG (RED) wird in Deutschland durch Zertifizierungssysteme sichergestellt. Die Zertifizierungssysteme stellen genau definierte Rechenregeln auf, um die entsprechenden Nachhaltigkeitskriterien über den gesamten Produktionsweg – vom Ersterfasser (z. B. Warengenossenschaften, Landhandelsunternehmen) über die Verarbeiter (z. B. Ölmühle) sowie die Kraftstoffhersteller und Kraftwerksbetreiber bis hin zur Tankstelle – erfassen und prüfen zu können. Daneben führen die Zertifizierungssysteme ein Verzeichnis, wem sie Zertifikate ausgestellt haben, und kontrollieren in Zusammenarbeit mit den Zertifizierungsstellen die Erfüllung der gesetzten Vorgaben. Zu den von der BLE anerkannten und zugelassenen Zertifizierungssystemen gehören ISCC (International Sustainability & Carbon Certification) [69] und REDcert (Renewable Energy Directive certification) [12].

Weiterentwicklung der EU-RED durch Richtlinie 2015/1513/EG

Bislang werden in der Nachhaltigkeitszertifizierung nach Richtlinie 2009/28/EG indirekte Landnutzungsänderungen (indirect Land Use Change – iLUC) und dadurch hervorgerufene THG-Emissionen nicht berücksichtigt. Trotz der großen Unsicherheiten in der Bewertung von iLUC-Effekten wird anerkannt, dass diese signifikant sein können. Dabei

können iLUC-Emissionen die THG-Bilanz von Bioenergie deutlich verschlechtern bzw. sogar zu höheren Emissionen als beim Einsatz fossiler Energieträger führen. Mit der Änderungsrichtlinie 2015/1513/EG wurde nun eine Obergrenze für Biokraftstoffe der sogenannten ersten Generation festgelegt. Demnach dürfen nur 7 % Biokraftstoffe auf Basis von Stärke, Zucker und pflanzlichen Ölen auf das 10°%-Ziel der EU angerechnet werden. Die anderen 3 % sollen vor allem durch reststoff- und abfallbasierte Biokraftstoffe sowie durch sogenannte fortschrittliche Biokraftstoffe (z. B. auf Basis von Cellulose) abgedeckt werden. In diesem Zusammenhang wurde für den Einsatz von sogenannten fortschrittlichen Biokraftstoffen eine freiwillige Untergrenze von 0,5 % festgelegt. Ziel dieser Änderung ist es, indirekte Landnutzungsänderungen durch Biokraftstoffe zu vermeiden. Kraftstoffanbieter müssen im Rahmen der Berichterstattung jährlich die Biokraftstoff-Herstellungswege, die Kraftstoffmengen sowie die spezifischen THG-Emissionen inklusive vorläufiger Mittelwerte der geschätzten Emissionen infolge indirekter Landnutzungsänderungen an die EU-Kommission melden. Die vorläufigen Mittelwerte für die spezifischen CO₂-Äquivalent-Emissionen je MJ Kraftstoffe betragen:

- 12 g MJ⁻¹ für Getreide/sonstige Kulturpflanzen mit hohem Stärkegehalt,
- 13 g MJ⁻¹ für Zuckerpflanzen und
- 55 g MJ⁻¹ für Ölpflanzen [44].

Eine verbindliche iLUC-Anrechnung in der THG-Bilanz wurde in diesem Zusammenhang nicht vorgeschrieben. Eine Fortschreibung der in Richtlinie 2009/28/EG festgeschriebenen Ziele erfolgte mit der Änderungsrichtlinie 2015/1513/EG nicht. Hierzu sind jedoch Konsultationsgespräche in Planung.

Zur Umsetzung der Richtlinie 2009/28/EG (RED) wurden, wie bereits erwähnt, auf nationaler Ebene die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung und die Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung erlassen. Auf beide Verordnungen wird im Folgenden kurz eingegangen.

Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV 2009)

Diese Verordnung gilt für die Steuerentlastungsfähigkeit von Biokraftstoffen sowie für die gesetzliche Verpflichtung, bestimmte Mindestanteile an Biokraftstoffen in den Verkehr zu bringen. Für die geforderten Nachhaltigkeitskriterien müssen Zertifikate nachgewiesen werden, welche von Zertifizierungsstellen ausgegeben werden. Für die Anerkennung und Kontrolle der Zertifizierungssysteme und Zertifizierungsstellen ist gemäß dieser Verordnung die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) zuständig. Werden die geforderten Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe nicht eingehalten, können diese weder steuerlich begünstigt, noch auf die zu erfüllende Biokraftstoffquote angerechnet werden [21].

Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV 2009)

Diese Verordnung gilt nach dem EEG für flüssige Biomasse zur Erzeugung von Strom. Ausgenommen sind jene flüssigen Biomassen, die nur zur Anfahr-, Zünd- oder Stützfeuerung eingesetzt werden. Da diese Verordnung die Umsetzung der Richtlinie

2009/28/EG (RED) darstellt, besteht nur dann Anspruch auf eine Vergütung von Strom aus Biomasse, wenn die definierten Nachhaltigkeitsanforderungen und THG-Einsparungen erfüllt sind [21]. Die Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung findet jedoch keine Anwendung auf die Biogaserzeugung und -verstromung, da es sich hierbei definitionsgemäß um einen gasförmigen Energieträger handelt.

3.3 Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Rapserzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion

Dieses Unterkapitel gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion.

3.3.1 Bewertung ökologischer Wirkungen

Im Gegensatz zur industriellen Rapsölgewinnung und Rapsölmethylesterproduktion existieren zu den ökologischen Auswirkungen sowie den betriebs- und volkswirtschaftlichen Effekten der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion bisher nur wenige Untersuchungen [109][115][63][55][56][57]. Die bisherigen Arbeiten zeigen jedoch, dass die beiden Kraftstofflinien zugrunde liegende Rapserzeugung sowohl im Bereich der Umweltwirkungen als auch für die ökonomische Bewertung eine bedeutende Rolle einnimmt.

Das Umweltbundesamt hat mit der Studie „Ökobilanz Rapsöl“ 1993 erstmals versucht, eine umfassende Bilanzierung der ökologischen Auswirkungen der Erzeugung sowie der Nutzung von Rapsöl und Rapsmethylester (RME) im Vergleich zu fossilem Diesel vorzulegen [52]. Die Studie errechnet eine positive Energiebilanz für Rapsöl und RME. Der Einsatz von Rapsöl und RME anstelle von Dieselkraftstoff führt zu einer Verringerung des Klimagasausstoßes. Dem stehen eine verstärkte Bildung bodennahen Ozons und eine Verstärkung des stratosphärischen Ozonabbaus durch die landwirtschaftlich generierten N₂O-Emissionen gegenüber. Im Vergleich zu den Referenzszenarien einer dauerhaften Stilllegung, der Extensivierung oder der Aufforstung ergibt sich eine höhere Belastung der Böden durch den Rapsanbau. Aufgrund der geringeren Toxizität von Rapsöl und RME gegenüber fossilem Diesel ist die Gewässerbelastung deutlich reduziert. Abschließend kommen die Autoren zu der Einschätzung, dass der Einsatz von Rapsöl und RME als Dieselkraftstoffersatz nur geringe bzw. keine ökologischen Vorteile bietet sowie bei flächendeckender Nutzung ökonomische Nachteile für die Volkswirtschaft zur Folge hat. Die Studie wurde in Expertenkreisen sowohl vom methodischen Ansatz als auch aufgrund des verwendeten Datenmaterials kontrovers diskutiert. Dies betrifft vor allem Fragen der Referenzszenarien, die N₂O-Problematik, die entsprechende Berücksichtigung bei der Klimabewertung sowie die Berechnung der CO₂-Minderungskosten. Die Daten für die landwirtschaftliche Produktion von Raps, vor allem die sehr hohen Stickstoffgaben, lassen sich aus heutiger Sicht nicht mehr rechtfertigen. Da damals mit einem verstärkten Rapsanbau vor allem Überschüsse in der Getreideproduktion verringert werden sollten, ist eine wesentliche Änderung der Bodenbelastung nicht gegeben. In diesem Zusammenhang wurden auch die bilanzierten Referenzsysteme, die Dauerbrache sowie

die Aufforstung kritisiert. Die Agrarressorts des Bundes und der Länder haben in einer gemeinsamen Stellungnahme vom 13. April 1994 einvernehmlich festgestellt, dass die Studie keine abschließende Beurteilung aus ökologischer Sicht ermöglicht [16]. In der Folgezeit wurden deshalb vermehrt Studien veröffentlicht mit dem Ziel, die Bewertungsgrundlagen von Rapsöl und RME zu ergänzen und zu verbessern [92][74][79]. Dabei wurden sowohl neue Erkenntnisse im Bereich der Forschung, der Entwicklung der verarbeitenden Industrie und der Fahrzeugtechnik als auch der Ökobilanzmethodik einbezogen.

Das Kyoto-Protokoll und die darin verbindlich festgelegten THG-Reduktionsziele führten zu einem steigenden politischen Interesse an Biokraftstoffen. In zahlreichen Studien wurden unter anderem auch die THG-Vermeidungsleistungen und -kosten von Rapsöl und RME untersucht [124][96][121][99][82][41]. Hierbei nehmen die N₂O-Feldemissionen bei der Biomasseerzeugung eine besondere Rolle ein [29][101]. Mit der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] der EU wurden erstmals Mindestwerte für THG-Einsparungen von Biokraftstoffen ordnungspolitisch vorgeschrieben [42] (siehe auch Unterkapitel 3.2). In der Folge wurden vermehrt Arbeiten veröffentlicht, um konkrete Optimierungspotenziale bei der Herstellung von Rapsölkraftstoff und RME aufzuzeigen [83][87]. Darüber hinaus werden die RED-Standardwerte auch für nationale Emissionsbilanzen verwendet [84].

3.3.2 Bewertung ökonomischer Wirkungen

Die einstigen Gründe für die Entwicklung der dezentralen Ölmühlen waren vielfältig: Auf Stilllegungsflächen durften nachwachsende Rohstoffe (z. B. Raps) produziert werden, die Wege zu den zentralen Ölmühlen waren lang, die Veredelung der Rapssaat erhöhte die Wertschöpfung. Heute könnten die dezentralen Ölmühlen für ein Wirtschaften in regionalen Stoffkreisläufen sowie für eine gekoppelte Erzeugung von Kraftstoff und heimischen Eiweißfuttermitteln (Rapspresskuchen) stehen. Doch die derzeitige wirtschaftliche Situation der Ölmühlen hemmt dies.

Eine deutschlandweite Befragung dezentraler Ölmühlen im Jahr 2013 zeigte deutlich, dass sich die wirtschaftliche Situation der Ölmühlen drastisch verschlechtert hat. Der starke Nachfragerückgang bei Rapsölkraftstoff, der vor allem in der Landwirtschaft und im Speditionsgewerbe, aber auch in Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Erzeugung von regenerativem Strom und Wärme eingesetzt wurde, ist hierfür der Hauptgrund [61].

Das EEG sieht seit der Novellierung im Jahr 2012 keine Förderung von Strom aus Pflanzenöl mehr vor [26] und die Steuerentlastung für Biokraftstoffe ist nahezu weggefallen [24]. Nach wie vor gilt eine Steuerbefreiung für Biodiesel in Reinform und für Pflanzenöl in der Land- und Forstwirtschaft (der volle Steuersatz wird rückvergütet) [24] und das bayerische Investitions-Förderprogramm „RapsTrak200“ unterstützt rapsöltaugliche Schlepper. Die Dieselpreise (Agrardiesel) sind jedoch derzeit so niedrig, dass eine Umstellung nicht lukrativ ist (vgl. Abbildung 1).

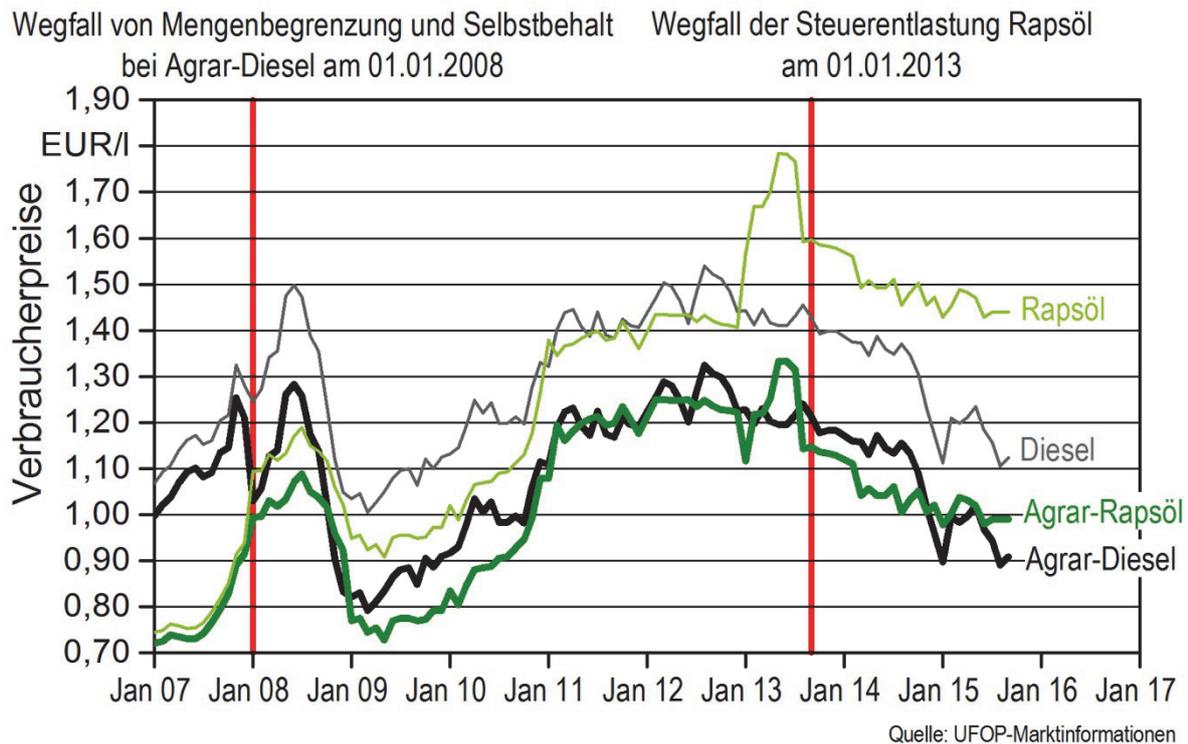


Abbildung 1: Verbraucherpreisentwicklung von Rapsölkraftstoff und Diesel unter Berücksichtigung der Steuerentlastung bzw. -befreiung [113]

Produktionskosten von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölmühlen

Aus verschiedenen Studien wird deutlich, dass die Auslastung der Ölmühlen sowie die Kosten des Einkaufs von Rapssaat die Produktionskosten von Rapsölkraftstoff vorrangig bestimmen [114][91]. Auch der Verkauf des Koppelproduktes Rapspresskuchen ist für die Wirtschaftlichkeit der dezentralen Ölmühlen mittlerweile enorm bedeutend. Die Rapspresskuchenerlöse werden in der Literatur zur Ermittlung der Produktionskosten von Rapsölkraftstoff stets von den Gesamtkosten der Ölmühle abgezogen. Ohne Berücksichtigung der Kosten für den Einkauf der Rapssaat werden in der Literatur Produktionskosten von $0,12$ bis $0,21 \text{ € l}^{-1}$ bzw. mit den Kosten für die Rapssaat von $0,46$ bis $0,84 \text{ € l}^{-1}$ genannt [114][91].

THG-Vermeidungskosten der Rapsölkraftstoffproduktion

In der Literatur findet sich eine große Bandbreite von THG-Vermeidungskosten der Rapsölkraftstoffproduktion von -50 bis 1.000 € t^{-1} [10][76][89]. Diese extreme Streubreite resultiert zum einen aus den schwankenden Preisen für Rapssaat und Rapspresskuchen als Koppelprodukt. Zum anderen sind nicht in allen Studien die Erlöse der Koppelprodukte berücksichtigt. Die negativen Vermeidungskosten resultieren aus einer Studie, bei der z. B. nicht Marktpreise, sondern Produktionskosten in Höhe von 165 € t^{-1} für die Rapssaat angesetzt wurden [76]. Den Studien sind nur wenige Eingangsparameter für die durchgeführten Berechnungen zu entnehmen, oftmals ist auch unklar, ob es sich um dezentrale Ölmühlen oder industrielle Anlagen handelt. Außerdem sind die Vermeidungskosten auch von den angesetzten Bereitstellungskosten der konventionellen Kraft-

stoffe (Referenzsysteme) abhängig. Die große Bandbreite der THG-Vermeidungskosten ergibt sich also zum einen aufgrund von Unterschieden beim Anbau und der Verarbeitung, zum anderen vor allem durch unterschiedliches methodisches Vorgehen bei der Berechnung.

3.4 Harmonisierte Bilanzierungsmethode ExpRessBio

Um innerhalb von ExpRessBio die Erstellung nachvollziehbarer und vergleichbarer Bilanzergebnisse sicherzustellen, wurde mit den „ExpRessBio-Methoden“ eine harmonisierte Bilanzierungsmethode festgelegt [122]. Dieses Unterkapitel liefert eine kurze Beschreibung dieser ExpRessBio-Methoden und ist in weiten Teilen der veröffentlichten Schrift „ExpRessBio – Methoden“ sowie der Langfassung des Abschlussberichtes „ExpRessBio – Ergebnisse“ [38] entnommen.

3.4.1 Zieldefinition

Die Zieldefinitionen für die Anwendung der harmonisierten Bilanzierungsmethode in ExpRessBio sind:

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

Die Ergebnisse der genannten Analysen dienen als Grundlage für Handlungsempfehlungen für eine umwelt- und ressourcenschonende Bereitstellung und Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Rohstoffe in Bayern.

3.4.2 Untersuchungsrahmen

Der Rahmen des zu untersuchenden Produktsystems sollte eindeutig 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 3.4.2.1 sowie Abbildung 2).

3.4.2.1 Systemdarstellung

Um die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Bilanzergebnisse zu gewährleisten, ist zur Beschreibung des untersuchten Produktsystems aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen ein strukturierter Ansatz notwendig. Die Festlegung „von der Wiege bis zum Werkstor“, wie sie nach ISO 14044 [32] empfohlen ist, ist hierbei ohne Angabe von genaueren Details nicht ausreichend, da insbesondere biobasierte Produkte aus einer Vielzahl unterschiedlicher, miteinander verbundener Systeme bestehen. Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an die DIN EN 15804 [34] 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 2).

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. Um die direkten, mit der Produktion zusammenhängenden Emissionen von den indirekten Emissionen abtrennen zu können, 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 aus der Holzwerkstoffindustrie) 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 Nutzung (z. B. Hackschnitzel, Rapsöl).
- **[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 kann hier die Energiespeicherung betrachtet werden.
- **[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] Aufarbeitungsprozesse 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"/> [A4.2] N ₂ O-Flecke <input type="checkbox"/> [A4.3] andere Feldemissionen <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 Beidung <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"/> [C-1] Stromerzeugung <input type="checkbox"/> [C-2] Wärmeerzeugung <input type="checkbox"/> [C-3] Kombinierte Strom und Wärmeerzeugung <input type="checkbox"/> [C-4] Bereitstellung Antriebsenergie (z. B. für Mobilität) <input type="checkbox"/> [C-5] Abgasreinigung	<input type="checkbox"/> [D] Nutzung <input type="checkbox"/> [D-1] C-Speicher Produkt <input type="checkbox"/> [D-2] Energiespeicherung <input type="checkbox"/> [D-3] stoffliche Verwertung <input type="checkbox"/> [D-4] energetische Verwertung <input type="checkbox"/> [D-5] Beseitigung
<input type="checkbox"/> [E] Abfallbewirtschaftung <input type="checkbox"/> [E-1] Vorbereitung zur Wiederverwendung <input type="checkbox"/> [E-2] stoffliche Verwertung <input type="checkbox"/> [E-3] energetische Verwertung <input type="checkbox"/> [E-4] Beseitigung			
<input type="checkbox"/> [L] Betriebliche Logistik <input type="checkbox"/> [L-1] außerbetrieblicher Transport <input type="checkbox"/> [L-2] innerbetrieblicher Transport			
<input type="checkbox"/> [T] Transporte <input type="checkbox"/> [T-1] Transport Biomasse <input type="checkbox"/> [T-2] Transport Zwischenprodukte <input type="checkbox"/> [T-3] Transport Endprodukte <input type="checkbox"/> [T-4] Transport Koprodukte und Abfälle			
<input type="checkbox"/> [V] Vorleistungen <input type="checkbox"/> [V-1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten <input type="checkbox"/> [V-2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur <input type="checkbox"/> [V-3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut <input type="checkbox"/> [V-4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen <input type="checkbox"/> [V-5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien <input type="checkbox"/> [V-6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern <input type="checkbox"/> [V-7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln <input type="checkbox"/> [V-8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien			
Ergänzende Informationen: <input type="checkbox"/> [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze <input type="checkbox"/> [F-1] Gutschriften für vermiedene Lasten <input type="checkbox"/> [F-2] Direkte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F-3] Indirekte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F-4] Gutschriften für vermiedenes Referenzsystem Koppelprodukte <input type="checkbox"/> [F-5] Gutschriften für vermiedene Roh- und Brennstoffe durch Abfallbewirtschaftung <input type="checkbox"/> [G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems <input type="checkbox"/> [G-1] Referenzsystem Hauptprodukt			
Geographische Repräsentativität: Zeitliche Repräsentativität: Anmerkungen:			

Abbildung 2: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen

3.4.2.2 Systemgrenzen

Für die Analyse und Bewertung von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen wird der vollständige Lebensweg eines Bioenergieträgers (z. B. Kraftstoff), einer Bioenergie (z. B. Wärme oder Mobilität) oder eines biobasierten Produkts (z. B. Spanplatte) betrachtet. Bezogen auf die in Abschnitt 3.4.2.1 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 2 dargestellten Systemgrenzen beschreibt die jeweilige Basisvariante der Analysen und Bewertungen im Projekt ExpResBio. Die Prozessgruppen [F] und [G] befinden sich in den Basisvarianten außerhalb der untersuchten Systemgrenzen (siehe Abbildung 2) und dienen somit zur Darstellung ergänzender Informationen (z. B. für die Darstellung weiterer Szenarien).

Neben den bereits definierten Systemgrenzen werden weitere Festlegungen zu den technischen, räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen getroffen, die in den ExpResBio-Methoden detailliert dargelegt sind [122].

3.4.2.3 Funktionelle Einheit/Bezugsgröße

Für die Analyse und Bewertung von Bioenergien aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen werden folgende Bezugsgrößen und funktionelle Einheiten festgelegt:

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

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, welche gebräuchlich für den aktuellen physischen Zustand des Produktes sind, mit entsprechenden funktionellen Einheiten. Dazu zählen die Biomasseerträge bezogen auf die Frisch- bzw. Trockenmasse in kg oder t sowie die Anbaufläche in Hektar (ha).

3.4.2.4 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) [77] sowie WAGNER et al. (2000) [120] ausführlich beschreiben und diskutieren.

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

Methodik der Allokation

Unter Allokation ist nach DIN EN ISO 14044 [32] 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 [30][77]. 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 [77].

Die für die Zuordnung der Input- und Outputflüsse erforderlichen Allokationsfaktoren (AF) berechnen sich aus dem Verhältnis der Masse multipliziert mit der Bezugsgröße von Hauptprodukt bzw. Koppelprodukt und der Summe beider Größen (siehe Formel (3.1)).

$$AF_{\text{Hauptprodukt}} = \frac{m_{\text{HP}} * \text{Bezugsgröße}_{\text{HP}}}{(m_{\text{HP}} * \text{Bezugsgröße}_{\text{HP}}) + (m_{\text{NP}} * \text{Bezugsgröße}_{\text{NP}})} \quad (3.1)$$

m = Masse in kg

HP = Hauptprodukt

NP = Nebenprodukt

Bei der Rapsölkraftstoffproduktion wird der Heizwert (H_i) als Bezugsgröße herangezogen, sodass sich der Allokationsfaktor für das Rapsöl (Hauptprodukt) wie folgt berechnet:

$$AF_{\text{Rapsöl}} = \frac{m_{\text{Rapsöl}} * \text{Heizwert}_{\text{Rapsöl}}}{(m_{\text{Rapsöl}} * \text{Heizwert}_{\text{Rapsöl}}) + (m_{\text{Preskuchen}} * \text{Heizwert}_{\text{Preskuchen}})} \quad (3.2)$$

Aus der Multiplikation aller Input- und Outputflüsse mit $AF_{\text{Rapsöl}}$ ergeben sich schließlich die Umweltwirkungen und Energieaufwendungen, die der Bereitstellung von Rapsölkraftstoff zugeordnet werden. Die Berechnung der mit dem Koppelprodukt Rapspresskuchen 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) [58] 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 Wärmegewinnung aus flüssigen Bioenergieträgern ist die Allokation der Input- und Outputflüsse nach dem Heizwert durch die Richtlinie 2009/28/EG [42] sowie durch die Biokraft-NachV [13] 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 Substitutionspotenzial und Gutschriften dar.

Methodik der Systemraumerweiterung mit Substitutionspotenzial und Gutschriften

Die Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 [32][30] sowie DIN CEN ISO/TS 14067 [33] 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 Substitutionspotenzial 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. Allerdings 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, siehe Abbildung 3).

Bei einem Vergleich des erweiterten Untersuchungssystems mit einem Referenzsystem (z. B. mit fossilem Dieselkraftstoff) 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 3). 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 Systemraumerwei-

terung mit Substitutionspotenzial und Gutschrift eines Referenzsystems (z. B. Bereitstellung von z kg Sojaschrot) mit einem größeren Datenbedarf zu rechnen [77][40].

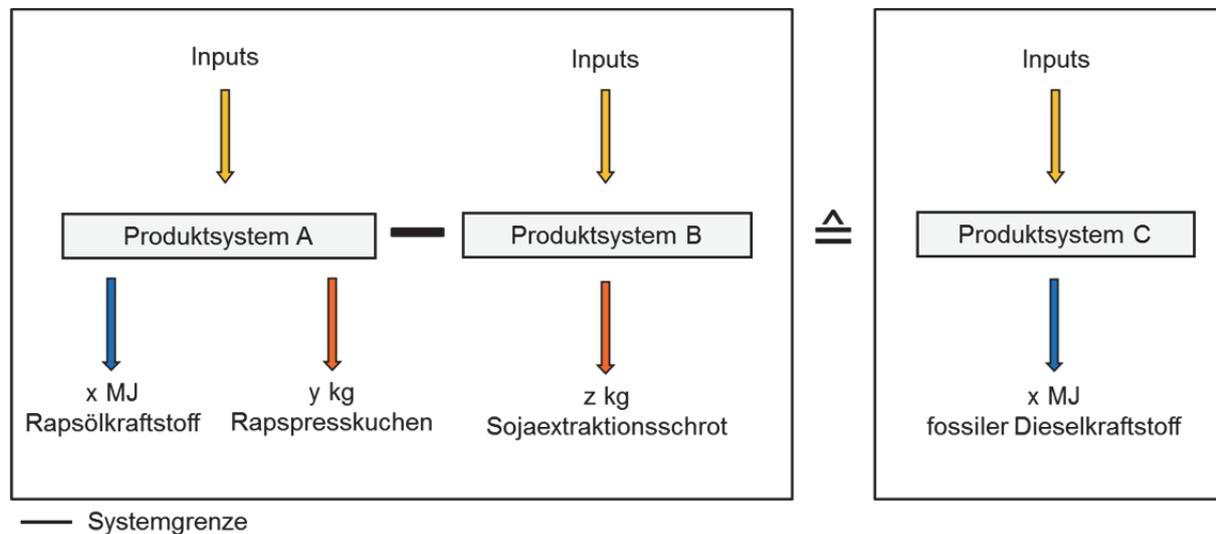


Abbildung 3: Herstellung der Nutzengleichheit bei der Systemraumerweiterung durch Subtraktion eines Referenzsystems, verändert nach [77][40]

Weiterhin hat die Auswahl des zu vergleichenden Referenzprozesses einen sehr großen Einfluss auf die Bilanzergebnisse. Daher sind das Substitutionspotenzial sowie die Auswahl der Referenzprozesse transparent darzulegen und zu begründen. 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 Koppelprodukt 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.

Festlegungen für die Anwendung im Projekt ExpResBio

Für die Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen finden im Projekt ExpResBio folgende Vorgehensweisen Anwendung:

Bewertung der Koppelprodukte durch Allokation als Basisvariante

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse in ExpResBio zu gewährleisten, wird für die ökobilanzielle Bewertung der Basisvarianten die Methodik der Allokation angewendet. Die Produktsysteme der Biokraftstofferzeugung werden beispielsweise nach Heizwert des Biokraftstoffs und des Koppelprodukts (z. B. Futtermittel) alloziert (siehe Formel (3.2) sowie Unterkapitel 4.6).

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

Sollte das Koppelprodukt keiner weiteren Nutzung zugeführt werden können, fällt dem Hauptprodukt die volle Umweltlast zu.

Ergänzende Bewertung von Koppelprodukten

Bei der Bilanzierung von Biokraftstoffen und der Biogaserzeugung wird die Methodik der Systemraumerweiterung mit Substitutionspotenzial und Gutschriften für die Bewertung von Koppelprodukten, die nicht energetisch genutzt werden, ergänzend durchgeführt. 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 (genaue Vorgehensweise siehe Unterkapitel 4.6). Gleiches gilt für die Vergärung: Hier entsteht neben dem energetisch nutzbaren Biogas auch ein nährstoffreiches Gärprodukt, das als Düngemittel im Pflanzenbau 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.

Unabhängig von der gewählten Methodik zum Umgang mit Koppelprodukten bzw. mit Recycling- und Wiederverwertungsprozessen ist nach DIN EN ISO 14044 [32] 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 im Projekt ExpResBio empfohlen und durchgeführt.

3.4.2.5 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 Produktsystem abgebildet wird. Für die Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen im Projekt ExpResBio sind die in den ExpResBio-Methoden [122] definierten Anforderungen an die Datenqualität hinsichtlich Repräsentativität, Vollständigkeit, Konsistenz, Transparenz und Genauigkeit einzuhalten.

Für die Beurteilung regionalspezifischer Produktions- und Nutzungsoptionen land- und forstwirtschaftlicher Rohstoffe (z. B. in Bayern) ist auch eine regional- bzw. betriebsspezifische Analyse erforderlich. Dies wird im Projekt ExpResBio durch Datenerhebung aus Feldversuchen, in Praxisbetrieben sowie für Modellbetriebe und Modellregionen umgesetzt. 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 die einheitliche Verwendung von LCI-Datenbanken (z. B. ecoinvent) mit den einzelnen Datensätzen z. B. für Strom, Diesel oder Ähnliches festgelegt und dokumentiert. Für die ökobilanzielle Analyse im Projekt ExpResBio werden Datensätze aus der LCI-Datenbank ecoinvent [111] in Ergänzung mit den LCI-Datenbanken der GaBi-Software [112] 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 gewählt.

3.4.2.6 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, wurden diese Kenngrößen eindeutig festgelegt und dokumentiert. Nur so können eine harmonisierte Bilanzierung aller Produktsysteme sowie die numerische Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden. In Tabelle 1 sind die für die Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern erforderlichen Kenngrößen aufgeführt.

Tabelle 1: *Physikalische und chemische Kenngrößen ausgewählter Energieträger*

	Dichte in kg m^{-3}	Heizwert in MJ kg^{-1}	Quelle
Dieselmotorkraftstoff (fossil)	840*	42,8	[71]
Benzin (fossil)	730*	43,5	[71]
Heizöl, extra leicht	860*	42,6	[71]
Rapsölkraftstoff (15 °C)	920	37,5	[91]

* ohne Bezugstemperaturen angegeben

3.4.3 Produktspezifische Sachbilanzierung

Die produktspezifische Sachbilanzierung erfolgt für alle einzelnen Prozessgruppen inklusive ihrer Prozess-Untergruppen und Prozesse entlang der Systemdarstellung. Hierbei werden die Systemgrenzen der einzelnen Prozessgruppen definiert sowie die darin beinhalteten Prozess-Untergruppen bzw. Prozesse beschrieben und wichtige Bilanzkenn-

größen aufgeführt. Darüber hinaus werden im Bedarfsfall methodische Besonderheiten zur funktionellen Einheit für die Bilanzierung einer einzelnen Prozessgruppe dargestellt.

Eine detaillierte Beschreibung der produktspezifischen Sachbilanzierung ist der Schrift „ExpRessBio – Methoden“ [122] zu entnehmen, eine Analyse und Bewertung der Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern nimmt Kapitel 4 des vorliegenden Berichts vor.

3.4.4 Umweltwirkungskategorien und ökonomische Kennzahlen

Im Folgenden werden die ausgewählten Umweltwirkungskategorien und die Methoden zur Berechnung der entsprechenden Umweltwirkungsindikatoren vorgestellt sowie die ökonomischen Kennzahlen hergeleitet.

3.4.4.1 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 [47]. 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 davon auszugehen, dass zukünftig Studien zur Umweltbewertung von Produktsystemen diesem europäischen Standard entsprechen müssen. Aus diesem Grund wurden die Wirkungskategorien inklusive ihrer Methoden zur Berechnung der jeweiligen Wirkungsindikatoren für die Analyse und Bewertung von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen im Projekt ExpRessBio den Empfehlungen des ILCD [47] entnommen. Die Auswahl der untersuchten Wirkungskategorien basiert auf einer Studie von WOLF et al. (2015) [123] und umfasst die Kategorien Globale Erwärmung, Partikelemissionen, Süßwassereutrophierung sowie Versauerung. Die entsprechenden Methoden für die Berechnung der jeweiligen Umweltwirkungsindikatoren sind in Tabelle 2 aufgeführt und in der Schrift „ExpRessBio – Methoden“ [122] beschrieben. 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.

Tabelle 2: Ausgewählte Wirkungskategorien mit Methoden zur Berechnung der jeweiligen Umweltwirkungsindikatoren nach ILCD [47]

Wirkungskategorie	Methode zur Berechnung des Wirkungsindikators	Referenz
Globale Erwärmung	IPCC	[68]
Partikelemissionen (Feinstaub)	RiskPoll	[90]
Süßwassereutrophierung	EUROTREND	[108]
Versauerung	Kumulierte Überschreitung	[100]
Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf	VDI 4600, DREIER (2000)	[119][37]

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 (3.3)).

$$\text{Umweltwirkungsindikator}_j = \sum_{i=1}^n \text{Sachbilanzgröße}_i \cdot \text{Charakterisierungsfaktor}_{ij} \quad (3.3)$$

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 [32][77].

3.4.4.2 Ökonomische Kennzahlen

Um harmonisierte und vergleichbare ökonomische Ergebnisse aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen zu generieren, sollten die ökonomischen Bewertungen stets auf Vollkostenbasis (inklusive kalkulatorischer Kosten: Arbeit, Boden, Kapital) erfolgen.

Die ökonomische Bewertung der Produktsysteme erfolgt auf betriebs- und volkswirtschaftlicher Ebene. Die betriebswirtschaftliche Bewertung (Kostenkalkulation und Rentabilität) erfolgt nach dem Schema der Systemdarstellung und gliedert sich in die Betrachtungsstufen Rohstoffbereitstellung (Rohstoffgewinnung und Rohstoffproduktion) und Rohstoffanwendung. Eine separate Betrachtung der Rohstoffbereitstellungskosten ist notwendig, da sich zwischen der Rohstoffherzeugung und der Weiterverarbeitung ein Markt befindet und damit ein Marktpreis (z. B. für Rapssaat oder Rohholz) existiert. Als Kennzahl für die Rentabilität wird der Unternehmergewinn ausgewiesen.

Die volkswirtschaftliche Betrachtung wird anhand der Umwelt-Vermeidungskosten und der Umwelt-Vermeidungsleistung durchgeführt. Damit wird eine Orientierung bei der Frage gegeben, welche Produktsysteme der Staat unterstützen sollte, um einen möglichst hohen Umweltschutz mit begrenzten finanziellen Mitteln zu erreichen. Die Wahl des Referenzsystems ist von großer Bedeutung für das Ergebnis. Die Berechnung der Vermeidungskosten ist 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, dynamische Effekte werden nicht erfasst. Dies ist bei der Bewertung zu berücksichtigen.

Neben dem Umweltschutz sind bei der volkswirtschaftlichen Betrachtung weitere Kennzahlen zu beachten. Für die Volkswirtschaft sind insbesondere die regionale Wertschöpfung sowie Beschäftigungseffekte von Bedeutung.

Die entsprechenden Methoden für die Berechnung der jeweiligen ökonomischen Kennzahlen sind in der Schrift „ExpRessBio – Methoden“ [122] beschrieben.

3.4.5 Referenzsysteme

Zur Einschätzung der ökobilanziellen und ökonomischen Bewertung land- und forstwirtschaftlicher Produktsysteme im Projekt ExpRessBio können die Ergebnisse einem oder mehreren Referenzsystem/-en gegenübergestellt werden, um z. B. die Umwelt-Vermeidungsleistung (Substitutionseffekte) abzuleiten (vgl. Prozessgruppe [G] in Abschnitt 3.4.2.1). Für jedes bereitgestellte Produkt wird mindestens ein Referenzsystem herangezogen, je nachdem welche Art von Vergleich benötigt wird. Beispielsweise kann der deutsche Strommix durch die Stromerzeugung aus Biogas oder eine bestehende Ölheizung durch eine Pelletheizung substituiert werden. Zur Quantifizierung der Kennwerte der Umwelt-Vermeidungsleistung und der Umwelt-Vermeidungskosten sind die jeweiligen Referenzsysteme eindeutig definiert und in der Schrift „ExpRessBio – Methoden“ [122] für die Bereitstellung von Biokraftstoffen sowie für die Bereitstellung von Strom- und Wärme exemplarisch dargelegt.

3.4.6 Ergebnisdarstellung

Die ökologischen und ökonomischen Bilanzergebnisse für das untersuchte Produktsystem sollten möglichst transparent und konsistent analog zur Systemdarstellung in Abschnitt 3.4.2.1 dargestellt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit von Ergebnissen sollten präzise 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]) berücksichtigt werden, sollten diese als gesondertes Teilergebnis ausgewiesen werden. Das Ge-

samtergebnis inklusive des Teilergebnisses aus Prozessgruppe [F] sollte ebenfalls als eigenständiger Wert ausgewiesen werden (Abbildung 4).

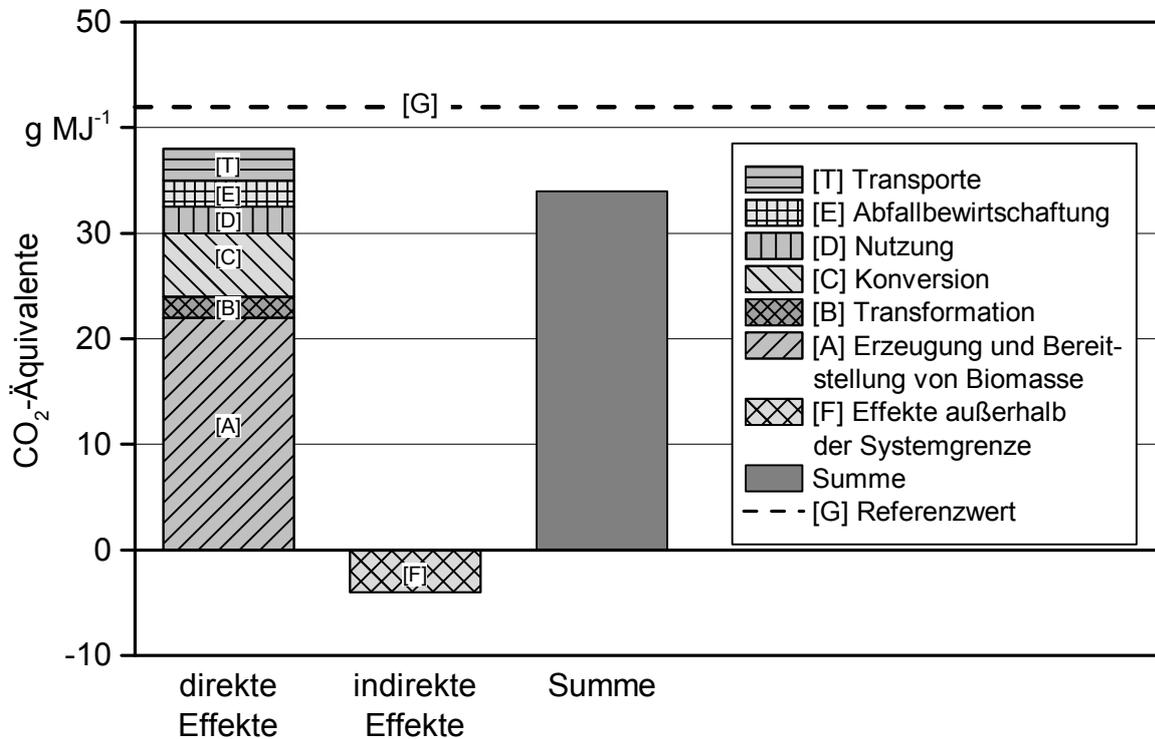


Abbildung 4: Grafische Ergebnisdarstellung (beispielhaft) für ein Produktsystem aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen am Beispiel der Wirkungskategorie Globale Erwärmung mit dem Wirkungsindikator CO₂-Äquivalente in g MJ⁻¹

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Transparenz ist die disaggregierte Ergebnisdarstellung in tabellarischer Form. Hierbei werden Teilergebnisse geordnet nach Prozessgruppe bzw. Prozess-Untergruppe auf Prozessebene dargestellt (vgl. Tabelle 3). Diese Vorgehensweise ermöglicht den praktischen, transparenten Vergleich von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien. Diese Art der Ergebnisdarstellung erfolgt ebenfalls analog zu der in Abschnitt 3.4.2.1 beschriebenen Systemdarstellung.

Tabelle 3: Disaggregierte Ergebnisdarstellung entsprechend dem Schema der Systemdarstellung

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g FE ⁻¹	in %
[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse		
[A1] Bestandesbegründung		
[A1.1] Bodenaufbereitung		
[A1.2] Pflanzen/Aussaat		
[A1.3] sonstige Flächenvorbereitung		
[A2] Bestandesführung		
[A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand		
[A2.2] Zaunbau		
[A2.3] Düngung		
[A2.4] Kalkung		
[A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung		
[A3] Ernte		
[A3.1] Ernte Biomasse		
[A3.2] Vorliefern zur Straße		
[A3.3] Aufbereitungsprozesse nach Ernte		
[A3.4] Aufladen auf Lkw/Traktor		
[A4.1] C-Speicher Fläche		
[A4.2] N ₂ O-Feldemissionen		
[A4.3] andere Feldemissionen		
[A4.4] Unterbringung von Personal		
[A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen		
[B] Transformation		
[B1] Lagerung		
[B1.1] Biomasselagerung		
[B1.2] Produktlagerung		
[B1.3] Ent- und Beladung		
[B1.4] Verpacken		
[B2] Vorbehandlung		
[B2.1] Reinigung		
[B2.2] Zerkleinerung		
[B2.3] Trocknung		
[B3] Umwandlung		
[B3.1] chemische Transformation		

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g FE ⁻¹	in %
[B3.2]	mechanische Transformation	
[B3.3]	biologische Transformation	
[C]	Konversion	
[D]	Nutzung	
[E]	Abfallbewirtschaftung	
[T]	Transporte	
[F]	Effekte außerhalb der Systemgrenze	

Weiterhin sind zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit bei der Auswertung der Bilanzergebnisse stets die zeitlichen Bezüge der verwendeten Ökobilanzdatenbanken, Preise und Kostenansätze inklusive ihrer Quelle anzugeben. Sollten die Bilanzergebnisse einem Referenzsystem [G] gegenübergestellt werden, muss auch dieses mit zeitlichem Bezug und Quelle ausgewiesen werden. Hintergrund 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 potenziellen 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 sind die Bilanzergebnisse umfangreich auszuwerten und zu diskutieren. In diesem Zusammenhang werden folgende Punkte zur Ergebnisauswertung und -diskussion empfohlen:

- Identifikation wesentlicher 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.

4 Methodische Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel wird die methodische Vorgehensweise der Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion entsprechend der ExpResBio-Methoden (vgl. Unterkapitel 3.4 und [122]) ausführlich dargelegt.

4.1 Zieldefinition

Das primäre Ziel der Untersuchungen ist es, regionaltypische und spezifische Ökobilanzdaten für die Rapserzeugung in Bayern und für die Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölmühlen zu erarbeiten. Verbunden mit der ökonomischen Bewertung sollen darauf aufbauend praktisch umsetzbare Minderungsstrategien z. B. bezüglich der THG-Emissionen und Handlungsempfehlungen für die regionale und einzelbetriebliche Beratung in Bayern zur nachhaltigen und THG-optimierten Produktion abgeleitet werden.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen ist die Überprüfung des Einflusses der Methode zur Berechnung der N₂O-Feldemissionen auf die Ergebnisse der Rapserzeugung. Im Rahmen der Untersuchungen von ExpResBio werden die N₂O-Feldemissionen standardmäßig mit den globalen Emissionsfaktoren nach IPCC (2006) [67] bewertet. Durch die Berechnung der N₂O Feldemissionen anhand der Methode von STEHFEST UND BOUWMAN (2006) [107] wird der Einfluss standortspezifischer Parameter auf die Höhe der N₂O-Feldemissionen ergänzend dargelegt (siehe Unterkapitel 6.1). Weiterhin wird der Einfluss der Bewertung des Koppelproduktes Rapspresskuchen auf die Ergebnisse der THG-Bilanz für Rapsölkraftstoff untersucht und diskutiert. Als Referenzmethode dient dabei die Energie-Allokation nach Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42]. Durch die zusätzliche Anwendung der Substitutionsmethode wird die tatsächliche Verwendung des Koppelproduktes Rapspresskuchen als Eiweißfutter berücksichtigt (siehe Unterkapitel 6.2).

4.2 Systemdarstellung und Systemgrenzen

Die bilanzierten Prozesse für die Produktsysteme Rapserzeugung und dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion sind den ExpResBio-Methoden entsprechend mit Häkchen gekennzeichnet (Abbildung 5). Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die THG-Bilanz nach der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] bzw. der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung zu gewährleisten, wird in der Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse ausschließlich die Rapserzeugung betrachtet (fruchtartenbezogener Bezugszeitraum ohne Fruchtfolgeeffekte). Zur Überprüfung des Einflusses der Bewertungsmethode von Koppelprodukten der Biokraftstoffherzeugung sowie des Vorfruchteffekts von Raps auf die Ergebnisse der THG-Bilanz wird der betrachtete Systemraum räumlich und zeitlich erweitert (siehe Unterkapitel 4.6 und 4.7). Die Bilanzergebnisse werden im Prozess [F4] Gutschrift für vermiedenes Referenzsystem Koppelprodukte ausgewiesen (Abbildung 6).

Bezeichnung Produktsystem: Rapsverarbeitung und dezentrale Rapsölkrampfproduktion			
Rohstoffgewinnung	Produktion	Anwendung	Reststoff- und Abfallbehandlung
<p><input checked="" type="checkbox"/> [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse</p> <p>[A1] Bestandesbegründung <input checked="" type="checkbox"/> [A1.1] Bodenaufbereitung <input checked="" type="checkbox"/> [A1.2] Pflanzen/Aussaat <input type="checkbox"/> [A1.3] sonstige Flächenverarbeitung</p> <p>[A2] Bestandesführung <input type="checkbox"/> [A2.1] Pflege Pflanzung/Bestand <input checked="" type="checkbox"/> [A2.2] Zaubau <input checked="" type="checkbox"/> [A2.3] Düngung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.4] Kalkung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung <input type="checkbox"/> [A2.6] Bau/Instandhaltung von Wägen</p> <p>[A3] Ernte <input checked="" type="checkbox"/> [A3.1] Ernte Biomasse <input checked="" type="checkbox"/> [A3.2] Vorliefern zur Straße <input type="checkbox"/> [A3.3] Aufbereitungsprozesse nach Ernte <input type="checkbox"/> [A3.4] Aufladen auf LKW/Traktor</p> <p>[A4] nicht-zuordenbar <input type="checkbox"/> [A4.1] C-Speicher <input type="checkbox"/> Fläche <input checked="" type="checkbox"/> [A4.2] N₂O-Feldmissionen <input type="checkbox"/> [A4.3] andere Feldmissionen <input 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>[B1] Lagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.1] Biomassalagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.2] Produktlagerung <input type="checkbox"/> [B1.3] Ent- und Beladung <input type="checkbox"/> [B1.4] Verpacken</p> <p>[B2] Vorbehandlung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.1] Reinigung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.2] Zerkleinerung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.3] Trocknung</p> <p>[B3] Umwandlung <input type="checkbox"/> [B3.1] chemische Transformation <input checked="" type="checkbox"/> [B3.2] mechanische Transformation <input type="checkbox"/> [B3.3] biologische Transformation</p>	<p><input type="checkbox"/> [C] Konversion</p> <p>[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>[D1] C-Speicher Produkt <input type="checkbox"/> [D2] Energiespeicherung</p>
<p><input type="checkbox"/> [L] Betriebliche Logistik</p> <p>[L1] außerbetrieblicher Transport <input type="checkbox"/> [L2] innerbetrieblicher Transport</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [T] Transporte</p> <p>[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>[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"/> [E] Abfallbewirtschaftung</p> <p>[E1] Vorbereitung zur Wiederverwendung <input type="checkbox"/> [E2] stoffliche Verwertung <input type="checkbox"/> [E3] energetische Verwertung <input type="checkbox"/> [E4] Beseitigung</p>
<p>Ergänzende Informationen:</p> <p><input type="checkbox"/> [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze</p> <p>[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</p> <p><input type="checkbox"/> [G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems</p> <p>[G1] Referenzsystem Hauptprodukt ----- ----- -----</p>			
<p>Geographische Repräsentativität: Rapsverarbeitung: Boden-Klima-Räume (BRK) nach Rotberg et al. (2007) (A) Tertiär-Hügelland Donau-Süd (B) Albtal und Ostbayerisches Hügelland (C) Verwitterungsböden in den Übergangslagen</p>		<p>Zeilliche Repräsentativität: Primärdaten: Erntejahre Raps Saat: 2013 - 2015 Verarbeitungsjahre Raps Saat: 2013/2014 und 2014/2015 Sekundärdaten: Datenbanken der GaBI-Software und ecoinvent Stand 2015</p>	
<p>Anmerkungen: Umgang mit Koppelprodukt (Rapspresskuchen), Allokation nach Heizwert Heizwert von Rapsölkrampf = 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 Rapsölkrampf aus dezentraler Ölgewinnung (Basisvariante)

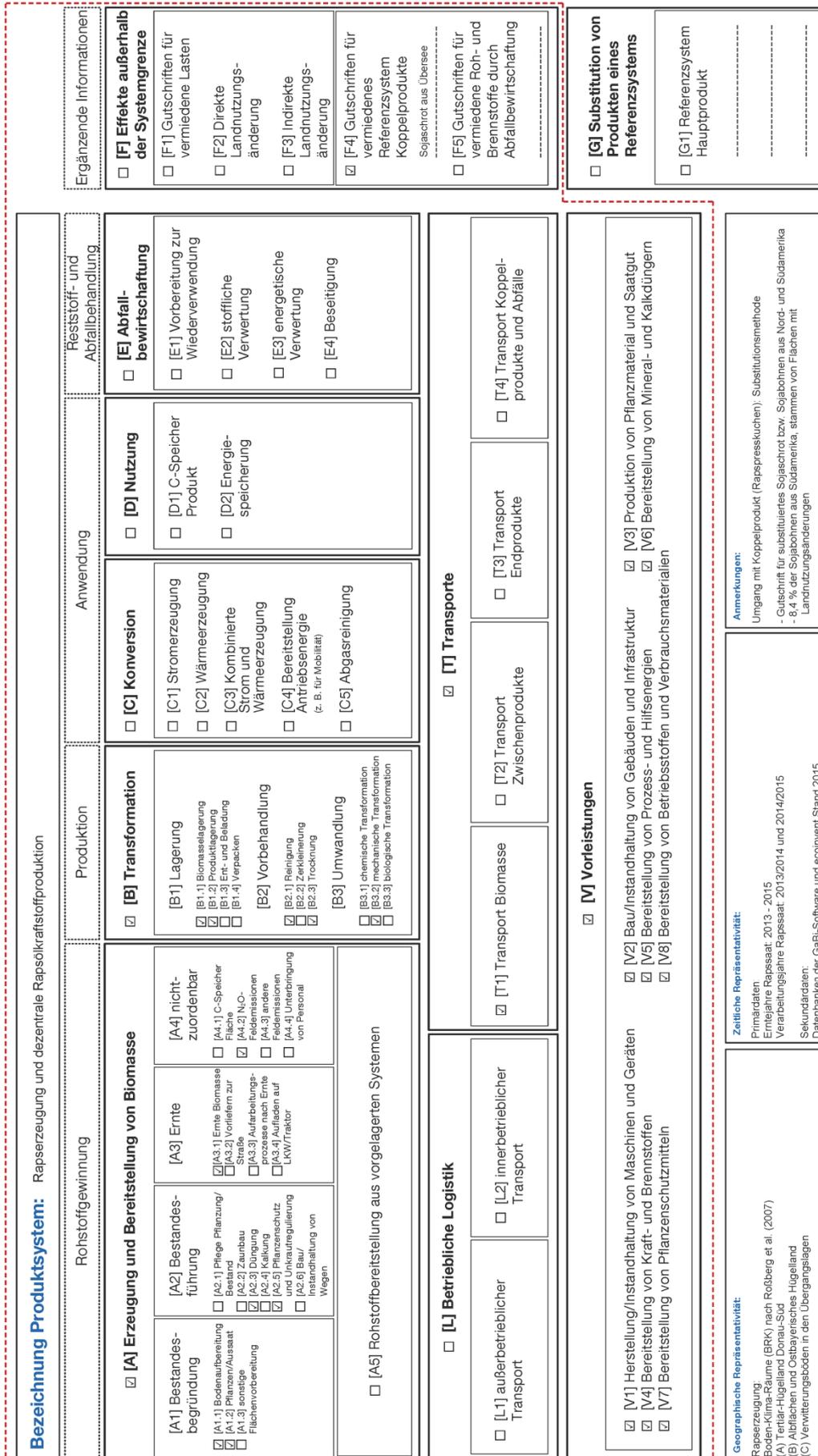


Abbildung 6: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung (Substitutionsmethode)

4.3 Bezugsgrößen/funktionelle Einheiten

Rapserzeugung: 1 kg Rapssaat (TM-Gehalt 91 %), ab Feld

Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung: 1 MJ Rapsölkraftstoff, ab Ölmühle

4.4 Beschreibung des Produktsystems

Das Produktsystem Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung umfasst die Prozessgruppen [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse, [T1] Biomassetransport und [B] Transformation.

[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse

Die Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse beschreibt den Abschnitt der Rapserzeugung. Sie umfasst die Prozesse [A1.1] Bodenaufbereitung (Stoppel- und Grundbodenbearbeitung), [A1.2] Pflanzen/Aussaat (Rapsaussaat und Anwalzen der Rapssaat), [A2.3] Düngung (Ausbringung von Mineral- und Wirtschaftsdünger einschließlich der Einarbeitung im Boden), [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung (Ausbringung chemischer Pflanzenschutzmittel) sowie [A3.1] Ernte Biomasse (Rapsdrusch). Neben den Emissionen aus der Nutzung des verwendeten Kraftstoffs werden den entsprechenden Prozessen auch die Emissionen aus Vorleistungsprozessen [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten, [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur, [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut, [V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern sowie [V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln zugeordnet. Darüber hinaus werden die aus der N-Düngung und den Ernte- und Wurzelrückständen entstehenden N₂O-Feldemissionen innerhalb der Prozessgruppe [A] erfasst und im Prozess [A4.2] gesondert dargestellt. Als N-Quellen für die direkten und indirekten N₂O-Feldemissionen werden die N-Mengen aus Mineral- und Wirtschaftsdünger bzw. anderer organischer Dünger sowie aus Ernte- und Wurzelrückständen berücksichtigt. Für die Berechnung der N-Mengen aus Ernte- und Wurzelrückständen (EWR) werden die Methoden und Daten des Thünen-Instituts [93] verwendet. Die Bewertung der N-Mengen aus Mineral- und Wirtschaftsdünger bzw. anderer organischer Dünger sowie der Ernte- und Wurzelrückstände erfolgt auf Basis der IPCC-Methodik [67]. In Tabelle 4 sind die verwendeten Emissionsfaktoren (EF) und die relativen Anteile der N-Verluste durch Oberflächenabfluss/Auswaschung bzw. Ausgasung (Frac) aufgeführt. Die Emissionsfaktoren werden in kg N₂O-N angegeben. Die Umrechnung in kg N₂O erfolgt durch die Multiplikation mit dem Molgewichtsverhältnis von N₂O zu N (44/28).

Tabelle 4: Emissionsfaktoren (EF) in kg N₂O-N und relative Anteile der N-Verluste durch Oberflächenabfluss/Auswaschung bzw. Ausgasung (Frac) in % nach IPCC [67]

	Mineraldünger		Organischer Dünger		Ernte- und Wurzelrückstände	
	EF _{MD} in kg N ₂ O-N kg N ⁻¹	Frac _{MD} in %	EF _{OD} in kg N ₂ O-N kg N ⁻¹	Frac _{OD} in %	EF _{EWR} in kg N ₂ O-N kg N ⁻¹	Frac _{EWR} in %
direkte N ₂ O-Feldemissionen	0,01		0,01		0,01	
indirekte N ₂ O-Feldemissionen (Auswaschung)	0,0075	30*	0,0075	30*	0,0075	30*
indirekte N ₂ O-Feldemissionen (Ausgasung)	0,01	10	0,01	20		

* Anwendung nur wenn Σ (Niederschlag in Regenzeit) - Σ (potenzielle Evaporation in Regenzeit) > Wasserspeicherkapazität des Bodens oder bei Bewässerung (Ausnahme Tröpfchenbewässerung)

[V] Vorleistungen

[V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten

Eingesetzte Maschinen und Geräte in kg Maschine bzw. Gerät je Arbeitseinheit. Eine Arbeitseinheit (AE) ist in der Regel die Fläche in ha. Nur im Fall der Wirtschaftsdüngung ist es das Volumen in m³.

[V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur

Benötigter Flächenbedarf in m² für die eingesetzten Maschinen und Geräte zur Unterbringung in einer Maschinenhalle je Arbeitseinheit (siehe [V1]).

[V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut

Eingesetzte Saatgutmenge in kg ha⁻¹.

[V4] Bereitstellung von Kraftstoffen

Verwendete Dieseldieselmotormenge in kg je Arbeitseinheit (siehe [V1]). Die Dieseldieselmotormenge ist dabei identisch mit der Summe aus den Einzelprozessen [A1.1] Bodenaufbereitung, [A1.2] Aussaat, [A2.3] Düngung, [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung sowie [A3.1] Ernte Biomasse.

[V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern

Eingesetzte Mineraldüngermenge in kg (N, P₂O₅, K₂O bzw. CaO) ha⁻¹.

[V7] Bereitstellung chemischer Pflanzenschutzmittel

Wirkstoffmenge in kg ha⁻¹ der eingesetzten Herbizide, Fungizide, Insektizide (inklusive Schneckenkorn), Wachstumsregulatoren und Saatgut-Beizmittel.

[T1] Transport Biomasse

Der Transport der Rapssaat erfolgt ab Feld mit einem Traktor oder Lastkraftwagen zur dezentralen Ölmühle bzw. einem Regionallager bei Weiterverarbeitung zu Rapsölme-

thylester. Dieser Transport wird nachfolgend als regionaler Biomassetransport bezeichnet.

[B] Transformation

Die Prozessgruppe [B] Transformation beschreibt den verfahrenstechnischen Ablauf der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion nach Anlieferung der Rapssaat in der dezentralen Ölmühle. Sie umfasst die Prozesse [B1] Lagerung, [B2] Vorbehandlung und [B3] Umwandlung. Wie im Folgenden beschrieben erfolgt die Lagerung der Rapssaat ([B1]) allerdings erst nach der Vorbehandlung ([B2]) der angelieferten Rapssaat. Zum Teil wird die Rapssaat nach der Lagerung und vor der Pressung einer weiteren Vorbehandlung unterzogen.

[B2] Vorbehandlung

Um die Rapssaat ohne Qualitätsverlust lagern und weiterverarbeiten zu können, wird diese zunächst gereinigt ([B2.1]) und falls erforderlich getrocknet ([B2.3]).

[B2.1] Reinigung

Die angelieferte Rapssaat wird in allen drei untersuchten Ölmühlen (siehe Unterkapitel 4.5, Tabelle 6) einem Reinigungsprozess unterzogen, der aus einer Trommelsiebung zur Abtrennung von Verunreinigungen und Störstoffen besteht. Der dabei anfallende Abputz wird entweder an den Landwirt zurückgegeben oder der Kompostierung zugeführt. In einer Ölmühle ist der Reinigung mittels Trommelsieb ein Magnetabscheider zur Abtrennung metallischer Fremdkörper vorgeschaltet. Weiterhin wird in zwei der drei untersuchten Mühlen (Ölmühle Y und Ölmühle Z) eine Feinreinigung der Ölsaats nach der Lagerung bzw. vor der Pressung durchgeführt. Die Feinreinigung erfolgt ebenfalls mittels Trommelsiebs. Sowohl die Trommelsiebe als auch der Magnetabscheider werden elektrisch betrieben.

[B2.3] Trocknung

Für eine optimale Lagerung der Rapssaat und eine optimale Ölgewinnung ist ein Wassergehalt von ≤ 7 Masse-% anzustreben [91], sodass bei höheren Wassergehalten eine Trocknung erforderlich ist. In allen drei untersuchten Ölmühlen wird hierzu eine heizölbeheizte Getreidetrocknungsanlage eingesetzt. Allerdings wird der Wassergehalt der Rapssaat über den Erntezeitpunkt gesteuert und damit angestrebt, den Anteil der Rapssaat zur Nachtrocknung möglichst gering zu halten (siehe Tabelle 6).

[B1.1] Biomasselagerung

Die Biomasselagerung umfasst die Langzeit-, Vorrats- und Tageszwischenlagerung der gereinigten und getrockneten Rapssaat. Die Langzeitlagerung erfolgt in Flachlagern und Hochsiloanlagen, wobei in Letzteren zum Teil elektrisch betriebene Belüftungssysteme integriert sind. Die Vorrats- und Tageszwischenlagerung, die einen kontinuierlichen Pressvorgang sicherstellen soll, ist in allen drei Ölmühlen durch einen Tagesvorratsbehälter gelöst, welcher in zwei Mühlen durch jeweils einen vorgeschalteten Vorratsbehälter bzw. durch ein Zwischenlager ergänzt wird. Im Tagesvorratsbehälter wird die Ölsaats für den nachfolgenden Pressvorgang über die Abwärme der Ölprese erwärmt.

[B1.2] Produktlagerung

Die Lagerung des Rapsöls (Trüböl und Reinöl) sowie des Rapspresskuchens wird der Prozessuntergruppe [B1.2] Zwischenproduktlagerung zugeordnet. Die Lagerung des Rapsöls findet vorwiegend in Edelstahl- oder Kunststoffbehältern statt. Der Presskuchen wird in den drei untersuchten Ölmühlen entweder in Gitterboxen oder direkt auf der Betonplatte in einer Halle gelagert.

[B3] Umwandlung

Die Prozessgruppe [B3] Umwandlung beinhaltet die mechanische Transformation, die bei der dezentralen Rapsölkraftstoffherzeugung aus den Teilschritten Pressung und Filtration besteht.

[B3.2] Mechanische Transformation

Die Pressung der Rapssaat erfolgt in allen drei Ölmühlen mittels einer elektrisch betriebenen Schneckenpresse. Es entstehen Presskuchen und Trüböl, wobei die spezifischen Ölausbeuten der jeweiligen Ölmühle berücksichtigt wurden (vgl. Tabelle 6). Mit dem Presskuchen entsteht ein Koppelprodukt, das einer weiteren Verwertung als Eiweißfutter in der Tierhaltung zugeführt wird. Die anschließende Filtration des Trüböls erfolgt durch zwei Filterungsstufen, einer Hauptfiltration mittels Vertikaldruckplattenfilters sowie einer nachgeschalteten Sicherheitsfiltration mit Beutel- und Kerzenfilter. Der bei der Hauptfiltration entstehende Filterkuchen kann entweder einer erneuten Pressung oder als Koppelprodukt einer weiteren Verwertung, z. B. als Eiweißfutter in der Tierhaltung oder als Biogassubstrat, zugeführt werden.

4.5 Datenqualität und Datenherkunft

Die Eingangsdaten für die Rapserzeugung und dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion wurden durch Vor-Ort-Befragungen in 15 landwirtschaftlichen Praxisbetrieben und drei dezentralen Ölmühlen erhoben. Dabei befinden sich jeweils fünf landwirtschaftliche Praxisbetriebe im Umkreis von maximal 37 km um die drei dezentralen Ölmühlen. Die drei dezentralen Ölmühlen befinden sich in unterschiedlichen Boden-Klima-Räumen Bayerns. Hierdurch wird es möglich, regionalspezifische Einflussfaktoren der Rapserzeugung zu berücksichtigen. Die Standorte sind in Abbildung 7 kartografisch dargestellt.

Aus Abbildung 7 geht hervor, dass sich die Ölmühle im Boden-Klima-Raum „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ im Grenzgebiet zum Boden-Klima-Raum „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“ befindet. Folglich wird diese Ölmühle von Rapserzeugern aus beiden Boden-Klima-Räumen beliefert. In Bezug auf die Temperatur und die Niederschlagsmengen sind die für diese Ölmühle ausgewählten Betriebe unabhängig vom tatsächlichen Standort dem Boden-Klima-Raum „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ zuzuordnen. Grund dafür sind geringere Niederschlagsmengen sowie geringere Jahresdurchschnittstemperaturen (vgl. Tabelle 5), durch die sich die im südlicheren Teil des Boden-Klima-Raum „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“ ausgewählten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe auszeichnen.

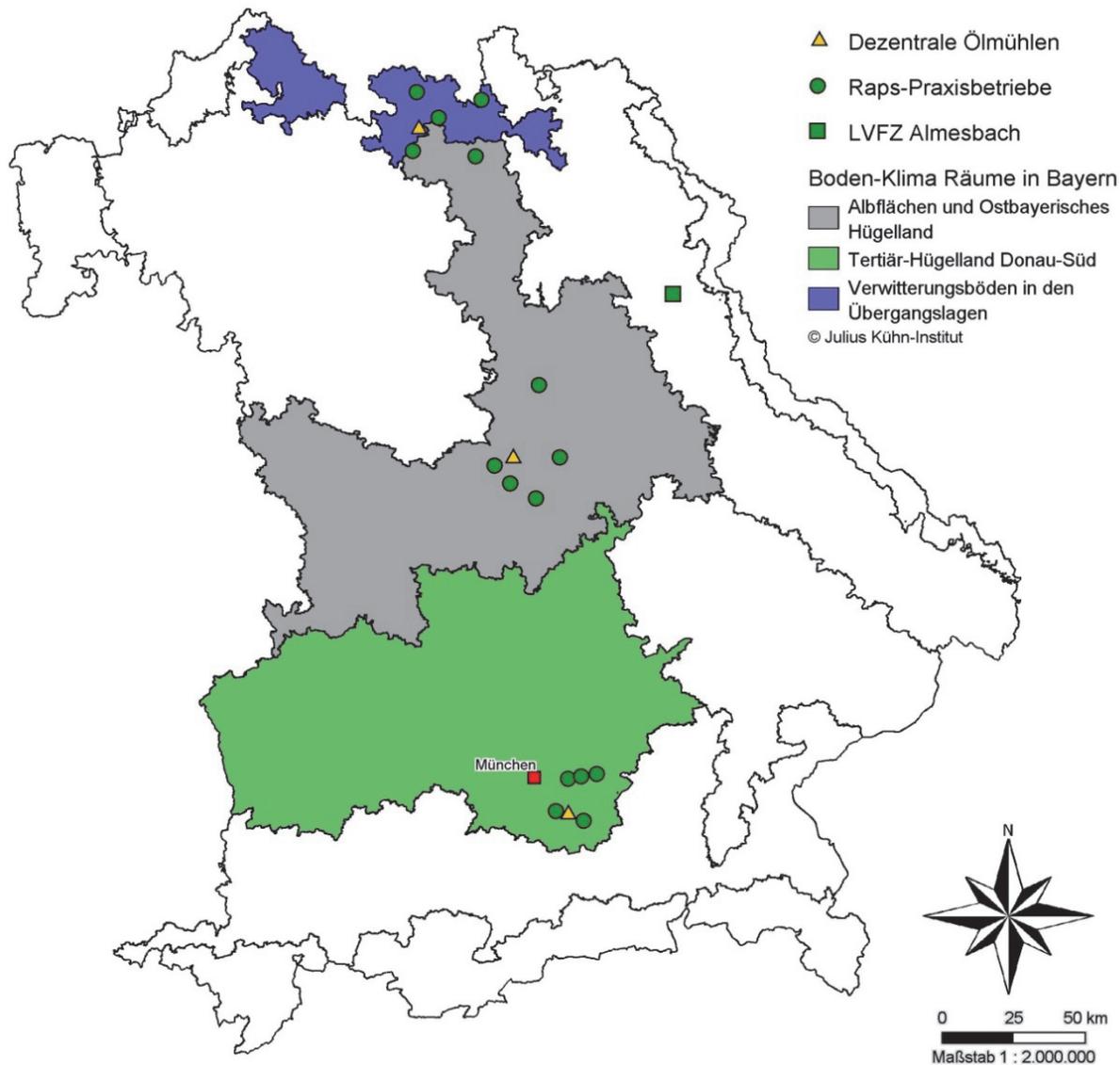


Abbildung 7: Lage der untersuchten dezentralen Ölmühlen und landwirtschaftlichen Praxisbetriebe innerhalb der Boden-Klima-Räume in Bayern sowie Standort des LVFZ Almesbach

Zusätzlich wurde das Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum (LVFZ) Almesbach in die Untersuchung eingebunden, um für das staatliche Versuchsgut spezifische Daten zu ermitteln. Der Rapsanbau im LVFZ Almesbach umfasste in den Erntejahren 2013 und 2014 jeweils rund 16 ha bzw. im Erntejahr 2015 knapp 11 ha. Die dominierende Bodenart ist sandiger Lehm (sL) mit durchschnittlichen Ackerzahlen (AZ) von 35. Die im LVFZ Almesbach angebaute Rapssaat wird in der 110 km entfernten dezentralen Ölmühle Y in Lohnpressung verarbeitet. Anschließend wird der produzierte Rapsölkraftstoff in einem Versuchstraktor der LVFZ verwendet und der produzierte Rapspresskuchen als Eiweißfuttermittel in der Rinderhaltung des LVFZ eingesetzt.

Tabelle 5 zeigt die natürlichen Standortbedingungen, Betriebsstrukturen und Eingangsdaten (Mittelwerte, Minima und Maxima) für die Rapserzeugung (Erntejahre 2013 bis 2015) der 15 landwirtschaftlichen Praxisbetriebe gegliedert nach Boden-Klima-Räumen.

Tabelle 6 veranschaulicht die Eingangsdaten für die Rapsölkraftstoffproduktion der drei untersuchten dezentralen Ölmühlen.

Tabelle 5: *Natürliche Standortbedingungen, Betriebsstrukturen und Eingangsdaten für die Rapserzeugung der 15 landwirtschaftlichen Praxisbetriebe gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte, Minima und Maxima aus den Erntejahren 2013 bis 2015)*

Boden-Klima-Räume nach ROßBERG et al. (2007) [94]	Tertiär-Hügelland Donau-Süd			Albflächen und Ostbayerisches Hügelland			Verwitterungsböden in den Übergangslagen		
Bezeichnung	Boden-Klima-Raum A			Boden-Klima-Raum B			Boden-Klima-Raum C		
Anzahl Praxisbetriebe	n = 5			n = 5			n = 5		
Natürliche Standortbedingungen									
Höhe über NN in m	530			490			395		
Ø Jahresniederschlag in mm	925			760			740		
Ø Jahrestemperatur in °C	7,2			7,2			7,4		
typische Bodenarten	IS, SL, sL, L			SI, IS, SL, sL, L			SI, IS, SL, sL, L, LT, T		
Ackerzahlen	40–60			20–70			20–80		
Betriebsstruktur									
Betriebstyp	4 × Ackerbau 1 × viehhaltend			5 × viehhaltend			5 × viehhaltend		
	\bar{x}	MIN	MAX	\bar{x}	MIN	MAX	\bar{x}	MIN	MAX
Betriebsgröße in ha	173	30	382	151	83	250	120	81	208
Ackerland in ha	159	30	323	137	71	205	92	65	166
Anteil Raps in % Ackerland	16	10	23	19	14	24	15	9	28
Rapserzeugung									
FM-Ertrag in dt ha ⁻¹ (91 % TM)	41,1	36,9	46,0	44,8	31*	52,2	39,4	26,4	50,0
Saatgut in kg ha ⁻¹	2,6	2,1	3,2	2,7	1,8	3,4	2,6	2,1	3,1
Dieselmotorkraftstoff in l ha ⁻¹	90	74	120	94	69	114	94	74	111
Pflanzenschutzmittelwirkstoffe in kg ha ⁻¹	2,0	1,6	2,7	2,0	1,7	2,3	1,9	1,2	2,5
Mineraldünger in kg N ha ⁻¹	199	104	247	198	180	241	167	116	249
in kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹	25	0	49	21	0	76	6	0	64
in kg K ₂ O ha ⁻¹	31	0	70	21	0	76	6	0	64
Wirtschaftsdünger in kg N ha ⁻¹	43	0	198	47	0	110	105	70	173
N ₂ O-Feldemissionen in kg ha ^{-1**}	6,5	5,6	7,9	6,6	5,4	7,9	6,9	5,2	8,6

* 40 % Hagelschaden; **berechnete Werte nach [93]

Tabelle 6: *Eingangsdaten für die Rapsölkraftstoffproduktion der drei untersuchten dezentralen Ölmühlen*

Ölmühle	X im Boden-Klima- Raum A		Y im Boden-Klima- Raum B		Z im Boden-Klima- Raum C	
	2013/14	2014/15	2013/14	2014/15	2013/14	2014/15
Ø Transportentfernung in km	13		21		19	
Verarbeitungskapazität in kg Rapssaat h ⁻¹	500		800		1.800	
Abschreibungszeitraum in Jahren	14		14		14	
Auslastung in %	23	27	30	41	25	29
Strombedarf in MJ kg ⁻¹ Rapssaat	0,184	0,184	0,252	0,258	0,210	0,210
Feuchte der Rapssaat vor Trocknung in %	12	7,5	7	7	7,3	6,9
Feuchte der Rapssaat nach Trocknung in %	8	7	7	7	7	6,9
Menge der Rapssaat zur Trocknung in %	0,03	0,25	0	0	1	0
Fremdbesatz vor Reinigung in %	0,3	1,62	1,5	1,5	2,5	2,5
Fremdbesatz nach Reinigung in %	0	0	0,05	0,65	0,05	0,78
Fremdbesatz vor Feinreinigung in %	keine		0,05	0,65	0,05	0,78
Fremdbesatz nach Feinreinigung in %	Feinreinigung		0	0	0	0
Ölgehalt der Rapssaat in %	43,0	42,5	44,0	42,7	43,0	43,4
Ölausbeute in kg Trüböl kg ⁻¹ Rapssaat	0,362	0,351	0,365	0,354	0,374	0,368
Rapspresskuchen in kg kg ⁻¹ Rapssaat	0,618	0,634	0,625	0,636	0,616	0,622
Allokationsfaktor Rapsöl	0,515	0,501	0,514	0,503	0,534	0,517
Zuschlagstoffe zum Trüböl in %	0,5		0,5		0,5	
Schwebstoffe vor Filterung in %	2,3		2,3		2,3	
Schwebstoffe nach Filterung in %	0		0		0	
Rapsölkraftstoff in kg kg ⁻¹ Trüböl	0,977		0,977		0,977	

Die auf den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben bzw. in den dezentralen Ölmühlen erhobenen Eingangsdaten gehören zu den primären Aktivitätsdaten, die mithilfe von Emissionsfaktoren zu THG-Emissionen umgerechnet werden können. Für die Vorkettenemissionen der Energieträger, Vorprodukte, Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe wurden die Datenbanken der Ökobilanz GaBi ts Professional (Stand Oktober 2015) und ecoinvent v2.2 (Stand Oktober 2015) als Sekundärdatenquelle verwendet.

Zur ökonomischen Bewertung des Rapsanbaus werden die primären Aktivitätsdaten (Angaben zu Arbeitsgängen und Maschinen) v. a. mithilfe von Kalkulationsdaten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft [80] in betriebsindividuelle Maschinenkosten und Arbeitszeit umgerechnet. Die Höhe des Stundenlohns ist angelehnt an die tariflichen Bruttolöhne eines Landarbeiters mit abgeschlossener Berufsausbildung und wird mit $12,41 \text{ € h}^{-1}$ angenommen [89]. Zuzüglich der durchschnittlichen Lohnnebenkosten in Höhe von 36 % (Bereich: 23 bis 49 %) als Zuschlag vom Bruttolohn [89], ergeben sich Gesamtlohnkosten in Höhe von $16,87 \text{ € h}^{-1}$. Die Dieselposten werden mit 90 ct l^{-1} angesetzt. Die Angaben der Landwirte zu den verwendeten Betriebsmitteln werden mit Kalkulationsdaten ergänzt (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Kalkulationsdaten der Betriebsmittel bei der Rapsverarbeitung

Betriebsmittel	Kosten	Einheit	Datenquelle
Saatgut	16,5	€ kg ⁻¹	[89]
Düngemittel*			
Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) 30 % N	289,3	€ t ⁻¹	[89][95]
Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) 28 % N	270,0	€ t ⁻¹	[89][95]
Ammonsulfatsalpeter (26 % N + 13 % S)	310,0	€ t ⁻¹	[89][95]
Azofertil 25 (+11 S)	340,0	€ t ⁻¹	[89][95]
Solubor 17,5 %	390,0	€ t ⁻¹	[89][95]
Diammonphosphat (18 % N + 46 % P ₂ O ₅)	500,0	€ t ⁻¹	[89][95]
Harnstoff (46 % N)	360,0	€ t ⁻¹	[89][95]
Hydro Sulfan (24 % N + 6 % S)	295,0	€ t ⁻¹	[89][95]
InnoFert Star (24 % N + 10 % S)	302,5	€ t ⁻¹	[89][95]
Optifert Power (39 % N + 6 % S)	340,0	€ t ⁻¹	[89][95]
Kalkammonsalpeter (27 % N)	285,0	€ t ⁻¹	[89][95]
PK-Dünger (14/20)	288,5	€ t ⁻¹	[89][95]
NPK-Dünger (15/15/15)	372,0	€ t ⁻¹	[89][95]
NPK-Dünger (13/9/16)	311,6	€ t ⁻¹	[89][95]
NPK-Dünger (16/8/8)	276,4	€ t ⁻¹	[89][95]

Betriebsmittel	Kosten	Einheit	Datenquelle
NPK-Dünger (16/16/16)	396,8	€ t ⁻¹	[89][95]
NPK-Dünger (19/8/8)	305,7	€ t ⁻¹	[89][95]
NPK-Dünger (20/7/7)	261,4	€ t ⁻¹	[89][95]
NPK-Dünger (20/8/8)	315,4	€ t ⁻¹	[89][95]
NPK-Dünger (21/5/5)	280,0	€ t ⁻¹	[89][95]
PIAMON® 33-S	313,1	€ t ⁻¹	[89][95]
Pflanzenschutzmittel**	85,0–137,0	€ ha ⁻¹	[89]
Schneckenkorn	4,7	€ kg ⁻¹	[89][95]

* Annahmen zu den Düngemittelpreisen basieren auf Durchschnittswerten einer Preisrecherche im Jahr 2014

** Herbizide, Fungizide, Insektizide (außer Schneckenkorn)

Des Weiteren werden zur Kostenberechnung folgende Sekundärdaten herangezogen bzw. Annahmen getroffen:

Die Kosten der Hagelversicherung berechnen sich mit 0,014 € €⁻¹ Marktleistung (Erlöse beim Verkauf der Rapssaat) zuzüglich eines fruchtartspezifischen Zuschlags von 300 % [5]. Es werden für alle Betriebe einheitliche Gebäudekosten (Remise zum Unterstellen der Maschinen) anhand von Kalkulationsdaten [89] unterstellt. Anhand statistischer Daten und Hochrechnungen [102][89] wurden für die drei Boden-Klima-Räume Pachtpreise festgelegt. Damit ergeben sich für die Betriebe von Boden-Klima-Raum B und D Pachten von 312 € ha⁻¹, von Boden-Klima-Raum A 343 € ha⁻¹ und von Boden-Klima-Raum C von 287 € ha⁻¹. Darüber hinaus werden 10 € ha⁻¹ als sonstige Flächenkosten (z. B. Wegebau, Entwässerung) berücksichtigt.

Die „Sonstigen Kosten“ berücksichtigen alle Gemeinkosten eines Betriebes, z. B. Verwaltung, Beiträge und allgemeine Versicherungen. Hierfür wird mit 96 € ha⁻¹ kalkuliert [5]. Alle Zinsberechnungen erfolgen mit einem Zinssatz von 4 %. Die Erlöse für die Rapssaat ergeben sich aus der Befragung der Ölmühlen (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Einkaufspreise der Rapssaat für die Rapsölkraftstoffproduktion der drei untersuchten dezentralen Ölmühlen

Ölmühle	X		Y		Z	
	im Boden-Klima-Raum A		im Boden-Klima-Raum B		im Boden-Klima-Raum C	
	2013/14	2014/15	2013/14	2014/15	2013/14	2014/15
Einkaufspreis der Rapssaat in € dt ⁻¹	38,50*	33,00*	40,00**	36,00**	41,97***	36,40***

* ohne Qualitätszuschlag

** 9 % Feuchte

*** Qualitätszuschläge sowie direkt zuordenbare Kosten enthalten (Annahme, Reinigung, Einlagerung, Auslagerung, Umlagerung, Analysekosten)

Aus der Befragung des Betreibers der Ölmühle Y ergeben sich ökonomische Eingangsdaten für die Bewertung der Rapsölproduktion (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Ökonomische Eingangsdaten für die Rapsölkraftstoffproduktion der dezentralen Ölmühle Y

Ölmühle	Y im Boden-Klima-Raum B	
	2013/14	2014/15
Verkaufspreis Rapsöl*	0,90 € l ⁻¹	
Verkaufspreis Rapspresskuchen	27,35 € dt ⁻¹	
Einkaufspreis der Rapssaat (9 % Feuchte)	40 € dt FM ⁻¹	36 € dt FM ⁻¹
Kosten externe Lagerung der Rapssaat	1 € dt ⁻¹	

* inklusive Mehrwertsteuer, ohne Energiesteuer

Die Investitionen für die Ölmühle lagen inklusive Grundstück, Erschließung und Planungskosten bei rund 1 Mio. €. Mithilfe von Kalkulationsdaten [117] werden die Investitionen in die vorhandenen baulichen und technischen Anlagen untergliedert sowie deren Nutzungspotenziale bestimmt. Die Ölmühle beschäftigt zur Geschäftsführung sowie zur Verwaltung 0,5 AK sowie zwei technische Mitarbeiter zur Betreuung der Ölmühle bei Bedarf. Die Stromkosten werden mit dem tatsächlichen Strombedarf der Ölmühle sowie einem Strompreis (Grundversorger der Region, gewerblicher Tarif mit Mindestabnahme) von 18 ct kWh⁻¹ (netto) angesetzt.

4.6 Umgang mit Koppelprodukten

Wie in Abschnitt 3.4.2.4 beschrieben existieren unterschiedliche Methoden, entstehende Umweltbelastungen und Kosten sowohl auf das Haupt- als auch auf das Koppelprodukt zu beziehen. Das im Produktsystem Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung anfallende Koppelprodukt ist der Rapspresskuchen. Die Annahmen für die Bewertung dieses Koppelproduktes sind nachfolgend sowohl für die Energie-Allokation als auch für die Substitutionsmethode dargelegt.

4.6.1 Allokation nach dem Energiegehalt

In der Basisvariante werden die Umweltbelastungen zwischen Hauptprodukt und den jeweilig anfallenden Koppelprodukten gemäß der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] nach dem Energiegehalt alloziert. Für die Allokation zwischen Trüböl und Rapspresskuchen wurde für das Trüböl ein Heizwert von 37,5 MJ kg⁻¹ und für den Rapspresskuchen ein Heizwert von 20,7 MJ kg⁻¹ auf Basis von [91] angenommen. Die Unterschiede der Allokationsfaktoren für das Trüböl zwischen den drei untersuchten Ölmühlen einerseits und

den beiden Verarbeitungsjahren andererseits sind aufgrund ähnlicher Ölausbeuten gering (vgl. Tabelle 6).

4.6.2 Substitutions- bzw. Gutschriftenmethode

Eine weitere Methode zur Bewertung der anfallenden Koppelprodukte stellt die Substitutions- bzw. Gutschriftenmethode dar (vgl. Abschnitt 3.4.2.4). Für die Berechnung der Gutschrift wurden folgende Festlegungen getroffen:

Der Rapspresskuchen ersetzt Sojaextraktionsschrot als Eiweißfutter in der Rinderhaltung. Die **Berechnung des Substitutionsfaktors** (Wie viel Kilogramm Sojaschrot kann durch 1 Kilogramm Rapspresskuchen substituiert werden?) erfolgt auf Basis des nutzbaren Rohproteins (nXP) beider Eiweißfuttermittel. Rapspresskuchen aus dezentraler Ölgewinnung beinhaltet ein nutzbares Rohprotein von 208 kg t^{-1} Trockenmasse. Sojaextraktionsschrot dagegen weist ein verfügbares Rohprotein von 319 kg t^{-1} Trockenmasse auf [88]. 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, werden somit je $1,53 \text{ kg}$ Rapspresskuchen dem Produktsystem der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion gutgeschrieben. 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.

Für die **Herkunftszusammensetzung des substituierten Sojaschrotes** wird die deutsche Importstatistik von Sojaschrot und Sojabohnen des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2013 verwendet [105]. Im Jahr 2013 wurden demnach $2,94$ Millionen Tonnen Sojaschrot und $3,64$ Millionen Tonnen Sojabohnen nach Deutschland importiert. Die Sojabohnen wurden zu $2,98$ Millionen Tonnen Sojaschrot verarbeitet, wodurch sich eine prozentuale Aufteilung von 50% direkt importiertem Sojaschrot und 50% Sojaschrot aus deutscher Verarbeitung ergibt [105]. Die länderspezifischen Importmengen und Anteile sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 10: Mengen und Anteile des im Jahr 2013 importierten Sojaschrotes nach Deutschland [105]

Länder	Sojaschrotmenge	
	in t	in %
Niederlande	641.152	21,8
Argentinien	571.259	19,4
Brasilien	1.568.189	53,2
USA	41.148	1,4
Sonstige	152.363	4,2
Gesamt	2.947.116	100

Tabelle 11: Mengen und Anteile der im Jahr 2013 importierten Sojabohnen nach Deutschland [105]

Länder	Menge an Sojabohnen	
	in t	in %
Argentinien	56.151	1,5
Brasilien	799.186	22,0
Kanada	480.404	13,2
Paraguay	458.525	12,6
Uruguay	263.984	7,3
USA	1.479.735	40,7
Sonstige	99.312	2,7
Gesamt	3.637.297	100

Aus Tabelle 10 geht hervor, dass rund 22 % des importierten Sojaschrotes aus den Niederlanden stammen. In den Niederlanden werden jedoch keine nennenswerten Mengen an Sojabohnen angebaut. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass das importierte Sojaschrot entweder direkt in die Niederlande importiert wurde oder aus der Verarbeitung von importierten Sojabohnen stammt. Somit wird für das aus den Niederlanden nach Deutschland importierte Sojaschrot ein niederländischer Importmix angenommen. Entsprechend der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) wurden im Jahr 2013 4,99 Millionen Tonnen Sojaschrot und 3,31 Millionen Tonnen Sojabohnen in die Niederlande importiert. Unter Berücksichtigung der wieder exportierten Menge wurden 1,65 Millionen Tonnen Sojaschrot erzeugt. Daraus ergibt sich eine prozentuale Aufteilung von 75 % direkt importiertem Sojaschrot und 25 % Sojaschrot aus der niederländischen Verarbeitung [53]. Die länderspezifischen Importmengen und -anteile sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 12: Mengen und Anteile des im Jahr 2013 importierten Sojaschrotes in die Niederlande [53]

Länder	Sojaschrotmenge	
	in t	in %
Argentinien	1.208.880	24,2
Brasilien	3.436.985	68,9
Sonstige	341.780	6,9
Gesamt	4.987.645	100

Tabelle 13: Mengen und Anteile der im Jahr 2013 importierten Sojabohnen in die Niederlande [53]

Länder	Menge an Sojabohnen	
	in t	in %
Brasilien	1.237.785	37,4
Kanada	380.034	11,5
Paraguay	369.590	11,2
Uruguay	186.668	32,2
USA	1.066.438	5,6
Sonstige	69.372	2,1
Gesamt	3.309.886	100

Der **THG-Emissionsfaktor** des aufgeführten Sojaschrotmixes wurde mithilfe der Software GaBi ts [112] und der ecoinvent-Datenbank [111] berechnet.

Für den **Anbau der Sojabohnen** in Südamerika wurde ein brasilianischer Datensatz verwendet. Der Sojaanbau in Nordamerika wurde mit einem US-Datensatz abgebildet [111]. Beiden Datensätzen ist ein länderspezifischer Anbau unterstellt, der in SUTTER (2006) [110] ausführlich dargelegt ist. Sie beziehen sich auf die Erzeugung von 1 kg Sojabohnen und umfassen die Bereitstellung der erforderlichen Menge an Saatgut, Dünge- und Pflanzenschutzmittel sowie Maschinen und Arbeitsgeräten. Neben den notwendigen Transporten fließen sowohl die Flächennutzung als auch **mögliche Landnutzungsänderungen** mit in die Bilanzierung ein. Der Sojaanbau in den USA findet auf 100 % Ackerland statt, wohingegen für den Anbau in Brasilien neben bereits existierenden Ackerflächen auch die Umwandlung von Buschland sowie die Rodung von Regenwald unterstellt wird [110]. Grund für diese Annahme ist der deutliche Flächenanstieg für den Sojaanbau in Brasilien um durchschnittlich 1,7 Mio. Hektar pro Jahr in den Jahren 2000 bis 2004. Unter Berücksichtigung des Flächenanstiegs und der Flächenveränderung (Umbruch von Buschland sowie Rodung von Regenwald) legt Sutter (2006) für den Anbau von 1 kg Sojabohnen in Brasilien folgende Flächennutzung zugrunde:

- 91,6 % bereits existierende Ackerfläche,
- 5,2 % Umwandlung von Buschland,
- 3,2 % Ackerfläche nach Regenwaldrodung.

Somit beinhaltet der **Datensatz für den brasilianischen Sojaanbau eine anteilige Landnutzungsänderung von 8,4 %**. Als vergleichende Referenz wurden ergänzende Bilanzen erstellt, in denen die Landnutzungsänderungen in Südamerika vollständig ausgeschlossen wurden.

Weiterhin wurden für den dargestellten Importmix alle notwendigen **Transportprozesse** bis zum Regionallager berücksichtigt. Dabei wird der Transport von Nord- bzw. Südame-

rika nach Europa mit dem Seefrachter durchgeführt. Der Transport der Sojabohnen sowie des Sojaschrots erfolgt sowohl in Nord- und Südamerika als auch in Europa mit dem Binnenseefrachter, mit der Eisenbahn und mit dem Lkw, wobei dem Lkw-Transport Abgasstufe EURO 3 unterstellt wurde. In Summe aller Transportprozesse sind die Aufwendungen der nach Europa importierten Sojabohne höher als die des direkt erzeugten Sojaschrotes.

Die Datensätze für die **Verarbeitung** der Sojabohnen in Nord- und Südamerika sowie in Europa unterscheiden sich vorwiegend in dem landesspezifischen Strommix sowie in der Art der erzeugten Prozessenergie. Während die erforderliche Prozesswärme in Nord- und Südamerika vorwiegend aus Erdgas bereitgestellt wird, hat die Verarbeitung in Europa einen höheren Anteil mit Heizöl betriebener Feuerungen. Die Ausbeute an Sojaschrot liegt in den betrachteten Ölmühlen zwischen 0,75 und 0,82 kg kg⁻¹ Sojabohnen. Anders als bei der Verarbeitung von Rapssaat ist bei der Verarbeitung der Sojabohnen das Zielprodukt das Extraktionsschrot mit dem Koppelprodukt Sojaöl. Die erforderlichen Energieaufwendungen und entstehenden Umweltlasten müssen folglich zwischen dem Ziel- und dem Koppelprodukt aufgeteilt werden. Die Anwendung einer Energie-Allokation ist aus den in Abschnitt 3.4.2.4 aufgeführten Gründen auch an dieser Stelle nicht zielführend. Bei einer Allokation nach dem ökonomischen Wert würden die Ergebnisse durch die marktwirtschaftlichen Strukturen der jeweiligen Verarbeitungsländer maßgeblich beeinflusst werden. Wird eine Allokation nach Masse durchgeführt, wird dem Sojaschrot (Zielprodukt) mit 75 bis 82 % die Hauptlast und dem Sojaöl eine entsprechende Teillast zugewiesen. Aus diesen Gründen wird der Bilanzierung des Sojaextraktionsschrotes eine Allokation nach Masse zugrunde gelegt.

Auf Basis der aufgeführten Festlegungen ergibt sich für den dargelegten importierten Sojaschrotmix ein THG-Emissionsfaktor als CO₂-Äquivalente von 1,73 kg kg⁻¹. Schließt man auch anteilige Landnutzungsänderungen beim Sojaanbau in Südamerika aus, liegt der THG-Emissionsfaktor bei 1,1 kg kg⁻¹. Die THG-Emissionen, die mit dem Transport verbunden sind, haben neben dem Anbau der Sojabohne den größten Anteil an den Gesamtemissionen und liegen bei 0,4 kg kg⁻¹.

4.6.3 Ökonomische Bewertung der Koppelprodukte

Die Erlöse von Koppelprodukten werden bei der ökonomischen Bewertung den Produktkosten des Hauptproduktes gegengerechnet. Im Falle der Rapsölkraftstoffproduktion ist dies der Rapspresskuchen. Zur Bewertung des Koppelproduktes werden die tatsächlich am Markt erzielten Preise angesetzt. Bei Ölmühle Y konnte beispielsweise im Betrachtungsjahr 2013/14 ein Preis von 27 € dt⁻¹ für den Rapspresskuchen erzielt werden.

4.7 Weitere Festlegungen

Der Rapsanbau hat insbesondere für den Winterweizenanbau zahlreiche positive Vorfruchteffekte. Hierbei ist vor allem die höhere Effizienz von N-Mineraldünger bedeutsam

[28]. Zur Berechnung der Gutschriften für den Vorfruchteffekt von Raps werden Ergebnisse aus den Untersuchungen von KAGE und PAHLMANN (2013) [72] verwendet. Auf Grundlage der Daten eines Fruchtfolgeversuches wurden dabei $7,3 \text{ g MJ}^{-1}$ geringere spezifische THG-Emissionen für die Ethanolproduktion aus Rapsweizen im Vergleich zur Ethanolproduktion aus Stoppelweizen berechnet. Diese THG-Einsparung kann als Vorfruchtwert dem Produktsystem Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung gutgeschrieben werden. Bei der ökonomischen Bewertung werden keine Vorfruchteffekte berücksichtigt.

4.8 Indikatorenberechnung

Schwerpunkt der Untersuchungen ist die Auswertung der Wirkungskategorie Globale Erwärmung ohne biogenes CO_2 . Die Berechnung des Wirkungsindikators CO_2 -Äquivalente in kg FE^{-1} wird nach Empfehlung des ILCD [47] anhand des Charakterisierungsmodells des IPCC (2007) [68] durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.4.4.1). Die Auswertung der weiteren in Abschnitt 3.4.4.1 aufgeführten Wirkungskategorien ist für das nachfolgend beschriebene Bilanzierungs- und Bewertungsmodell ebenfalls möglich.

4.9 Bilanzierungs- und Bewertungsmodelle der ökologischen Analyse

Unter Verwendung der LCA-Software GaBi ts sowie der Ökobilanzdatenbanken GaBi ts Professional (Stand Oktober 2015) und ecoinvent v2.2 (Stand Oktober 2015) wurden jeweils 16 einzelne Modelle für die Rapserzeugung in den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben und den Transport der Rapssaat zur dezentralen Ölmühle sowie drei einzelne Modelle für die Rapsölkraftstoffproduktion in den dezentralen Ölmühlen erstellt.

4.9.1 Modellierung der Rapserzeugung

Abbildung 8 zeigt einen GaBi-Plan mit dem Modell zur Rapserzeugung am Beispiel des LVFZ Almesbach im Erntejahr 2013. Die Modelle der Rapserzeugung haben jeweils einen zentralen Prozess mit einer eindeutigen Bezeichnung: [A] Rapssaat konventionell, ab Feld_Betriebsname_Erntejahr.

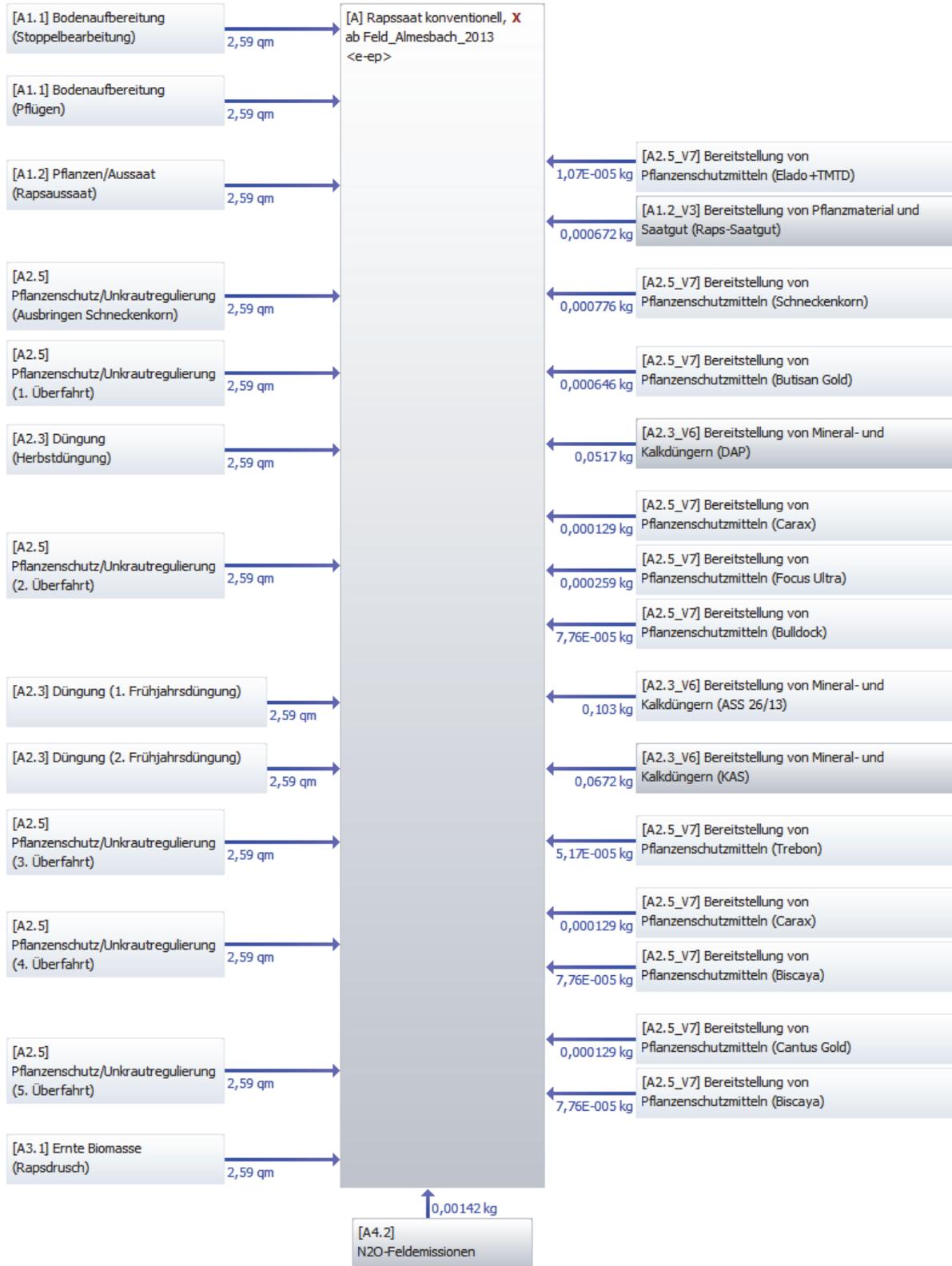


Abbildung 8: GaBi-Bilanzierungsmodell für die Rapserzeugung am Beispiel des LVFZ Almesbach für das Erntejahr 2013

Der zentrale Prozess wird auf 1 kg Rapssaat fixiert. Auf der linken Seite des Modells fließen die Teilpläne der einzelnen Arbeitsverfahren mit den entsprechenden Bezugsgrößen ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ geerntete Rapssaat) als Input in den zentralen Prozess ein. Innerhalb der Teilpläne der einzelnen Arbeitsverfahren fließen die zugeordneten Vorleistungsprozesse in kg ha^{-1} bzw. $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ als Input in den entsprechenden Arbeitsprozess ein. Am unteren Rand des Modells fließt der Teilplan für die N_2O -Feldemissionen mit der entsprechenden Bezugsgröße (kg kg^{-1} geerntete Rapssaat) als Input in den zentralen Prozess ein.

Abbildung 9 zeigt exemplarisch die Modellierung der Bodenaufbereitung (Stoppelbearbeitung) des LVFZ Almesbach. Auf der rechten Seite des Modells fließen die Teilpläne bzw. Prozesse der eingesetzten Betriebsmittel (Saatgut, chemische Pflanzenschutzmittel und Mineraldünger) mit den entsprechenden Bezugsgrößen (kg kg^{-1} geerntete Rapssaat) als Input in den zentralen Prozess ein.



Abbildung 9: GaBi-Bilanzierungsmodell für den Arbeitsprozess [A1.1] Bodenaufbereitung (Stoppelbearbeitung) des LVFZ Almesbach

Zur Ermittlung der Dieselmotorkraftstoffmenge für die einzelnen Arbeitsverfahren werden die betriebs- und verfahrensspezifischen Arbeitsbreiten, Motorleistungen (Schlepper bzw. Mähdrescher), Fassungsvermögen (Sämaschine, Düngerstreuer, Güllefass, Pflanzschutzgerät, Mähdrescher) sowie Ausbringungsmengen (Saatgut, Mineraldünger, Wirtschaftsdünger und Pflanzenschutzmittel) und Erntemengen je ha in den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben erhoben und mithilfe des KTBL-Feldarbeitsrechners [80] entsprechende Arbeitsverfahren und Maschinenkombinationen ausgewählt. Vereinfachend werden bei allen landwirtschaftlichen Praxisbetrieben mittlere Schlaggrößen von 5 ha und mittlere Transportentfernungen (Feld-Hof) von 5 km unterstellt.

Zur Bewertung der Vorleistungen im Herstellungsprozess von Maschinen, Geräten und Aggregaten wird die Berechnung eines Abschreibungsfaktors nach dem Prinzip der Absetzung für Abnutzungen (AfA) verwendet. Als Eingangsgrößen werden hierzu die tat-

sächliche Nutzungsgröße und das technische Nutzungspotenzial der verwendeten Maschinen, Geräte und Aggregate benötigt (siehe Formel (4.1)).

$$AfA = \frac{\textit{tatsächliche Nutzungsgröße}}{\textit{technisches Nutzungspotenzial}} \quad (4.1)$$

Die tatsächliche Nutzungsgröße in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion wird beispielsweise durch die Maschinenzeit in h ha^{-1} oder bei Anbau- bzw. Anhängergeräten durch die bearbeitete Fläche in ha , die ausgebrachte Mineraldüngermasse in t ha^{-1} oder das Wirtschaftsdüngervolumen in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ beschrieben. Die Maschinenzeiten für die einzelnen Arbeitsverfahren bei der Rapserzeugung werden beispielsweise aus entsprechenden Arbeitsverfahren und Maschinenkombinationen des KTBL-Feldarbeitsrechners entnommen (vergleichbar zur Ermittlung der Dieselkraftstoffmenge).

Die tatsächliche Nutzungsgröße bei der Biokraftstoffproduktion entspricht 1 kg verarbeiteten Rohstoff (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 Nutzungspotenzial gibt die Anzahl der möglichen Nutzungseinheiten bis zum Verschleiß einer Maschine, eines Gerätes oder Aggregates an. Angegeben wird die maschinenspezifische Nutzungseinheit beispielsweise in h , ha , t oder m^3 . Das technische Nutzungspotenzial für die zur Rapserzeugung eingesetzten Maschinen und Anbau- bzw. Anhängergeräte basiert auf KTBL-Daten [81].

Zur Berechnung des spezifischen Maschinen- und Geräteeinsatzes je funktioneller Einheit ist das spezifische Leergewicht mit dem Abschreibungsfaktor zu multiplizieren (siehe Formel (4.2)). Für die Bilanzierung der Rapsölkraftstoffproduktion werden dazu die betriebs- und verfahrensspezifischen Leergewichte der Maschinen, Anbau- bzw. Anhängergeräte und Aggregate in den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben bzw. dezentralen Ölmühlen erhoben.

$$\textit{spezifischer Maschinen- und Geräteeinsatz} = \textit{spezifisches Leergewicht} \cdot AfA \quad (4.2)$$

4.9.2 Modellierung der Transportprozesse

Abbildung 10 zeigt ein Modell zum Rapstransport am Beispiel des LVFZ Almesbach im Erntejahr 2013. Für die Modellierung der betriebspezifischen Transportprozesse wurden folgende Annahmen getroffen:

- Transport der Rapssaat ab Feldrand mit einem Traktor und Doppelzug zur Ölmühle,
- Gesamtstrecke (hin und zurück) ist betriebspezifisch und variiert von 10 bis 220 km,

- Ladekapazität der beiden Anhänger beträgt insgesamt 18 t,
- durchschnittliche Geschwindigkeit (Leer- und Vollfahrt) beträgt 30 km h^{-1} ,
- durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch (Leer- und Vollfahrt) beträgt 18 l h^{-1} ,
- Schmierölverbrauch beträgt 30 l bei einem Wechselintervall von 500 Betriebsstunden.



Abbildung 10: GaBi-Bilanzierungsmodell für den Rapstransport mit einem Traktor und Doppelzug am Beispiel des LVFZ Almesbach für das Erntejahr 2013

4.9.3 Modellierung der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

Für die drei untersuchten dezentralen Ölmühlen wurden jeweils einzelne Bilanzmodelle erstellt, die die Betrachtung unterschiedlicher Verarbeitungsjahre sowie die Auswertung verschiedener Szenarien ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden wesentliche Kenngrößen wie die Auslastung der Ölmühle, die Ölausbeute oder der Strombedarf als variable Parameter im Bilanzierungsmodell berücksichtigt. Den Basisvarianten sind die in Tabelle 6 aufgeführten Kenngrößen zugrunde gelegt. Weiterhin wurden alle Bilanzmodelle so angelegt, dass neben der Energie-Allokation der Rapspresskuchen auch mit der Gutschriftenmethode bewertet werden kann. Dies wurde über Schnittstellen realisiert, die wahlweise für die Anwendung der Allokation oder der Substitutionsmethode aktiviert werden können.

In Abbildung 11 ist das Modell für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion von Ölmühle Y exemplarisch dargestellt. Es zeigt sämtliche Verarbeitungsschritte der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion von der Anlieferung bis zur Lagerung des Reinöls bzw. für die Anwendung der Substitutionsmethode auch bis hin zur Lagerung des Presskuchens. Weiterhin veranschaulicht Abbildung 11, dass hier die Allokation nach Heizwert angewendet wird. Dies wird einerseits durch das „A“ für Allokation im Prozess „Schnittstelle Presse ALLOKATION“ deutlich und andererseits dadurch, dass der Stoffstrom „Rapspresskuchen“ mit 0 kg in die Schnittstelle „Gutschrift Eiweißfuttermittel“ geht.

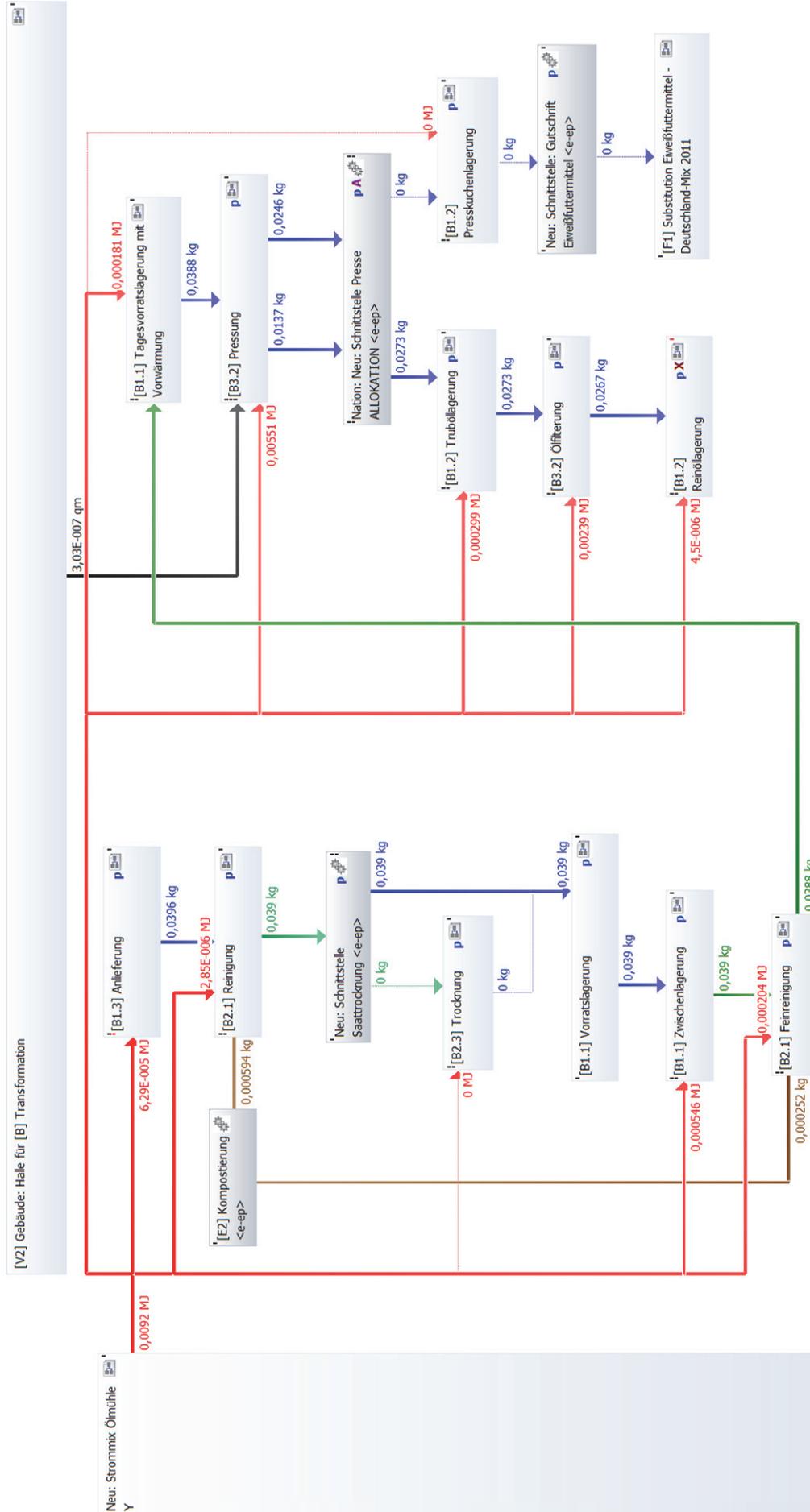


Abbildung 11: GaBi-Bilanzierungsmodell für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion in Ölmühle Y

Die Inputstoffe (Vorleistungen) der einzelnen Prozesse werden bis einschließlich Prozess [B3.2] Pressung auf die Menge der verarbeiteten Rapssaat bezogen. Die dem Pressvorgang anschließenden Prozesse (z. B. Trüböllagerung, Filterung) haben die Ölmenge bzw. die Menge an Rapspresskuchen als Bezugsgröße. Auf diese Weise lässt sich die Auslastung der Anlage über die verarbeitete Menge an Saat bzw. produzierte Menge an Öl abbilden.

Nachfolgend werden wichtige Festlegungen für die Modellierung der erforderlichen Vorleistungen sowie der technischen Trocknung [B2.3] vorgestellt:

[V1] Herstellung und Instandsetzung der Maschinen und Geräte

- Für die Modellierung der verfahrensrelevanten Apparate und Aggregate wurden sowohl Daten aus den Datenbanken der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts verwendet und zum Teil hinsichtlich der spezifischen Gegebenheiten abgewandelt, als auch eigene Datensätze erstellt. Die Materialgewichte für die einzelnen Apparate und Aggregate stammen bei Erstellung eigener Datensätze größtenteils aus eigenen Erhebungen nach [117]. Hierfür wurden so weit wie möglich die Emissionen der Materialgewinnungs-, Herstellungs-, Gebrauchs- und Entsorgungsphase („End-of-Life“), d. h. des gesamten Lebensweges berücksichtigt. Im Einzelnen wurden folgende Modellierungen durchgeführt:
- Die Darstellung der Hoch- und Flachsilos erfolgt auf Basis der jeweiligen ecoinvent-Prozesse, wobei beim Hochsilo die Kunststoffhülle durch eine aus rostfreiem Edelstahl ersetzt wurde.
- Die Pressung und Filtration wurden komplett neu modelliert, da in den zur Verfügung stehenden Datenbanken keine Datensätze für die Pressung vorhanden sind. Die Daten zum Gewicht und Materialverbrauch stammen aus eigenen Erhebungen [117]. Der Motor wurde auf Basis eines ecoinvent-Prozesses für einen vergleichbaren Elektromotor modelliert.
- Lüftungsgeräte und die Bereitstellung von Druckluft dagegen wurden aus der Datenbank ecoinvent v2.2 bzw. aus GaBi Professional in passender Dimensionierung unverändert übernommen.
- Lagertanks aus Stahl bzw. rostfreiem Edelstahl wurden anhand ihrer Dimensionen über den Materialverbrauch modelliert.

Die Abschreibung der Herstellung und Instandsetzung der erforderlichen Maschinen, Aggregate und Anlagen (mit Ausnahme der Langzeitlagerung im Hoch- bzw. Flachsilo) erfolgt nach Formel (4.1) und Formel (4.2). Bei der Modellierung der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion wird das technische Nutzungspotenzial durch die Menge Rapssaat angegeben, die innerhalb des spezifischen Abschreibungszeitraumes (z. B. 14 Jahre) theoretisch verarbeitet werden kann. Die tatsächliche Nutzungsgröße entspricht der Menge an Saat, die unter Berücksichtigung der Auslastung real verarbeitet wurde.

[V2] Herstellung und Instandsetzung von Gebäuden

Die Halle der Ölmühle wurde jeweils mithilfe landwirtschaftlicher Gebäude aus den Datenbanken modelliert. Die Abschreibung der Herstellung und Instandsetzung der Halle erfolgt analog zu den Hoch- und Flachsilos linear über 14 Jahre auf Basis von [117].

[B.2.3] Technische Trocknung

Der Prozess der technischen Trocknung ist ein optionaler Prozess und von dem Wassergehalt der angelieferten Rapssaat abhängig. Für eine optimale Lagerung der Rapssaat und den nachfolgenden Pressvorgang wird ein Wassergehalt von durchschnittlich 7 % angestrebt. Die Datenaufnahme zu den jeweiligen Wassergehalten der in den untersuchten Ölmühlen verarbeiteten Rapssaat zeigt, dass eine technische Trocknung nur anteilig und in Ölmühle Y sogar überhaupt nicht erforderlich war (vgl. Tabelle 6). Aus diesem Grund wurde der Prozess [B2.3] Trocknung als optionaler Prozess modelliert, der über eine Schnittstelle angesteuert wird. Hier kann der Anteil der zu trocknenden Rapssaat in % als variabler Parameter eingegeben werden.

Im eigentlichen Trocknungsprozess wird die zu trocknende Masse bzw. die sich daraus ergebende zu evaporierende Wassermenge in Anlehnung an [62] nach Formel (4.3) und Formel (4.4) berechnet. Dabei sind die Ausgangsfeuchte w_1 und die Endfeuchte w_2 als variable Parameter modelliert.

$$m_2 = m_1 * \left[1 - \left(\frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$\text{zu evaporierende Wassermasse} = m_1 - m_2 \quad (4.4)$$

m_1 = Ausgangsmasse in kg

m_2 = Endmasse in kg

w_1 = Ausgangswassergehalt in %

w_2 : = Endwassergehalt in %

Die Trocknung der Rapssaat erfolgt in den drei untersuchten Ölmühlen durch eine heizölbetriebene Getreidetrocknung und wird durch einen entsprechenden Datensatz aus der ecoinvent Datenbank abgebildet. Der für den Trocknungsprozess erforderliche Heizölbedarf je Kilogramm evaporierten Wasserdampfes von 7 MJ unterer Heizwert (H_i) basiert auf einer umfassenden Literaturstudie bei landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen durch ecoinvent [111]. Für die Evaporation eines Kilogramms Wasserdampf in einer Trocknungsanlage für Rapssaat werden demnach 0,164 kg Heizöl benötigt.

4.10 Bilanzierungs- und Bewertungsmodelle der ökonomischen Analyse

Unter Verwendung von Microsoft-Excel[®] wurden jeweils 16 einzelne Modelle für die Rapserzeugung in den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben inklusive des Transports der Rapssaat zur dezentralen Ölmühle sowie ein Modell für die Rapsölkraftstoffproduktion in der dezentralen Ölmühle Y erstellt.

4.10.1 Rapserzeugung

Langfristig ist es bei der Rohstoffbereitstellung (= Produktion eines Agrar- bzw. Forststoffes bis Feldrand bzw. Waldweg, gegebenenfalls inklusive Transport zur Transformation) nötig, dass alle entstehenden Kosten von den Erlösen mindestens abgedeckt werden. Um dies in den ökonomischen Berechnungen abbilden zu können, werden stets die Vollkosten (K_{Gesamt}) inklusive der kalkulatorischen Kosten (Boden, Kapital, Arbeit) berücksichtigt [122].

Formel (4.5) zeigt die Summation der Kostenbestandteile in € je funktionelle Einheit FE.

$$K_{\text{Rapssaat (Gesamt)}} = K_{\text{Direkt}} + K_{\text{Arbeit}} + K_{\text{Gebäude}} + K_{\text{Fläche}} + K_{\text{Sonstige}} \quad (4.5)$$

$K_{\text{Rapssaat (Gesamt)}}$	=	<i>Vollkosten der Rapssaatbereitstellung in € FE⁻¹</i>
K_{Direkt}	=	<i>Direktkosten in € FE⁻¹</i>
K_{Arbeit}	=	<i>Arbeitserledigungskosten in € FE⁻¹</i>
$K_{\text{Gebäude}}$	=	<i>Gebäudekosten in € FE⁻¹</i>
$K_{\text{Fläche}}$	=	<i>Flächenkosten in € FE⁻¹</i>
K_{Sonstige}	=	<i>Sonstige Kosten in € FE⁻¹</i>

Die Betrachtung des Rapsanbaus findet zunächst in der Einheit € ha⁻¹ statt. Die Umrechnung auf die Einheit € kg⁻¹ Rapssaat erfolgt mit dem tatsächlichen Ernteertrag.

Im Folgenden werden die einzelnen Kostenarten erläutert:

Direktkosten

Die Direktkosten umfassen alle Kosten, die einem Betriebszweig direkt und verursachungsgemäß zugeordnet werden können, im Falle des Rapsanbaus: Saatgut, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel und Hagelversicherung. Für die Ermittlung des kalkulatorischen Zinsansatzes des Umlaufkapitals wird angenommen, dass das Umlaufkapital (= Direktkosten) durchschnittlich für ein halbes Jahr gebunden ist:

$$ZA_{Umlaufkapital} = \frac{DK}{2} \cdot Zins \quad (4.6)$$

$ZA_{Umlaufkapital}$	=	<i>Kalkulatorischer Zinsansatz für das Umlaufkapital in €/ha</i>
DK	=	<i>Summe der Direktkosten in €/ha</i>
$Zins$	=	<i>Zinssatz in %</i>

Arbeitserledigungskosten

Mit den Arbeitserledigungskosten werden alle Kosten erfasst, die durch den Einsatz von Maschinen in den Prozessen [A1] bis [A3] bzw. [T1.3] entstehen. Angaben zu den Arbeitsvorgängen und den eingesetzten Maschinen werden durch die Landwirte gemacht. Die Maschinenkosten hierfür sowie der Arbeitszeitbedarf werden mithilfe des Feldarbeitsrechners [80] ermittelt.

Der Arbeitszeitbedarf beinhaltet nicht nur die reine Arbeitszeit auf dem Feld, sondern auch evtl. Wartezeiten (z. B. bei der Ernte), Rüstzeit am Hof (Vorbereiten der Maschinen, Befüllen mit Saatgut etc.) sowie Wegezeiten zwischen Hof und Feld. Bei Transportvorgängen kommen Lade- und Entladezeiten hinzu. Für den Transport der Rapssaat zur Ölmühle wird bei der ökonomischen Berechnung davon ausgegangen, dass keine Leerfahrten stattfinden, also die Rückfahrt für andere Güter/Betriebsmittel genutzt werden kann.

Die Maschinenkosten setzen sich zusammen aus den fixen und variablen Maschinenkosten. Die fixen Maschinenkosten beinhalten die Abschreibungskosten der Maschinen, einen Zinsansatz bzw. Zinskosten, Kosten der technischen Überwachung, Kfz-Steuer, Versicherungskosten sowie Wartungskosten.

Die Abschreibungskosten werden beim KTBL-Feldarbeitsrechner [80] als leistungsabhängige und lineare Abschreibung kalkuliert und entsprechen dem anteiligen Wertverlust durch nutzungsbedingten Verschleiß. Als Restwert der Maschine nach Ablauf des technischen Nutzungspotenzials wird mit null angenommen. Beispielsweise werden für einen Schlepper 10.000 Stunden technisches Nutzungspotenzial angenommen. Benutzt man den Schlepper 1 Stunde für einen Prozess, so sind als Abschreibungskosten dem Prozess 0,01 % des Anschaffungswertes anzurechnen.

$$AL_{Anlagegut} = \frac{I_{Anlagegut}}{n} \quad (4.7)$$

$AL_{Anlagegut}$	=	<i>Leistungsabhängige Abschreibung eines Anlageguts in € je FE</i>
$I_{Anlagegut}$	=	<i>Investitionskosten eines Anlagegutes in €</i>
n	=	<i>Technisches Nutzungspotenzial in FE</i>

Die Berechnung der Zinskosten erfolgt beim KTBL-Feldarbeitsrechner [80] durch die Ermittlung der durchschnittlichen Kapitalbindung. Diese entspricht dem mittleren Zeitwert der Maschinen während ihrer Abschreibungsdauer. Es wird davon ausgegangen, dass der Restwert bei allen Maschinen gleich null ist. Daher ist zur Ermittlung des mittleren Zeitwerts der Anschaffungswert vereinfacht zu halbieren. Dieser wird mit dem angenommenen Zinssatz (4 %) multipliziert:

$$ZA_{Anlagegut} = \frac{I_{Anlagegut}}{2} \cdot Zins \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} ZA_{Anlagegut} &= \text{Kalkulatorischer Zinsansatz für das gebundene Kapital durch} \\ &\quad \text{Anlagegüter (Maschinen und Gebäude)} \\ I_{Anlagegut} &= \text{Investitionskosten eines Anlagegutes in €} \\ Zins &= \text{Zinssatz in \%} \end{aligned}$$

Folgende variablen Maschinenkosten werden von dem KTBL-Feldarbeitsrechner [80] direkt übernommen: Schmierstoff-, Betriebsmittel- und Reparaturkosten. Der Schmierstoffverbrauch wird mit 1 % des Treibstoffverbrauchs angesetzt. Der vom KTBL-Feldarbeitsrechner errechnete Treibstoffverbrauch (Diesel) wird mit einem Dieselpreis (Agrardiesel, netto¹) von 0,9 € l⁻¹ verrechnet.

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 Nutzungspotenzials:

$$AZ_{Anlagegut} = \frac{I_{Anlagegut}}{N} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} AZ_{Anlagegut} &= \text{Zeitabhängige Abschreibung eines Anlageguts in € pro Jahr} \\ I_{Anlagegut} &= \text{Investitionskosten eines Anlagegutes in €} \\ n &= \text{Wirtschaftliches Nutzungspotenzial in Jahre} \end{aligned}$$

Die Zinsberechnung erfolgt identisch zu den Zinskosten der Maschinen.

Die genannten Kostenarten werden den Prozessen des Produktsystems – gemäß der Systemdarstellung zur Bilanzierung von Umweltwirkungen – zugeordnet. Die Unterprozesse [A1] bis [A3] sind die tatsächlichen und kalkulatorischen Kosten der Rapssaatbe-

¹ Dieselpreis für den Einsatz in der Land- und Forstwirtschaft. Der angegebene Preis ist um die Steuerrückvergütung in Höhe von 21,48 Cent l⁻¹ vermindert und mehrwertsteuerbereinigt.

reitstellung. Die Unterprozesse umfassen die Bestandesbegründung [A1] (Boden, Aufbereitung und Aussaat), die Bestandesführung [A2] (Düngung, Pflanzenschutz) sowie die Ernte [A3]. Die Kosten der Prozesse [A1] und [A2] setzen sich aus den Direktkosten (Saatgut, Düngemittel, Pflanzenschutzmittel, Hagelversicherung und Zinsansatz für das Umlaufkapital), den Arbeitserledigungskosten (Personalaufwand, Maschinenkosten inklusive Kraftstoff und Betriebsmittel) und den Gebäudekosten zur Unterbringung der notwendigen Maschinen zusammen. Beim Prozess [A3] entstehen beim Rapsanbau nur Arbeitserledigungskosten und Gebäudekosten.

Die jährlichen Gebäudekosten werden auf die Prozesse [A1] bis [A3] anhand der Arbeitszeit der darin eingesetzten Maschinen aufgeteilt. Der Transport [T1.3] der Rapssaat zur Ölmühle berücksichtigt die dafür notwendigen Arbeitserledigungskosten. Die Distanz entspricht den Angaben der Landwirte.

Im Bereich des Anbaus der Rapssaat existieren Kosten und Leistungen, für die in der Systemdarstellung zur Bilanzierung von Umweltwirkungen keine Prozesse vorgesehen sind, da diese für die ökologische Bewertung nicht relevant sind. Diese werden der Prozessgruppe [A4] Nicht zuordenbare Prozesse zugeteilt. Es handelt sich dabei um Flächenkosten und sonstige Kosten. Da zwischen dem Rapsanbau (Landwirt) und der Transformation (Ölmühlenbetreiber) ein Markt herrscht, auf dem ein Preis gebildet wird, entsprechen die Kosten des Anbaus nicht den Erlösen der Landwirte für ihre Rapssaat ($Erlös_{Rapssaat}$). Diese Differenz ist der Unternehmergewinn der Landwirte ($UG_{Landwirt}$), der sowohl positiv (Gewinn) als auch negativ (Verlust) ausfallen kann. Es werden EU-Direktzahlungen (Betriebsprämien) berücksichtigt [6].

$$UG_{Landwirt} = Erlös_{Rapssaat} + Direktzahlungen - Kosten \quad (4.10)$$

Der Unternehmergewinn der Landwirte beim Rapsanbau ist ein Indikator dafür, ob es für einen Landwirt ökonomisch sinnvoll ist, Raps anzubauen. Diese Betrachtung findet isoliert und ohne Bewertung von Vorfruchteffekten statt. Außerdem dient der Unternehmergewinn des Landwirtes als volkswirtschaftliche Kennzahl zur Bewertung der regionalen Wertschöpfung.

4.10.2 Dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion

Im Folgenden werden die Berechnungen im Modell Rapsölproduktion, Prozess [B], näher erläutert.

Die Saatgutlagerung [B1] erfolgt bei Ölmühle Y extern. Es werden dementsprechend die tatsächlichen Kosten für diese Dienstleistung angesetzt.

Die Berechnung der Produktionskosten von [B3] erfolgt auf Vollkostenbasis inklusive der kalkulatorischen Kosten:

$$K_{Rapsöl} = (K_K + K_V + K_B + K_{Sonstige}) - E_{KP} \quad (4.11)$$

$K_{Rapsöl}$ = Spezifische Kosten der Rapsölproduktion in ct FE^{-1}

E_{RP} = Erlöse in ct FE^{-1} (Erlöse Rapspresskuchen)

K_K = Kapitalkosten in ct FE^{-1} (Abschreibung, Zins)

K_V = Verbrauchsgebundene Kosten in ct FE^{-1} (Rapssaat, Strom)

K_B = Betriebsgebundene Kosten in ct FE^{-1} (Personal, Instandhaltung/Wartung)

$K_{Sonstiges}$ = Sonstige Kosten in ct FE^{-1} (Versicherungen etc.)

Die Kosten der Ölmühle 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. Die Investitionen für Gebäude- und Lagerungsanlagen sowie Erschließung und Installationsarbeiten werden linear und zeitabhängig gemäß Formel (4.9) abgeschrieben. Alle anderen Investitionen werden linear und leistungsabhängig abgeschrieben (siehe Formel (4.7)). Für das Grundstück wird keine Abschreibung angesetzt, sondern nur der Zinsansatz. Die Höhe der Investitionen entspricht den Angaben der Ölmühlenbetreiber. Ergänzungen hierzu sowie die Nutzungspotenziale stammen aus Kalkulationsdaten [117].

Die **verbrauchsgebundenen Kosten** setzen sich aus dem Einkauf der Rapssaat und den Stromkosten zusammen. Die Kosten für die Rapssaat ergeben sich aus den Einkaufspreisen der Ölmühlen sowie der verarbeiteten Menge. Die benötigte Strommenge wird von den Ölmühlen angegeben und mit einem tatsächlichen oder angesetzten Strompreis verrechnet.

Betriebsgebundene Kosten beschreiben Personal-, Wartungs- und Instandsetzungskosten.

Die **sonstigen Kosten** umfassen z. B. Kosten für Versicherungen. Die Personalkosten für den Betrieb der Ölmühle werden nach den Angaben der Ölmüller angesetzt. Kosten für Wartung und Instandhaltung werden nach Kalkulationsdaten ermittelt [117].

Die Erlöse des **Koppelprodukts Rapspresskuchen** werden von den Kosten der Ölge-
winnung abgezogen. Dadurch entstehen die spezifischen Kosten des Rapsöls.

Die **Produktionskosten von Rapsöl** dienen als Eingangsgröße für die volkswirtschaftliche Bewertung zur Berechnung der THG-Vermeidungskosten sowie des Unternehmergewinns.

Der **Unternehmergewinn** der Ölmühle ($UG_{Ölmühle}$) dient als volkswirtschaftliche Kennzahl zur Bewertung der regionalen Wertschöpfung. Er ergibt sich aus der Differenz der Erlöse des Rapsöls und der spezifischen Produktkosten des Rapsöls.

Der Einkaufspreis der Rapssaat sowie der Verkaufspreis des Rapsöls werden von den Ölmühlen abgefragt. Der Einkaufspreis der Rapssaat dient gleichzeitig als Verkaufspreis der Landwirte frei Ölmühle, gegebenenfalls abzüglich eingerechneter Kosten z. B. für Lagerung, Analysen.

Alle Kosten und Erlöse werden in € MJ⁻¹ dargestellt.

Aus der Zusammenführung der Ergebnisse der Ökobilanzierung und der ökonomischen Bilanzierung für die Rapsölproduktion sowie der Ergebnisse aus der Bewertung des Referenzsystems Diesel werden die **THG-Vermeidungskosten** berechnet.

$$VK_{CO_2-\ddot{A}q} = \frac{K_{Raps\ddot{o}lkraftstoff} - K_{Dieselkraftstoff}}{UW_{CO_2-\ddot{A}q,Dieseldkraftstoff} - UW_{CO_2-\ddot{A}q,Raps\ddot{o}lkraftstoff}} \quad (4.12)$$

$VK_{CO_2-\ddot{A}q}$	=	<i>THG-Vermeidungskosten in € t CO₂-Äq⁻¹</i>
$K_{Raps\ddot{o}lkraftstoff}$	=	<i>Spezifische Kosten des Produktsystems Rapsölkraftstoff in € MJ⁻¹</i>
$K_{Dieselkraftstoff}$	=	<i>Spezifische Kosten des Referenzsystems Dieseldkraftstoff in € MJ⁻¹</i>
$UW_{CO_2-\ddot{A}q,Dieseldkraftstoff}$	=	<i>THG-Emissionen des Produktsystems in t MJ⁻¹</i>
$UW_{CO_2-\ddot{A}q,Raps\ddot{o}lkraftstoff}$	=	<i>THG-Emissionen des Referenzsystems in t MJ⁻¹</i>

Als Referenzsystem für Rapsölkraftstoff dient fossiler Dieseldkraftstoff. Als Energiegestehungskosten wird hierfür der Preis für Dieseldkraftstoff bei Abgabe von mindestens 100 hl an den Großhandel frei Zielort gewählt (einschließlich Energiesteuer und Erdölbevorratungsbeitrag (EBV), ohne Mehrwertsteuer). Dieser Wert lag im ersten Halbjahr 2015 bei 93 € hl⁻¹ [104]. Die Energiesteuer muss hiervon noch abgezogen werden, die aktuell laut Energiesteuergesetz (EnergieStG) 47,04 ct l⁻¹ Diesel beträgt. Die Kosten für fossilen Dieseldkraftstoff betragen damit 45,96 ct l⁻¹. Je MJ Dieseldkraftstoff ergeben sich mit den festgelegten Kraftstoffparametern in Tabelle 1 Kosten in Höhe von 0,0128 €. Die THG-Emissionen als CO₂-Äquivalente für fossilen Dieseldkraftstoff betragen 0,0838 kg MJ⁻¹ [122].

Der Anbau von Rapssaat und die dezentrale Rapsverarbeitung können für die Region eine Wertschöpfung bedeuten. Als Kennzahl wird die Summe der Unternehmergewinne des Rapsanbaus und der Rapsölproduktion bzw. der Ölmühle herangezogen.

Der Brutto-Beschäftigungseffekt durch den Betrieb einer dezentralen Ölmühle wird ausgewiesen. Hierfür werden für die Arbeitszeiten auf den landwirtschaftlichen Betrieben für die Rapsbereitstellung inklusive des Transports zur Ölmühle sowie die notwendige Arbeitszeit in der Ölmühle summiert. Die Ergebnisse werden in Arbeitskraft pro Jahr (AK) angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass 1 AK 1.840 AKh (Arbeitskraftstunden) pro Jahr entspricht.

5 Ergebnisse

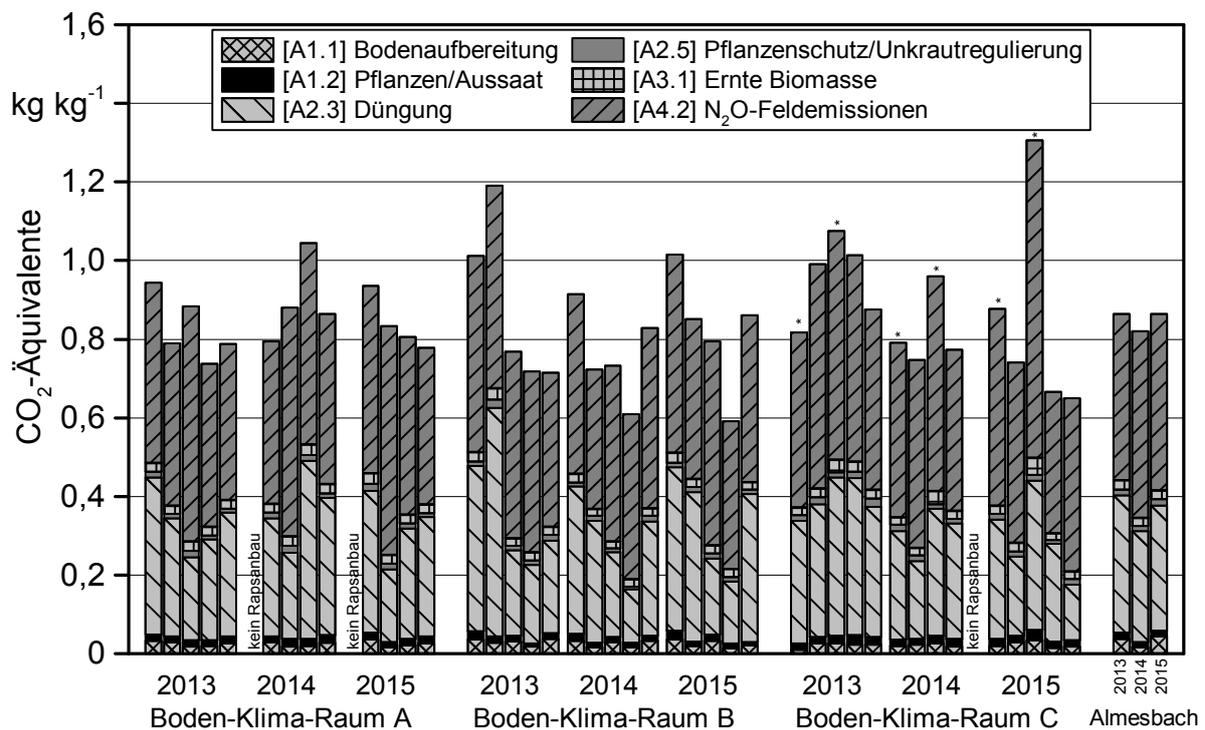
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion ausführlich dargelegt.

5.1 Ökologische und ökonomische Wirkungen der Rapserzeugung

5.1.1 Ökologische Wirkungen

Als ökologische Wirkung der Rapserzeugung wird im Folgenden ausschließlich auf die Wirkungskategorie Klimawandel eingegangen. Dazu werden die THG-Emissionen von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) berücksichtigt und als CO₂-Äquivalente dargestellt.

Abbildung 12 gibt einen Überblick zu den THG-Emissionen der Rapserzeugung in den 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetrieben gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (BKR) sowie im LVFZ Almesbach jeweils für die Erntejahre 2013 bis 2015.



* Betriebe liegen im nördlichen Teil des Boden-Klima-Raums B an der Grenze zu C (vgl. Unterkapitel 4.5)

Abbildung 12: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente gegliedert nach Boden-Klima-Räumen in den Erntejahren 2013 bis 2015

Hierbei wird deutlich, dass die THG-Emissionen selbst bei Vernachlässigung der beiden Extremwerte von 1,306 kg kg⁻¹ Rapssaat in Betrieb 3 der BKR C im Erntejahr 2015 (starker Ernteausschlag auf sandigem Schlag durch Trockenheit) und 1,190 kg kg⁻¹ Rapssaat in Betrieb 2 der BKR B im Erntejahr 2013 (40 % Hagelschaden) eine große Spannweite aufweisen (0,591 kg kg⁻¹ in Betrieb 4 der BKR B im Erntejahr 2015 bis 1,075 kg kg⁻¹ in Betrieb 3 der BKR C im Erntejahr 2013). Tabelle 14 zeigt, dass sich diese Spannweite auch bei der Betrachtung der einzelbetrieblichen Mittelwerte aus den Erntejahren 2013 bis 2015 nur geringfügig vermindert (0,640 bis 1,114 kg kg⁻¹). Darüber hinaus weisen die landwirtschaftlichen Praxisbetriebe auch innerhalb der Boden-Klima-Räume mit 0,640 bis 0,980 kg kg⁻¹ in BKR B und 0,762 bis 1,114 kg kg⁻¹ in BKR C zum Teil hohe Spannweiten auf. Hieraus ergeben sich Ansätze für das Aufzeigen einzelbetrieblicher THG-Optimierungspotenziale der Rapsproduktion.

Tabelle 14: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapsproduktion als CO₂-Äquivalente sowie relativer Anteil der bilanzierten Prozesse (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)

	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹	Anteil der bilanzierten Prozesse in %					
		[A1.1]	[A1.2]	[A2.3]	[A2.5]	[A3.1]	[A4.2]
Boden-Klima-Raum A							
Betrieb 1	0,943	3,4	1,8	42,5	1,5	2,4	48,4
Betrieb 2	0,840	3,8	1,8	38,1	1,8	2,8	51,7
Betrieb 3	0,866	2,0	1,9	23,6	1,9	2,8	67,8
Betrieb 4	0,862	2,4	1,8	38,3	1,5	2,8	53,2
Betrieb 5	0,810	3,3	2,3	39,8	1,3	2,8	50,5
Boden-Klima-Raum B							
Betrieb 1	0,980	3,6	2,1	41,2	1,0	2,5	49,6
Betrieb 2	0,922	2,3	1,4	46,0	1,7	2,4	46,2
Betrieb 3	0,765	4,0	2,0	27,3	1,5	2,5	62,7
Betrieb 4	0,640	2,5	1,7	25,7	1,5	3,3	65,3
Betrieb 5	0,801	3,8	1,5	37,5	1,7	2,5	53,0
Boden-Klima-Raum C							
Betrieb 1*	0,829	1,9	2,0	35,9	1,8	2,5	55,9
Betrieb 2	0,826	3,2	1,8	29,8	1,8	2,7	60,7
Betrieb 3*	1,114	2,6	2,0	33,0	1,2	3,3	57,9
Betrieb 4	0,817	2,3	2,4	38,4	1,5	2,7	52,7
Betrieb 5	0,762	2,6	2,3	31,1	2,3	2,8	58,9
LVFZ Almesbach	0,850	3,9	1,7	37,2	1,6	2,8	52,8

* Betriebe liegen im nördlichen Teil des Boden-Klima-Raums B an der Grenze zu C (vgl. Unterkapitel 4.5)

Zur Identifikation wichtiger Einflussgrößen werden die THG-Emissionen in die Prozesse [A1.1] Bodenaufbereitung, [A1.2] Pflanzen/Aussaart, [A2.3] Düngung, [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung, [A3.1] Ernte Biomasse sowie [A4.2] N₂O-Feldemissionen unterteilt. Hierbei wird deutlich, dass die Düngung (vor allem die Bereitstellung von N-Mineraldünger) und die aus der N-Düngung und den Ernte-Wurzelrückständen resultierenden N₂O-Feldemissionen wesentliche Prozesse für die THG-Bilanz der Rapserzeugung darstellen. Die Summe dieser beiden Prozesse beträgt in allen untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetrieben rund 90 % der THG-Emissionen. Die Prozesse Bodenaufbereitung, Pflanzen/Aussaart, Pflanzenschutz und Unkrautregulierung sowie Ernte Biomasse spielen mit einem Anteil von zusammen rund 10 % an den THG-Emissionen eine untergeordnete Rolle für die THG-Bilanz der Rapserzeugung (vgl. Tabelle 14).

Demnach ist für die Minderung der THG-Emissionen in der Rapserzeugung ein auf den Standort (vor allem das Ertragspotenzial) und den Betriebstyp angepasstes Düngungsmanagement von entscheidender Bedeutung. Aus ackerbaulicher Sicht ist dabei die unterschiedliche N-Effizienz von Düngerarten zu beachten (Mineraldünger, Wirtschaftsdünger (z. B. Gülle) bzw. andere organische Dünger (z. B. Gärrest). Im Vergleich zu Mineraldünger ist die N-Effizienz von Gülle bzw. Gärrest in der Regel geringer, da gasförmige N-Verluste in Form von Ammoniak direkt bei der Ausbringung auftreten und mit einer verstärkten Verlagerung von Nitrat in tiefere Bodenschichten und in das Grundwasser gerechnet werden muss. Doch auch N-Mineraldünger unterscheiden sich in ihrer Wirkungsgeschwindigkeit wesentlich durch die enthaltenen mineralischen Stickstoffformen. Grundsätzlich wird zwischen Carbamid-N (Harnstoff), Ammonium-N und Nitrat-N unterschieden. Nitrat-N wird in hohen Mengen direkt von den Pflanzen aufgenommen, während Ammonium-N nur in geringen Mengen direkt von den Pflanzen aufgenommen wird. Der größte Teil von Ammonium-N wird durch Bodenmikroben in Nitrat-N umgewandelt. Ein weiterer Teil von Ammonium-N wird durch Bodenmikroben in der organischen Bodensubstanz immobilisiert. Carbamid-N (Harnstoff) muss durch Bodenenzyme zu Ammonium-N hydrolysiert werden, was je nach Temperatur einen Tag bis eine Woche dauern kann.

Auch in Bezug auf die THG-Bilanzierung spielen die verschiedenen Düngerarten und N-Mineraldüngerformen eine wesentliche Rolle. Anders als Mineraldünger wird die Bereitstellung von betriebseigenem Wirtschaftsdünger bzw. anderen organischen Dünger bei der THG-Bilanz in der Regel mit null bewertet. Bei der Bewertung der verschiedenen N-Mineraldünger spielt der Herstellungsprozess die entscheidende Rolle. Bei der Bereitstellung mineralischer Ammonium- und Nitratdünger werden große Mengen an Energie verbraucht (Haber-Bosch-Verfahren). Die THG-Bilanz nitrathaltiger Mineraldünger wird darüber hinaus durch N₂O-Emissionen bei der Salpetersäureproduktion belastet. Bis auf wenige Ausnahmen (Harnstoff) enthalten Mineraldünger jedoch meist mehrere Stickstoffformen.

Abbildung 13 zeigt die relativen Anteile der verwendeten N-Mineraldünger bezogen auf die eingesetzte N-Menge in den 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetrieben sowie im LVFZ Almesbach. Hierbei zeigt sich, dass knapp die Hälfte des N-Mineraldüngers für die Rapserzeugung in Form von Ammonsulfatsalpeter (ASS) ausgebracht

wird. Der Grund hierfür dürfte in erster Linie der hohe Schwefelgehalt (13 % S) des ASS sein, da Raps einen vergleichsweise hohen Schwefelbedarf hat.

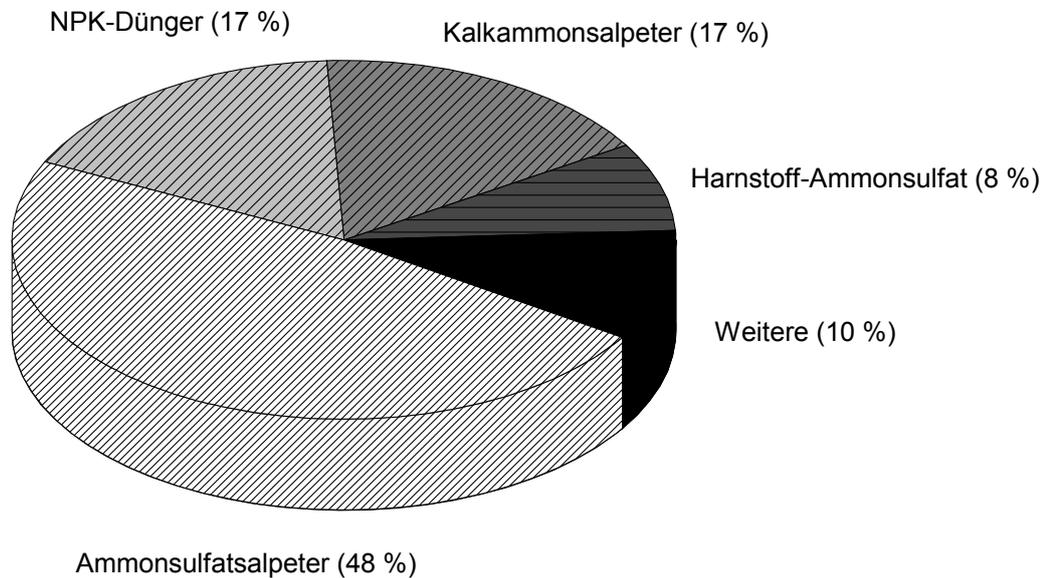


Abbildung 13: Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger bezogen auf die eingesetzte N-Menge in den 15 landwirtschaftlichen Praxisbetrieben sowie im LVFZ Almesbach

Sowohl der Rapsertrag als auch die Rapssaatqualität werden in entscheidendem Maße durch die Schwefelversorgung bestimmt. Für die THG-Bilanzierung sind jedoch die beiden im ASS enthaltenen Stickstoffformen Ammonium-N und Nitrat-N entscheidend. Bei einem Gesamt-N-Gehalt von 26 % wirkt sich der vergleichsweise geringe Nitrat-N-Gehalt von 7 % positiv auf die THG-Bilanz des ASS aus. Im Vergleich dazu wirkt sich die Zusammensetzung des Stickstoffs in den beiden anderen häufig verwendeten Mineraldüngern Kalkammonsalpeter (KAS) und NPK-Dünger ungünstig auf die THG-Bilanz aus. Im KAS liegt bei einem Gesamt-N-Gehalt von 27 % die Hälfte als Nitrat-N vor. Die verwendeten NPK-Dünger weisen Gesamt-N-Gehalte von 13 bis 21 % auf, wobei meist die Hälfte als Nitrat-N vorliegt. Die THG-Bilanz von NPK-Dünger wird zudem durch die Bewertung der Nährstoffe P_2O_5 und K_2O zusätzlich belastet. In den drei untersuchten Erntejahren wurde in den Praxisbetrieben zunehmend Harnstoff-Ammonsulfat verwendet (4 % im Erntejahr 2013, 8 % im Erntejahr 2014 und 11 % im Erntejahr 2015). Harnstoff-Ammonsulfat ist eine Kombination aus Carbamid- und Ammoniumstickstoff, wodurch die THG-Emissionen bei der Herstellung vergleichsweise gering sind. Zum Teil wird Harnstoff-Ammonsulfat auch als stabilisierter N-Dünger angeboten. Hierdurch kann die Verlagerung oder Auswaschung von Nitrat reduziert und die N-Effizienz erhöht werden. Der Einsatz weiterer N-Mineraldünger wie Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) (7 %),

Harnstoff (3 %) und Diammonphosphat (DAP) (1 %) in den untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetrieben bzw. im LVFZ Almesbach zur Rapserzeugung ist derzeit gering.

Im Folgenden werden anhand von Daten zum Rapsertrag und der N-Düngung in den 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetrieben erste regionalspezifische THG-Minderungsstrategien für die Rapserzeugung abgeleitet. Tabelle 15 gibt einen Überblick zur einzelbetrieblichen N-Abfuhr (Rapsertrag nach Düngeverordnung [17]), N-Zufuhr (N-Düngung mit Mineral- und Wirtschaftsdünger) sowie N-Effizienz. Mithilfe der N-Effizienz kann eine Aussage über die Ertragswirksamkeit des gedüngten Stickstoffs getroffen werden.

Tabelle 15: Einzelbetriebliche N-Abfuhr, N-Zufuhr sowie N-Effizienz (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)

	N-Abfuhr* in kg ha ⁻¹	N-Zufuhr in kg ha ⁻¹	N-Zufuhr durch Wirtschafts- dünger in %	Mineraldünger in %	N-Effizienz in %
Boden-Klima-Raum A					
Betrieb 1	137	237	0	51 (NPK), 49 (ASS)	58
Betrieb 2	145	233	0	61 (ASS), 39 (AHL)	62
Betrieb 3	130	291	64	36 (ASS)	45
Betrieb 4	140	240	0	79 (ASS), 11 (KAS), 5 (Harnstoff), 4 (NPK)	58
Betrieb 5	137	205	0	59 (ASS), 41 (NPK)	67
Boden-Klima-Raum B					
Betrieb 1	137	250	28	72 (NPK)	55
Betrieb 2	142	214	4	47 (NPK), 36 (KAS), 13 (AHL)	66
Betrieb 3	164	292	34	51 (ASS), 11 (AHL), 4 (NPK)	56
Betrieb 4	157	239	15	66 (Harnstoff-AS), 14 (ASS), 5 (AHL)	66
Betrieb 5	149	234	10	57 (ASS), 31 (KAS), 2 (Harnstoff)	64
Boden-Klima-Raum C					
Betrieb 1	138	294	45	29 (ASS), 27 (KAS)	47
Betrieb 2	156	297	26	42 (ASS), 19 (Harnstoff), 8 (KAS), 4 (Harnstoff- AS), 2 (AHL)	53
Betrieb 3	108	266	46	21 (ASS), 21 (KAS), 12 (NPK)	40
Betrieb 4	124	236	37	34 (KAS), 29 (ASS)	53
Betrieb 5	132	272	42	22 (Harnstoff-AS), 17 (ASS), 11 (NPK), 8 (AHL)	49
LVFZ Almesbach	137	228	19	44 (ASS), 28 (KAS), 10 (DAP)	60

* 3,35 kg N dt⁻¹ Frischmasse (91 % TS in der Frischmasse) [17]

Abbildung 14 zeigt, dass zwischen der N-Effizienz und dem Anteil von Wirtschaftsdünger an der N-Düngung ein deutlicher (linearer) Zusammenhang besteht ($R^2 = 0,72$). Demnach sinkt die N-Effizienz mit steigendem Anteil von Wirtschaftsdünger an der N-

Düngung. Abbildung 14 zeigt zudem, dass alle Betriebe in den Boden-Klima-Räumen B und C anteilig Wirtschaftsdünger zur N-Rapsdüngung verwenden. Allerdings sind die Anteile in den Betrieben des Boden-Klima-Raumes C (26 bis 46 %) aufgrund der regionaltypisch stärkeren Viehhaltung tendenziell höher als in den Betrieben im Boden-Klima-Raum B (4 bis 34 %). Die fünf Betriebe im Boden-Klima-Raum A befinden sich in der Münchner Schotterebene, einer Region, die zunehmend von reinen Ackerbaubetrieben dominiert wird. Folglich wird für die Rapsdüngung, mit Ausnahme eines Betriebes, ausschließlich Mineraldünger verwendet. Unabhängig vom Anteil der Wirtschaftsdünger an der N-Düngung wird deutlich, dass bei einigen der untersuchten Betriebe, vor allem bei den Betrieben unterhalb der Trendlinie zum Teil noch erheblicher Optimierungsbedarf hinsichtlich der N-Effizienz in der Rapsproduktion besteht.

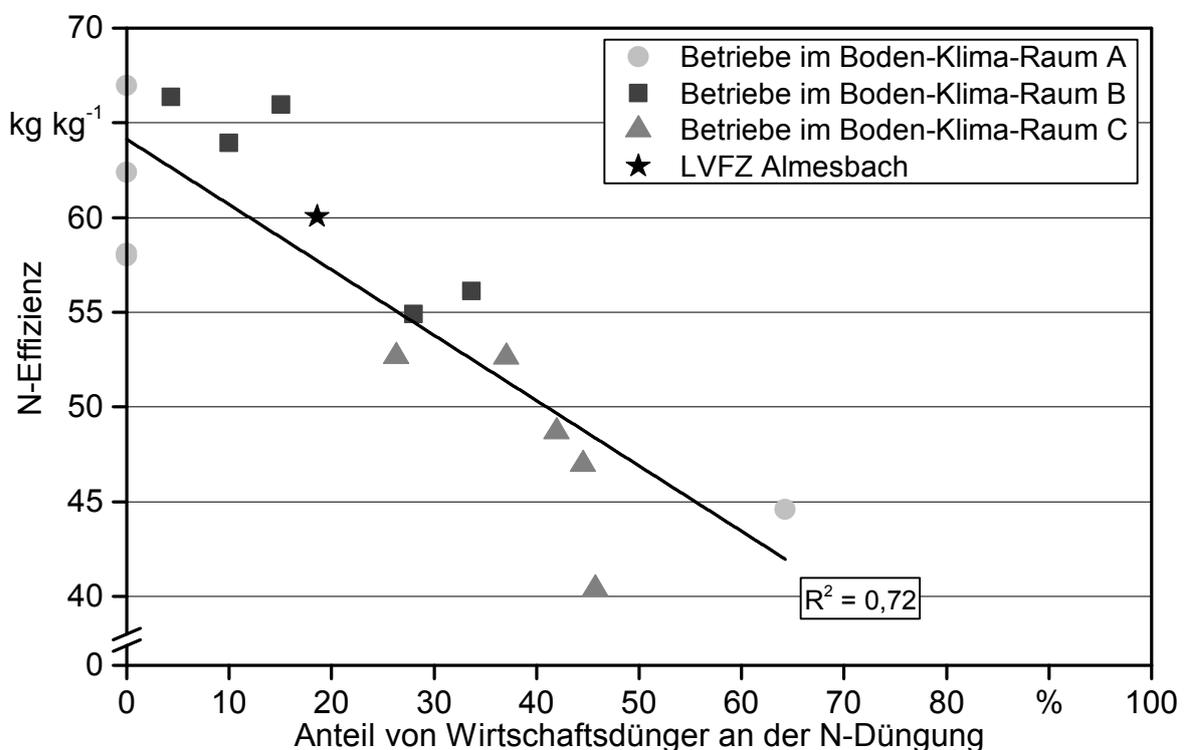


Abbildung 14: Einzelbetriebliche N-Effizienz der Rapsproduktion in Abhängigkeit des Anteils von Wirtschaftsdünger an der N-Düngung gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)

Abbildung 15 zeigt, dass mit steigender N-Effizienz die N₂O-Feldemissionen vermindert werden können. Dieser direkte Zusammenhang ist mit der gewählten Methode zur Berechnung der N₂O-Feldemissionen zu begründen (siehe Unterkapitel 4.4). Ein Methodenvergleich zwischen dem hier verwendeten IPCC-Ansatz und regionalspezifischen N₂O-Emissionsfaktoren nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) [107] wird in Unterkapitel 6.2 aufgezeigt. Wie Abbildung 15 zudem verdeutlicht, ist die N-Effizienz für die Entwicklung von THG-Minderungsstrategien in der Rapsproduktion nur bedingt aussagekräftig. Letztlich sind auch die verwendeten Mineraldünger mit ihren unterschiedlichen „THG-

Rucksäcken“ aus der Bereitstellung (siehe Abschnitt 5.3.1) entscheidend für die Gesamthöhe der THG-Emissionen in der Rapserzeugung.

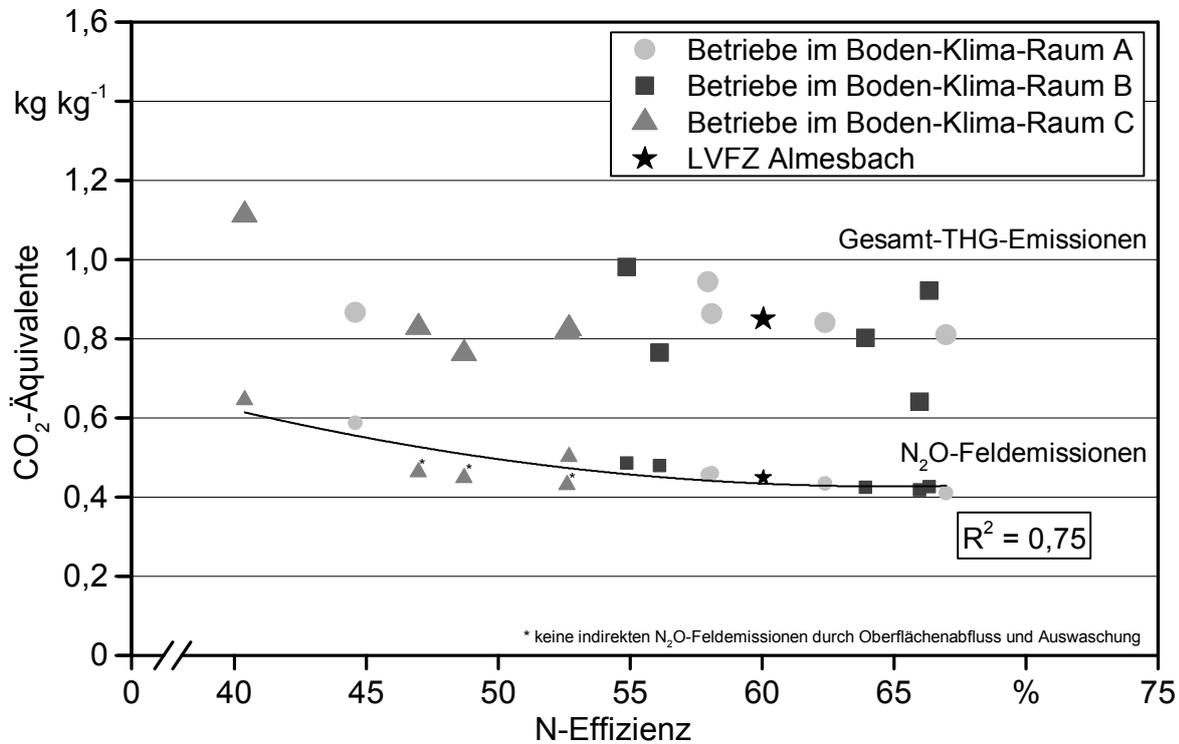


Abbildung 15: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente in Abhängigkeit der N-Effizienz gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)

Die vier Ackerbaubetriebe im Boden-Klima-Raum A verwenden eine vergleichbare Zusammensetzung der Mineraldüngung. Hierbei nimmt Ammonsulfatsalpeter (ASS) mit einem Anteil von 49 bis 79 % eine dominierende Rolle bei N-Rapsdüngung ein (Tabelle 15). Wie bereits beschrieben, wirkt sich der Einsatz von ASS aufgrund seiner vergleichsweise geringen THG-Belastung aus der Bereitstellung grundsätzlich positiv auf die THG-Bilanz aus. Allerdings kommt der Versorgung der Böden mit P und K in Ackerbaubetrieben aufgrund ihrer offenen Nährstoffkreisläufe eine besondere Bedeutung zu. In den vier untersuchten Ackerbaubetrieben werden dazu NPK-Dünger bzw. PK-Dünger verwendet. Hinsichtlich der THG-Emissionen in Tabelle 14 zeigen sich trotzdem deutliche Unterschiede zwischen den vier untersuchten Ackerbaubetrieben (0,810 bis 0,943 kg kg⁻¹). Der Grund hierfür ist die unterschiedliche N-Effizienz in den Betrieben (Tabelle 15). In deren Steigerung liegen demnach die größten THG-Minderungspotenziale für die Ackerbaubetriebe in der zum Boden-Klima-Raum A gehörenden Münchner Schotterebene. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen zur THG-Bilanz der Rapserzeugung kann für die Münchner Schotterebene sowohl aus ackerbaulicher als auch aus klimarelevanter Sicht das Düngungsmanagement von Betrieb 5 empfohlen werden. Hierbei konnte im Mittel der Erntejahre 2013 bis 2015 mit einer N-Zufuhr von 205 kg ha⁻¹ bestehend aus

59 % ASS und 41 % NPK eine N-Abfuhr von 137 kg ha^{-1} (entspricht einem Rapsertag von 41 dt ha^{-1}) erzielt werden. Als N-Düngung im Herbst werden standardmäßig rund 20 kg ha^{-1} ausgebracht.

Der Einsatz von Wirtschaftsdünger zur Rapsdüngung kann sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht sinnvoll sein. Die Gründe hierfür sind vielfältig und reichen von Kosteneinsparungen für Mineraldünger bis zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit. Voraussetzung für einen kostensparenden und umweltschonenden Einsatz von Wirtschaftsdünger ist dessen gezielte, d. h. bedarfsorientierte und verlustarme Ausbringung. Im Mittel der Erntejahre 2013 bis 2015 wurden in drei Viertel der untersuchten Betriebe Gülle oder Gärrest zur Rapsdüngung eingesetzt. Der Anteil bezogen auf die Gesamt-N-Düngung variiert dabei zwischen den Betrieben mit 4 bis 64 % sehr stark (Tabelle 15). Das entspricht einer N-Menge von 9 bis 187 kg ha^{-1} (ohne Abzug von Ausbringungsverlusten). Die Ausbringung erfolgt in der Regel (elf von zwölf Betrieben) vor der Aussaat. Dazu werden in drei Betrieben Systemtraktoren (Selbstfahrer mit Gülleaufbau) mit angebauten Gülleinjektoren bzw. Güllegrubber eingesetzt, wodurch die gasförmigen N-Verluste in Form von Ammoniak deutlich reduziert werden können. In den restlichen acht Betrieben wird die Gülle bzw. der Gärrest durch Pumptankwagen (PTW) mittels Breit- oder Exaktverteilers ausgebracht und anschließend durch einen zusätzlichen Arbeitsgang in den Boden eingearbeitet. In einem Betrieb im BKR C erfolgt die Güllegabe im Nachauflauf. Im Betrieb 3 der BKR A wird im Herbst, zusätzlich zur Düngung vor der Aussaat, zudem eine weitere Güllegabe im Nachauflauf ausgebracht. Eine Ausbringung von Gülle im Frühjahr ist in den untersuchten Betrieben bisher die Ausnahme (Betrieb 3 in BKR A sowie Betrieb 1 und z. T. Betrieb 5 in BKR C). Jedoch ist mit Blick auf die geplante Novelle der Düngeverordnung [15] hierzu anzumerken, dass eine N-Düngung im Herbst zukünftig stark eingeschränkt wird, da eine N-Düngung grundsätzlich nur nach Bedarf durchgeführt werden darf. Zudem soll die Höchstmenge auf 60 kg ha^{-1} Gesamt-N und 30 kg ha^{-1} Ammonium-N abgesenkt und der Zeitraum der Herbsdüngung im Raps vermutlich um vier Wochen vom 31. Oktober auf den 1. Oktober deutlich verkürzt werden. Deshalb ist zu vermuten, dass sich eine Verlagerung der Gülledüngung vom Herbst ins Frühjahr vollziehen wird.

Die Ergebnisse der einzelbetrieblichen THG-Emissionen (Abbildung 15) zeigen, dass durch einen gezielten Einsatz von Wirtschaftsdünger die THG-Emissionen in der Raps-erzeugung reduziert werden können (z. B. Betrieb 4 im BKR B). Allerdings besteht in anderen viehhaltenden Betrieben (z. B. Betrieb 1 im BKR B und Betrieb 3 im BKR C) noch erheblicher Optimierungsbedarf. Offenbar wird der Düngewert von Gülle oder Gärrest in einigen Betrieben unterschätzt und/oder mit zu hohen Sicherheitszuschlägen bei Ausbringungsmenge aufgrund der unvermeidlichen N-Verluste kalkuliert. Die Folgen sind eine geringe N-Effizienz und steigende N_2O -Feldemissionen. Um beim Einsatz von Wirtschaftsdünger in der Raps-erzeugung optimale THG-Bilanzen zu erreichen, müssen jedoch nicht nur der Ausbringungszeitpunkt und die -technik sowie die ausgebrachte N-Gesamtmenge und die N-Zusammensetzung im Wirtschaftsdünger berücksichtigt werden, sondern auch passende Mineraldünger verwendet werden. Hierbei ist anzumerken, dass in einigen Betrieben zusätzlich zur organischen Düngung auch noch mineralische

Volldünger (z. B. NPK-Dünger) verwendet werden (Tabelle 16). Diese Maßnahme sollte jedoch nicht standardmäßig, sondern nur nach tatsächlichem Nährstoffbedarf erfolgen. Der Grund ist, wie bereits erwähnt, dass die THG-Bilanz der Mineraldünger auf Basis der Summe aus den Nährstoffgehalten von N, P₂O₅ und K₂O erfolgt.

Tabelle 16: Regionale Verwendung von N-Mineraldünger in der Rapserzeugung bezogen auf die eingesetzte N-Menge

	N-Mineraldünger in %		
	Boden-Klima-Raum A	Boden-Klima-Raum B	Boden-Klima-Raum C
Ammonsulfatsalpeter	69	32	46
NPK-Dünger	16	29	7
Kalkammonsalpeter	3	15	31
Harnstoff-Ammonsulfat	0	16	7
Weitere	12	8	10

Basierend auf den bisherigen Ergebnissen zur THG-Bilanz der Rapserzeugung kann für den Boden-Klima-Raum B sowohl aus ackerbaulicher als auch aus klimarelevanter Sicht das Düngungsmanagement von Betrieb 4 empfohlen werden. Hierbei konnte im Mittel der Erntejahre 2013 bis 2015 eine N-Abfuhr von 157 kg ha⁻¹ (entspricht einem Rapsertrag von 47 dt ha⁻¹) mit einer N-Zufuhr von 239 kg ha⁻¹ erzielt werden. Standardmäßig wird dabei Gärrest vor der Aussaat durch einen Pumptankwagen (PTW) mittels Exaktverteilers auf den Stoppeln der Vorfrucht ausgebracht und anschließend durch einen zusätzlichen Arbeitsgang (Tiefgrubber) in den Boden eingearbeitet. Der Gärrest stammt aus einer nahegelegenen Gemeinschaftsbiogasanlage in der u. a. betriebseigene Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen vergärt werden. Als weitere Maßnahme zur Erhöhung der N-Effizienz wird dem Gärrest vor der Ausbringung ein Nitrifikationshemmstoff zugegeben. Hierdurch kann ein Ammonium-Düngerdepot aufgebaut und eine Verringerung der Nitrat-Verlagerung erreicht werden. Die Frühjahrsdüngung erfolgt, aufgeteilt auf zwei Gaben, mit schwefelhaltigem N-Mineraldünger. Hierbei wird überwiegend Harnstoff-AS (66 %) oder alternativ ASS (14 %) verwendet. Bei hoher Ertragserwartung (z. B. im Erntejahr 2014) wurde im Knospenstadium kurz vor der Blüte und zusammen mit einer Pflanzenschutzbehandlung noch eine zusätzlich N-Spätdüngung mit AHL (5 %) durchgeführt.

Eine generelle Empfehlung für ein Düngungsmanagement im Boden-Klima-Raum C ist aufgrund der Heterogenität der natürlichen Standortbedingungen (vor allem Bodenarten bzw. Ackerzahlen, Jahresniederschlagsmenge und dem daraus resultierenden Ertragspotenzial) schwierig. Aufgrund der regionaltypisch starken Viehhaltung im Boden-Klima-Raum C und den damit verbundenen hohen Anteilen von Wirtschaftsdünger an der N-

Düngung ist jedoch betriebsübergreifend eine vergleichsweise geringe N-Effizienz festzustellen (40 bis 53 %). Zum Teil steigen die einzelbetrieblichen N-Zufuhren übermäßig an, ohne eine entsprechende Ertragswirksamkeit zu erzielen (Tabelle 15). Ein generelles THG-Minderungspotenzial für den Boden-Klima-Raum C liegt demnach besonders in der bedarfsorientierten und verlustarmen Ausbringung der Wirtschaftsdünger. Zudem ist hinsichtlich der N-Mineraldüngung festzustellen, dass der Anteil von Kalkammonsalpeter (KAS) bezogen auf die eingesetzte Mineral-N-Menge im Boden-Klima-Raum C mit 31 % deutlich höher ist als im Boden-Klima-Raum A (3 %) bzw. Boden-Klima-Raum B (15 %) (Tabelle 16). Die Böden im Boden-Klima-Raum C weisen zum Teil sehr niedrige pH-Werte < 5,5 auf. Im Vergleich zu anderen N-Mineraldüngern wird die Kalkzehrung im Boden durch den Einsatz von Kalkammonsalpeter deutlich vermindert. Aus Sicht der THG-Bilanz wirkt sich Kalkammonsalpeter aufgrund seines vergleichsweise hohen Anteils an Nitrat-N dagegen eher nachteilig aus.

Die regionale Betrachtung der THG-Emissionen zeigt, dass die untersuchten Betriebe im Boden-Klima-Raum C trotz der beschriebenen Nachteile bezüglich natürlicher Standortbedingungen und Betriebsstruktur vergleichbare THG-Bilanzen für die Rapserzeugung erreichen können (Abbildung 16).

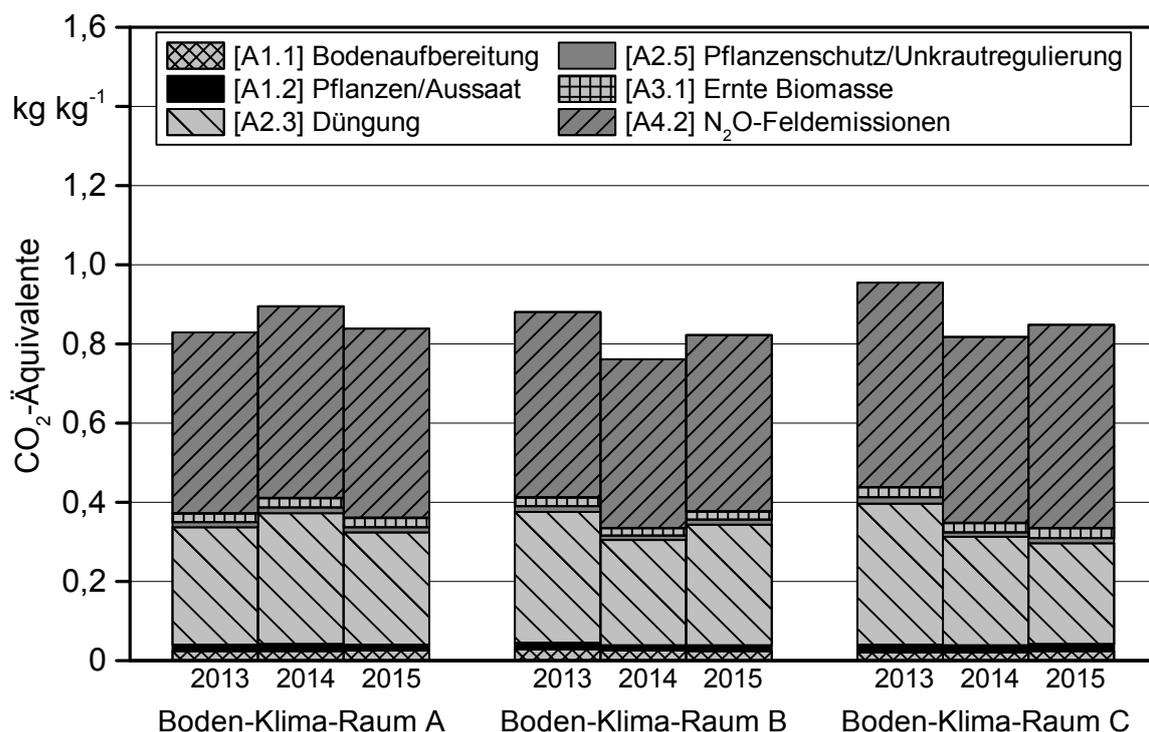


Abbildung 16: Regionale THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015 von je fünf Betrieben)

Einzig im Erntejahr 2013 waren die THG-Emissionen mit 0,954 kg kg⁻¹ aufgrund der vergleichsweise geringen Rapserträge von 37,3 dt ha⁻¹ gegenüber Boden-Klima-Raum A

(0,829 kg kg⁻¹ bzw. 42,7 dt ha⁻¹) und Boden-Klima-Raum B (0,880 kg kg⁻¹ bzw. 41,0 dt ha⁻¹) deutlich erhöht. Insgesamt zeigen sich für die THG-Emissionen deutliche Jahreseffekte zwischen den untersuchten Boden-Klima-Räumen. Die Jahreseffekte sind hauptsächlich auf die Höhe der Rapserträge zurückzuführen. Demnach lagen die mittleren regionalen FM-Erträge im Erntejahr 2014 bei 39,7 dt ha⁻¹ im BKR A, 48,7 dt ha⁻¹ im BKR B und 41,0 dt ha⁻¹ im BKR C und im Erntejahr 2015 bei 40,8 dt ha⁻¹ im BKR A, 44,6 dt ha⁻¹ im BKR B und 39,9 dt ha⁻¹ im BKR C. Entsprechend rangieren auch die mittleren regionalen THG-Emissionen in den Erntejahren 2014 und 2015 (Tabelle 17).

Im Mittel der Erntejahre 2013 bis 2015 zeigen die Betriebe im Boden-Klima-Raum B mit 0,822 kg CO₂-Äquivalenten die geringsten THG-Emissionen je kg Rapssaar, gefolgt von den Betrieben in den Boden-Klima-Räumen A (0,854 kg kg⁻¹) und C (0,873 kg kg⁻¹) (Tabelle 17). Der Mittelwert der Erntejahre 2013 bis 2015 und der untersuchten Boden-Klima-Räume beträgt 0,850 kg CO₂-Äquivalente je Kilogramm erzeugter Rapssaar (Tabelle 17).

Tabelle 17: Regionale THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente sowie relativer Anteil der bilanzierten Prozesse

Erntejahr	Anzahl Betriebe	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹	Anteil der bilanzierten Prozesse in %					
			[A1.1]	[A1.2]	[A2.3]	[A2.5]	[A3.1]	[A4.2]
Boden-Klima-Raum A								
2013	n = 5	0,829	3,0	1,9	35,7	1,5	2,7	55,0
2014	n = 4	0,896	2,7	2,0	36,9	1,6	2,8	54,1
2015	n = 4	0,838	3,0	1,9	33,7	1,7	2,9	56,9
2013–2015		0,854	2,9	1,9	35,5	1,6	2,8	55,3
Boden-Klima-Raum B								
2013	n = 5	0,880	3,4	1,7	37,6	1,5	2,6	53,1
2014	n = 5	0,762	3,3	1,8	34,9	1,4	2,5	56,0
2015	n = 5	0,823	3,0	1,7	37,1	1,5	2,6	54,2
2013–2015		0,822	3,2	1,7	36,5	1,5	2,6	54,5
Boden-Klima-Raum C								
2013	n = 5	0,954	2,2	2,0	37,4	1,7	2,7	54,0
2014	n = 4	0,818	2,6	2,1	33,4	1,6	2,9	57,4
2015	n = 5	0,848	2,8	2,2	30,1	1,6	2,9	60,5
2013–2015		0,873	2,5	2,1	33,6	1,6	2,8	57,3
Gesamt		0,850	2,9	1,9	35,2	1,6	2,7	55,7

5.1.2 Ökonomische Wirkungen

Die Ergebnisse der Kostenermittlung der Rapserzeugung werden für die Einzelprozesse [A1.1] Bodenaufbereitung, [A1.2] Pflanzen/Aussaat, [A2.3] Düngung, [A2.5] Pflanzenschutz und [A3.1] Ernte Biomasse dargestellt.

Der überwiegende Teil der Kosten resultiert aus der Düngung. Demnach stammen im Mittel über alle 16 untersuchten Praxisbetriebe 34,8 % der Kosten aus der Düngung (durchschnittlich 0,090 € kg⁻¹ Rapssaat). Einen Anteil von 20,5 % der Kosten macht der Pflanzenschutz aus (durchschnittlich 0,053 € kg⁻¹ Rapssaat). Damit wird für die Düngung und den Pflanzenschutz mehr als die Hälfte der Rapserzeugungskosten benötigt (vgl. Abbildung 17).

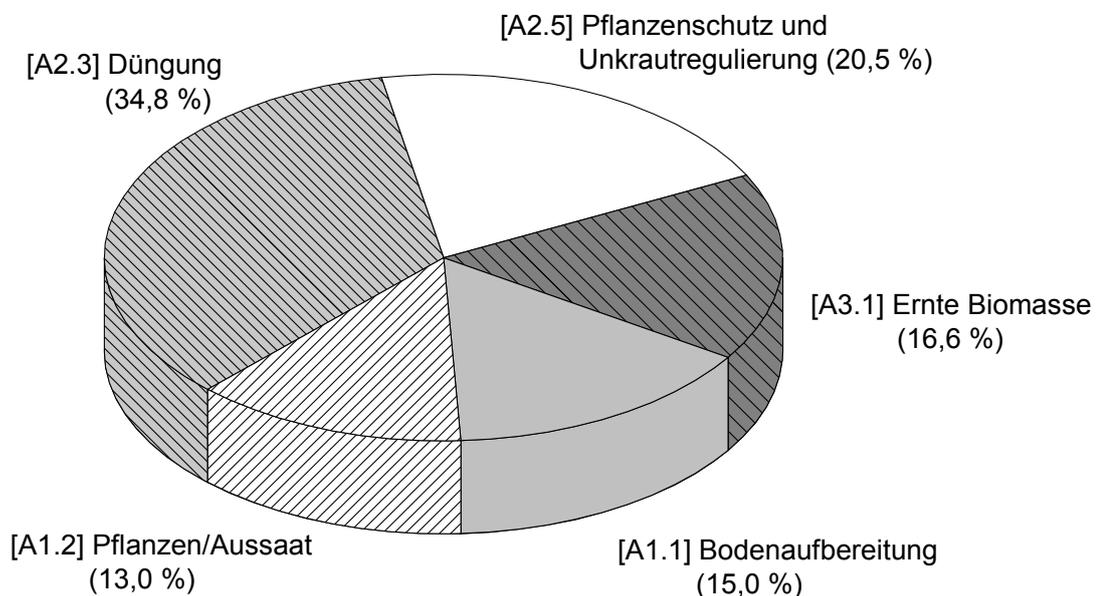


Abbildung 17: Relative Anteile der Kosten der Rapserzeugung der 15 landwirtschaftlichen Praxisbetriebe sowie des LVFZ Almesbach

In Abbildung 18 sind die einzelbetrieblichen Kosten für die Rapserzeugung in den 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetrieben gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (BKR) sowie im LVFZ Almesbach dargestellt. Hierbei zeigen sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den drei bayerischen BKR. Innerhalb der Regionen sind jedoch einzelbetriebliche Unterschiede deutlich zu erkennen. Die Unterschiede ergeben sich insbesondere durch die Kosten der Bodenaufbereitung (z. B. Pflugeinsatz), der Düngung (Dünger- bzw. Nährstoffmenge, Einsatz von Wirtschaftsdünger) und des Pflanzenschutzes (Menge an Pflanzenschutzmitteln) sowie das Ertragsniveau.

Die fünf untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe in der BKR A (Tertiär-Hügelland Donau-Süd) weisen mit mittleren Kosten von $0,268 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat die höchsten Kosten der Rapserzeugung auf (vgl. Tabelle 18). Die Streuung der Kosten beträgt in dieser BKR $0,056 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat. Deutlich stechen die hohen Kosten für den Prozess der Düngung in einem Betrieb der BKR A heraus ($0,149 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat). Vor allem aufgrund eines hohen Einsatzes von Wirtschaftsdünger ($120 \text{ m}^3 \text{ Gülle ha}^{-1}$) entstanden hier hohe Ausbringkosten. Zusätzlich wurde mineralisch gedüngt.

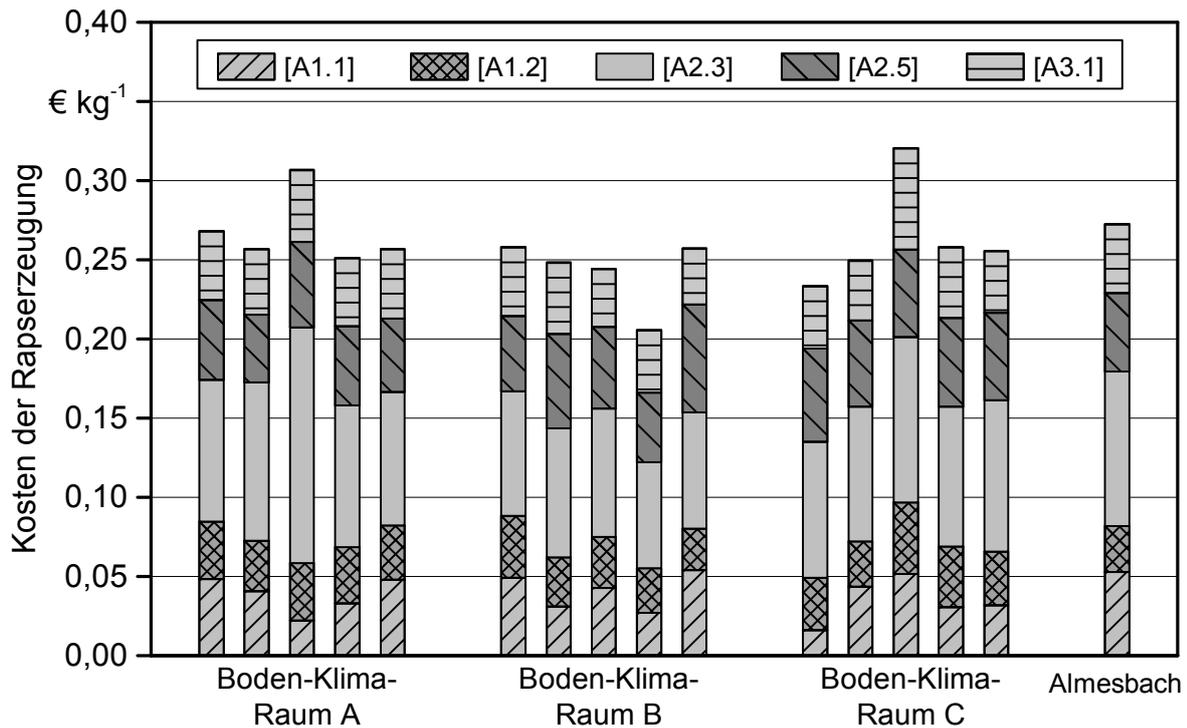


Abbildung 18: Einzelbetriebliche Kosten der Rapserzeugung der 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe sowie des LVFZ Almesbach gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)

Die fünf untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe in der BKR B (Albflächen und Ostbayerisches Hügelland) weisen im Mittel die geringsten Kosten auf ($0,242 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat), bei einer Streuung von $0,052 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat.

Die mittleren Kosten der fünf untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe in der BKR C (Verwitterungslagen in den Übergangslagen) sind mit $0,243 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat fast identisch zu BKR B. Allerdings beträgt die Streuung hier $0,087 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat. Grund hierfür sind die hohen Kosten eines Betriebs des BKR C ($0,320 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat) aufgrund geringer Rapsertträge über alle drei Betrachtungsjahre (durchschnittlich 32 dt ha^{-1}).

Hohe Kosten bei der Bodenaufbereitung [A1.1] ergeben sich überwiegend bei Betrieben mit Pflugeinsatz. Über alle untersuchten Praxisbetriebe variieren die Kosten für die Bo-

denaufbereitung zwischen 0,016 und 0,054 € kg⁻¹ in Höhe von 0,039 € kg⁻¹ Rapssaat und liegen im Mittel bei 0,039 € kg⁻¹ Rapssaat.

Tabelle 18: Regionale und einzelbetriebliche Kosten der Rapserzeugung sowie ihre relative Verteilung auf die bilanzierten Prozesse (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)

	Kosten in € kg ⁻¹	Relativer Anteil der Prozesse an den Kosten in %				
		[A1.1]	[A1.2]	[A2.3]	[A2.5]	[A3.1]
Boden-Klima-Raum A	0,268	14,6	13,1	37,8	18,2	16,3
Betrieb 1	0,269	18,1	13,5	33,3	18,8	16,3
Betrieb 2	0,257	15,9	12,3	38,9	16,7	16,2
Betrieb 3	0,307	7,3	11,8	48,5	17,6	14,8
Betrieb 4	0,251	13,2	14,2	35,6	19,9	17,1
Betrieb 5	0,257	18,6	13,4	32,8	18,1	17,1
Boden-Klima-Raum B	0,242	16,7	13,0	31,4	22,3	16,6
Betrieb 1	0,258	19,1	15,2	30,4	18,4	16,9
Betrieb 2	0,248	12,5	12,6	32,7	24,1	18,1
Betrieb 3	0,244	17,4	13,3	33,1	21,2	15,0
Betrieb 4	0,205	13,2	13,7	32,5	21,4	19,2
Betrieb 5	0,257	21,1	10,2	28,5	26,4	13,8
Boden-Klima-Raum C	0,261	13,0	13,5	35,0	21,5	17,0
Betrieb 1	0,233	6,9	14,2	36,7	25,3	16,9
Betrieb 2	0,249	17,4	11,6	34,1	21,7	15,2
Betrieb 3	0,320	16,1	14,0	32,6	17,3	20,0
Betrieb 4	0,258	11,8	14,9	34,2	21,7	17,4
Betrieb 5	0,243	12,5	13,1	37,4	21,7	15,3
Almesbach	0,272	19,4	10,6	35,9	18,1	16,0

In Abbildung 19 sind die mittleren Unternehmergewinne (2013 bis 2015) der Rapserzeugung der 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (BKR) sowie des LVFZ Almesbach dargestellt. Die Unternehmergewinne waren durchweg positiv. Sie bewegten sich in einem Bereich zwischen 0,014 und 0,148 € kg⁻¹ Rapssaat (Mittelwert 0,086 € kg⁻¹). Ohne Berücksichtigung der Direktzahlungen (Betriebsprämien) hätten jedoch mehrere Betriebe kein positives Ergebnis erreichen können. Die Direktzahlungen sind in diesen Fällen höher als die Unternehmergewinne.

Die Unternehmergewinne zwischen den Boden-Klima-Räumen unterscheiden sich insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Erlöse für die Rapssaat. In der BKR A erreichten die Praxisbetriebe im Mittel einen Unternehmergewinn von $0,055 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat (durchschnittlicher Erlös: $35,75 \text{ € dt}^{-1}$ Rapssaat), in der BKR B $0,111 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat (durchschnittlicher Erlös: $38,00 \text{ € dt}^{-1}$ Rapssaat) und in der BKR C $0,096 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat (durchschnittlicher Erlös: $38,19 \text{ € dt}^{-1}$ Rapssaat). Die Unternehmergewinne innerhalb der Boden-Klima-Räume unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Kosten im Anbau (vgl. Tabelle 18) sowie unterschiedlicher Erntemengen.

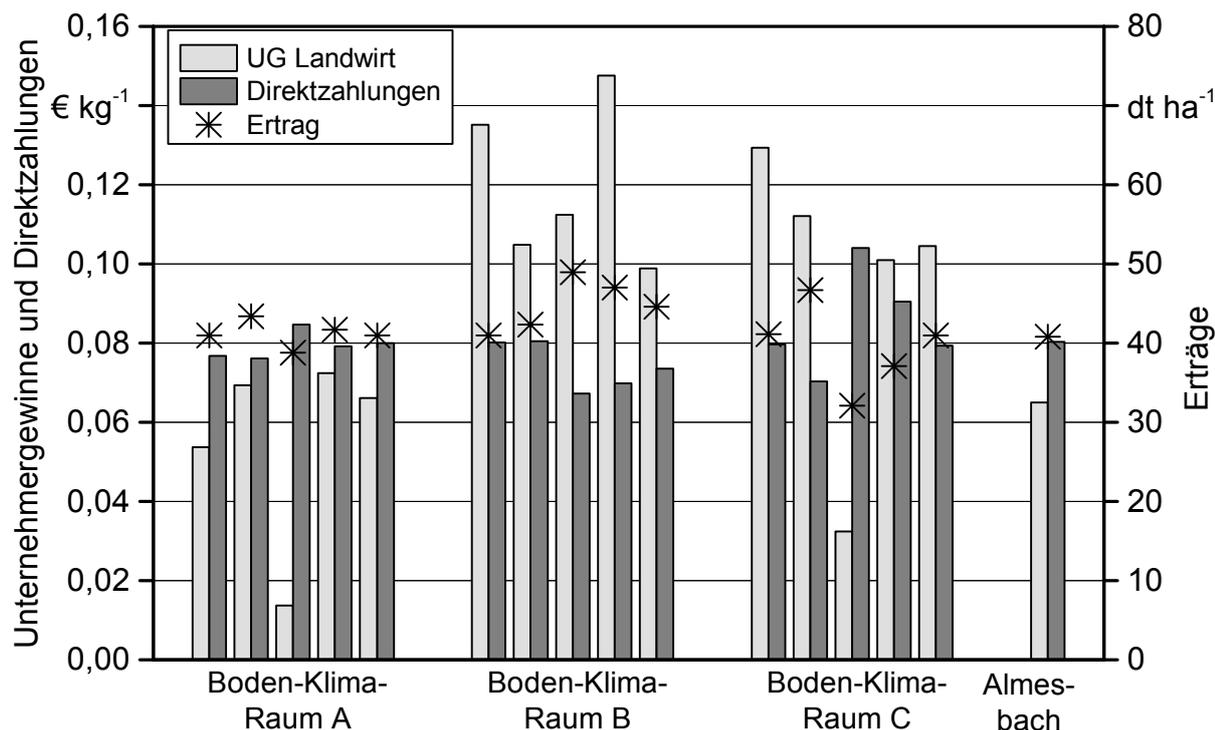


Abbildung 19: Unternehmergewinne, Direktzahlungen sowie Erträge der Rapserzeugung der 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe sowie des LVFZ Almesbach gegliedert nach Boden-Klima-Räumen (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015)

5.2 Ökologische und ökonomische Wirkungen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

5.2.1 Ökologische Wirkungen

In Anlehnung an die Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] wurden die THG-Emissionen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion Anbau, Transport und Verarbeitung entsprechend dem Schema der Systemdarstellung (vgl. Abbildung 5) separat ausgewertet. Die Auswertung der THG-Emissionen für den Anbau erfolgte in Unterkapitel 5.1.

[T1] Transport der Rapssaat vom Feld/Hof zur Ölmühle

Die Ergebnisse der THG-Bilanz des Transports der Rapssaat vom Feld bzw. Hof bis zur Ölmühle sind für alle Betriebe der drei Boden-Klima-Räume und für das LVFZ Almesbach in Abbildung 20 dargestellt.

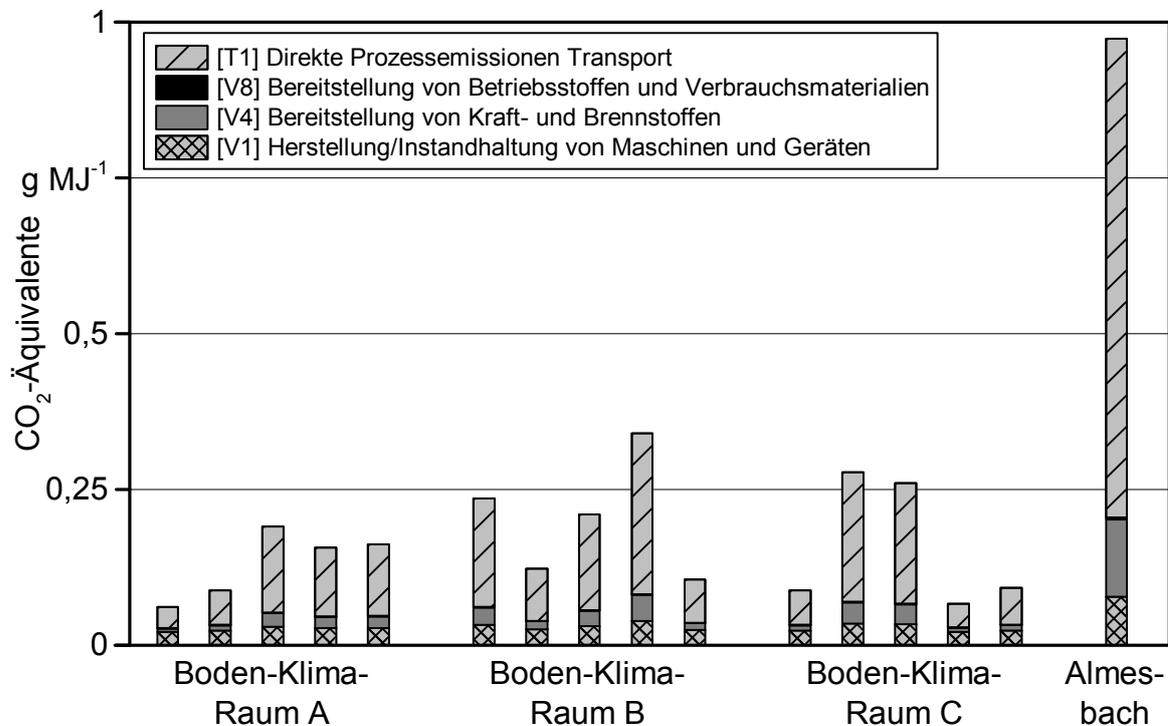


Abbildung 20: Einzelbetriebliche THG-Emissionen des Rapssaattransportes vom Hof zur Ölmühle als CO₂-Äquivalente (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015) gegliedert nach Boden-Klima-Räumen

Hier sind die THG-Emissionen als CO₂-Äq in g je MJ Rapsölkraftstoff als betriebsspezifische Mittelwerte für die Anbaujahre 2013, 2014 und 2015 aufgetragen. Die Ergebnisse variieren je nach Betrieb zwischen 0,062 g MJ⁻¹ für Betrieb 1 in Boden-Klima-Raum A und 0,973 g MJ⁻¹ für das LVFZ Almesbach. Da der Transport für alle landwirtschaftlichen Betriebe wie auch für das LVFZ Almesbach gleich modelliert wurde (vgl. Unterkapitel 4.9), sind die Unterschiede in den Ergebnissen der THG-Bilanz auf die unterschiedlichen Transportmenge und die Transportentfernung zurückzuführen, wobei die Transportentfernung die übergeordnete Rolle einnimmt. So zeigt das LVFZ Almesbach mit der größten Transportentfernung von 110 km je Strecke mit Abstand auch die höchsten Emissionen. In Betrieb 1 in Boden-Klima-Raum A liegt die Transportentfernung mit nur 5 km analog zu den THG-Emissionen am niedrigsten (vgl. hierzu auch Tabelle 19). Dies verdeutlicht den Vorteil einer dezentralen Verarbeitung der Rapssaat, die sich durch in der Regel geringe Transportentfernungen von durchschnittlich 20 km pro Strecke auszeichnet [61]. Weiterhin geht aus Abbildung 20 sowie aus Tabelle 19 auch die Aufteilung der Emissionen auf die einzelnen Prozesse [V1], [V4], [V8] und [T1] hervor. Hier zeigen die direkten Prozessemissionen [T1] mit 0,035 bis 0,768 g MJ⁻¹ bzw. 56 bis 79 % den

größten Anteil am Ergebnis der THG-Bilanz des Rapstransportes (Tabelle 19). Die Höhe der direkten Prozessemissionen hängt dabei von der eingesetzten Kraftstoffmenge ab, die wiederum auf die Transportentfernung zurückzuführen ist. Darüber hinaus werden die direkten Prozessemissionen maßgeblich durch die Art des Kraftstoffes (hier fossiler Diesel) bestimmt. Der Anteil der Bereitstellung des erforderlichen Kraftstoffs [V4] an den Gesamtemissionen variiert mit der Höhe des Verbrauchs (9 bis 12,7 %), wie auch Abbildung 20 und Tabelle 19 insbesondere am Beispiel des LVFZ Almesbach zeigen. Insgesamt haben die kraftstoffbezogenen Emissionen [T1] und [V4] einen Anteil von durchschnittlich 80 %.

Tabelle 19: Relative Verteilung der THG-Emissionen des Rapssaattransports vom Hof zur Ölmühle als CO₂-Äquivalente (Mittelwerte der Erntejahre 2013 bis 2015), gegliedert nach Boden-Klima-Räumen sowie für das LVFZ Almesbach

	Entfernung (Hof-Ölmühle) in km	CO ₂ -Äquivalente in g MJ ⁻¹	Anteil an den THG-Emissionen in %			
			[V1]	[V4]	[V8]	[T1]
Ölmühle X in Boden-Klima-Raum A						
Betrieb 1	5	0,062	34,8	9,0	0,3	55,9
Betrieb 2	8	0,088	26,4	10,2	0,3	63,1
Betrieb 3	20	0,191	15,4	11,7	0,4	72,5
Betrieb 4	16	0,157	17,4	11,4	0,3	70,5
Betrieb 5	16	0,162	17,1	11,5	0,3	71,2
Ölmühle Y für Boden-Klima-Raum B						
Betrieb 1	25	0,236	13,7	11,9	0,4	74,0
Betrieb 2	12	0,123	20,7	11,0	0,3	68,1
Betrieb 3	22	0,210	14,7	11,8	0,4	73,2
Betrieb 4	37	0,340	11,4	12,3	0,4	76,0
Betrieb 5	10	0,106	23,0	10,6	0,3	65,9
Ölmühle Z Boden-Klima-Raum C						
Betrieb 1	8	0,088	26,4	10,2	0,3	63,1
Betrieb 2	30	0,278	12,5	12,1	0,4	75,0
Betrieb 3	28	0,260	13,0	12,0	0,4	74,6
Betrieb 4	11	0,066	32,9	9,3	0,3	57,5
Betrieb 5	17	0,092	25,4	10,3	0,3	64,0
Ölmühle Y						
Almesbach	110	0,973	8,0	12,7	0,4	78,9

[V1] Herstellung und Instandsetzung der Maschinen und Geräte;

[V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen

[V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien;

[T1] Direkte Emissionen des Transportprozesses

Der Prozess [V1] Herstellung und Instandsetzung der Maschinen hat mit Ausnahme des LVFZ Almesbach den zweitgrößten Anteil an den Gesamtemissionen (11,5 bis 35 %). Die Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien [V8] nimmt mit 0,3 bis 0,4 % nur einen geringen Anteil an den THG-Emissionen des Rapssaattransportes ein.

[B] Dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion

In Tabelle 20 sind die THG-Emissionen der Prozessgruppe [B] für die dezentrale Rapssaatverarbeitung zu Rapsölkraftstoff in den drei untersuchten Ölmühlen für die Verarbeitungsjahre 2013/2014 und 2014/2015 aufgeführt. Die THG-Emissionen als CO₂-Äq betragen im Mittel über die drei untersuchten Ölmühlen und die beiden Verarbeitungsjahre 2013/2014 sowie 2014/2015 1,34 g MJ⁻¹ mit einer Standardabweichung von 0,30 g MJ⁻¹. Weiterhin zeigt Tabelle 20 eine Aufteilung der einzelnen Vorleistungen, die für die dezentrale Rapssaatverarbeitung erforderlich sind: [V1] Herstellung und Instandsetzung der Maschinen und Geräte (z. B. Ölpresse), [V2] Herstellung und Instandsetzung von Gebäuden, [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen, [V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien sowie [V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien.

Tabelle 20: THG-Emissionen für die Prozessgruppe [B] Transformation – dezentrale Rapssaatverarbeitung zu Rapsölkraftstoff in den drei untersuchten Ölmühlen als CO₂-Äquivalente

Verarbeitungsjahr	CO ₂ -Äquivalente in g MJ ⁻¹					
	Gesamt	[V1]	[V2]	[V4]	[V5]	[V8]
Ölmühle X						
2013/2014	1,314	0,217	0,115	0,031	0,917	0,034
2014/2015	1,266	0,175	0,098	0,032	0,927	0,034
Ölmühle Y						
2013/2014	1,573	0,422	0,112	0,000	1,005	0,034
2014/2015	1,471	0,334	0,083	0,000	1,019	0,034
Ölmühle Z						
2013/2014	1,199	0,106	0,043	0,074	0,953	0,024
2014/2015	1,201	0,097	0,037	0,075	0,968	0,024

[V1] Herstellung und Instandsetzung der Maschinen und Geräte (z. B. Ölpresse)

[V2] Herstellung und Instandsetzung von Gebäuden

[V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen

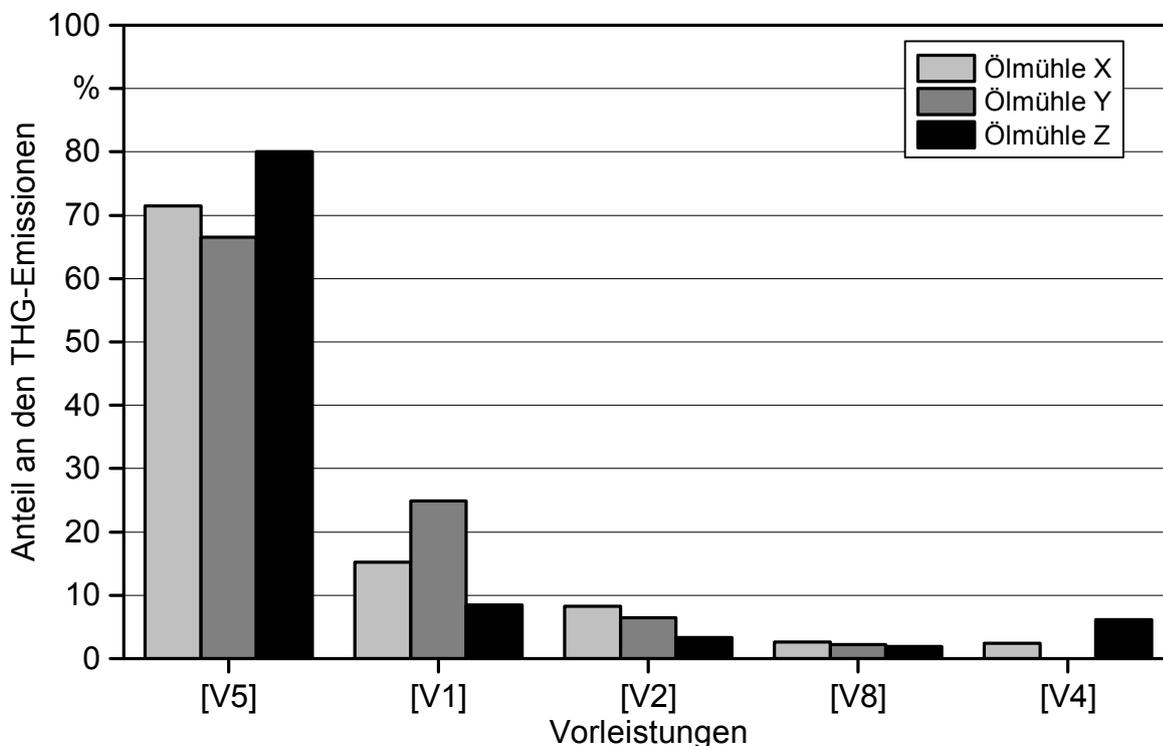
[V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien

[V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien

Ein Vergleich der THG-Emissionen zwischen den Verarbeitungsjahren 2013/2014 und 2014/2015 zeigt für alle drei Ölmühlen eine Verbesserung der THG-Emissionen. Dabei fällt auf, dass die THG-Emissionen der verbrauchsgebundenen Vorleistungen [V4], [V5]

und [V8] nahezu konstant geblieben sind, wohingegen die THG-Emissionen der Maschinen und Geräte [V1] sowie der Halle [V2] im Verarbeitungsjahr 2014/2015 geringer ausfallen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Vorleistungen [V1] und [V2] über ihre Nutzungsdauer abgeschrieben werden und die Auslastung bei allen drei Ölmühlen im Verarbeitungsjahr 2014/2015 höher war als im Jahr zuvor (siehe Tabelle 6). Damit stellt die Auslastung der Anlage – wie zu erwarten – eine Kenngröße zur Reduzierung der THG-Emissionen dar.

Die Ergebnis bestimmende Prozessgröße der THG-Bilanz für Prozessgruppe [B] stellt in allen drei Ölmühlen jedoch die Bereitstellung der erforderlichen Prozessenergie (Strom) [V5] mit einem $\text{CO}_2\text{-Äq}$ von 0,927 bis 1,019 g MJ^{-1} dar. Dies wird auch in Abbildung 21 deutlich, in der die Anteile der einzelnen Vorleistungen am Gesamtergebnis der THG-Bilanz als Säulen aufgetragen sind.



- [V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien
 [V1] Herstellung und Instandsetzung der Maschinen und Geräte (z. B. Ölpresse)
 [V2] Herstellung und Instandsetzung von Gebäuden
 [V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien
 [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen

Abbildung 21: Relative Verteilung der THG-Emissionen der Rapssaatverarbeitung zu Rapsölkraftstoff in den drei untersuchten Ölmühlen

Aus Abbildung 21 geht hervor, dass die Bereitstellung der erforderlichen Strommenge einen Anteil von 70 bis 79 % an den Gesamtemissionen hat. Dabei hat die Pressung [B3.2] mit 39 bis 42 kWh t^{-1} Rapssaat den höchsten Strombedarf (64 bis 76 % des Gesamtstrombedarfs). Weiterhin konnte beobachtet werden, dass der betriebsspezifische

Prozessstrom in den Verarbeitungsjahren 2013/2014 und 2014/2015 in der jeweiligen Ölmühle nahezu konstant bleibt und bei 50 bis 60 kWh t⁻¹ verarbeiteter Rapssaat liegt (siehe auch Tabelle 6).

Der Prozess [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen ist auf den Heizölbedarf für die Trocknung [B2.3] zurückzuführen, die in Ölmühle Z am häufigsten und in Ölmühle Y gar nicht durchgeführt wurde. Bezogen auf die Gesamtemissionen spielt die Trocknung aufgrund des geringen Trocknungsanteils in allen drei Ölmühlen jedoch eine untergeordnete Rolle.

Die THG-Emissionen für Prozess [V2] Bau und Instandhaltung der Ölmühlengebäude liegen bei Ölmühle X mit 0,115 g MJ⁻¹ am höchsten und bei Ölmühle Z mit 0,037 g MJ⁻¹ am niedrigsten (siehe Tabelle 6 und Abbildung 22). Grund dafür ist eine Abschreibung der Emissionen über die Produktionsmenge der Anlage und damit die Berücksichtigung von Skaleneffekten. So können in Ölmühle X maximal 500 kg Rapssaat pro Stunde verarbeitet werden, während die Verarbeitungsmenge in Ölmühle Z bei 1.800 kg h⁻¹ liegt. Auch unter Berücksichtigung der jahresspezifischen Auslastung wurde in Ölmühle Z mit durchschnittlich 4.000 t a⁻¹ am meisten Rapssaat verarbeitet.

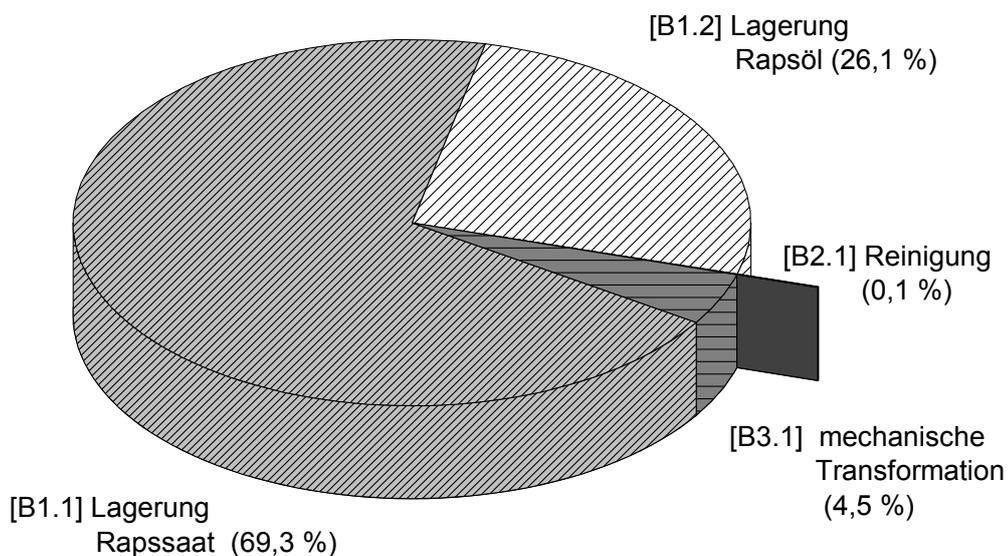


Abbildung 22: Aufteilung der Bauvorleistungen [V1] auf die einzelnen Verarbeitungsprozesse der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Ölmühle Y

Die Vorleistung mit dem zweitgrößten Einfluss auf das Ergebnis der THG-Bilanz für die Prozessgruppe [B] ist jedoch die Bereitstellung und Instandsetzung der erforderlichen Maschinen und Aggregate [V1] mit durchschnittlich 0,196 g MJ⁻¹ bzw. 15 % für Ölmühle X und 0,378 g MJ⁻¹ bzw. 25 % für Ölmühle Y. Es zeigt sich, dass die THG-Emissionen der Ölmühle Y deutlich höher sind als in Ölmühle X und hier keine Skaleneffekte zum Tragen kommen, obwohl in der Ölmühle Y in beiden Verarbeitungsjahren deutlich mehr

Rapssaat verarbeitet wurde als in der Ölmühle X. Der Vergleich zwischen den Ölmühlen X und Z zeigt für den Prozess [V1] dagegen erkennbare Skaleneffekte. Grund dafür ist der Unterschied in der Anlagenkonzeption. In Ölmühle Y sind nahezu alle Lagerungsvorrichtungen aus Edelstahl zu Betriebsbeginn neu gebaut worden. Abbildung 22, in der die THG-Emissionen der Bauvorleistungen [V1] auf die einzelnen Verarbeitungsprozesse in Ölmühle Y aufgeteilt dargestellt sind, zeigt den hohen Anteil der Lagerung. Der Bau und die Instandhaltung der Lagerungseinrichtung nehmen 95,4 % der Gesamtemissionen der Vorleistung [V1] in Ölmühle Y ein. Die eigentlichen Verarbeitungsgeräte wie die Reinigung, die Pressung und die Filterung haben mit 4,6 % nur einen geringen Anteil. Damit wird deutlich, dass auch die Anlagenkonzeption einen Einfluss auf die Ergebnisse der THG-Bilanz hat.

THG-Emissionen des vollständigen Produktsystems der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

Die Ergebnisse der THG-Bilanz für die vollständige Prozesskette der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern sind als CO₂-Äquivalente in Abbildung 23 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Mittelwerte für die Ölmühle X im Boden-Klima-Raum A, die Ölmühle Y im Boden-Klima-Raum B und die Ölmühle Z im Boden-Klima-Raum C für die Erntejahre 2013, 2014 und 2015. Den Erntejahren 2013 und 2014 wurden die Verarbeitungsjahre 2013/2014 und 2014/2015 zugrunde gelegt. Da zum Berichtszeitpunkt das Verarbeitungsjahr 2015/2016 noch nicht abgeschlossen war, ist dem Erntejahr 2015 ein Mittelwert aus den Jahren 2013/2014 und 2014/2015 unterstellt. Weiterhin zeigt Abbildung 23 die Teilstandardwerte der Richtlinie 2009/28/EG (RED) für reines Rapsöl.

Die THG-Emissionen für dezentral produzierten Rapsölkraftstoff in Bayern liegen je nach Boden-Klima-Raum und Erntejahr zwischen 38,8 g MJ⁻¹ und 31,8 g MJ⁻¹ und damit in der gleichen Größenordnung wie der RED-Standardwert für reines Rapsöl (36 g MJ⁻¹). Der fossile Referenzwert entspricht dem RED-Standardwert für fossilen Dieselmotorkraftstoff und beträgt 83,80 g MJ⁻¹. Der Vergleich der THG-Emissionen für dezentral produzierten Rapsölkraftstoff in Bayern mit dem fossilen Referenzwert zeigt eine minimale THG-Einsparung von 54 % für das Erntejahr 2013 und Ölmühle Z in Boden-Klima-Raum C sowie eine maximale THG-Minderung von 62 % für das Erntejahr 2014 und Ölmühle Y in Boden-Klima-Raum B. Im Mittel über die Erntejahre 2013 bis 2015 lassen sich THG-Einsparungen für Ölmühle X im Boden-Klima-Raum A in Höhe von 59 %, für Ölmühle Y im Boden-Klima-Raum B in Höhe von 60 % und für Ölmühle Z im Boden-Klima-Raum C in Höhe von 58 % erzielen. Damit liegt die THG-Einsparung von dezentral erzeugtem Rapsölkraftstoff in Bayern für alle drei untersuchten Boden-Klima-Räume im dreijährigen Mittel über der THG-Einsparung des Standardwertes der Richtlinie 2009/28/EG für reines Rapsöl aus industrieller Ölgewinnung inklusive Lösungsmittelextraktion und Raffination (57 %). Weiterhin werden die in Richtlinie 2009/28/EG vorgeschriebenen Mindesteinsparungen für Biokraftstoffe aus Bestandsanlagen (Inbetriebnahme bis zum 5. Oktober 2015) weit unterschritten. Demnach müssen Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe bis zum 31. Dezember 2017 eine THG-Einsparung von mindestens 35 % und ab dem 1. Januar 2018 eine THG-Einsparung von mindestens 50 % erzielen [42][44]. Die

THG-Einsparung für Neuanlagen (Inbetriebnahme nach dem 05. Oktober 2015) beträgt mindestens 60 % und wird von Ölmühle Y im Jahr 2014 erreicht.

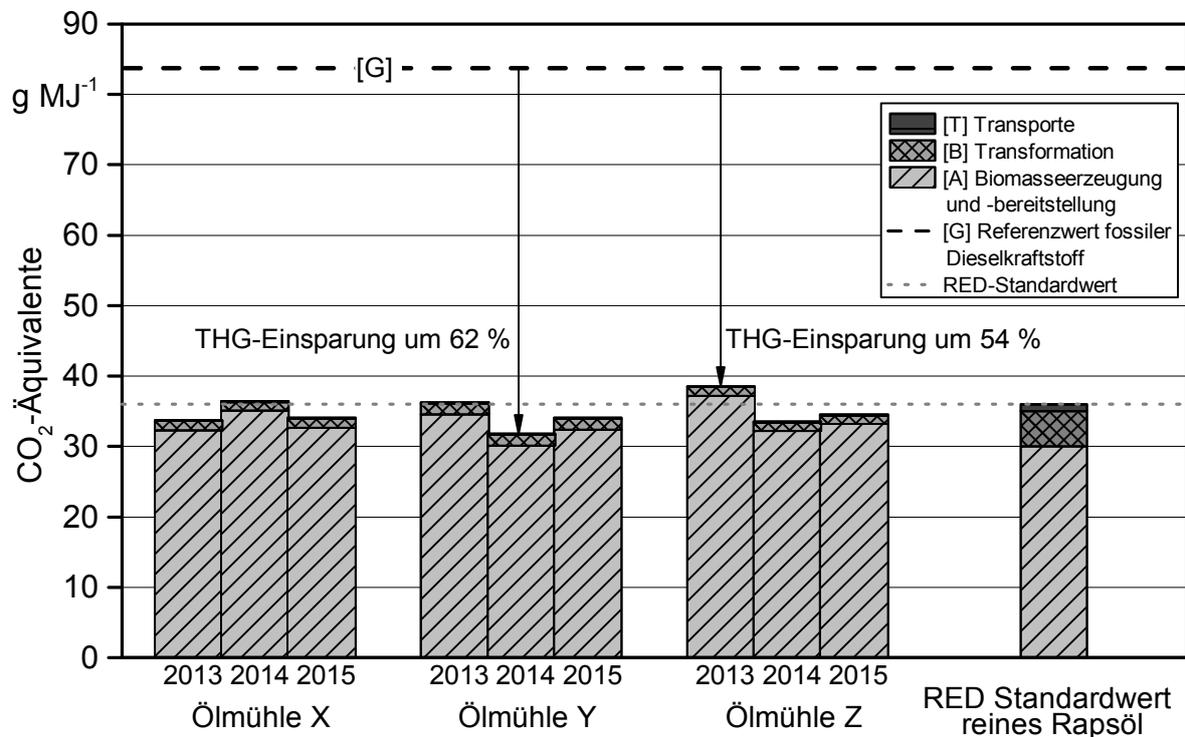


Abbildung 23: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in Bayern als CO₂-Äquivalente im Vergleich zum fossilem Referenzwert und dem RED-Standardwert für reines Rapsöl

Aus Abbildung 23 geht darüber hinaus ein Vergleich der THG-Emissionen für die Raps-erzeugung in den 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetrieben sowie der de- zentralen Rapsverarbeitung zu Rapsölkraftstoff in den drei untersuchten Ölmühlen mit den Teilstandardwerten der Richtlinie 2009/28/EG für reines Rapsöl hervor. Hierbei wird deutlich, dass die Stufen Transport mit durchschnittlich 0,16 g MJ⁻¹ und Verarbeitung mit durchschnittlich 1,34 g MJ⁻¹ in der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion geringere THG-Emissionen aufweisen als die entsprechenden Teilstandardwerte der Richtlinie 2009/28/EG (1,00 und 5,00 g MJ⁻¹). Grund hierfür ist die dezentrale Verarbeitungsstruk- tur, die deutlich geringere Transportdistanzen mit sich bringt. Das Beispiel des LVFZ Al- mesbach (siehe Abbildung 20) zeigt, dass höhere Transportentfernungen mit wesentlich höheren Emissionen verbunden sind. Weiterhin ist die dezentrale Ölgewinnung mit ei- nem geringeren verfahrenstechnischen und damit auch mit einem geringeren energeti- schen Aufwand verbunden als eine industrielle Ölgewinnung, bei der auf den Pressvor- gang noch Extraktions- und Raffinationsschritte folgen (siehe Einleitung von Kapitel 1 auf Seite 17). Die Vorteile der dezentralen Verarbeitung werden allerdings durch höhere THG-Emissionen für die Rapserzeugung in den untersuchten Betrieben der drei Boden- Klima-Räume mit durchschnittlich 33,38 g MJ⁻¹ gegenüber dem Teilstandardwert (30,00 g MJ⁻¹) nahezu aufgehoben. In Summe liegen die THG-Emissionen für dezentral

erzeugten Rapsölkraftstoff in Bayern bei durchschnittlich $34,88 \text{ g MJ}^{-1}$.

5.2.2 Ökonomische Wirkungen

Produktionskosten

Am Beispiel der Ölmühle Y werden die in Unterkapitel 4.10 beschriebenen Kennzahlen für die Rapsölproduktion bzw. für das gesamte Produktsystem Rapsölkraftstoff dargestellt. Die Jahreskosten der Ölmühle Y lagen im Verarbeitungsjahr 2013/14 bei einer Auslastung von 30 % und einem Einkaufspreis der Rapssaat von 40 € dt FM^{-1} bei $0,0358 \text{ € MJ}^{-1}$ Rapsölkraftstoff. Den Großteil der Kosten verursacht der Einkauf der Rapssaat in Höhe von $0,0302 \text{ € MJ}^{-1}$. Zuzüglich der Kosten für die Rapssaatlagerung [B1.1] ergeben sich die Rohstoffkosten in Höhe von $0,0310 \text{ € MJ}^{-1}$. Diese stellen einen Anteil von ca. 86,4 % der Jahreskosten der Ölmühle (vgl. Abbildung 24) dar. Nach Abzug der Erlöse des Koppelproduktes Rapspresskuchen in Höhe von $0,0127 \text{ € MJ}^{-1}$ von den Jahreskosten der Ölmühle bleiben Produktionskosten in Höhe $0,0231 \text{ € MJ}^{-1}$ (entspricht $0,80 \text{ € t}^{-1}$) für den Rapsölkraftstoff.

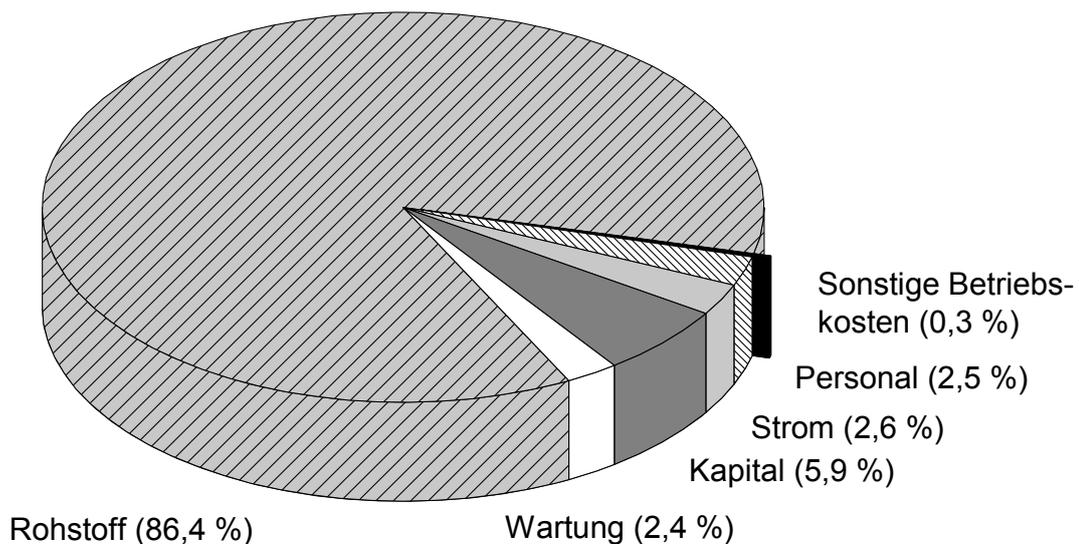


Abbildung 24: Anteile der Jahreskosten der Ölmühle Y im Verarbeitungsjahr 2013/14

Im Verarbeitungsjahr 2014/15 (Auslastung 41 %, Preis Rapssaat: $36 \text{ € dt}^{-1} \text{ FM}$) lagen die Jahreskosten der Ölmühle Y bei $0,0328 \text{ € MJ}^{-1}$ Rapsölkraftstoff. Den Großteil der Kosten verursacht der Einkauf der Rapssaat in Höhe von $0,0280 \text{ € MJ}^{-1}$. Zuzüglich der Kosten für die Rapssaatlagerung [B1.1] ergeben sich Rohstoffkosten in Höhe von $0,0288 \text{ € MJ}^{-1}$. Diese stellten einen Anteil von ca. 87,6 % der Jahreskosten der Ölmühle dar. Nach Abzug der Erlöse des Koppelproduktes Rapspresskuchen in Höhe von $0,0133 \text{ € MJ}^{-1}$ von

den Jahreskosten der Ölmühle bleiben Produktionskosten in Höhe $0,0195 \text{ € MJ}^{-1}$ (entspricht $0,67 \text{ € l}^{-1}$) für den Rapsölkraftstoff.

THG-Vermeidungskosten

Durch Zusammenführung der Ergebnisse der THG-Bilanz und der ökonomischen Bilanzierung von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung sowie der Ergebnisse aus der Bewertung des Referenzsystems Diesel ergeben sich die THG-Vermeidungskosten. Die THG-Emissionen als CO_2 -Äquivalente von Rapsölkraftstoff in Ölmühle Y lagen im Verarbeitungsjahr 2013/14 bei $0,0363 \text{ kg MJ}^{-1}$ (Verarbeitungsjahr 2014/15 $0,0318 \text{ kg MJ}^{-1}$), die Produktionskosten bei $0,0231 \text{ € MJ}^{-1}$ (Verarbeitungsjahr 2014/15 $0,0195 \text{ € MJ}^{-1}$). Die THG-Emissionen als CO_2 -Äquivalente des Referenzsystems (fossiler Dieselmotorkraftstoff) betragen $0,0838 \text{ kg MJ}^{-1}$ bei Kosten in Höhe von $0,0128 \text{ € MJ}^{-1}$ (vgl. Abschnitt 4.10.2).

THG-Vermeidungskosten im Verarbeitungsjahr 2013/14:

$$217 \text{ € t}^{-1} = \frac{0,0231 \text{ € MJ}^{-1} - 0,0128 \text{ € MJ}^{-1}}{0,0838 \text{ kg MJ}^{-1} - 0,0363 \text{ kg MJ}^{-1}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{t}}$$

THG-Vermeidungskosten im Verarbeitungsjahr 2014/15:

$$130 \text{ € t}^{-1} = \frac{0,0195 \text{ € MJ}^{-1} - 0,0128 \text{ € MJ}^{-1}}{0,0838 \text{ kg MJ}^{-1} - 0,0318 \text{ kg MJ}^{-1}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{t}}$$

Aus der Berechnung ergibt sich, dass die Bereitstellung von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu Diesel THG-Vermeidungskosten im Verarbeitungsjahr 2013/14 in Ölmühle Y mit ihren zuliefernden Betrieben aus Boden-Klima-Raum B je eingesparte Tonne CO_2 -Äquivalente Kosten in Höhe von 217 € verursacht hat, im Verarbeitungsjahr 2014/15 hingegen 130 € . Zu beachten ist bei diesen Ergebnissen noch die Berücksichtigung des Koppelprodukts Rapspresskuchen. Bei der Ermittlung der THG-Emissionen wurde eine energetische Allokation durchgeführt. Zur Berechnung der Produktionskosten wurden die Erlöse des Rapspresskuchens den Gesamtkosten der Ölmühle gegengerechnet (vgl. Unterkapitel 4.6).

Regionale Wertschöpfung

Trotz der geringen Auslastung der Ölmühle im Betrachtungszeitraum konnte die Ölmühle Y stets einen Unternehmergewinn durch den Verkauf von Rapsöl und Rapspresskuchen erzielen. Im Verarbeitungsjahr 2013/14 lag der Unternehmergewinn bei $0,0030 \text{ € MJ}^{-1}$. Auch die zuliefernden Landwirte konnten durch den Anbau und den Verkauf der Rapssaat an die Ölmühle im Erntejahr 2013 einen Unternehmergewinn erwirtschaften. Dieser lag bei $0,0053 \text{ € MJ}^{-1}$ (entspricht $0,0719 \text{ € kg}^{-1}$ Rapssaat). Über die gesamte Produktionskette der Rapsölbereitstellung (Anbau der Rapssaat und Weiterverarbeitung) konnte somit ein Unternehmergewinn von durchschnittlich $0,0083 \text{ € MJ}^{-1}$ erzielt werden.

Bei einem Verkauf von rund 28,6 Mio. MJ Rapsöl entsteht eine Wertschöpfung (Unternehmensgewinn Ölmühle und Landwirte) in der Region um die Ölmühle von rund 237.000 €.

Beschäftigungseffekt

Die Rapsölproduktion schafft Beschäftigung in der Region (Brutto-Beschäftigungseffekt). Der Bedarf an Arbeitskräften der Ölmühle lag im Verarbeitungsjahr 2013/14 bei rund $0,05 \text{ AKh dt}^{-1}$ verarbeitete Rapssaat (vgl. Abbildung 25), dies entspricht $0,6 \text{ AK a}^{-1}$. Darin eingeschlossen sind die Verwaltung ($0,5 \text{ AK a}^{-1}$) sowie die technische Betreuung der Ölmühle ($1,4 \text{ AKh pro Presstag}$). Der Personalaufwand für die technische Betreuung ist bei dieser Ölmühle aufgrund einer modernen Fernüberwachungstechnik sehr gering, aber auch aufgrund der wenigen Betriebstage im Betrachtungsjahr.

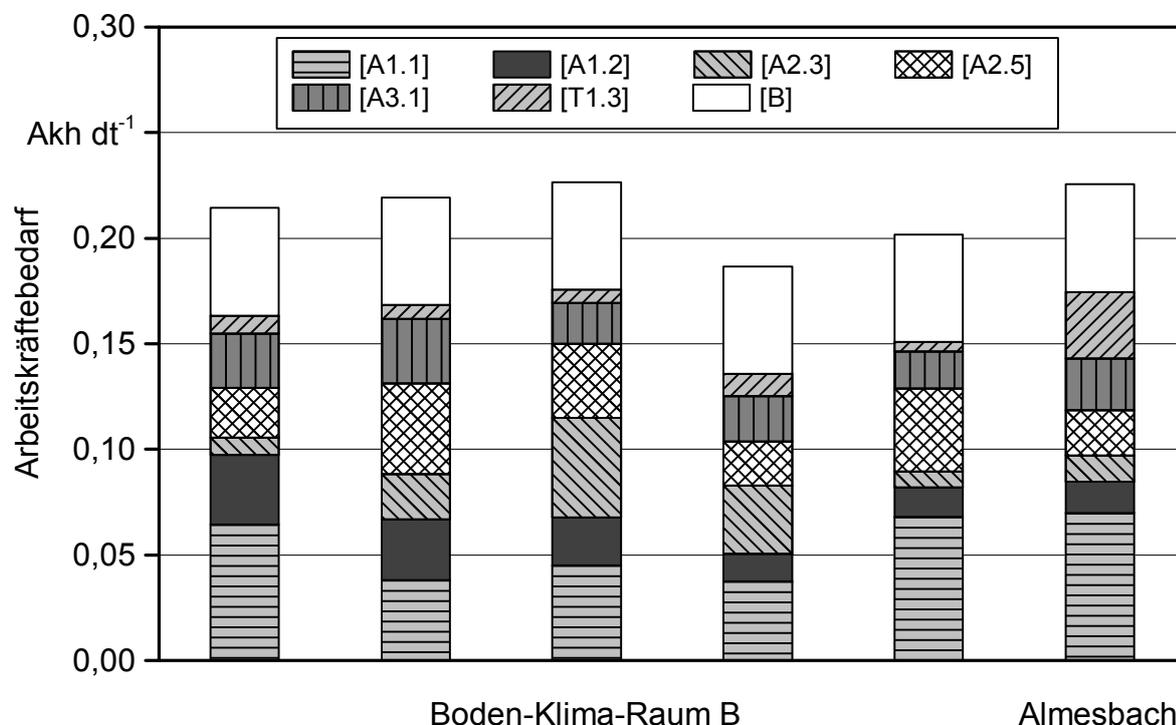


Abbildung 25: Arbeitskräftebedarf für die Rapserzeugung der fünf untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe im Boden-Klima-Raum B und des LVFZ Almesbach (Erntejahr 2013) sowie der Rapsölkraftstoffproduktion in Ölmühle Y bezogen auf 1 dt Rapssaat

Im Durchschnitt der landwirtschaftlichen Betriebe waren zur Bereitstellung und zum Transport zur Ölmühle je dt Rapssaat ca. $0,16 \text{ AKh}$ notwendig (vgl. Abbildung 25). Für die Bereitstellung der gesamten verarbeiteten Rapssaat der Ölmühle (21.120 dt Rapssaat) waren damit rund $1,8 \text{ AK}$ notwendig. Für die gesamte Rapsölproduktion konnten im Betrachtungsjahr somit $2,4 \text{ AK}$ beschäftigt werden.

5.3 Sensitivitätsanalysen

Bei der Bewertung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen der Rapserzeugung sowie der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion konnten unterschiedliche Schlüsselfaktoren identifiziert werden. Diese sollen nun in den Sensitivitätsanalysen näher betrachtet werden. Dabei wird zwischen den Sensitivitätsanalysen der Rapserzeugung und denen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion unterschieden.

5.3.1 Sensitivitätsanalysen der Rapserzeugung

In Abschnitt 5.1.1 konnte gezeigt werden, dass die THG-Bilanz der Rapserzeugung im Wesentlichen durch das Düngungsmanagement beeinflusst wird. Ein weiterer Faktor, der sich auf die gesamte Prozesskette der Rapserzeugung auswirkt, ist die eingesetzte Kraftstoffart. Die Faktoren „Kraftstoffart“ und „Mineraldüngerart“ sollen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der Rapserzeugung näher untersucht werden.

Sensitivität der Kraftstoffart

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse in den 15 untersuchten Betrieben sicherzustellen, wird in den Basisvarianten standardmäßig fossiler Dieselmotorkraftstoff für die Rapserzeugung eingesetzt. Im Mittel der Erntejahre 2013 bis 2015 werden durch den Einsatz von fossilem Dieselmotorkraftstoff in den 15 untersuchten Praxisbetrieben 0,068 kg CO₂-Äquivalente je erzeugtes Kilogramm Rapssaat emittiert (Abbildung 26). Der überwiegende Teil wird dabei durch Nutzung bzw. Verbrennung des fossilen Dieselmotorkraftstoffs freigesetzt (0,059 kg kg⁻¹). Bei der Bereitstellung des fossilen Dieselmotorkraftstoffs fallen dagegen nur 0,010 kg kg⁻¹ an.

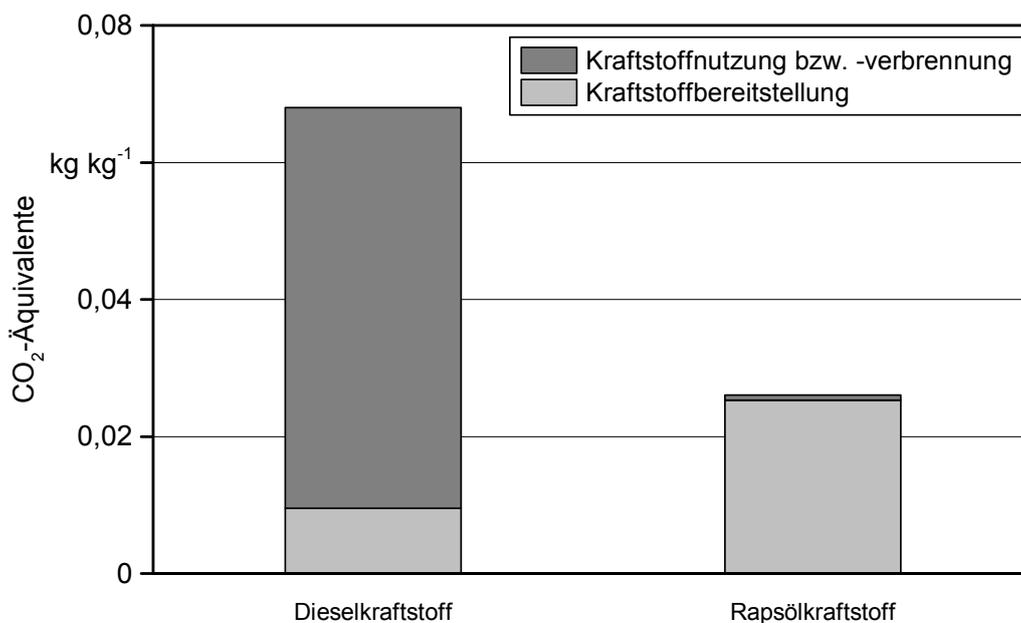


Abbildung 26: THG-Emissionen von Diesel- und Rapsölkraftstoff in der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente (Mittelwerte der 15 untersuchten landwirtschaftlichen Praxisbetriebe in den Erntejahren 2013 bis 2015)

In einem Szenario wird in den 15 untersuchten Betrieben Rapsölkraftstoff für die Raps-erzeugung eingesetzt. Hierbei wird jedoch ein Mehrverbrauch von 5 % Rapsölkraftstoff im Vergleich zu fossilen Dieselloskraftstoff angenommen. Grund hierfür ist die Differenz in den Energiegehalten der beiden Kraftstoffe. Als THG-Emissionsfaktor für die Bereitstellung des Rapsölkraftstoffs wird der Mittelwert aus den regionalen THG-Bilanzen der Erntejahre 2013 bis 2015 verwendet (siehe Abbildung 23).

Abbildung 26 zeigt, dass durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff die THG-Emissionen für die Raps-erzeugung gesenkt werden können. Im Mittel der Erntejahre 2013 bis 2015 werden durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff in den 15 untersuchten Betrieben nur noch 0,026 kg CO₂-Äquivalente je erzeugtes Kilogramm Rapssa-aat über den Kraftstoff emittiert. Die THG-Emissionen sind dabei fast ausschließlich auf die Bereitstellung von Rapsölkraftstoff zurückzuführen (0,025 kg kg⁻¹). Bei der Nutzung bzw. Verbrennung von Rapsölkraftstoff fallen dagegen nur geringe THG-Emissionen in Form von Methan und Lachgas an (0,001 kg kg⁻¹). Durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff können die THG-Emissionen der Rapssa-aterzeugung um durchschnittlich 5 % im Vergleich zur Verwendung von fossilem Diesel gesenkt werden.

Sensitivität der Mineraldüngerart

Bei der Bewertung der verschiedenen Mineraldünger spielt der Herstellungsprozess des Stickstoffs die entscheidende Rolle. Bei der Bereitstellung mineralischer Ammonium- und Nitratdünger werden große Mengen Energie verbraucht (Haber-Bosch-Verfahren). Die THG-Bilanz nitrathaltiger Mineraldünger wird darüber hinaus durch N₂O-Emissionen bei der Salpetersäureproduktion belastet. Bis auf wenige Ausnahmen (Harnstoff) enthalten Mineraldünger jedoch meist mehrere Stickstoffformen. Die THG-Bilanz von Mehrnährstoffdüngern wie beispielsweise NPK-Dünger wird durch die Bereitstellung von Phosphat (P₂O₅) und Kali (K₂O) zusätzlich belastet.

In Tabelle 21 sind die THG-Emissionen ausgewählter Mineraldünger in kg CO₂-Äquivalente je kg Nährstoff dargestellt. Die Bezugseinheit Kilogramm Nährstoff setzt sich aus Stickstoff (N), Phosphat (P₂O₅) und Kali (K₂O) zusammen. Da in reinen N-Mineraldüngern (z. B. Harnstoff oder KAS) und schwefelhaltigen N-Mineraldüngern (Harnstoff-AS oder ASS) kein Phosphat und Kali enthalten sind, entsprechen die angegebenen THG-Emissionen je kg Nährstoff einem kg N (Tabelle 21). Für die Mehrnährstoffdünger NPK (15/15/15) und NPK (20/7/7) betragen die THG-Emissionen 3,35 bzw. 5,04 kg kg⁻¹ Nährstoff. Bei der Ausbringung von einem kg N erhöhen sich die THG-Emissionen entsprechend ihrer P₂O₅- bzw. K₂O-Gehalte: im Fall von NPK (15/15/15) um den Faktor 3 auf 10,05 kg CO₂-Äquivalente bzw. im Fall von NPK (20/7/7) um den Faktor 1,7 auf 8,57 kg CO₂-Äquivalente.

Bei Bereitstellung von Mineraldüngern bestehen hinsichtlich der THG-Emissionen erhebliche Unterschiede. Die Verwendung von THG-optimierten Mineraldüngern ist für die Reduzierung der THG-Emissionen in der Raps-erzeugung ein entscheidender Einflussfaktor. Allerdings sind hierbei die unterschiedlichen N-Effizienzen der einzelnen Mineraldünger zu beachten. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Stickstoffzusammensetzung (Carbamid, Ammonium, Nitrat) können standortbedingt höhere N-Gaben erforderlich sein. Weiterhin

sollte die Verwendung von NPK-Dünger nur bei P_2O_5 - bzw. K_2O -Bedarf erfolgen, da der darin befindliche Stickstoff vergleichsweise hohe THG-Emissionen mit sich bringt.

Tabelle 21: THG-Emissionsfaktoren ausgewählter Mineraldünger bezogen auf 1 kg Nährstoff und 1 kg N (berechnet mit ecoinvent database v2.2 [111])

Mineraldüngerart mit Nährstoffgehalten	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹ Nährstoff	Nährstoffzusammensetzung je kg	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹ N
Harnstoff-AS mit 33 % N	3,00	1 (N)	3,00
Harnstoff mit 46 % N	3,30	1 (N)	3,30
NPK mit 15 % N, 15 % P ₂ O ₅ , 15 % K ₂ O	3,35	0,333 (N) 0,333 (P ₂ O ₅) 0,333 (K ₂ O)	10,05
Ammonsulfatsalpeter mit 26 % N, 13 % S	5,03	1 (N)	5,03
NPK mit 20 % N, 7 % P ₂ O ₅ , 7 % K ₂ O	5,04	0,588 (N) 0,206 (P ₂ O ₅) 0,206 (K ₂ O)	8,57
Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung mit 32 % N	5,84	1 (N)	5,84
Kalkammonsalpeter mit 27 % N	8,65	1 (N)	8,65

5.3.2 Sensitivitätsanalysen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

In Unterkapitel 5.2 konnte herausgearbeitet werden, dass die Auslastung sowie der Strombedarf der Ölmühle entscheidende Schlüsselfaktoren in Bezug auf die Ergebnisse der ökologischen Bewertung der Ölgewinnung (Prozessgruppe [B]) sind. Ein weiterer Schlüsselfaktor, der sich auf die gesamte Prozesskette der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion auswirkt, ist die Ölausbeute. Diese Faktoren sollen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion näher untersucht werden.

Sensitivität der Auslastung der Ölmühle

Den Basisvarianten der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in den Ölmühlen X, Y und Z ist die reale Auslastung der jeweiligen Ölmühle für die untersuchten Verarbeitungsjahre zugrunde gelegt (vgl. Tabelle 22). Um den Einfluss der Auslastung auf die Höhe der CO₂-Äquivalente sowie der Presskosten zu quantifizieren, wird dem Produktionsprozess der Ölgewinnung (Prozessgruppe [B]) eine Auslastung von 0 bis 100 % unterstellt. Eine 100%ige Auslastung entspricht 365 Presstagen mit 24 Verarbeitungsstunden, wobei aus einer Umfrage im Jahr 2007 eine übliche Vollauslastung von 330 Presstagen ermittelt wurde [116][60].

Tabelle 22: Auslastung der Ölmühlen in den Verarbeitungsjahren 2013/2014 und 2014/2015 (Basisvariante)

	Ölmühle X		Ölmühle Y		Ölmühle Z	
	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015	2013/2014	2014/2015
Auslastung in %	23	27	30	41	25	29
Auslastung in Presstagen	83	98	110	150	90	105

Abbildung 27 zeigt die THG-Emissionen als CO₂-Äquivalente (linke Ordinate) und die Presskosten (rechte Ordinate) der Ölgewinnung (Prozessgruppe [B]) in Abhängigkeit von der Auslastung der Ölmühle. Die THG-Emissionen spiegeln die Mittelwerte der Verarbeitungsjahre 2013/2014 sowie 2014/2015 für alle drei Ölmühlen wider. Die Presskosten sind als Mittelwert der Verarbeitungsjahre für Ölmühle Y dargestellt.

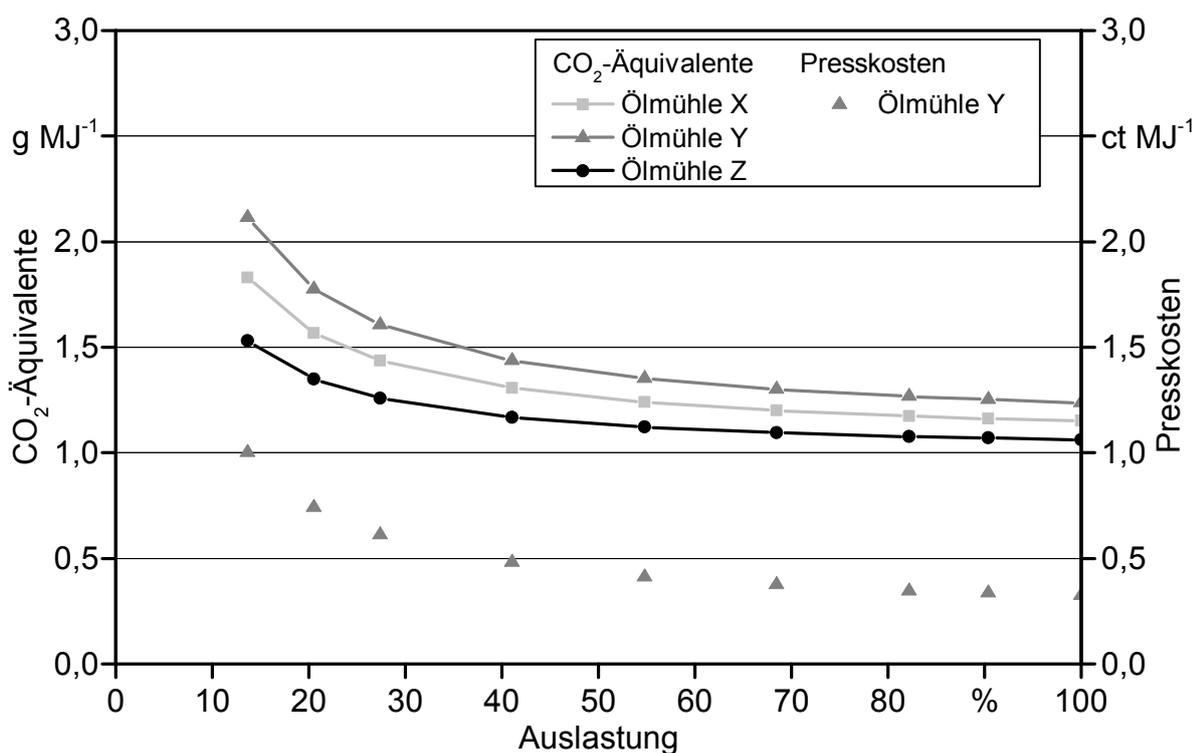


Abbildung 27: Einfluss der Auslastung der Ölmühle auf die THG-Emissionen der Prozessgruppe [B] Transformation – Wertebereich von 10 bis 100 %

Es zeigt sich, dass mit sinkender Auslastung sowohl die THG-Emissionen als auch die Presskosten ansteigen. In dem dargestellten Auslastungsbereich von 10 bis 100 % variieren die THG-Emissionen von 1,51 bis 1,05 g MJ⁻¹ für Ölmühle Z und von 2,2 bis 1,25 g MJ⁻¹ für Ölmühle Y. Die Gestehungskosten der Ölmühle Y liegen zwischen 1,0 und 0,3 ct MJ⁻¹. Es wird deutlich, dass die Presskosten erst unter einer Auslastung von

75 % bzw. 274 Presstagen exponentiell ansteigen. Das bedeutet, dass der Zielwert der Anlagenauslastung unter ökonomischen Gesichtspunkten bei mindestens 75 % bzw. 274 Presstagen liegen sollte, da eine geringere Auslastung einen sehr hohen Effekt auf die Gestehungskosten des Rapsöls hat. Dieses Ergebnis liegt in derselben Größenordnung wie in den Studien von REMMELE (2009) [91]. Dort wird auf Basis einer Marktanalyse empfohlen, die Auslastung einer dezentralen Ölmühle mit mindestens 250 Produktionstagen pro Jahr zu kalkulieren [91]. JAENISCH und SOMMERFELD (2005) geben einen leicht höheren Zielwert an. Nach ihren Untersuchungen sind ab 320 Presstagen nur noch geringe Abnahmen des Ölgestehungspreises zu erwarten [70]. Insgesamt lässt sich ableiten, dass die Auslastung einer dezentralen Ölmühle unter ökonomischen Gesichtspunkten bei mehr als 70 % bzw. 250 Presstagen liegen sollte. Die realen Auslastungen der untersuchten Ölmühlen lagen in den betrachteten Verarbeitungsjahren zwischen 23 und 41 % bzw. 83 und 150 Presstagen und damit unterhalb des Zielwertes.

Die Kurve der THG-Emissionen steigt bereits bei einer Auslastung unter 55 % bzw. 200 Presstagen exponentiell an. Für eine Optimierung der THG-Bilanz sollte die Auslastung daher bei mindestens 55 % bzw. 200 Presstagen liegen, da eine geringere Auslastung einen hohen Effekt auf die THG-Bilanz hat. Dies verdeutlicht auch die nachweisliche Verbesserung der Ergebnisse der THG-Emissionen und der Presskosten im Verarbeitungsjahr 2014/2015 im Vergleich zu 2013/2014. Hier wurde die Auslastung von 23 auf 41 % gesteigert.

Weiterhin geht aus Abbildung 27 hervor, dass der Abstand zwischen den THG-Emissionen der einzelnen Ölmühlen mit sinkender Auslastung zunimmt. Somit werden der Einfluss der Skaleneffekte zwischen Ölmühle X und Ölmühle Z sowie der Unterschied in der Anlagenkonzeption bei Ölmühle Y mit sinkender Auslastung größer.

Ölausbeute

Den Einfluss der Ölausbeute auf die Höhe der CO₂-Äquivalente (linke Ordinate) sowie der Produktionskosten (rechte Ordinate) der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion zeigt Abbildung 28. Für diese Sensitivitätsanalyse wurde unabhängig von der eigentlichen Ölausbeute der jeweiligen Ölmühle (vgl. Tabelle 6) ein Wertebereich von 0,33 bis 0,38 kg Öl je kg Rapssaat festgelegt. Dieser angenommene Wertebereich entspricht den Ölausbeuten, die in Abhängigkeit des Ölgehalts der Rapssaat in den Praxisanlagen erhoben wurden. Der Ölgehalt in den Praxisanlagen lag in den untersuchten Verarbeitungsjahren zwischen 42,5 und 44,0 %. Die Ölausbeute variierte zwischen 0,351 und 0,374 kg kg⁻¹. Dies entspricht einem Abpressgrad von ca. 80 %.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen die jeweiligen Mittelwerte für die Verarbeitungsjahre 2013/2014 und 2014/2015 mit den Erntejahren 2013 und 2014. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Ölausbeuten zwischen 0,33 und 0,38 kg kg Saat⁻¹ zeigen sich sowohl sinkende THG-Emissionen als auch sinkende Produktionskosten. Dabei sinken die THG-Emissionen für Ölmühle X von 35,53 auf 34,41 g MJ⁻¹, für Ölmühle Y von 34,51 auf 33,43 g MJ⁻¹ bzw. für Ölmühle Z von 37,07 auf 35,91 g MJ⁻¹. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei steigender Ölausbeute die Presskuchenmasse abnimmt. Damit erhöht sich bei der ökologischen Bewertung der Allokationsfaktor zulasten des Rapsölkraftstoffs.

Allerdings sinken bei steigender Ölausbeute auch der Bedarf an Rapssaat je MJ Rapsölkraftstoff und damit auch die mit der Rapsverarbeitung verbundenen THG-Emissionen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Letztgenannte sinken im dargestellten Anwendungsfall so stark, dass sie den zulasten des Rapsölkraftstoffs höheren Allokationsfaktor mehr als kompensieren.

Die Gestehungskosten für Ölmühle Y sinken von 2,26 bis 2,06 ct MJ⁻¹ (vgl. Abbildung 28). Auch hier werden die geringere Ausbeute an Rapspresskuchen und damit der geringere Erlös durch die Einsparungen des Rapssaatbedarfs übervorteilt. Diese positive Kostenveränderung ist jedoch abhängig vom Einkaufspreis der Rapssaat sowie vom Erlös des Rapspresskuchens.

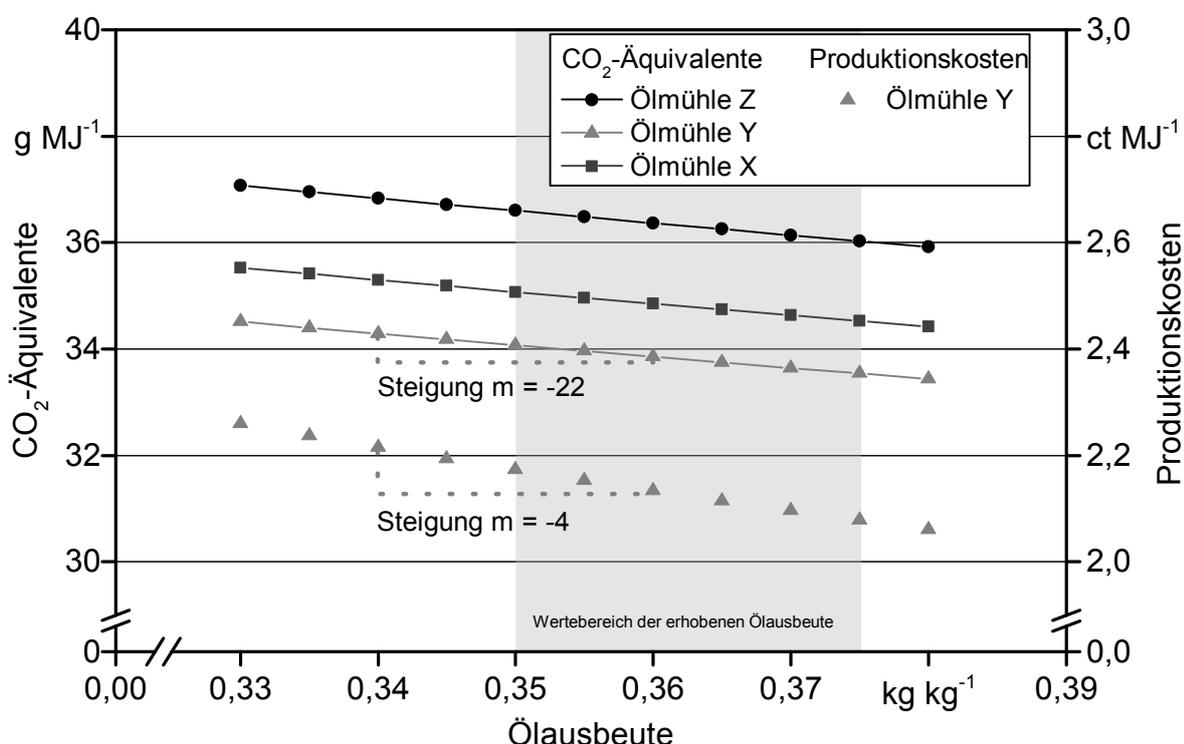


Abbildung 28: Einfluss der Ölausbeute auf die THG-Emissionen der Rapsölkraftstoffproduktion

Darüber hinaus kann aus der Sensitivitätsanalyse „Ölausbeute“ mithilfe der Steigungsformel (vgl. Formel (5.1)) eine unterschiedliche Ausprägung der Auswirkungen auf die THG-Emissionen und die Gestehungskosten abgeleitet werden.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{5.1}$$

So weisen die Graphen der CO₂-Äquivalente eine deutlich höhere negative Steigung auf ($m = -22$) als der Graph der Produktionskosten ($m = -4$). Folglich wirkt sich die Änderung der Ölausbeute deutlich stärker auf die THG-Emissionen als auf die Produktionskosten aus.

Erzeugung von Eigenstrom durch Verstromung von Rapsöl im BHKW

Das Szenario Eigenstrom bezieht sich ausschließlich auf die Ölmühle Y. In dieser Ölmühle wird derzeit ein BHKW mit einer installierten elektrischen Leistung von 25 kW, einer installierten thermischen Leistung von 45 kW und einer Brennstoffleistung von 79,6 kW betrieben. Daraus ergibt sich ein Verbrauch von 7,642 kg Rapsöl pro Stunde. Der Nutzungsgrad wird mit 0,9 angenommen. Dem BHKW wird bei Betrieb der Ölmühle eine kontinuierliche Produktion von Strom und Wärme unterstellt.

Ein Vergleich mit der Energie- und Stoffstromanalyse der Ölmühle Y zeigt, dass mit dem vorhandenen BHKW weniger Strom generiert werden kann, als von der Anlage an Prozessenergie benötigt wird. Folglich kann der erforderliche Strombedarf nur anteilig durch die Verstromung von Rapsöl im BHKW substituiert werden. Das Referenzsystem für den substituierten Fremdstrom ist der deutsche Strommix (vgl. Tabelle 23).

Tabelle 23: Kenndaten zur Strom- und Wärmeerzeugung in Ölmühle Y

	Ölmühle Y	
	2013/2014	2014/2015
Stromerzeugung		
Eigenstromerzeugung im BHKW in MJ kg ⁻¹ Saat	0,099	0,099
zusätzlicher Fremdstrom in MJ kg ⁻¹ Saat	0,153	0,159
Strombedarf der Ölmühle in MJ kg ⁻¹ Saat	0,252	0,258
Wärmeerzeugung		
Wärme gesamt	0,182	0,182
Wärmebedarf der Ölmühle in MJ kg ⁻¹ Saat	0,039	0,039
potenzielle Nutzwärme in MJ kg ⁻¹ Saat	0,143	0,143
verkaufte Wärme in MJ kg ⁻¹ Saat	0,072	0,072
weitere Bilanzkenngrößen		
zusätzlicher Rapssaatbedarf in kg kWh ⁻¹ Strom	0,50	0,51
exegetischer Allokationsfaktor Strom in %	78,9	78,9
Wärmepreis in € MWh ⁻¹	75	75
Emissionsfaktor Strom aus Rapsöl in g kWh ⁻¹	365	320
Emissionsfaktor Referenzsystem für Fremdstrom (deutscher Strommix) in g kWh ⁻¹	399	399

Die im BHKW gleichzeitig erzeugte Wärme dient einerseits als Prozesswärme und andererseits für die Beheizung des Verwaltungsgebäudes (Nutzwärme). Der Anteil der Prozesswärme liegt bei 21 % und der Anteil der Nutzwärme bei 79 % (vgl. Tabelle 23). Die Nutzwärme wird bei der Bewertung der ökologischen Wirkungen mittels exegetischer Allokation berücksichtigt (vgl. Tabelle 23). Bei der Bewertung der Produktionskosten werden 50 % der Nutzwärme mit einem Wärmeerlös (Gutschrift) berücksichtigt.

Abbildung 29 zeigt die Bilanzergebnisse der ökologischen Bewertung am Beispiel der Wirkungskategorie „Globale Erwärmung“ als CO₂-Äquivalente in g MJ⁻¹. Hierbei sind die Ergebnisse des Szenarios Erzeugung von Eigenstrom durch Verstromung von Rapsöl im BHKW den Ergebnissen des Basiszenarios für die Jahre 2013 und 2014 gegenübergestellt. Der Vergleich der Basisvariante mit dem Szenario Eigenstrom zeigt einen geringen Rückgang der THG-Emissionen im Fall der Eigenstromerzeugung. So sinken im Jahr 2013 die THG-Emissionen von 36,3 g MJ⁻¹ auf 35,7 g MJ⁻¹ und im Jahr 2014 von 31,8 g MJ⁻¹ auf 31,2 g MJ⁻¹. Dabei ist zu beobachten, dass die Emissionen, die mit der Erzeugung und Bereitstellung der Biomasse [A] in Verbindung stehen, im Vergleich zur Basisvariante von 34,5 bzw. 30,2 g MJ⁻¹ auf 34,7 bzw. 30,3 g MJ⁻¹ geringfügig ansteigen. Dies ist auf den zusätzlichen Bedarf an Rapssaat (3 %) je MJ Rapsölkraftstoff zurückzuführen, der für die Rapsölproduktion zur Verstromung im BHKW benötigt wird. Die Emissionen der eigentlichen Ölgewinnung [B] dagegen sinken von 1,57 bzw. 1,47 g MJ⁻¹ auf 0,76 bzw. 0,63 g MJ⁻¹. Grund hierfür ist die Reduzierung des Fremdstrombedarfs, der über den deutschen Strommix abgedeckt wird. Hierbei zeigt der deutsche Strommix einen leicht höheren Emissionsfaktor von 399 g kWh⁻¹ als die Stromerzeugung aus Rapsöl (365 bzw. 320 g kWh⁻¹) (vgl. Tabelle 23).

Bei der ökonomischen Bewertung sinken die Produktionskosten für Rapsölkraftstoff um ca. 0,01 € MJ⁻¹ (vgl. Abbildung 30) durch den Betrieb des BHKWs. Ausschlaggebend ist hierfür zum einen der Wärmeverkauf (vgl. Tabelle 23) und zum anderen geringere Kosten für den Stromeinkauf. Zur Ermittlung der Produktionskosten des Rapsölkraftstoffes werden die Erlöse des Wärmeverkaufs identisch zu den Erlösen des Rapspresskuchens von den Gesamtkosten der Ölmühle abgezogen. Diesen Kosteneinsparungen steht der höhere Bedarf an Rapssaat je Liter Rapsölkraftstoff bzw. ein geringerer Rapsölkraftstoffverkauf gegenüber. Der in dieser Sensitivitätsanalyse veranschaulichte ökonomische Vorteil kann also durch einen hohen Verkaufspreis von Rapsölkraftstoff bzw. einen hohen Einkaufspreis der Rapssaat vermindert werden. Auch Änderungen bei den gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Eigenstromversorgung können zu einer veränderten ökonomischen Situation führen.

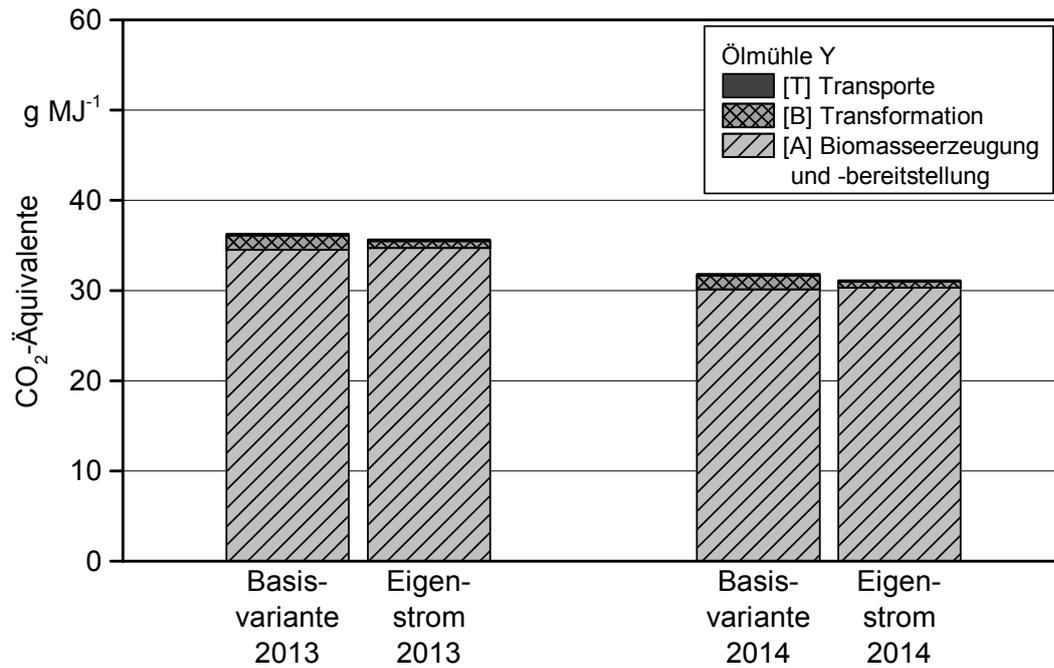


Abbildung 29: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff von Ölmühle Y in den Verarbeitungsjahren 2013/14 und 2014/15 mit und ohne Eigenstromnutzung

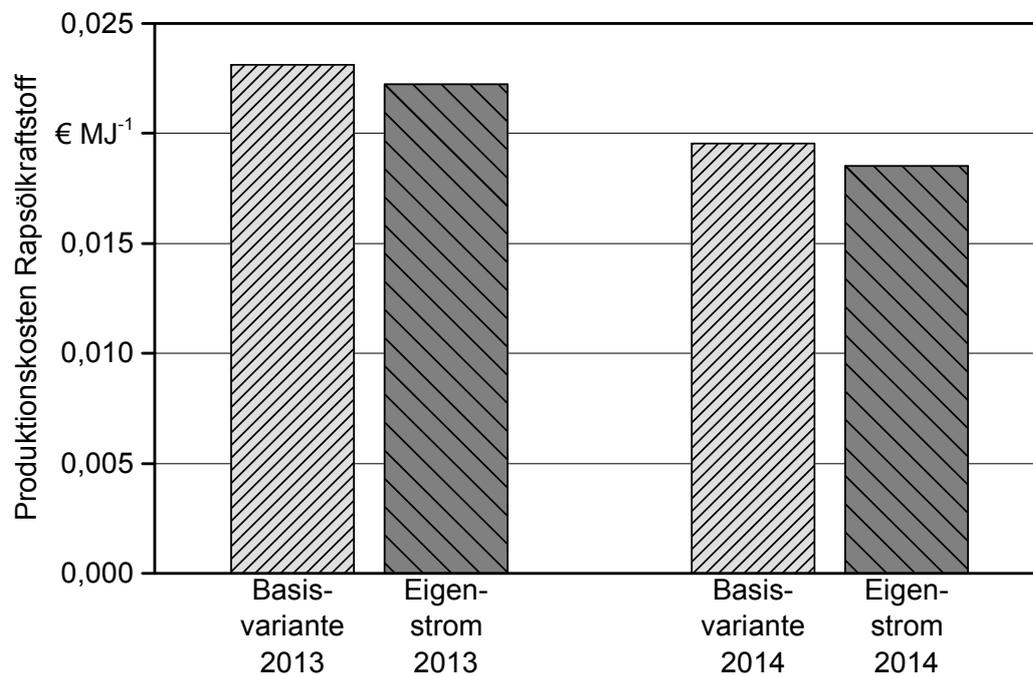


Abbildung 30: Produktionskosten von Rapsölkraftstoff von Ölmühle Y in den Verarbeitungsjahren 2013/14 und 2014/15 mit und ohne Eigenstromnutzung

6 Diskussion

6.1 Methodenvergleich: Berechnung von N₂O-Feldemissionen

Im Rahmen von ExpResBio werden zur Berechnung von direkten und indirekten N₂O-Feldemissionen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen die Aktivitätsdaten (N-Mengen aus Mineral- und Wirtschaftsdünger sowie Ernte-Wurzelrückständen) standardmäßig mit globalen Emissionsfaktoren nach IPCC (siehe Tabelle 4 in Unterkapitel 4.4) bewertet. Standorteinflüsse werden jedoch hierbei nur unzureichend in die THG-Bilanzen einbezogen. Die tatsächliche Höhe der N₂O-Feldemission ist von bodenspezifischen Parametern abhängig, die wiederum von der Bewirtschaftungsweise beeinflusst werden. Die Berücksichtigung der konkreten Standort- und Produktionsbedingungen ist bei der Ableitung praktisch umsetzbarer THG-Minderungsstrategien, besonders für N-intensive landwirtschaftliche Kulturen wie dem Raps, von großer Bedeutung. Die Untersuchungen zur Raps-erzeugung in den drei bayerischen Boden-Klima-Räumen haben gezeigt, dass THG-Emissionen zu mehr als der Hälfte durch N₂O-Feldemissionen verursacht werden (Tabelle 15). Auch im Hinblick auf die festgelegten Mindestwerte zur Reduktion der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen (Biokraft-NachV) [13] kann die verwendete Methode zur Berechnung der N₂O-Feldemissionen die betrieblichen Ergebnisse beeinflussen und so über die Vorzüglichkeit (THG-Quote) oder sogar den Marktzugang des entsprechenden Biokraftstoffes entscheiden.

Im Folgenden wird anhand der Methode von STEHFEST und BOUWMAN (2006) [107] dargestellt, welchen Einfluss die Berücksichtigung standortspezifischer Parameter auf die Ergebnisse der N₂O-Feldemissionen hat. Hierbei werden die direkten N₂O-Feldemissionen aus Mineral- und Wirtschaftsdünger nach Standort- (Klimazone, Bodentextur, Kohlenstoffgehalt im Boden und pH-Wert im Boden) und Bewirtschaftungsparametern (N-Applikationsrate und Art der Feldfrucht) bewertet. Die Methode von STEHFEST und BOUWMAN (2006) wird unter anderem im Global Nitrous Oxide Calculator (GNOC) verwendet. Das GNOC wird für die Bewertung der THG-Standardwerte von Biokraftstoffen in der EU-Gesetzgebung entwickelt.

Nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) werden Standorte in verschiedene Klassen bezüglich der Klimazone (gemäßigt kontinental, gemäßigt ozeanisch, subtropisch, tropisch), der Bodentextur (grob-, mittel- bzw. feinkörnig), des Kohlenstoffgehaltes im Boden (< 1 %, 1 bis 3 % bzw. > 3 %) und des pH-Werts im Boden (< 5,5, 5,5 bis 7,3 bzw. > 7,3) eingeteilt. Weiterhin befinden sich alle untersuchten Betriebe in der gemäßigten ozeanischen Klimazone (vgl. Tabelle 24). Demnach hat der Standortparameter „Klimazone“ keinen Einfluss auf die unterschiedlichen Ergebnisse in den Boden-Klima-Räumen.

Die Bodentextur dagegen hat einen erheblichen Einfluss auf die Bildung von N₂O-Feldemissionen. In Böden mit mittelkörniger Textur (lehmige Böden mit weniger als 35 % Ton und weniger als 65 % Sand; auch Sandanteile bis zu 82 % sind möglich, wenn der Tonanteil mindestens 18 % beträgt) kommt es aufgrund eines optimalen Anteils des wassergefüllten Porenraumes zu einer reduzierten N₂O-Bildung. Auch der Kohlenstoffgehalt im Boden (C_{org}) beeinflusst die Intensität der N₂O-Feldemissionen. Vor allem De-

nitrifizierer nutzen Kohlenstoff z. B. als Elektronendonator bei der Denitrifikation. Deshalb erhöht sich die Denitrifikationsrate, je mehr C_{org} vorhanden ist. Letztlich haben STEHFEST und BOUWMAN (2006) beobachtet, dass die N_2O -Bildung ab einem pH-Wert von 5,5 bis 7,3 leicht und ab einem pH-Wert von mehr als 7,3 stark abnimmt.

Tabelle 24: Zuordnung der standortspezifischen Parameter für die untersuchten Betriebe nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) [107] mittels GNOC [78]

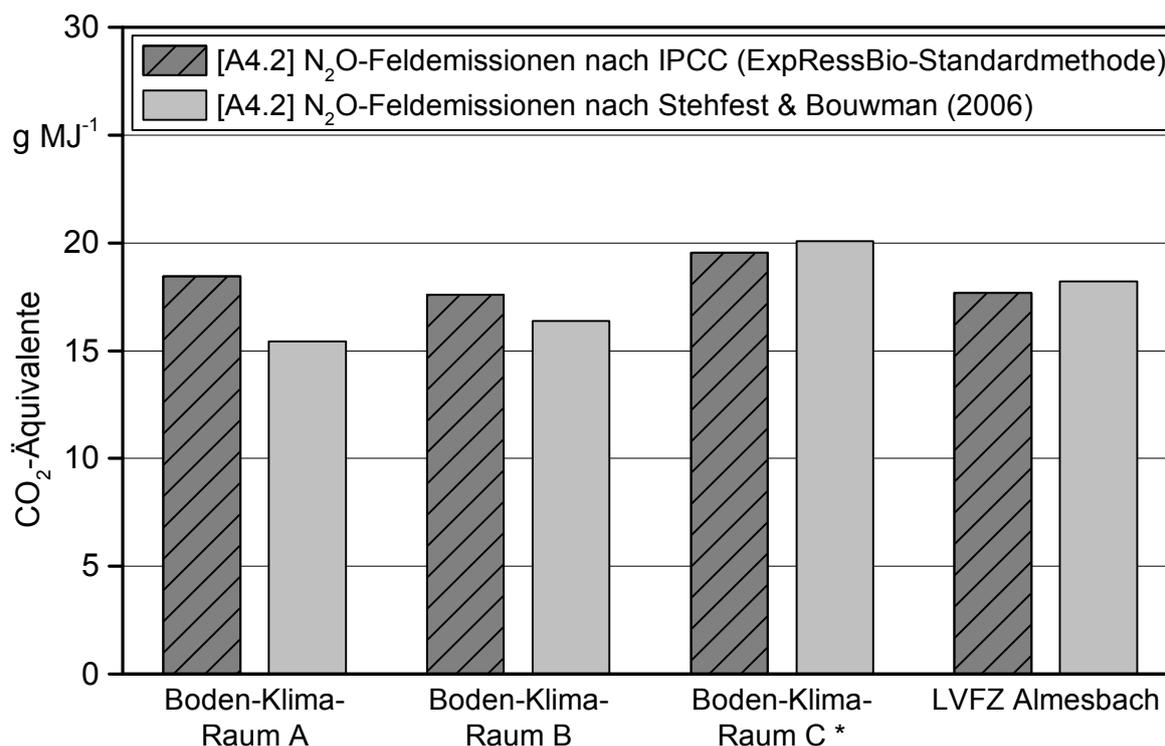
	Klimazone	Bodentextur	Kohlenstoffgehalt im Boden in %	pH-Wert im Boden
Boden-Klima-Raum A				
Betrieb 1	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	< 1	> 7,3
Betrieb 2	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	< 1	5,5–7,3
Betrieb 3	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	< 1	> 7,3
Betrieb 4	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	< 1	5,5–7,3
Betrieb 5	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	< 1	5,5–7,3
Boden-Klima-Raum B				
Betrieb 1	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	1–3	5,5–7,3
Betrieb 2	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	1–3	5,5–7,3
Betrieb 3	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	1–3	5,5–7,3
Betrieb 4	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	1–3	5,5–7,3
Betrieb 5	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	1–3	5,5–7,3
Boden-Klima-Raum C				
Betrieb 1*	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	< 1	5,5–7,3
Betrieb 2	gemäßigt ozeanisch	grobkörnig	1–3	< 5,5
Betrieb 3*	gemäßigt ozeanisch	mittelkörnig	1–3	5,5–7,3
Betrieb 4	gemäßigt ozeanisch	grobkörnig	1–3	< 5,5
Betrieb 5	gemäßigt ozeanisch	grobkörnig	1–3	< 5,5
LVFZ Almesbach	gemäßigt ozeanisch	grobkörnig	1–3	< 5,5

* Betriebe liegen im nördlichen Teil des Boden-Klima-Raums B an der Grenze zu C (vgl. Unterkapitel 4.5)

Im Vergleich zur ExpResBio-Standardmethode zeigt die Anwendung der standortspezifischen Parameter nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) unterschiedliche Auswirkungen auf die Ergebnisse der N_2O -Feldemissionen. Während sich die Ergebnisse für die N_2O -Feldemissionen im Boden-Klima-Raum A um 16 % und im Boden-Klima-Raum B um 7 % verringern, steigen diese im Boden-Klima-Raum C und dem LVFZ Almesbach um jeweils 3 % leicht an (Abbildung 31).

Bei der Berechnung der N_2O -Feldemissionen nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) sind die stark verringerten Ergebnisse im Boden-Klima-Raum A auf eine optimale Bodentex-

tur (mittelkörnig), einen minimalen Kohlenstoffgehalt im Boden (< 1 %) und mittlere (5,5 bis 7,3) bis hohe pH-Werte im Boden (> 7,3) zurückzuführen. Zusätzlich machen sich die im Vergleich zu den anderen Boden-Klima-Räumen geringeren N-Zufuhren (siehe Tabelle 15) positiv bemerkbar. Die Standortparameter der Betriebe im Boden-Klima-Raum B sind grundsätzlich mit denen im Boden-Klima-Raum A vergleichbar. Lediglich die Kohlenstoffgehalte im Boden sind mit 1 bis 3 % betriebsübergreifend höher. Zudem liegen die pH-Werte in allen Betrieben zwischen 5,5 und 7,3.



* Beinhaltet zwei Betriebe, die im nördlichen Teil des Boden-Klima-Raums B an der Grenze zu C liegen (vgl. Unterkapitel 4.5)

Abbildung 31: N₂O-Feldemissionen in den drei bayerischen Boden-Klima-Räumen und dem LVFZ Almesbach in Abhängigkeit der Methode zur Berechnung der N₂O-Feldemissionen

Nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) befinden sich das LVFZ Almesbach und die drei Betriebe im Boden-Klima-Raum C² auf Standorten, die die N₂O-Bildung im Boden erhöhen. Demnach werden das LVFZ Almesbach und die drei Betriebe im Boden-Klima-Raum C den Klassen „grobkörnige Bodentextur“ und „pH-Wert < 5,5“ zugeordnet. Zudem werden das LVFZ Almesbach und alle Betriebe im Boden-Klima-Raum C, bis auf eine Ausnahme, der Klasse „C_{org} = 1 bis 3 %“ zugeordnet. Die vergleichsweise hohen N-

² Dem Boden-Klima-Raum C wurden zwei Betriebe aus dem nördlichen Teil des Boden-Klima-Raums B an der Grenze zu Boden-Klima-Raum C zugeordnet, da diese Betriebe dieselbe Ölmühle (Z) beliefern. Weiterhin zeigen diese Betriebe zwar eine ähnliche Bodentextur zu den anderen Betrieben in Boden-Klima-Raum B auf, die klimatischen Verhältnisse entsprechen jedoch eher den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben in Boden-Klima-Raum C (vgl. auch Unterkapitel 4.5).

Zuführen wirken sich darüber hinaus negativ auf die Ergebnisse der N₂O-Feldemissionen aus.

6.2 Methodenvergleich: Umgang mit Koppelprodukten

In der bisherigen Ergebnisdarstellung erfolgte die Aufteilung der Umweltbelastungen zwischen dem Rapsöl und dem Rapspresskuchen gemäß der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] durch Allokation nach dem Energiegehalt. Nach Richtlinie 2009/28/EG eigne sich die Energie-Allokationsmethode für Regulierungszwecke am besten, da sie leicht anzuwenden und im Zeitablauf vorhersehbar sei, kontraproduktive Anreize auf ein Mindestmaß begrenze und Ergebnisse hervorbringe, die in der Regel mit den Ergebnissen der Substitutionsmethode vergleichbar seien. Weiterhin wird geraten, für politische Analysen auch die Ergebnisse der Substitutionsmethode heranzuziehen [42].

Bei der Biokraftstoffproduktion entsteht als Koppelprodukt ein hochwertiges Eiweißfuttermittel, das keiner energetischen Nutzung zugeführt wird. Der Heizwert, der als Kriterium für die Energie-Allokation verwendet wird, ist damit von untergeordneter Bedeutung. Wesentliches Kriterium, das die eigentliche Nutzung beschreibt, ist der Futterwert des Rapspresskuchens. Aus diesem Grund soll im nachfolgenden Abschnitt der Einfluss der Methode zum Umgang mit Koppelprodukten auf das Ergebnis der THG-Bilanz dargestellt und diskutiert werden. Hierfür werden die Ergebnisse der THG-Bilanz für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern einmal alloziert und einmal unter Berücksichtigung der Substitutionsmethode einander gegenübergestellt. Die Herleitung des THG-Emissionsfaktors für das substituierte Sojaschrot inklusive der getroffenen Festlegungen wurde in Abschnitt 3.4.2.4 detailliert dargelegt. Neben der Anwendung der Substitutionsmethode wird der Vorfruchtwert des Rapsanbaus im Rahmen des Substitutionsverfahrens berücksichtigt. Die hierfür getroffenen Festlegungen sind in Unterkapitel 4.7 aufgeführt.

Substitution von Sojaextraktionsschrot durch Rapspresskuchen

Abbildung 32 zeigt die THG-Emissionen der Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern (Mittelwert der drei Ölmühlen und Anbaujahre) sowohl als alloziertes Ergebnis als auch für die Anwendung der Substitutionsmethode. Die THG-Einsparung durch dezentral erzeugten Rapsölkraftstoff bei Anwendung der in der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] geforderten Energie-Allokationsmethode liegt bei 58 %.

Um den Rapspresskuchen in seiner tatsächlichen Anwendung als Eiweißfuttermittel zu bewerten, wird in Abbildung 32 zusätzlich zur Allokation die Systemraumerweiterung mit Substitution von Sojaextraktionsschrot durch Rapspresskuchen auf Basis der Futterwerte dargestellt (vgl. Unterkapitel 4.6). Hierbei sind die mit dem Rapsanbau und der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion verbundenen Bruttoemissionen auf der positiven Ordinatennachse und die Gutschriften für die Substitution von Sojaextraktionsschrot durch Rapspresskuchen auf der negativen Ordinatennachse aufgetragen (siehe Abbildung 32). Die Nettoemissionen sind durch die breitere dunkelgraue Säule dargestellt. Weiterhin wird bei der Anwendung der Substitutionsmethode zwischen den Szenarien „Gutschrift

mit LUC“ und „Gutschrift ohne LUC“ unterschieden. Der einzige Unterschied zwischen den Szenarien ist die in Unterkapitel 4.6 ausführlich dargelegte anteilige Landnutzungsänderung (LUC) beim Sojaanbau in Südamerika. Im Szenario „Gutschriften mit LUC“ wird für das aus Südamerika importierte Sojaschrot bzw. für die Sojabohnen eine anteilige Landnutzungsänderung von 8,4 % unterstellt (vgl. Unterkapitel 4.6).

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei Anwendung der Substitutionsmethode für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion und bei Verwendung des Rapspresskuchens als Eiweißfuttermittel die THG-Einsparung im Vergleich zum fossilen Referenzwert bei bis zu 82 % liegt. Ein Vergleich der THG-Einsparungen unter Anwendung der Allokationsmethode und der Substitutionsmethode verdeutlicht, dass die Ergebnisse nur dann miteinander vergleichbar sind, wenn Landnutzungsänderungen bei dem Anbau von Sojabohnen in Südamerika vollständig ausgeschlossen werden können. Die THG-Einsparungen des Szenarios „Gutschriften ohne LUC“ sind mit 59 % nur marginal höher als die nach dem Heizwert allozierten Ergebnisse (58 % THG-Einsparung).

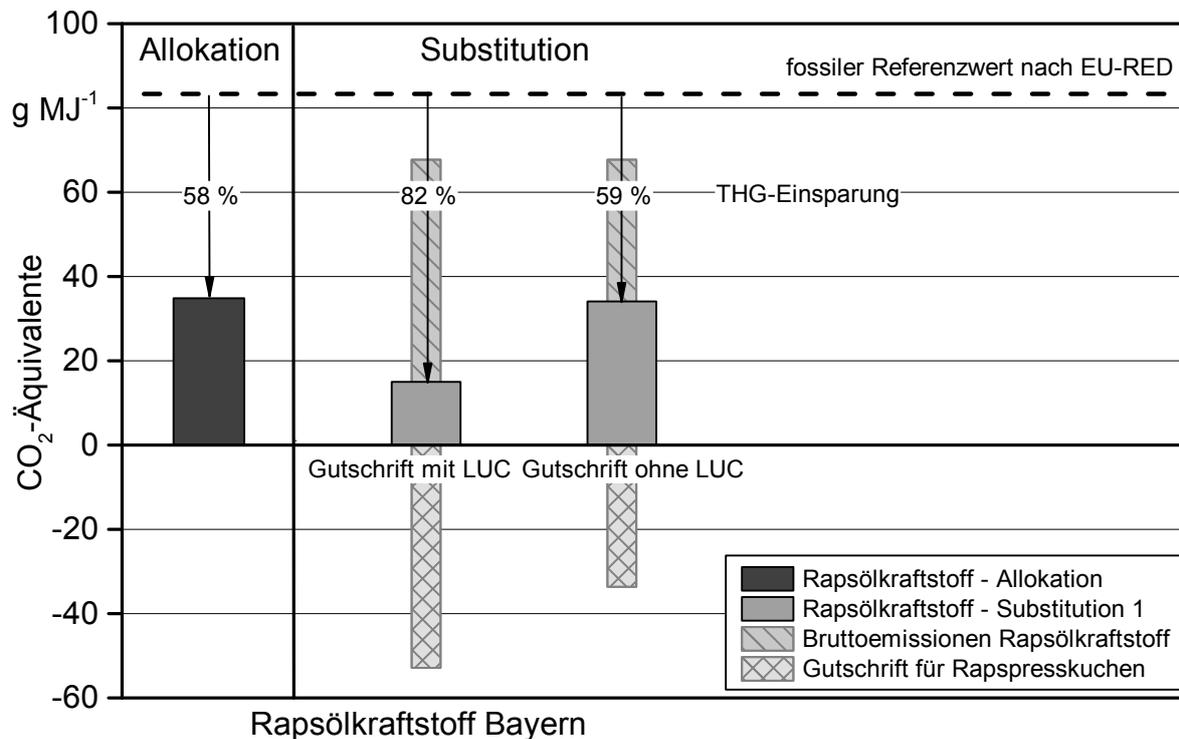


Abbildung 32: THG-Einsparung von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in Abhängigkeit der Methode zur Bewertung des Rapspresskuchens

Untersuchungen von FLESSA et al. (2012) [51] sowie MÜLLER-LINDENLAUF et al. (2013) [85] weisen jedoch ebenfalls darauf hin, dass die in Unterkapitel 4.6 beschriebenen Landnutzungsänderungen in Brasilien im Zusammenhang mit dem erhöhten Flächenverbrauch für den Sojaanbau stehen. Für die Berechnungen in dieser vergleichenden Gegenüberstellung werden daher die anteiligen Landnutzungsänderungen von 8,4 % in

der THG-Gutschrift berücksichtigt. Bei der Bilanzierung des Rapsanbaus in Bayern wird angenommen, dass Landnutzungsänderungen auf Grund des Rapsanbaus nicht stattgefunden haben, auch wenn in Deutschland im Betrachtungszeitraum ein Umbruch von Grünland nachweislich stattfand. Grund für diese Annahme ist die geltende Biokraftstoff-nachhaltigkeitsverordnung, nach der die Rohstoffe für die Biokraftstoffproduktion nicht von Flächen mit Landnutzungsänderung stammen dürfen [13]. Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte zeigen die Ergebnisse („Gutschrift mit LUC“) um 24 % Punkte höhere THG-Einsparungen als bei Anwendung der Allokationsmethode.

Darüber hinaus wird durch die Energie-Allokationsmethode nach Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] der tatsächliche Verwendungszweck des Rapspresskuchens als hochwertiges Eiweißfuttermittel nicht korrekt dargestellt. Aus diesem Grund sollten für weitere Analysen und strategische Entscheidungen – wie in der EU-RED gefordert – auch die Ergebnisse der Substitutionsmethode Beachtung finden. Der verwendete Referenzwert zur Anrechnung der Gutschrift ist dabei ausführlich darzulegen und zu begründen und ggf. durch ein weiteres Szenario zu ergänzen.

Berücksichtigung von Fruchtfolgeeffekten

Ein weiterer Aspekt, der mit der Energie-Allokationsmethode nach Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] nicht abgebildet werden kann, ist der Vorfruchteffekt des Rapsanbaus. So lassen sich beim nachfolgenden Weizenanbau durch die Vorfruchteffekte des Raps N-Mineraldünger substituieren, die mittels Substitutionsmethode dem Produktsystem der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion gutgeschrieben werden können. Die Gutschrift liegt nach KAGE und PAHLMANN (2013) [72] bei $7,3 \text{ g MJ}^{-1}$ und ist in Abbildung 33 ergänzend zur Gutschrift für den Rapspresskuchen dargestellt.

Unter Anwendung der Substitutionsmethode kann bei zusätzlicher Anrechnung des Vorfruchtwertes des Rapsanbaus eine maximale THG-Einsparung von bis zu 91 % erreicht werden (Szenario „Gutschrift mit LUC“). Werden mögliche Landnutzungsänderungen beim Anbau von Sojabohnen in Südamerika vollständig ausgeschlossen, zeigt Abbildung 33 für das Szenario „Gutschrift ohne LUC“ noch eine THG-Einsparung von 68 % im Vergleich zum fossilen Referenzwert.

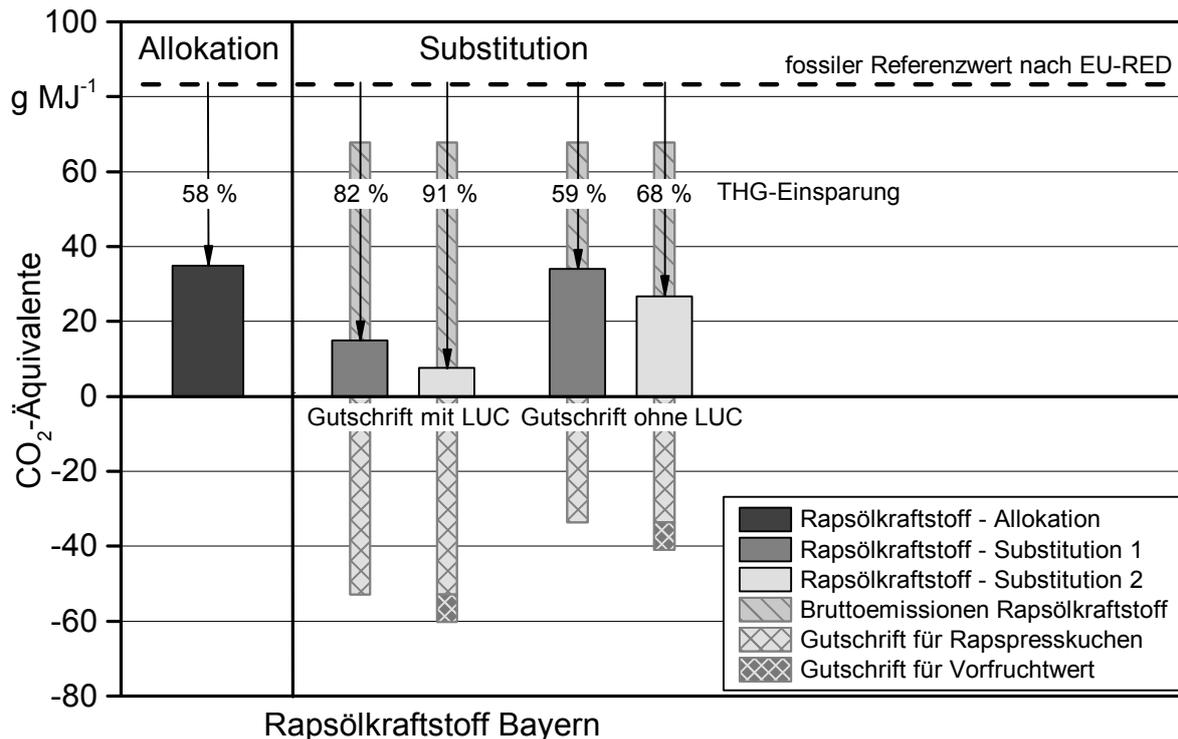


Abbildung 33: THG-Einsparung von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in Abhängigkeit der Methode zur Bewertung des Rapspresskuchens und des Vorfruchtwertes von Raps

6.3 Einordnung der Gesamtergebnisse

Die Einordnung der Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kontext erfolgt für die ökologische und ökonomische Analyse getrennt voneinander. Weiterhin wird bei der ökologischen Analyse zwischen den Ergebnissen der Rapsrerzeugung, der Rapsölkraftstoffproduktion und der Rapsölmethylesterproduktion differenziert.

6.3.1 Ökologische Analyse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zu den THG-Emissionen der Rapsrerzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion verschiedenen Literaturwerten gegenübergestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Ergebnisse sowohl auf unterschiedlichen Annahmen bei der Definition des Produktsystems als auch auf Unterschieden in der zugrunde gelegten Datenbasis beruhen. Die Festlegungen zu den eigenen Analysen der Produktsysteme der Rapsrerzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion bzw. Rapsölmethylesterproduktion sowie die verwendete Datengrundlagen sind in Kapitel 4 ausführlich dargelegt.

Rapsrerzeugung

Die eigenen Untersuchungen zu den THG-Emissionen der Rapsrerzeugung in Bayern haben gezeigt, dass sowohl auf einzelbetrieblicher Ebene (0,640 bis 1,114 kg kg⁻¹

Rapssaar, vgl. Tabelle 14) als auch auf regionaler Ebene (0,822 bis 0,873 kg kg⁻¹ Rapssaar, vgl. Tabelle 17) Unterschiede bestehen.

Im Vergleich dazu wird im THG-Rechner ENZO₂ für die Rapsarzeugung ein massebezogener RED-Teilstandardwert von 0,688 kg kg⁻¹ ausgewiesen [66]. Als regionale THG-Emissionen für die Rapsarzeugung wurden von der EU-Kommission für die bayerischen NUTS-2-Regionen Werte zwischen 0,544 bis 0,554 kg kg⁻¹ veröffentlicht, die zum Teil deutlich unter den Werten der eigenen Untersuchungen liegen [118]. Frühere Untersuchungen von KÄGI et al. (2007) [73] zu Umweltwirkungen der Biomasseproduktion verschiedener Anbausysteme in der Schweiz zeigen für die Rapsarzeugung mit THG-Emissionen von 1,304 bis 1,552 kg kg⁻¹ (TM-Gehalt 100 %) noch deutlich höhere Werte als die eigenen Untersuchungen (TM-Gehalt 92 %). Bei umfangreichen Untersuchungen zum Energiepflanzenanbau in Niedersachsen wurden der Energieaufwand, die THG-Emissionen sowie die versauernd und eutrophierend wirkenden Emissionen der Rapsarzeugung modellhaft berechnet [39]. Hierbei zeigte sich bei den berechneten THG-Emissionen eine Spannweite von 0,653 bis 0,759 kg kg⁻¹ (TM-Gehalt: 92 %) für die verschiedenen Modellregionen. Im Gegensatz zu den eigenen Untersuchungen wurden den aufgeführten Studien keine bzw. nur wenige betriebsspezifische Daten zugrunde gelegt. So wurden in den Untersuchungen zum Energiepflanzenanbau in Niedersachsen beispielsweise die Stickstoffmengen auf Basis der Düngempfehlungen der Landwirtschaftskammer kalkuliert. Somit liegt diesen Bilanzen eine sehr hohe Stickstoffeffizienz zugrunde, was auch die zum Teil deutlich besseren Ergebnisse erklärt.

Die verbindliche Vorgabe zur Anhebung der Mindesteinsparung an THG-Emissionen von Biokraftstoffen gegenüber fossilen Kraftstoffen auf 50 % ab dem Jahr 2017 [42] bedeutet besonders für Raps-Biodiesel eine große Herausforderung. Ob die Produktion von Raps-Biodiesel die geforderte Klimaschutzeffizienz erreicht, wird maßgeblich durch die THG-Emissionen der Rapsarzeugung bestimmt. Entscheidend ist hierbei die Erhöhung der N-Effizienz bei der Rapsdüngung, um die daraus resultierenden N₂O-Feldemissionen zu verringern, wie die eigenen und Untersuchungen von PAHLMANN et al. (2013) [87] verdeutlichen.

Rapsölkraftstoffproduktion

Für die Produktion von Rapsöl als Kraftstoff oder zur energetischen Nutzung im BHKW sind in der Literatur nur wenige Untersuchungen zu den THG-Emissionen zu finden, die sich allerdings auf die Rapsölproduktion in industriellen Ölmöhlen beziehen [42][97][98][99][115]. Darüber hinaus werden in diesen Untersuchungen unterschiedliche funktionelle Einheiten und Systemgrenzen verwendet, was eine Ergebnisgegenüberstellung zusätzlich erschwert [42][99][115] bzw. nahezu unmöglich macht [97][98][54].

TZSCHEUTSCHLER et al. (2001) [115] verwenden in ihrer „Ganzheitlichen Systemanalyse für die Erzeugung und Anwendung von Biodiesel und Naturdiesel im Verkehrssektor“ die Fahrleistung in km bzw. 100 km als funktionelle Einheit. Folglich sind auch die Systemgrenzen andere, da die Verbrennung des Kraftstoffs und die Herstellung und Entsorgung des Fahrzeugs von TZSCHEUTSCHLER et al. (2001) mitbilanziert wurden. Die THG-Emissionen für Rapsöl liegen ohne Berücksichtigung von Koppelprodukten bei ca.

122 g km⁻¹. Bei Beachtung der Koppelprodukte (Energie-Allokation) liegen die THG-Emissionen bei 80 g km⁻¹. Bezieht man diese Werte auf den spezifischen Verbrauch, der für Rapsöl („Naturdiesel“) mit 43,8 kWh je 100 km angegeben wird, ergeben sich THG-Werte von 77,37 bzw. 50,7 g MJ⁻¹ [115]. Damit liegt der energieallozierte Wert im oberen Bereich der Ergebnisbandbreite der eigenen Untersuchungen zu dezentral produziertem Rapsölkraftstoff (25,15 bis 52,6 g MJ⁻¹, vgl. auch Abschnitt 5.2.1). Allerdings zeigen die Untersuchungen von TZSCHEUTSCHLER et al. (2001) hohe THG-Emissionen für die Kraftstoffnutzung. Diese haben bei der Rapsölproduktion ohne Anrechnung der Koppelprodukte einen Anteil von mehr als 30 % an den Gesamtemissionen. Für den energieallozierten THG-Wert ist der Anteil mit mehr als 50 % deutlich höher. Betrachtet man die Ergebnisse von TZSCHEUTSCHLER et al. [115] ohne Kraftstoffnutzung würden die THG-Emissionen für die Produktion von Rapsöl bei ca. 25 g MJ⁻¹ und damit am unteren Rand des Wertebereichs der eigenen Untersuchungen liegen. Für die Verarbeitung der Rapssaat zu teilraffiniertem Rapsöl lässt sich eine THG-Emission von ca. 6 g MJ ableiten, die deutlich über den THG-Emissionen für eine dezentrale Verarbeitung liegt. Ein Vergleich der absoluten Werte der eigenen Untersuchungen mit den Untersuchungen von TZSCHEUTSCHLER et al. (2001) ist aufgrund der dargelegten Unterschiede in den Systemannahmen nicht zu empfehlen.

In der Studie von SCHMITZ et al. [99] werden THG-Einsparungen unterschiedlicher Biokraftstoffe herausgearbeitet. Für reines Pflanzenöl (Rapsöl) liegt diese bei 1,9 kg l⁻¹ Biokraftstoff. Unter Berücksichtigung des Heizwertes von 34,59 MJ l⁻¹ Rapsöl bzw. 32,65 MJ l⁻¹ Rapsölmethylester ergibt sich eine THG-Einsparung von 54,9 g MJ⁻¹ bzw. 58,19 g MJ⁻¹. Da aus SCHMITZ et al. [99] allerdings kein Referenzwert für fossilen Dieselmotorkraftstoff hervorgeht, auf den die THG-Einsparung zurückzuführen ist, ist ein direkter Vergleich mit den eigenen Ergebnissen nicht möglich.

Die Richtlinie 2009/28/EG [42] weist für reines Rapsöl einen Standardwert von 36 g MJ⁻¹ aus. Dieser wird im Mittel über drei Jahre (2013 bis 2015) nur in drei der untersuchten 16 Betriebe überschritten. Im regionalen Mittel liegen die THG-Emissionen der eigenen Untersuchungen zwischen 34,1 und 35,6 g MJ⁻¹. Die Unterschiede zwischen dem Standardwert nach Richtlinie 2009/28/EG und den eigenen Untersuchungen liegen insbesondere in der dezentralen Verarbeitungsstruktur. Für die Verarbeitung gibt die Richtlinie 2009/28/EG einen Teilstandardwert von 5 g MJ⁻¹ an. Die eigenen Untersuchungen zeigen, dass bei einer dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion die Verarbeitung zu einer THG-Emission von 1,2 bis 1,6 g MJ⁻¹ führt (vgl. 5.2.1).

Eine umfassende Analyse zum Einfluss der Bewertung von Koppelprodukten bei der THG-Bilanzierung von Rapsölmethylester zeigen die Untersuchungen von FEHRENBACH et al. (2016) [49]. Hier werden Ergebnisse der Energie-Allokation, der Marktpreisbasierten Allokation sowie Ergebnisse der Substitutionsmethode den Bruttoergebnissen (ohne Bewertung der Koppelprodukte) gegenübergestellt und zeigen ein ähnliches Bild wie die eigenen Untersuchungen (vgl. Unterkapitel 6.2). So variieren die Ergebnisse bei Anwendung der Substitutionsmethode in Abhängigkeit von dem gewählten Referenzsystem (z. B. mit oder ohne Landnutzungsänderungen beim Sojaanbau) sehr stark. Deutlich

wird, dass die Wahl des Referenzsystems Sojaschrot ohne Landnutzungsänderungen ebenfalls zu ähnlichen Ergebnissen führt wie die Anwendung der Energie-Allokation [49].

Die Bewertung von Koppelprodukten und Fruchtfolgeeffekten in Ökobilanzen landwirtschaftlicher Produktsysteme wird in BRANKATSCHK und FINKBEINER (2014) [8] sowie BRANKATSCHK und FINKBEINER (2015) [9] untersucht. Im Vergleich zu anderen Studien wird hier der die Getreideeinheit als Bewertungskriterium herangezogen.

Der vorangehende Versuch, die eigenen Ergebnisse aus den vorliegenden Untersuchungen (siehe Kapitel 5) Literaturwerten gegenüberzustellen, verdeutlicht noch einmal die Komplexität von Bilanzergebnissen. Für eine Gegenüberstellung von Bilanzergebnissen ist eine transparente und harmonisierte Systembeschreibung und Analyse des jeweiligen Produktsystems wie in den ExpResBio-Methoden (siehe Unterkapitel 3.4 und [122]) dargelegt zwingend erforderlich. Aus diesem Grund lassen sich andere Untersuchungen zur Rapsöl- und Rapsölmethylesterproduktion mit den Ergebnissen des vorliegenden Berichtes gar nicht oder nur eingeschränkt vergleichen.

6.3.2 Ökonomische Analyse

Die in Ölmühle Y ermittelten Produktionskosten von Rapsölkraftstoff befinden sich mit $0,67 \text{ € l}^{-1}$ (2014/15) bzw. $0,80 \text{ € l}^{-1}$ (2013/14) im Bereich von Literaturwerten, die in Studien von RICHTER et al. (2008) [114] und von REMMELE (2009) [91] zwischen $0,46$ und $0,84 \text{ € l}^{-1}$ variieren. Die deutlich höhere Spanne in den Literaturwerten ist maßgeblich auf den zugrunde gelegten Rapspreis zurückzuführen. Während in REMMELE (2009) [91] der Rapspreis zwischen $20,7$ und $25,3 \text{ € dt}^{-1}$ variiert, wurden für die Kalkulation der Produktionskosten in Ölmühle Y Rapspreise von 36 bzw. 40 € dt^{-1} bei gleichzeitig höheren Ölgehalten von $43,3 \%$ erhoben. Auch die Aufteilung der jährlichen Gesamtkosten der Ölmühle, bei denen die Kosten für die Rapssaat die Gesamtkosten dominieren, ist mit den Studien von RICHTER et al. (2008) [114], REMMELE (2009) [91] sowie GRAF und REINHOLD (2005) [55] vergleichbar.

Die reinen Presskosten liegen bei den eigenen Untersuchungen in Ölmühle Y bei durchschnittlich $1,51 \text{ € dt}^{-1}$ Rapssaat und werden durch die Kapitalkosten dominiert. GRAF und REINHOLD (2005) [55] geben mit $3,78$ bis $4,86 \text{ € dt}^{-1}$ höhere Presskosten an. Die Unterschiede in den Ergebnissen können auf die jeweilige Anlagenkonfiguration und zugrunde gelegte Auslastung der Anlage zurückgeführt werden. Die Bedeutung einer „ausreichenden“ Auslastung der dezentralen Ölmühle [114] wird durch die Sensitivitätsanalyse der Presskosten von Ölmühle Y in Abschnitt 5.3.2 unterstrichen. Hierbei ist zu beobachten, dass die Presskosten mit steigender Auslastung sinken. Dies unterstreichen auch die Untersuchungen von JAENISCH und SOMMERFELD (2005) [70] sowie GRAF und REINHOLD (2005) [55]. JAENISCH und SOMMERFELD (2005) geben mit 320 Presstagen einen leicht höheren Zielwert an, als in den vorliegenden Untersuchungen für Ölmühle Y ermittelt wurde (vgl. Abschnitt 5.3.2). Ab diesem Wert ist nur noch eine geringe Abnahme des Ölgestehungspreises zu erwarten.

In Abschnitt 3.3.2 wird die große Bandbreite der THG-Vermeidungskosten der Rapsölkraftstoffproduktion von -50 bis 1.000 € t^{-1} bereits genannt [89]. Die THG-Vermeidungskosten von Ölmühle Y liegen mit 217 € t^{-1} im Verarbeitungsjahr 2013/14 und mit 130 € t^{-1} im Verarbeitungsjahr 2014/15 im unteren Bereich. Ein vergleichbar niedriges Niveau zeigen die Untersuchungen von SCHMITZ et al. [99]. Hier werden für reines Pflanzenöl (Rapsöl) THG-Vermeidungskosten in Höhe von 159 € t^{-1} angegeben. Niedrigere Werte haben beispielsweise Studien berechnet, die anstatt Marktpreisen für Rapssaat die Anbaukosten von Raps angesetzt haben (vgl. Abschnitt 3.3.2). Diese Methodik darf allerdings nur gewählt werden, wenn der landwirtschaftliche Anbau und die Ölmühle ein Unternehmen sind und somit kein Markt(-preis) dazwischensteht.

6.4 Optimierung des Produktsystems

Im Folgenden werden konkrete Maßnahmen zur Optimierung der THG-Vermeidungsleistung von Rapsölkraftstoff szenarienhaft veranschaulicht. Zum besseren Verständnis der Vorgehensweise erfolgt die Berechnung der Szenarien am Beispiel eines landwirtschaftlichen Praxisbetriebes (Betrieb 1 im Boden-Klima-Raum B) und einer dezentralen Ölmühle (Ölmühle Y). Die Grundlage für die Berechnungen der Szenarien bilden die THG-Emissionen der Rapserzeugung in den Erntejahren 2013 bis 2015 (siehe Unterkapitel 5.1) und der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in den Verarbeitungsjahren 2013/14 und 2014/2015 (siehe Unterkapitel 5.2).

Ausgehend von dieser Basisvariante wurden folgende Szenarien durchgeführt:

- Szenario 1: Substitution von fossilem Dieselmotorkraftstoff durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff in der Rapserzeugung.
- Szenario 2: Substitution von NPK-Dünger durch Ammonsulfatsalpeter (ASS) zur Frühjahrsdüngung in der Rapserzeugung.
- Szenario 3: Steigerung der Auslastung der Ölmühle auf 90 % (330 Presstage).
- Szenario 4: Steigerung der Ölausbeute auf 0,38 kg Öl je kg Rapssaat.
- Szenario 5: Erzeugung von Eigenstrom im Rapsöl-BHKW.

Die THG-Vermeidungsleistung von Rapsölkraftstoff berechnet sich aus der Differenz der THG-Emissionen des Referenzsystems ($83,8 \text{ g MJ}^{-1}$ für fossilen Dieselmotorkraftstoff) und der Basisvariante bzw. des jeweiligen Szenarios für Rapsölkraftstoff. Die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Optimierung der THG-Vermeidungsleistung müssen auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein. Um dies zu prüfen, werden die jeweiligen Produktionskosten von Rapsölkraftstoff berechnet und als Kostendifferenz im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff dargestellt. Als Referenzkosten wird wie in Abschnitt 4.10.2 beschrieben der Preis für Dieselmotorkraftstoff (93 € hl^{-1}) bei Abgabe von mindestens 100 hl an den Großhandel frei Zielort gewählt (einschließlich Mineralölsteuer und Erdölbevorratungsbeitrag (EBV), ohne Mehrwertsteuer und abzüglich der Energiesteuer). Auf dieser Basis ergeben

sich aktuell Kosten in Höhe von $1,28 \text{ ct MJ}^{-1}$. Für die Umrechnung von Megajoule auf Liter müssen die Differenzen der THG-Emissionen und Produktionskosten mit dem spezifischen Heizwert und der Dichte von Rapsölkraftstoff multipliziert werden (vgl. Tabelle 1 in Abschnitt 3.4.2.6). Ausgehend von den THG-Emissionen der Basisvariante ($40,38 \text{ g MJ}^{-1}$) errechnet sich für das Beispiel eine THG-Vermeidungsleistung von $43,42 \text{ g MJ}^{-1}$ bzw. $1,50 \text{ kg l}^{-1}$. Für die Berechnung der Kostendifferenz spielt der Bezugspreis der Rapssaat für die Ölmühle eine wesentliche Rolle. In der Regel beziehen dezentrale Ölmühlen die Rapssaat zum Marktpreis. Für die Basisvariante „Rapssaat zu Marktpreis“ liegt der Bezugspreis der Ölmühle Y bei $40,0$ bzw. $36,0 \text{ € dt}^{-1}$ (siehe Tabelle 8 in Unterkapitel 4.5). Die Kostendifferenz von Rapsölkraftstoff zu fossilem Dieselkraftstoff beträgt hierbei knapp 30 ct l^{-1} . Bei einer innerbetrieblichen Verarbeitung der Rapssaat können jedoch Erzeugerkosten angesetzt werden. Bei der Basisvariante „Rapssaat zu Erzeugerkosten“ wird also davon ausgegangen, dass die Rapssaat von Landwirt 1 im Boden-Klima-Raum B zu Erzeugerkosten ($25,8 \text{ € dt}^{-1}$) an die Ölmühle Y geliefert wird. Die Kostendifferenz von Rapsölkraftstoff zu fossilem Dieselkraftstoff verringert sich hierdurch mit $6,15 \text{ ct l}^{-1}$ deutlich. Die Kosteneffekte der untersuchten THG-Optimierungsszenarien in der Rapserzeugung können bei Verwendung von Marktpreisen für die Rapssaat nicht abgebildet werden. Folglich können die Szenarien 1 und 2 nur auf die Basisvariante Rapssaat zu Erzeugerkosten bezogen werden. Die Szenarien 3 bis 5 beziehen sich dagegen sowohl auf die Basisvariante Rapssaat zu Erzeugerkosten als auch auf die Basisvariante Rapssaat zu Marktpreis. Auf die THG-Vermeidungsleistung hat die gewählte Basisvariante keinen Einfluss.

Die Kostendifferenzen der beiden Basisszenarien und der dazugehörigen Optimierungsszenarien in Bezug zur jeweiligen THG-Vermeidungsleistung sind in Abbildung 34 zusammenfassend dargestellt.

Szenario 1: Mit der Substitution von fossilem Dieselkraftstoff durch den Einsatz von Rapsölkraftstoff in der Rapserzeugung erhöht sich die THG-Vermeidungsleistung auf $1,57 \text{ kg l}^{-1}$. Aufgrund des geringeren Energiegehaltes von Rapsölkraftstoff erhöht sich allerdings auch der Kraftstoffbedarf (Annahme: 5 %), sodass die Kostendifferenz von Rapsölkraftstoff zu fossilem Dieselkraftstoff für dieses THG-Optimierungsszenario im Vergleich zur Basisvariante von $6,15$ auf $6,47 \text{ ct l}^{-1}$ leicht ansteigt. Die Kostendifferenz dieses THG-Optimierungsszenarios ist jedoch stark abhängig von den Marktpreisen der betrachteten Kraftstoffe. In diesem Szenario wurde für den Rapsölkraftstoff und für den fossilen Dieselkraftstoff ein Bezugspreis von jeweils 90 ct l^{-1} unter Berücksichtigung der jeweiligen Energiesteuerrückerstattung angenommen. Es ist jedoch anzumerken, dass die Marktpreise durch ordnungspolitische Rahmenbedingungen beeinflusst werden.

Szenario 2: Für die Minderung der THG-Emissionen in der Rapserzeugung ist ein an Standort (v. a. das Ertragspotenzial) und Betriebstyp angepasstes Düngungsmanagement von entscheidender Bedeutung. Im Fall des zu optimierenden Rapserzeugers (Betrieb 1 im Boden-Klima-Raum B) ist festzustellen, dass für die Frühjahrsdüngung standardmäßig NPK-Dünger verwendet werden, obwohl bereits zur Herbstdüngung mit Milchviehgülle eine Versorgung mit Phosphor und Kali erfolgt ist. Da bei der Bereitstellung von NPK-Dünger vergleichsweise hohe THG-Emissionen entstehen, wird dem

Rapserzeuger empfohlen, bei gleicher N-Mineraldüngermenge für die Frühjahrsdüngung künftig Ammoniumsulfatsalpeter (ASS) zu verwenden. Hierdurch kann die THG-Vermeidungsleistung deutlich erhöht werden ($1,72 \text{ kg l}^{-1}$). Im Vergleich zur Basisvariante sinkt zudem die Kostendifferenz von Rapsölkraftstoff zu fossilem Dieselmotorkraftstoff für dieses THG-Optimierungsszenario von $6,15$ auf $3,14 \text{ ct l}^{-1}$ (vgl. auch Tabelle 25). Grund hierfür sind die niedrigeren Kosten von ASS-Dünger je kg N (siehe Tabelle 7).

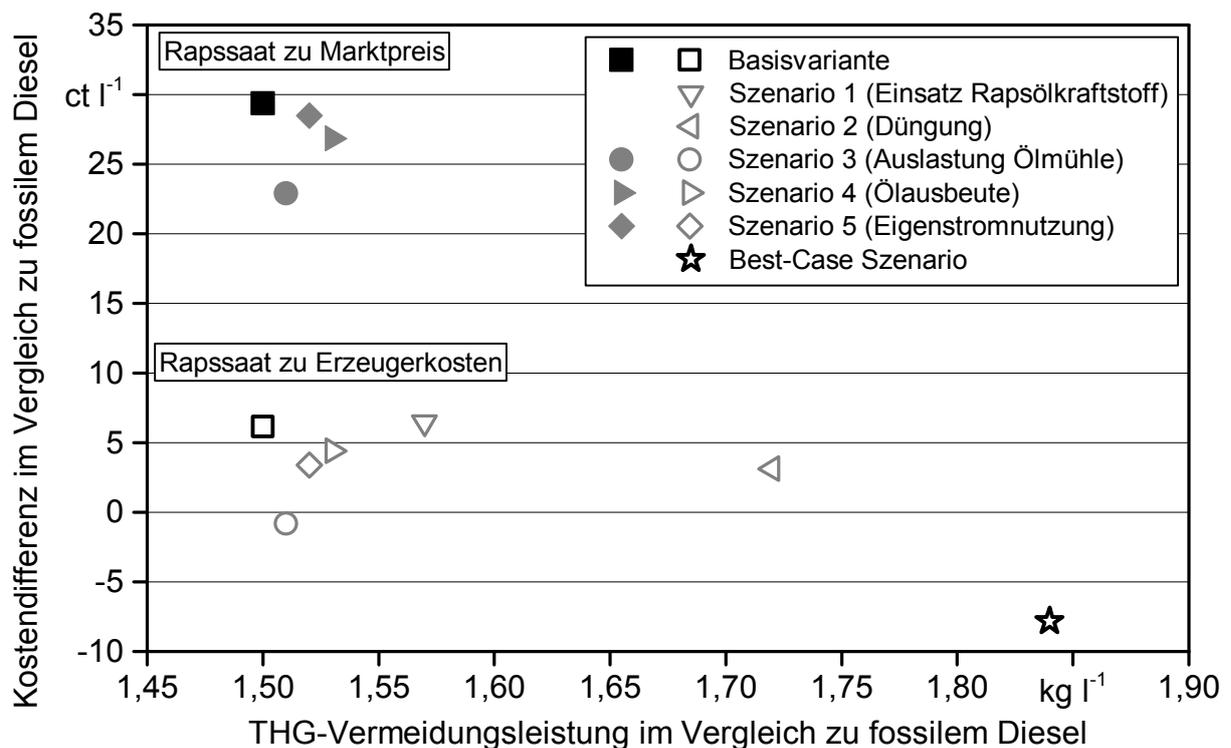


Abbildung 34: THG-Vermeidungsleistung und Kostendifferenz für die Basisvarianten und Optimierungsszenarien von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff

Szenario 3: Die Steigerung der Auslastung der Ölmühle auf 90 % (= 330 Presstage) hat einen positiven Effekt auf die THG-Vermeidungsleistung der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion. Hier steigt die THG-Vermeidungsleistung unabhängig von der gewählten Basisvariante um $0,01 \text{ kg l}^{-1}$ auf $1,51 \text{ kg l}^{-1}$ an. Grund dafür ist, dass insbesondere die Bauvorleistungen für die Herstellung und Instandhaltung von Maschinen und Geräten [V1] sowie für den Bau und die Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur [V2] auf eine wesentlich größere Menge an Rapsölkraftstoff bezogen werden und dadurch geringer ins Gewicht fallen (siehe Abschnitt 5.3.2). In Bezug auf die Kostendifferenz im Vergleich zur jeweiligen Basisvariante zeigt die Steigerung der Auslastung die größten Auswirkungen. Durch die Verteilung der jährlichen Fixkosten (z. B. Kapitalkosten, festangestelltes Personal) auf eine wesentlich größere Menge Rapsölkraftstoff verringern sich die Kosten der Rapsölproduktion deutlich (vgl. Abbildung 34 und Tabelle 25). In Bezug auf die Basisvariante Rapssaat zu Erzeugerkosten führt die Steigerung der Auslastung sogar zu einer negativen Kostendifferenz ($-0,81 \text{ ct l}^{-1}$), da die Kosten für Rapsölkraftstoff in

diesem Fall geringer als die Kosten für fossilen Dieselkraftstoff (Referenzsystem) sind. Grund hierfür ist, dass die jährlichen Fixkosten aufgrund des geringeren Substratpreises einen wesentlich höheren Stellenwert einnehmen als bei der Basisvariante Rapssaat zu Marktpreis.

Szenario 4: Die höhere Ölausbeute von 0,38 kg je kg Rapssaat führt zu einer größeren Menge an Rapsölkraftstoff bei gleichbleibendem Einsatz von Rapssaat und anderen Vorleistungen (z. B. Strombedarf). Dadurch erhöht sich die THG-Vermeidungsleistung um 0,03 kg l⁻¹ auf 1,53 kg l⁻¹. Weiterhin führt eine höhere Ölausbeute bei identischen Jahreskosten der Ölmühle zu einer geringeren Kostendifferenz. Diese ist in Bezug auf die Basisvariante Rapssaat zu Marktpreis um 2,52 ct l⁻¹ geringer und liegt bei 26,84 ct l⁻¹. Bezogen auf die Basisvariante Rapssaat zu Erzeugerkosten ist die Kostendifferenz um 1,75 ct l⁻¹ geringer und liegt bei 4,40 ct l⁻¹ (vgl. Abbildung 34 und Tabelle 25). Grund für den geringeren Einfluss auf die Kostendifferenz im Vergleich zur Basisvariante Rapssaat zu Marktpreis sind die geringeren Rapssaatkosten. Insgesamt ist für die Ergebnisse dieses Szenarios zu beachten, dass die Steigerung der Ölausbeute sowohl vom Ölgehalt der Rapssaat als auch vom Abpressgrad der Ölpresung abhängt. Um eine Ölausbeute von 0,38 kg je kg Rapssaat zu erreichen, wird ein Ölgehalt von 44 % bei einer Restfeuchte der Saat von 7 % und einem Abpressgrad von 80 % unterstellt. Diese Parameter können jedoch jahres- und anlagenspezifisch variieren. Weitere Informationen zum Szenario Ölausbeute sind in Abschnitt 5.3.2 dargelegt.

Szenario 5: Die Nutzung von Eigenstrom des Rapsöl-BHKW führt einerseits zu einem höheren Bedarf an Rapssaat pro Liter erzeugten Rapsölkraftstoffs. Andererseits wird die THG-Vermeidungsleistung von 1,50 auf 1,52 kg l⁻¹ erhöht und die Produktionskosten von Rapsölkraftstoff und damit die Kostendifferenz zu fossilem Dieselkraftstoff von 29,36 bzw. 6,15 ct l⁻¹ auf 28,47 bzw. 3,38 ct l⁻¹ verringert (vgl. Abbildung 34 und Tabelle 25). Gründe für die Erhöhung der THG-Vermeidungsleistung bzw. die Verringerung der Kostendifferenz sind zum einen der geringere Fremdstrombedarf. Zum anderen führt die Anrechnung des Koppelproduktes Wärme durch Allokation bzw. durch Gutschrift zu der dargestellten Verbesserung der THG-Vermeidung bzw. zur Verringerung der Kosten (vgl. auch Abschnitt 5.3.2). Die Ergebnisse dieses Szenarios sind damit abhängig von dem Anteil der Wärmenutzung und dem Marktpreis, der für den Wärmeverkauf erzielt werden kann.

Tabelle 25: THG-Vermeidungsleistung und Kostendifferenz für die Basisvarianten und Optimierungsszenarien von Rapsölkraftstoff im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff

	THG-Vermeidungsleistung in kg l ⁻¹	Kostendifferenz zu fossilem Dieselkraftstoff in ct l ⁻¹
Basisvariante (Rapssaat zu Marktpreis)	1,50	29,36
Szenario 3 (Auslastung Ölmühle)	1,51	22,89
Szenario 4 (Ölausbeute)	1,53	26,84
Szenario 5 (Eigenstromnutzung)	1,52	28,47
Basisvariante (Rapssaat zu Erzeugerkosten)	1,50	6,15
Szenario 1 (Einsatz Rapsölkraftstoff)	1,57	6,47
Szenario 2 (Düngung)	1,72	3,14
Szenario 3 (Auslastung Ölmühle)	1,51	-0,81
Szenario 4 (Ölausbeute)	1,53	4,40
Szenario 5 (Eigenstromnutzung)	1,52	3,38
Best-Case-Szenario	1,84	-7,84

Um die THG-Optimierung des gesamten Produktsystems der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion ausweisen zu können, wurden die untersuchten Szenarien zu einem Best-Case-Szenario zusammengeführt. Die Ergebnisse des Best-Case-Szenarios sind neben den Ergebnissen der Basisvarianten und der Szenarien 1 bis 5 in Tabelle 25 aufgeführt. Um die Effekte der Szenarien 1 und 2 (THG-Optimierungsszenarien der Rapserzeugung) in das Best-Case-Szenario integrieren zu können, wurde es lediglich auf die Basisvariante Rapssaat zu Erzeugerkosten bezogen.

Die Summe aller Optimierungen innerhalb des vollständigen Produktsystems der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion führt zu einer THG-Vermeidungsleistung von 1,84 kg l⁻¹ Rapsöl im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff. Die THG-Vermeidungsleistung der Basisvariante dagegen beträgt 1,50 kg l⁻¹. Durch die Optimierung des gesamten Produktsystems kann die THG-Vermeidungsleistung um 12 %-Punkte (von 52 auf 64 %) gesteigert werden. Neben der Steigerung der THG-Vermeidungsleistung führen die durchgeführten Optimierungen zu einer Reduzierung der Kosten für Rapsölkraftstoff von 13,99 ct l⁻¹ im Vergleich zur Basisvariante. Die Kostendifferenz zu fossilem Dieselkraftstoff beträgt -7,84 ct l⁻¹. Damit weist die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion unter Berücksichtigung der Erzeugerkosten der Rapssaaterzeugung nicht nur eine deutlich höhere THG-Vermeidungsleistung, sondern auch geringere Bereitstellungskosten als fossiler Dieselkraftstoff auf.

7 Handlungsempfehlungen

Die Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion zeigt unterschiedliche Handlungsfelder. Diese unterscheiden sich zwischen Empfehlungen zur Optimierung der THG-Bilanzierungsmethodik und Empfehlungen zur kosteneffizienten Optimierung der THG-Bilanz des untersuchten Produktsystems.

Handlungsempfehlungen zur Optimierung der THG-Bilanzierungsmethodik:

- Zur Analyse und Bewertung von Umweltwirkungen der Rapserzeugung wird empfohlen, die regionalspezifischen Gegebenheiten in Bayern zu berücksichtigen. Die durchgeführten Analysen und Bewertungen zu den THG-Emissionen und den Kostenstrukturen zeigen, dass natürliche Standortbedingungen (z. B. Boden und Klima) sowie Betriebsstrukturen einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.
- Das THG-Minderungspotenzial von Rapsölkraftstoff, bei dessen Herstellung Eiweißfuttermittel entstehen, wird infolge der methodischen Berechnungsvorgaben durch die EU-RED als zu gering bewertet. Fruchtfolgeeffekte des Rapsanbaus bleiben gänzlich unberücksichtigt. Da Wechselwirkungen zwischen der Biomasse-, Biogas- und Nahrungserzeugung (Marktfruchtbau, Tierhaltung) jedoch der landwirtschaftlichen Praxis in Bayern entsprechen, wird empfohlen, diese in THG-Bilanzen abzubilden. Eine entsprechende methodische Anpassung in der EU-RED (Bewertung des THG-Minderungspotenzials sowohl mit Methode „Energie-Allokation“ als auch mit „Gutschriften“ bei der Berücksichtigung der Koppelprodukte) ist dringend zu empfehlen. Zu diesem Zweck müssen Regeln entwickelt werden, in denen die Vorgehensweise (z. B. Bestimmung des Referenzproduktes und seines Emissionsfaktors, Grundlage zur Berechnung des Substitutionsfaktors) eindeutig festgelegt ist. Die Ableitung von Standardwerten zur Bewertung klassischer Koppelprodukte wie beispielsweise Rapspresskuchen oder Rapsextraktionsschrot wird ebenfalls empfohlen.
- Die Methode zur Bewertung der Koppelprodukte sowie die Auswahl des Referenzsystems bei Anwendung der Substitutionsmethode haben einen wesentlichen Einfluss auf das THG-Minderungspotenzial von Rapsölkraftstoff. Hierdurch entsteht die Gefahr, das errechnete THG-Minderungspotenzial falsch zu bewerten. Aus diesem Grund wird empfohlen, dass die Auswahl des Referenzsystems sehr sorgfältig abgewogen werden sollte. Dabei ist das Referenzsystem ausführlich darzulegen und durch eine Sensitivitätsanalyse zu hinterfragen.

Handlungsempfehlungen zur Optimierung der THG-Bilanz von Rapsölkraftstoff

- Das Düngungsmanagement der Rapserzeugung weist sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht ein erhebliches Optimierungspotenzial auf. Neben einer quantitativen Betrachtung (bedarfsgerechte Düngung) spielen auch qualitative As-

pekte der eingesetzten Düngerarten bzw. -formen hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen eine entscheidende Rolle.

- Unabhängig von der Bewertungsmethode weist Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung gegenüber fossilen Kraftstoffen ein enormes THG-Einsparungspotenzial auf. Speziell Rapsöl ist ein regional produzierter Kraftstoff, der niedrige volkswirtschaftliche Kosten (ggf. sogar volkswirtschaftliche Leistungen) aufweist. Die Ölmühle bringt Arbeitsplätze und Wertschöpfung für die Region. Langfristig soll fossiler Dieselmotorkraftstoff zum Betrieb von Land- und Forstmaschinen durch Rapsölkraftstoff aus dezentralen Ölmühlen ersetzt werden. Aus diesem Grund wird empfohlen, Rapsölkraftstoff künftig verstärkt in der landwirtschaftlichen Biomasseerzeugung einzusetzen.
- Die Auslastung ist der ausschlaggebende Parameter für die Optimierung der Produktionskosten der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion. Folglich sollten politische Anreize für eine vermehrte Rapsölkraftstoffproduktion geschaffen werden (z. B. das Förderprogramm „RapsTrak200“), um die Auslastung in den Ölmühlen zu erhöhen.

8 SWOT-Analyse der Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern

Mit der nachfolgenden Analyse zu den Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (**Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats – SWOT**) wird das Produktsystem der Rapserzeugung, der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion und der Nutzung in pflanzenöлтаuglichen Traktoren im Kontext einer nachhaltigen Nutzung auf regionaler Ebene verfügbarer Biomasseressourcen bewertet (siehe Tabelle 26 bis Tabelle 28).

Mit der Analyse der Stärken und Schwächen werden systeminterne Faktoren wie Rohstoffversorgung, Produktionstechnologie und Produkteigenschaften betrachtet. Die Analyse der Chancen und Risiken umfasst externe Faktoren wie Marktumfeld, gesellschaftliche Akzeptanz, Kundenerwartungen und politische Rahmenbedingungen. Die Analyse beschränkt sich auf die Bewertung von technologischen, ökologischen und ökonomischen sowie rechtlichen bzw. politischen Kriterien.

Erzeugung von Rapssaat

Winterraps stellt aktuell die wichtigste Ölf Frucht in Bayern dar. Im Jahr 2015 lag der Anbauumfang bei etwa 100.000 ha und die Jahresproduktion betrug gut 400.000 t [106]. Der Anbau von Winterraps ist etabliert und bereichert die Fruchtfolge, in der es unter anderem zu Ertragssteigerungen der Folgefrüchte (z. B. Winterweizen) bei gleichzeitig geringerem Stickstoffeinsatz kommen kann [72]. Gleichzeitig ist das Anbaupotenzial von Rapssaat begrenzt, weil Anbaupausen von drei bis vier Jahren einzuhalten sind und sich Raps in der Fruchtfolge nicht mit anderen Kreuzblütlern wie Ölrettich, Rüben und Senf verträgt [4]. Dies hat einerseits positive Effekte auf die Gestaltung einer Fruchtfolge und verhindert die Etablierung einer Raps-Monokultur, andererseits stellt die Anbaupause von drei bis vier Jahren aber auch eine Begrenzung des Rohstoffpotenzials dar. Das Anbauverfahren von Raps ist ausgereift, jedoch arbeitsintensiv hinsichtlich Düngung und Pflanzenschutz. Bei unsachgemäßem Rapsanbau können sich negative Effekte auf die Umwelt wie Nitratauswaschung, Lachgasemissionen oder Bienengefährdung ergeben.

Ein zunehmender Anbau von Raps für die Kraftstoffnutzung wirft Fragen zur Flächenkonkurrenz mit der Erzeugung von Nahrungsmitteln, Rohstoffen, Siedlungsflächen etc. auf. Insbesondere aufgrund der öffentlichen Wahrnehmung der auffällig gelb blühenden Rapsfelder werden Monokulturen befürchtet. Die Etablierung von Raps-Monokulturen steht jedoch im Widerspruch zu den genannten Fruchtfolgerestriktionen.

Rapsöl und Presskuchen können auf unterschiedlichste Art und Weise genutzt werden und haben dadurch ein vielfältiges Spektrum an Absatzmärkten. Zusätzlich können durch den Verkauf der Treibhausgasquote des in den Verkehr gebrachten Rapsölkraftstoffes erzielt werden. In Bezug auf das letztgenannte zeigt insbesondere die Rapserzeugung (Düngemanagement) noch umfangreiche Möglichkeiten zur Einsparung von Treibhausgasemissionen auf. Darüber hinaus können züchterische Verbesserungen (z. B. hinsichtlich Ölgehalt) die Attraktivität der Ölpflanze als wichtigen Öl- und Eiweißlieferanten weiter steigern.

Eine detaillierte Gegenüberstellung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der Raps-erzeugung zeigt Tabelle 26.

Tabelle 26: SWOT-Analyse der Erzeugung von Rapssaat für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • etablierte Ackerfrucht • Verfahrenstechnik weit ausgereift • Verbesserung der Fruchtfolge: <ul style="list-style-type: none"> – Anbau auf derselben Fläche nur alle drei bis vier Jahre – Blattfrucht als Humusmehrer – Tiefwurzler lockert Boden und speichert Stickstoff – Ertragssteigerung bei Folgefrucht – weniger Pflanzenschutz erforderlich • auf der Fläche verbleibendes Stroh für Humusaufbau und Nährstoffrückführung • Blühpflanze: <ul style="list-style-type: none"> – Bienenweide – Prägung des Landschaftsbildes • „Multitalent Raps“ – Multi-Purpose Crop für breites Nutzungsspektrum (Speiseöl, Tierfutter, Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoff ...) 	<ul style="list-style-type: none"> • begrenztes Rohstoffpotenzial durch Fruchtfolgerestriktionen • hohe Arbeitsintensität • hoher Aufwand an Stickstoff und Pflanzenschutzmitteln führt zu negativen Umweltwirkungen <ul style="list-style-type: none"> – Globale Erwärmung – Eutrophierung – Versauerung
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung des THG-Minderungspotenzials (v. a. durch Optimierung des Düngemanagements) • züchterische Verbesserungen (Ölgehalt, Nährstoffeffizienz) • nachhaltige Ausweitung der Anbaufläche • hohe Akzeptanz bei Landwirten • betriebliche Wertschöpfung durch Rapsverarbeitung • Wegbereiter für alternative Ölpflanzen, z. B. Leindotter, Sonnenblumen 	<ul style="list-style-type: none"> • verstärkte Umweltgefährdung bei nicht sachgerechtem Anbau (Nitratauswaschung, Bienengefährdung ...) • Abhängigkeit vom volatilen Weltmarkt der Ölsaaten • Flächenkonkurrenz mit Nahrungs- und Rohstoffproduktion, Siedlungsflächen etc. • Ablehnung von scheinbaren Raps-Monokulturen in der gesellschaftlichen Diskussion

Dezentrale Erzeugung von Rapsölkraftstoff für den Einsatz in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen

Aus Rapssaat kann sowohl in industriellen Ölmühlen als auch in dezentralen Kleinanlagen Rapsöl und Extraktionsschrot bzw. Presskuchen produziert werden. Vorteil der dezentralen Erzeugung ist das technologisch einfache sowie energie- und ressourcensparende Verfahren der Kaltpressung. Das Verfahren der Ölgewinnung ist weit ausgereift und in der Praxis etabliert. Es zeichnet sich durch einen hohen Automatisierungsgrad sowie eine geringe Arbeitsintensität aus. Die Investitions- und Betriebskosten sind für kleinere dezentrale Ölmühlen gering [117][55]. Die Erzeugung und Verarbeitung der Rapssaat sowie Nutzung des Rapsöls und des Presskuchens ist bei dezentralen Kleinanlagen kleinräumig strukturiert, was zu kurzen Transportwegen und zu hoher Transparenz des gesamten Produktweges führt. Aufgrund der überwiegend regionalen Stoffströme und der geringen Verarbeitungstiefe sind die THG-Emissionen bei der dezentralen Rapsverarbeitung im Vergleich zu einer industriellen Ölgewinnung besonders niedrig.

Die Produktkosten werden maßgeblich durch die Kosten des Rohstoffes (Rapssaat) bestimmt. Die Rohstoffkosten wiederum sind stark volatil und orientieren sich an den internationalen Ölsaatenbörsen, welche die schwankenden Erntemengen und Nachfragen abbilden. Darüber hinaus ist bei der dezentralen Verarbeitung eine hohe Saatqualität erforderlich, um Energie und Einsatzstoffe für die Ölnachbehandlung zu minimieren und die Qualitätsanforderungen des Kraftstoffes entsprechend der Kraftstoffnorm DIN 51605 zu erfüllen. Um das Rapsöl als Kraftstoff in landwirtschaftlichen Maschinen wie Traktoren einsetzen zu können, sind nicht nur Anforderungen in Bezug auf das Qualitätsmanagement zu erfüllen, sondern auch administrative Anforderungen wie z. B. die Einrichtung eines Steuerlagers und der Nachweis der nachhaltigen Erzeugung und Verarbeitung durch Zertifizierung. Diese können gerade bei Anlagen mit geringen Produktionsmengen den wirtschaftlichen Erfolg des Ölmühlenbetriebes schmälern. Weiterhin ist bei der Vermarktung des Koppelproduktes Rapspresskuchen aus der dezentralen Produktion zu beachten, dass dieser einen höheren Restfettgehalt im Vergleich zu Rapsextraktionsschrot aufweist und daher die Futterzusammensetzung auf den Gesamtenergiegehalt angepasst werden muss.

Aufgrund der dezentralen Struktur kann der Kraftstoff durch die Ölmühle selbst an umliegende landwirtschaftliche Betriebe vermarktet und/oder im eigenen Betrieb genutzt werden. Dadurch trägt eine dezentrale Ölmühle zur Diversifizierung der landwirtschaftlichen Produktion bei, die häufig mit einer erhöhten Wertschöpfung und der Schaffung bzw. dem Erhalt von Arbeitsplätzen verbunden ist. Der gleichzeitig erzeugte Rapspresskuchen ist ein hoch geschätztes, gentechnisch unverändertes Futtermittel, das z. B. Importe von Soja aus Übersee ersetzt. Damit verringert sich die Gefahr des Verlustes ökologisch wertvoller Flächen wie zum Beispiel Regenwald oder Buschlandflächen in Südamerika, die ansonsten zur Erweiterung des Sojaanbaus „umgenutzt“ würden [110]. Ein höherer Selbstversorgungsgrad mit Eiweißfutter ist ein politisches Anliegen und wird sowohl in Bayern als auch bundesweit forciert (Eiweißstrategie). Generell haben dezentrale Wirtschaftsstrukturen eine hohe Akzeptanz in der Gesellschaft.

Wirtschaftliche Risiken der dezentralen Ölgewinnung betreffen in erster Linie die Abhängigkeit des erzielbaren Rapsölpreises vom Mineralölpreis. In Zeiten sehr niedriger Mineralölpreise sind die Marktaussichten schlecht. Daneben wirken sich förderpolitische Instrumente (Biokraftstoffquote, Energiesteuer ...) maßgeblich auf Erfolg oder Misserfolg der Ölmühlen aus. Aufgrund vielfach geänderter rechtlicher Bestimmungen in den vergangenen Jahren ist das Vertrauen in verlässliche Rahmenbedingungen gestört und die Investitionsbereitschaft gering. Darüber hinaus führen die Vorgaben zur Berechnung der THG-Emissionen, wie z. B. die fehlende Anrechnung des Vorfruchtwertes der Raps-erzeugung, die im Teilstandardwert der EU-RED nicht berücksichtigten geringeren THG-Emissionen bei der dezentralen Verarbeitung sowie die energetische Bewertung des als Tierfutter verwendeten Presskuchens dazu, dass der Klimaschutzbeitrag von Rapsölkraftstoff unterbewertet wird.

Eine detaillierte Gegenüberstellung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion zeigt Tabelle 27.

Tabelle 27: SWOT-Analyse der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • etablierte Technik • technisch unkompliziertes Verfahren • Einhaltung der Anforderungen der DIN 51605 möglich • wenig arbeitsintensiv: <ul style="list-style-type: none"> – günstige Umweltwirkungen – geringer Energiebedarf durch geringe Verarbeitungstiefe – geringe THG-Emissionen – Verzicht auf Lösungsmittel und Chemikalien – kaum Anfall von Reststoffen oder Abwasser • geringe Investitionskosten • geringe Produktionskosten • Erzeugung des Koppelproduktes Presskuchen als heimisches, nicht gentechnisch modifiziertes Eiweißfutter • hohe Produktqualität • kurze Transportwege • hohe Transparenz durch regionale Erzeugung und Nutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Einfluss der Rohstoffkosten auf die Wirtschaftlichkeit • hohe Anforderungen an die Rapssaatqualität • hoher Ölgehalt im Presskuchen erfordert Abstimmung der Futtermittellage • hoher Aufwand für Qualitätsmanagement • hoher administrativer Aufwand für Steuerangelegenheiten (Zoll) und Nachhaltigkeitszertifizierung

Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Eigenproduktion möglich: Partizipation der Landwirtschaft • Diversifizierung der landwirtschaftlichen Produktion • Schaffung von Arbeitsplätzen • Presskuchen aus dezentraler Ölgewinnung als Beitrag zur Eiweißstrategie • Verringerung des Flächendrucks in Übersee durch weniger Sojaimporte (Minderung der Gefahr des Verlustes wertvoller Ökosysteme) • hohe Akzeptanz der dezentralen Verarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • hohes wirtschaftliches Risiko bei niedrigen Mineralölpreisen • hohe Abhängigkeit von politischen Lenkungsmaßnahmen: Energiesteuer-gesetz, Beimischungsquoten ... • Investitionsbereitschaft gering aufgrund von fehlendem Vertrauen in stabile Rahmenbedingungen • teilweise mangelndes Vertrauen in Produktqualität durch Landmaschinen-industrie und Landwirte • durch EU-RED vorgegebene Bewer-tung des Presskuchens nach Energie-gehalt und die fehlende Berücksichti-gung des Vorfruchtwertes beim Rapsanbau unterschätzen den Beitrag zur THG-Minderung

Nutzung von dezentral produziertem Rapsölkraftstoff in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen

Die Nutzung von regional produziertem Rapsölkraftstoff als Antriebsenergie in der Land- und Forstwirtschaft schont endliche fossile Ressourcen und mindert die Abhängigkeit von Mineralölimporten. Die technische Machbarkeit der Rapsölkraftstoffnutzung (zuverlässiger und umweltschonender Betrieb der land- und forstwirtschaftlichen Maschinen) wird durch die verbindlichen Qualitätsvorgaben der DIN 51605 sichergestellt. Hierfür liegen mittlerweile zahlreiche positive Betriebserfahrungen mit Traktoren bis einschließlich Abgasstufe IV vor [64]. Die Ergebnisse zeigen, dass die bestehende Tank-Infrastruktur mit wenig Aufwand an den Kraftstoff angepasst werden kann und eine Umstellung der Betreiber an die Handhabung der Maschinen kaum erforderlich ist. Da der Kraftstoff im Inland und in der Hand der Landwirtschaft erzeugt wird, trägt dieser zur krisensicheren Nahrungs- und Futtermittelproduktion bei. Weiterhin ist der eingesetzte Kraftstoff in der Regel nachhaltigkeitszertifiziert und weist nur geringe THG-Vermeidungskosten auf. Studien zeigen, dass der Einsatz in landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen vielfach als zukunftsfähige Anwendung für Rapsölkraftstoff gesehen wird [86].

Bislang sind die verkauften Stückzahlen von pflanzenöлтаuglichen Traktoren noch gering. Es gibt nur wenige Freigaben für einzelne Modelle von Seiten der Landmaschinenindustrie. Darüber hinaus ist die technische Entwicklung noch nicht vollständig abgeschlossen. Weitere Optimierungen z. B. hinsichtlich des Kaltstartverhaltens stehen noch aus. Weiterhin sind die Mehrkosten für die Pflanzenölausstattung des Traktors und die Einrichtung einer Hof-Tankstelle als wesentliches Hemmnis zu sehen, da diese sich nur bei geringeren Rapsölkraftstoffpreisen im Vergleich zu Dieselmotoren amortisieren.

Dennoch hat der Einsatz von Rapsölkraftstoff in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen auch viele positive Seiten. So wird dem Land- bzw. Forstwirt beim Einsatz von Rapsölkraftstoff auf Antrag die Energiesteuer in voller Höhe rückerstattet. Weiterhin kann durch eine Kraftstoff-Eigenversorgung des Betriebes eine deutlich höhere Unabhängigkeit von fossilem Dieselkraftstoff realisiert werden. Gleichzeitig stellt der Einsatz von Rapsölkraftstoff eine wichtige Maßnahme dar, um Treibhausgasemissionen in den Sektoren der Land- und Forstwirtschaft einzusparen und die anvisierten Ziele des Klimaschutzplans 2050 zu erreichen [18].

Bei niedrigen Mineralölpreisen fehlt der wirtschaftliche Anreiz, pflanzenöлтаugliche Traktoren, die mit Rapsölkraftstoff betrieben werden, einzusetzen. Zudem ist das Image von Rapsölkraftstoff angekratzt, da in früheren Jahren häufiger technische Defizite im Alltagsbetrieb auftraten. Zudem bieten Unsicherheiten bezüglich möglicher Änderungen in der Steuergesetzgebung, die Deckelung der Quotenanrechnung für Biokraftstoffe aus Nahrungsmittelpflanzen sowie fehlende längerfristige Mengenziele derzeit nur wenige Zukunftsperspektiven. Folglich bleibt die Option Rapsölkraftstoff im Vergleich zu anderen Antriebsalternativen weitgehend unbeachtet.

Eine detaillierte Gegenüberstellung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der Nutzung von dezentral produziertem Rapsölkraftstoff in land- und forstwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen zeigt Tabelle 28.

Tabelle 28: SWOT-Analyse der Nutzung von dezentral produziertem Rapsölkraftstoff in land- und forstwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • positive Betriebserfahrungen liegen vor: <ul style="list-style-type: none"> – hohe Zuverlässigkeit – hoher Wirkungsgrad – kompatibel mit Abgasnachbehandlungssystemen • vertraute Handhabung für Betreiber • Infrastrukturanpassung für Kraftstoffversorgung wenig aufwendig • genormter Kraftstoff nach DIN 51605 • nachhaltiger Kraftstoff: <ul style="list-style-type: none"> – Schonung von fossilen Ressourcen – hoher Beitrag zum Klimaschutz bei geringen THG-Vermeidungskosten – Boden- und Gewässerschutz durch hohe biologische Abbaubarkeit und geringe Ökotoxizität – Nachhaltigkeitszertifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Verbreitung • bisher wenige Freigaben bei land- und forstwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen • eingeschränkte Kältetauglichkeit • Mehrkosten für einen pflanzenöлтаuglichen Motor • Zusatzkosten für Rapsöl-Hoftankstelle

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Versorgungssicherheit durch Einsatz von heimischem Kraftstoff bei der Nahrungsmittelproduktion • regionale Wertschöpfung • präferierte Anwendung in der optimierten Kraftstoff-/Einsatz-Matrix 	
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoff-Eigenversorgung möglich • mehr Unabhängigkeit von fossilem Dieselmotorkraftstoff • Förderung durch Beantragung auf Rückerstattung der vollen Energiesteuer in der Land- und Forstwirtschaft • weiteres Optimierungspotenzial am Motorsystem (v. a. Motorsteuerung) möglich • Konsens über Vorzüglichkeit des Biokraftstoffpfades als Beitrag zum Klimaschutz in der Landwirtschaft • Branchenplattform zur Unterstützung der Technologie und Markteinführung 	<ul style="list-style-type: none"> • Image von Rapsölkraftstoff angekratzt aufgrund früherer technischer Defizite • technische Entwicklung nicht abgeschlossen (z. B. Kaltstartverhalten) • Rapsölkraftstoff wird nicht als Innovation wahrgenommen und bleibt wenig beachtet • fehlender wirtschaftlicher Anreiz • Investitionen und Entwicklungen werden nur zögerlich oder gar nicht getätigt • Unsicherheit bzgl. Änderungen in der Steuergesetzgebung • EU-Biokraftstoffpolitik: Deckelung der Quotenanrechnung für Biokraftstoffe aus Nahrungsmittelpflanzen • keine Ziele für die Zeit nach 2020

Die Betrachtung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des vollständigen Produktsystems der Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern verdeutlicht, dass die betrachteten Kriterien auf unterschiedlichste Weise miteinander verknüpft sind. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Bewertung der Rapsölkraftstoffproduktion in das übergeordnete Untersuchungssystem der Landwirtschaft eingebettet werden muss. Das Produkt Rapsölkraftstoff sollte nicht nur als Bioenergieträger bewertet werden, sondern auch als Rohstoff für eine nachhaltige sowie eine von fossilem Dieselmotorkraftstoff unabhängige Nahrungs- und Futtermittelproduktion betrachtet werden. Gleichzeitig wird mit dem Rapspresskuchen ein Futtermittel erzeugt, welches ebenfalls einen Betrag zur nachhaltigen Sicherstellung der Nahrungsmittelversorgung leistet. Durch die Erzeugung von Rapspresskuchen als Futtermittel wird die Importabhängigkeit von Sojaschrot reduziert. Gleichzeitig werden mögliche Landnutzungsänderungen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen in den Hauptexportländern Südamerikas vermindert. Aus diesen Gründen sollte das hohe THG-Minderungspotenzial (bis zu 91 %) bei gleichzeitig geringen THG-Vermeidungskosten von Rapsölkraftstoff nicht nur aus ökologischer und ökonomischer Sicht Beach-

tung finden. Vielmehr sollte die Betrachtung des landwirtschaftlichen Gesamtsystems anerkannt (z. B. durch Änderungen der Berechnungsvorgaben in der EU-RED) und in der zukünftigen politischen Weichenstellung berücksichtigt werden. Die einseitige Bewertung von Rapsölkraftstoff führt zu einer Unterbewertung verschiedener Stärken (z. B. Importunabhängigkeit, Klima- und Ressourcenschutz, Nahrungsmittelversorgung), hat Auswirkungen auf die gesellschaftliche und politische Wahrnehmung dieses Kraftstoffes und erhöht die Risiken der Kraftstoffherzeuger, Maschinenhersteller und Kraftstoffnutzer.

Zusammenfassung

Klima- und Ressourcenschutz zählen zu den wichtigsten gesellschaftlichen Aufgaben im 21. Jahrhundert. Dies zeigt nicht zuletzt das Klimaschutzabkommen von Paris (COP 21), das im Dezember 2015 beschlossen und dem die Bundesrepublik Deutschland im Oktober 2016 beigetreten ist. Zielvorgabe des Klimaschutzabkommens ist, dass alle Industriestaaten ihren Ausstoß an Treibhausgasen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 um 80 % reduzieren. Vor diesem Hintergrund und da der energetischen und stofflichen Nutzung von Biomasse ein hohes Treibhausgas-Minderungspotenzial zugeschrieben wird, wird das Wissen um die Entstehung von Treibhausgasemissionen aus den Bereitstellungsketten von Produkten auf Basis Nachwachsender Rohstoffe immer wichtiger.

Möglichkeiten der energetischen Biomassenutzung sind die Bereitstellung von Rapsölkraftstoff und dessen Nutzung in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen. In der Richtlinie 2009/28/EG sind Standardwerte zur Treibhausgas-Minderung verschiedener Biokraftstoffe, wie z. B. von reinem Rapsöl veröffentlicht. Allerdings wurde bei der Herleitung dieser Standardwerte von durchschnittlichen Produktionsbedingungen ausgegangen. Unterschiede in den Produktionsverfahren (z. B. bei der Ölgewinnung) bleiben ebenso unberücksichtigt wie besonders effiziente Herstellungspfade. Standort- und Bewirtschaftungseinflüsse (Böden, Klima, Ertragspotenziale, standortspezifische Produktionsverfahren oder Fruchtfolgen) können jedoch einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis einer Klimagasbilanz und damit auf die Höhe der Treibhausgas-Minderung haben. Die Ableitung praktisch umsetzbarer Treibhausgas-Minderungsstrategien sowie eine einzelbetriebliche Beratung zur treibhausgasminimierten Produktion erfordern daher regionalspezifische Daten sowie die Berücksichtigung der konkreten Produktionsbedingungen.

Ausgehend von der dargelegten Problemstellung befasst sich der vorliegende Bericht mit der Analyse und Bewertung der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern. Ein wesentliches Ziel der Analyse und Bewertung der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion ist die Ermittlung von regionaltypischen und spezifischen Ökobilanzdaten. Darauf aufbauend werden unter Berücksichtigung der ökonomischen Bewertung praktisch umsetzbare THG-Minderungsstrategien erarbeitet. Diese münden in Handlungsempfehlungen für die regionale und einzelbetriebliche Beratung zur nachhaltigen und treibhausgasoptimierten Produktion.

Darüber hinaus werden auch methodische Aspekte der Bilanzierung und ihre Auswirkungen auf die Ergebnisse der Treibhausgasbilanz untersucht und diskutiert, wie zum Beispiel der Einfluss der Methode zur Bewertung des Koppelproduktes Rapspresskuchen. Hierbei wird die nach der Richtlinie 2009/28/EG festgelegte Energie-Allokation mit der Substitutionsmethode verglichen.

Die Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion basieren auf der ExpResBio-Methode. Mit der ExpResBio-Methode können harmonisierte und transparente Bilanzergebnisse für die land- und forstwirtschaftliche Produktion berechnet, dargestellt und untereinander

sowie mit einem fossilen Energieträger verglichen werden. Neben den Festlegungen zum Untersuchungssystem (z. B. Systemgrenzen, funktionelle Einheit, Umgang mit Koppelprodukten) ist die Berücksichtigung von Standort- und Bewirtschaftungseinflüssen (z. B. Boden, Klima, Fruchtfolge) ein weiterer wichtiger Aspekt der ExpResBio-Methoden.

Durchgeführt wurden die Analyse und die Bewertung der Raps-erzeugung und dezentralen Rapsöl-kraftstoffproduktion in Bayern auf Basis regionalspezifischer Betriebsdaten der Jahre 2013 bis 2015. Hierbei wurden in drei dezentralen Ölmühlen, die von jeweils fünf landwirtschaftlichen Praxisbetrieben beliefert werden, Daten erhoben. Die drei Ölmühlen befinden sich in drei verschiedenen Boden-Klima-Räumen Bayerns, sodass neben den betriebsspezifischen auch regionalspezifische Einflüsse zu Boden und Klima in die Analysen einfließen. Die erhobenen Daten umfassen die vollständige Prozesskette vom Rapsanbau über Transport und Lagerung bis hin zur Pressung und Ölfiltration. Ergänzt werden die erhobenen Aktivitätsdaten durch Emissionsfaktoren aus den Ökobilanzdatenbanken ecoinvent und der GaBi-Software.

Ergebnisse der Treibhausgasbilanz

Die Treibhausgasbilanz des dezentral erzeugten Rapsöl-kraftstoffes wird mit mehr als 90 % durch den Rapsanbau dominiert. Die Ergebnisse der Raps-erzeugung zeigen dabei starke einzelbetriebliche und geringere regionale Unterschiede in der Treibhausgasbilanz. Bezogen auf den dreijährigen Mittelwert (2013 bis 2015) variieren die einzelbetrieblichen Treibhausgasemissionen zwischen 25,2 und 43,6 g MJ⁻¹. Dies entspricht einer Abweichung von 18,4 g MJ⁻¹. Ursachen hierfür sind die betrieblichen Produktionsverfahren (z. B. Düngemanagement) einerseits und die natürlichen Standortbedingungen (z. B. Ertragspotenzial) andererseits. Als wesentliche Stellschrauben der Treibhausgasbilanz der Raps-erzeugung erweisen sich die N₂O-Feldemissionen sowie die Art der ausgebrachten Mineraldünger. Dies verdeutlichen Auswertungen zur Stickstoffeffizienz und zur ausgebrachten N-Düngerart. So nehmen die N₂O-Feldemissionen zwar mit steigender N-Effizienz ab, die Treibhausgas-Gesamtemissionen zeigen aber keinen linearen Zusammenhang zur N-Effizienz. Die Höhe der Gesamtemissionen ist maßgeblich auf den Emissionsfaktor für die Bereitstellung der jeweiligen Stickstoffart zurückzuführen. Während der Emissionsfaktor für die Bereitstellung von Wirtschaftsdünger allgemein mit null angenommen wird und damit am niedrigsten ist, haben NPK-Volldünger oder Nitratdünger die höchsten Emissionsfaktoren. Empfehlungen für einen möglichst treibhausgasarmen Dünger können allerdings nur unter Berücksichtigung der regionalspezifischen Gegebenheiten (z. B. Boden, hohe Verfügbarkeit von Wirtschaftsdüngern) erfolgen.

Im Vergleich zur Raps-erzeugung variieren der Transport und die Verarbeitung der Raps-saat in den drei untersuchten bayerischen dezentralen Ölmühlen kaum. Aufgrund der kurzen Entfernungen und der energiesparenden Ölgewinnung bei der Kaltpressung ohne Lösungsmittlextraktion und ohne Raffination werden im Vergleich zur industriellen Ölgewinnung deutlich geringere Treibhausgasemissionen verursacht. Dies zeigt der Vergleich der Treibhausgasemissionen der dezentralen Ölgewinnung (1 g MJ⁻¹) mit dem Teilstandardwert nach Richtlinie 2009/28/EG (5 g MJ⁻¹), der einer industriellen Ölgewinnung entspricht.

Bei Anwendung der Energie-Allokation Bewertung des Koppelproduktes liegt die Treibhausgas-Minderung von Rapsölkraftstoff aus Bayern im Mittel (über drei Anbaujahre der drei dezentralen Ölmühlen) bei 58 % im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff. Dieser Wert ist geringfügig besser als der RED-Standardwert für reines Rapsöl (57 %).

Anders als bei der Energie-Allokation wird bei Anwendung der Substitutionsmethode der Presskuchen nach dessen üblicher Verwendung als hochwertiges Eiweißfuttermittel in der tierischen Erzeugung bewertet. Das substituierte Produkt ist dabei importiertes Sojaschrot. Zudem hat der Rapsanbau einen positiven Einfluss auf den Ertrag der nachfolgenden Kultur (Vorfruchtwert), wofür weitere Gutschriften vergeben werden können. So liegt die Treibhausgas-Minderung von dezentral erzeugtem Rapsölkraftstoff nach dieser Berechnungsmethode und unter Berücksichtigung des Vorfruchtwertes im Mittel aller Betriebe und Erntejahre bei 68 %. Bezieht man auch noch ein, dass Landnutzungsänderungen in Südamerika zum Teil auch auf den zunehmenden Sojaanbau zurückzuführen sind (Annahme auf der Basis von Literaturdaten: 8,4 % des Sojas stammen von Flächen aus Landnutzungsänderung), liegt die errechnete Treibhausgas-Minderung bei 91 % gegenüber fossilem Dieselkraftstoff. Zwar ist in der Richtlinie 2009/28/EG die Anwendung der Energie-Allokation zur Anrechnung auf die Biokraftstoff-Quote festgelegt, aber für politische Entscheidungsprozesse wird angeregt, die Ergebnisse der Substitutionsmethode heranzuziehen.

Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Ähnlich wie bei der Berechnung der Treibhausgasemissionen dominiert auch bei der ökonomischen Bewertung die Erzeugung des Rohstoffes (Rapssaat) mit durchschnittlich 86 % die Kosten des dezentral erzeugten Rapsölkraftstoffes. Weiterhin unterscheiden sich auch hier die Ergebnisse der Rapszerzeugung stärker zwischen den Betrieben als zwischen den untersuchten Boden-Klima-Räumen. Bezogen auf den Mittelwert der drei Anbaujahre (2013 bis 2015) variieren die Ergebnisse zwischen 0,320 und 0,205 € kg⁻¹ Rapssaat. Die Unterschiede ergeben sich insbesondere durch die Kosten der Bodenaufbereitung (z. B. Pflugeinsatz), der Düngung (Dünger- bzw. Nährstoffmenge, Einsatz von Wirtschaftsdünger), des Pflanzenschutzes (Menge an Pflanzenschutzmitteln) sowie das Ertragsniveau. Auf die Düngung (Ausbringung und Materialkosten) entfallen durchschnittlich 38 % der Produktionskosten der Rapssaat. Somit ist dieser Parameter eine wichtige Stellschraube zur Optimierung der Kostenbilanz.

Bei der Verarbeitung der Rapssaat beeinflusst die Anlagenauslastung maßgeblich die Kosten der Rapsölerzeugung. Anhand einer Sensitivitätsanalyse wurde eine wirtschaftlich optimale Auslastung von 75 % oder 275 Presstagen identifiziert. Die reale Auslastung der untersuchten Ölmühle in dem Betrachtungszeitraum (2013 bis 2015) lag jedoch bei maximal 41 % bzw. 110 Presstagen. Da die Kapitalkosten mit ca. 6 % den zweitgrößten Anteil der Verarbeitungskosten ausmachen, ist eine möglichst hohe Anlagenauslastung anzustreben.

Fazit

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen konnten unterschiedliche Handlungsfelder identifiziert werden. Diese umfassen Empfehlungen zur kosteneffizienten Optimierung

der Treibhausgasbilanz des untersuchten Produktsystems und Empfehlungen zur Optimierung der Bilanzierungsmethodik. So weist beispielsweise das Düngemittelmanagement bei der Rapsrerzeugung ein erhebliches Optimierungspotenzial auf. Eine einzelbetriebliche Abstimmung von Art, Menge und Ausbringung des eingesetzten Düngers kann Kosten minimieren und den Treibhausgasausstoß erheblich reduzieren. Im Vergleich zu fossilem Diesel kann der Einsatz von Pflanzenölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in Land- und Forstmaschinen einen großen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Darüber hinaus verursacht Rapsöl, das regional erzeugt wird, niedrige volkswirtschaftliche Kosten und erhöht die Wertschöpfung für die Region, insbesondere auch durch die Arbeitsplätze in der Ölmühle.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass bei Verwendung des Teil-Standardwertes für reines Rapsöl (industrielle Ölgewinnung) nach EU-RED die Vorteile durch geringere Treibhausgasemissionen bei der dezentralen Ölgewinnung unberücksichtigt bleiben. Zur besseren Abbildung der dezentralen Verarbeitung, die sich durch geringe Transportentfernungen und einen deutlich geringeren Energiebedarf im Vergleich zu einer industriellen Ölgewinnung auszeichnet, ist die Implementierung eines Teil-Standardwertes für die dezentrale Ölgewinnung im Zertifizierungsprozess erforderlich.

Schließlich ist zu berücksichtigen, dass das Treibhausgas-Minderungspotenzial von Rapsölkraftstoff, bei dessen Herstellung Eiweißfuttermittel entstehen, infolge der Berechnungsvorgaben durch die EU-RED oft als zu gering bewertet wird und die positiven Fruchtfolgeeffekte des Rapsanbaus gänzlich unberücksichtigt bleiben. Durch Anwendung der Substitutionsmethode können hingegen Wechselwirkungen zwischen der Biomasse- und Nahrungserzeugung (Marktfruchtbau, Tierhaltung) abgebildet werden. Die Ableitung von Standardwerten zur Bewertung klassischer Koppelprodukte wie beispielsweise die Substitution von Sojaschrot durch Rapspresskuchen oder Rapsextraktionschrot wird empfohlen. Gleiches gilt für die Berücksichtigung von Fruchtfolgeeffekten.

Abstract

Climate and resource protection are among the most important social tasks in 21st century. In this regard material and energetic use of biomass is attributed to reducing greenhouse gas (GHG) emissions. Thereby, the production and use of decentralized rapeseed oil fuel offers a great potential. To reduce GHG emissions, a more profound knowledge about how to calculate and to avoid them along the supply chain of bio-based products or bio-energies becomes more and more important.

The Directive 2009/28/EC (RED) claims a minimum level of greenhouse gas reduction for biofuels to be marketed. Site-specific production conditions are not considered in default values, which are specified by RED for calculating the greenhouse gas emissions. Within the research project "Expert Group Resource Management Bioenergy in Bavaria" (ExpRessBio), regional and farm-specific greenhouse gas balances were carried out for the production of rapeseed and rapeseed oil according to the ExpRessBio method. The analysis and assessment were based on specific data of three decentralized oil mills and 15 agricultural farms. These data were collected from 2013 to 2015.

Results of regional and farm specific GHG balances for rapeseed production show a considerable range of GHG-emissions in CO₂-eq (25.2 to 43.6 g MJ⁻¹). This range results from nitrogen-efficiencies and the type of N-fertilizer, which are used. These parameters (nitrogen-efficiencies and type of N-fertilizer) are the key factors to reduce GHG-emissions in the production of rapeseed. For the complete product system of decentralized rapeseed oil fuel production in Bavaria a GHG reduction of 58 % can be achieved. This is slightly higher than the default value of 57 % as specified in Directive 2009/28/EC. However, this value under Directive 2009/28/EG is based on an industrial oil production process, whereas a decentralized production is less energy intensive and consequently leads to less GHG emissions.

In comparison to the energy allocation method, the press cake is evaluated as a feed according to its feed value, when using the substitution method. In doing so, 82 % higher value for greenhouse gas reduction was calculated. In addition positive effects of rapeseed production can be considered within crop rotation. In addition these effects lead to a distinctly higher GHG reduction rate of up to 91 %.

Quellenverzeichnis

- [1] AIGNER, A.; STICKSEL, E.; SCHMIDT, M. (2013): Versuchsergebnisse aus Bayern – Jahr 2013 – Winterraps. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ) (Hrsg.). http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/raw_gesamt_bericht_2013.pdf (Stand: 13.11.2016)
- [2] AIGNER, A.; STICKSEL, E.; SCHMIDT, M. (2014): Versuchsergebnisse aus Bayern – Jahr 2014 – Winterraps. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ) (Hrsg.). <http://www.hortigate.de/Apps/WebObjects/ISIP.woa/vb/bericht?nr=62639> (Stand: 13.11.2016)
- [3] AIGNER, A.; STICKSEL, E.; SCHMIDT, M. (2015): Versuchsergebnisse aus Bayern – Jahr 2015 – Winterraps. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ) (Hrsg.). http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/winterraps_2015.pdf (Stand: 13.11.2016)
- [4] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2011): Anbauempfehlungen für Winterraps. LfL-Information; 6. Aufl. Freising-Tüntenhausen: ES-Druck, 14 Seiten
- [5] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2014): Internet Deckungsbeitragsrechner. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). URL: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/default.html;jsessionid=351324FBD39D27836BE333224CE401F5> (Stand: 26.05.2014)
- [6] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2015): Direktzahlungen in der EU-Förderperiode 2014–2020. URL: <http://www.lfl.bayern.de/iba/agrarstruktur/056688/> (Stand: 15.09.2015)
- [7] BAYERISCHE STAATSREGIERUNG (2011): Bayerisches Energiekonzept „Energie Innovativ“ beschlossen am 24.05.2011. München: Bayerische Staatskanzlei, 80 Seiten
- [8] BRANKATSCHK, G.; FINKBEINER, M. (2014): Application of the Cereal Unit in a new allocation procedure for agricultural life cycle assessments. *Journal of cleaner Production*, Nr. 73, S. 72–79
- [9] BRANKATSCHK, G.; FINKBEINER, M. (2015): Modeling crop rotation in agricultural LCAs – Challenges and potential solutions. *Agriculture Systems*, Nr. 138, S. 66–67
- [10] BRAUER, S.; VOGEL, A.; MÜLLER-LANGER, F. (2014): Kosten und Ökobilanzen von Biokraftstoffen. Leipzig: Institut für Energetik und Umwelt, 23 Seiten
- [11] BRITISH STANDARDS INSTITUTION – BSI (2011): PAS 2050:2011 – Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. URL: <http://shop.bsigroup.com/en/forms/PASs/PAS-2050/> (Stand 05.09.2014)
- [12] BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG (2010): Leitfaden Nachhaltige Biomasseherstellung. Stand: Januar 2010. 1. Aufl. Bonn: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), 82 Seiten

- [13] BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN (2010): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV) vom 30. September 2009, die durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. Juni 2010 (BGBl. I, S. 814) geändert worden ist, Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 65, S. 3183–3212
- [14] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2011): Energiesteuergesetz. EnergieStG, vom 01.03.2011 BGBl. I, S. 282. Fundstelle: Artikel 1 Gesetz zur Änderung des Energiesteuer- und des Stromsteuergesetzes
- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2015): Verordnung zur Neuordnung der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Verordnungsentwurf). URL: http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Service/Rechtsgrundlagen/Entwurfe/EntwurfDuengeverordnung.pdf?__blob=publicationFile (Stand: 16.12.2015)
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1994): Ökologische Bilanz von Rapsöl bzw. Rapsölmethylester als Ersatz von Dieselkraftstoff; Stellungnahme der Agrarressorts des Bundes und der Länder zur Studie des Umweltbundesamtes (UBA), Ökobilanz Rapsöl. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
- [17] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1994): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 7, S. 221–240
- [18] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (2016A): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Kabinettsbeschluss vom 14. November 2016. Berlin: 91 Seiten
- [19] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (2016B): Pariser Klimaschutzabkommen tritt in Kraft. Pressemitteilung Nr. 238 vom 05.10.2016
- [20] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (2014): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020, Kabinettsbeschluss vom 3. Dezember 2014. Berlin: 84 Seiten
- [21] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2009): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von flüssiger Biomasse zur Stromerzeugung (Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung – BioStNachV) vom 23. Juli 2009, die zuletzt durch Artikel 2 Abs. 70 der Verordnung vom 22.12.2011 geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 46, S. 2174–2202
- [22] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT; BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE E. V. (2010): Produktbezogene Klimaschutzstrategien. Product Carbon Footprint verstehen und nutzen. URL: http://www.bdi.eu/download_content/KlimaUndUmwelt/PCF-Leitfaden_100810_Online.pdf (Stand: 08.09.2014)

- [23] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (1994): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) in der Fassung vom 24. Februar 2012, Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 10, S. 212
- [24] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (2006): Energiesteuergesetz (EnergieStG) in der Fassung vom 31. August 2015, Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 35, S. 1474
- [25] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (2006): Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote (Biokraftstoffquotengesetz – BioKraftQuG) in der Fassung vom 18. Dezember 2006, Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 62, S. 3180
- [26] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (2008): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) in der Fassung vom 20. Dezember 2012, Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 61, S. 2743
- [27] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (2015): Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 76 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 35, S. 1487
- [28] CHRISTEN O.; SIELING, K. (1999): Vorfruchtwert von Raps. Raps, Jg. 17, Nr. 2, S. 65–67
- [29] CRUTZEN, P. J.; MOSIER, A. R.; SMITH, K. A.; WINIWARTER, W. (2007): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Nr. 7, S. 11191–11205
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2009): DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. November 2009. Berlin: Beuth-Verlag, 40 Seiten
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN 51605: Kraftstoffe für pflanzenölaugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth-Verlag, 16 Seiten
- [32] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2006): DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Oktober 2006. Berlin: Beuth-Verlag, 84 Seiten
- [33] 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
- [34] 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
- [35] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2012): DIN EN 16214-1: Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen für Energieanwendungen – Grundsätze, Kriterien, Indikatoren und Prüfer – Teil 1: Terminologie. November 2011. Berlin: Beuth-Verlag, 26 Seiten

- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN CEN/TS 16214-2: Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen für Energieanwendungen – Grundsätze, Kriterien, Indikatoren und Prüfer – Teil 2: Konformitätsbewertung einschließlich überwachter Lieferkette und Massenbilanz. Juni 2014, Berlin: Beuth Verlag
- [37] DREIER, T. (2000): Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München. Dissertation, München: Technische Universität München, 134 Seiten
- [38] DRESSLER, D.; ENGELMANN, K. ET AL. (2016): ExpResBio-Ergebnisse: Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Abschlussbericht – Langfassung. Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 748 Seiten (in Vorbereitung)
- [39] DRESSLER, D.; LOEWEN, A. (2011): Ganzheitliche Bewertung regional angepasster Bioenergiekonzepte unter dem Aspekt des Klimawandels. In: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) (Hrsg.): Klimafolgenmanagement in der Metropolregion Hannover – Braunschweig – Göttingen. GeoBerichte, Nr. 18. Hannover: (LBEG), 174 Seiten, ISSN 1864-7529
- [40] 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
- [41] EMMENEGGER, M. F.; GMÜNDER, S.; REINHARD, J.; ZAH, R.; NEMECEK, T.; SCHNETZER, J.; BAUER, C.; SIMONS, A.; DOKA, G. (2012): Harmonisation and extension of the bioenergy inventories and assessment. End report, 31.08.2012. Dübendorf: EMPA Materials Science & Technology (Hrsg.), 97 Seiten
- [42] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (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, L140, S. 16–62
- [43] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2009): Richtlinie 2009/30/EG des europäischen Parlaments und Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikation für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 93/12/EWG. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 52, L140, S. 88–113
- [44] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2015): Richtlinie 2015/1513/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 09. September 2015 zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG über die Qualität von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen und zur Änderung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung und Nutzung von Energien aus erneuerbaren Quellen. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 58, L239, S. 1–29

- [45] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2015): Richtlinie 2015/625/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. April 2015 zur Festlegung von Berechnungsverfahren und Berichterstattungspflichten gemäß der Richtlinie 98/70/EG des europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und Dieselmotoren. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 58, L107, S. 26–67
- [46] EUROPEAN COMMISSION (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. Specific guide for Life Cycle Inventory data sets. First Edition. Ispra, Italy: European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (JRC IES); Publication Office of the European Union. EUR – Scientific and Technical Research series, EUR 24709 EN, 142 Seiten, ISBN 978-92-79-19093-3
- [47] 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
- [48] EUROPEAN COMMISSION (2012): The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. Towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe. First Edition. Authors: Wolf, M.-A.; Pant, R.; Chomkamsri, K., Sala, S.; Pennington, D.; Ispra, Italy: European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (JRC IES); Publication Office of the European Union. EUR – Scientific and Technical Research series, EUR24982 EN, 72 Seiten, ISBN 978-92-79-21640-4
- [49] FEHRENBACH, H.; KÖPPEN, S.; MARKWARDT, S.; VOGT, R. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). Texte 09/2016, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 160 Seiten
- [50] 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
- [51] FLESSA, H.; MÜLLER, D.; PLASSMANN, K.; OSTERBURG, B.; TECHEN, A.-L.; NITSCH, H.; NIEBERG, H.; SANDERS, J.; MEYER ZU HARTLAGE, O.; BECKMANN, E.; ANSPACH, V. (2012): Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Sonderheft 361, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTi) Braunschweig, 472 Seiten
- [52] FRIEDRICH, A.; GLANTE, F.; SCHLÜTER, C.; GOLZ, C.; NÖH, I.; REINHARD, G.; HÖPFNER, U.; SATORIUS, R.; BENNDORF, R.; BLÜMEL, H.; SCHÄRER, B.; RODT, S. (1993): Ökologische Bilanz von Rapsöl bzw. Rapsölmethylester als Ersatz von Dieselmotoren: Ökobilanz Rapsöl. UBA-Texte 4/93, Berlin: Umweltbundesamt, 176 Seiten
- [53] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2016): Ein- und Ausfuhr von Sojaschrot und Sojabohnen in die Niederlande im Jahr 2013. URL: <http://faostat3.fao.org/download/FB/BC/E> (Stand: 06.06.2016)

- [54] GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; GARCÍA-REY, D.; HOSPIDO, A. (2012): Environmental life cycle assessment for rapeseed-derived biodiesel. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 18, Nr. 1, S. 61–76.
- [55] GRAF, T.; REINHOLD, G. (2008): Betriebswirtschaftliche Aspekte der dezentralen Ölsaatenverarbeitung. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (Hrsg.): *KTBL-Schrift*, Nr. 427. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), S. 122–129
- [56] GRAU, B.; BERNAT, E.; ANTONI, R.; JORDI-ROGER, R.; RITA, P. (2010): Small-scale production of straight vegetable oil from rapeseed and its use as biofuel in the Spanish territory. *Energy Policy*, Jg. 38, Nr. 1, S. 189–196
- [57] GRAU, B.; BERNAT, E.; RITA, P.; JORDI-ROGER, R.; ANTONI, R. (2013): Environmental life cycle assessment of rapeseed straight vegetable oil as self-supply agricultural biofuel. *Renewable Energy*, Jg. 50, Nr. 2, S. 142–149
- [58] GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; VOET, E. (2009): A greenhouse gas indicator for bio-energy: some theoretical issues with practical implications. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 14, Nr. 4, S. 328–339
- [59] HAAS, R. (2015): Status quo der dezentralen Ölmühlen in Bayern, Vortrag beim 7. Arbeitskreis „Dezentrale Ölgewinnung in Bayern“ am 05.03.2015 in Straubing, 16 Folien
- [60] HAAS, R.; REMMELE, E. (2011): Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung. Im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP). *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 26. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 74 Seiten, ISSN 1614-1008
- [61] HAAS, R.; REMMELE, E. (2013): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung. Im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF). *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 34. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 51 Seiten
- [62] HARTMANN, H. (2009): Transport, Lagerung, Konservierung und Trocknung. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Aufl. Dordrecht; Heidelberg; London; New York: Springer, S. 61–72, ISBN 978-3-540-85094-6
- [63] HARTMANN, H.; KALTSCHMITT, M. (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. *Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“*, Band 3, 2. Aufl., Münster: Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 692 Seiten
- [64] HUBER, G.; SCHOLZ, A.; STÖHR, M.; DÜSSELDORF, C.; FLIERL, R.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.; PICKEL, P. (2015): Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl. *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 44. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 86 Seiten
- [65] INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH (IFEU) (2015): Biograce. Harmonised calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe. URL: www.biograce.net (Stand: 24.02.2016)

- [66] INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH (IFEU) (2015): Treibhausgasberechnungs-Tools für RED und BioSt-/Biokraft-NachV. URL: <http://www.ifeu.de/index.php?bereich=nac&seite=ENZO2> (Stand: 16.02.2016)
- [67] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 11 N₂O Emissions from Managed Soils and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. Japan: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 54 Seiten
- [68] INTERGOVERNMENTAL 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
- [69] INTERNATIONAL SUSTAINABILITY & CARBON CERTIFICATION (2012): ISCC PLUS 202. ISCC PLUS Standard on Sustainability Requirements for the Production of Biomass – ISCC PLUS 202 V1.0 URL: http://www.iscc-system.org/index.php?eID=tx_nawsecured1&u=0&file=fileadmin/content/documents/ISCC-Zertifizierungs-Prozess/ISCC_PLUS/ISCCPLUS202StandardonSustainabilityRequirementsfortheProductionofBiomass.pdf&t=1358417114&hash=671aea9d2952017d0213c1df9e5e90b55c105e96 (Stand: 16.01.2013)
- [70] JAENISCH, D.; SOMMERFELD, D. (2005): Dezentrale Gewinnung und Nutzung des biogenen Kraftstoffes Rapsöl in einer Modellregion in Mecklenburg-Vorpommern. In: Dezentrale Ölsaatenverarbeitung, KTBL-Schrift 427, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.), 164 Seiten, ISBN 3-7843-2171-2, Seite 155–164
- [71] 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
- [72] KAGE, H.; PAHLMANN, I. (2013). Potenziale zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Rapsanbau. In: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche, Band 45, Berlin: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), S. 235–259
- [73] KÄGI, THOMAS; FREIERMUTH KNUCHEL, RUTH; NEMERECEK, THOMAS; GAILLARD, GERARD (2007): Ökobilanz von Energieprodukten: Bewertung der landwirtschaftlichen Biomasse-Produktion. Hg. v. Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, zuletzt aktualisiert am 07.05.2007, zuletzt geprüft am 29.10.2012
- [74] KALTSCHMITT, M.; REINHARDT, G. (1997): Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, Ökologische Bilanzierung. 1. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn, 527 Seiten
- [75] KALTSCHMITT, M.; MÜLLER-LANGER, F.; NEULING, U.; REMMELE, E.; THUNEKE, K. (2016): Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (HRSG.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, 1867 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2

- [76] KAVALOV B.; JENSEN P.; PAPAGEORGIOU D.; SCHWENSEN C.; OLSSON J. P. (2003): Biofuel Production Potential of EU-Candidate Countries. Final EUR 20835 EN. Addendum to the Final Report EUR 20836 EN
- [77] KLÖPFFER, W.; GRAHL, B. (2009): Ökobilanz (LCA). Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 426 Seiten. ISBN 978-3-527-32043-1
- [78] KÖBLE, R. (2014): The Global Nitrous Oxide Calculator – GNOC-Online Tool Manual. Version 1.2.4
- [79] KRAUS, K.; NIKLAS, G.; TAPPE, M. (1999): Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. 1. Aufl. Berlin: Umweltbundesamt (UBA), 199 Seiten
- [80] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2015): KTBL-Feldarbeitsrechner. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) URL: <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html> (Stand: 14.03.2016)
- [81] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2014): Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15. 24. Auflage. Darmstadt: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 832 Seiten, ISBN 978-3-941583-93-1
- [82] LICHTBLAU, G.; PÖLZ, W.; STIX, S.; WINTER, R. (2012): Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe. Erstellt im Rahmen des Projektes „Biokraftstoffe – Potentiale, Risiken, Zukunftsszenarien“. Wien: Umweltbundesamt GmbH Wien (Hrsg.). Perspektiven für Umwelt & Gesellschaft, Nr. REP-0360, 50 Seiten, ISBN 978-3-99004-163-5
- [83] MAJER, S.; OEHMICHEN, K. (2010): Mögliche Ansätze zur Optimierung der THG-Bilanz von Biodiesel aus Raps. Studie im Auftrag der UFOP Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V., Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum. Projektnummer 3510005, 25 Seiten
- [84] MEMMLER, M.; MERKEL, K.; PABST, J.; ROTHER, S.; SCHNEIDER, S.; DREHER, M. (2013): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012. Climate Change 15. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 136 Seiten
- [85] MÜLLER-LINDENLAUF, M.; ZIPFEL, G.; MÜNCH, J.; GÄRTNER, S.; RETTENMAIER, N.; PAULSCH, D.; REINHARDT, G. (2013): CO₂-Fußabdruck und Umweltbilanz von Fleisch aus Baden-Württemberg. Endbericht im Auftrag der Marketinggesellschaft Baden-Württemberg mbH (MBW). Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 66 Seiten
- [86] NAUMANN, K.; OEHMICHEN, K.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; SCHRÖDER, J.; ZEYMER, M.; ZECH, K.; MÜLLER-LANGER, F. (2016): Monitoring Biokraftstoffsektor, 3. Auflage. Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ. Leipzig: 176 Seiten
- [87] PAHLMANN, I.; BÖTTCHER, U.; SIELING, K.; KAGE, H. (2013): Possible impact of the Renewable Energy Directive on N fertilization intensity and yield of winter oilseed rape in different cropping systems. Biomass & Bioenergy, Jg. 57, S. 168–179

- [88] 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
- [89] QUIRIN M.; GÄRTNER S. O.; PEHNT M. REINHARDT G. A. (2004): CO₂-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe. Eine Bestandsaufnahme. Endbericht. Heidelberg: IFEU-Institut, 230 Seiten
- [90] RABL, A.; SPARDO, J. V. (2004): The RiskPoll software, version is 1.051. URL: <http://www.arirabl.com> (Stand August 2004)
- [91] 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
- [92] ROESCH, C. (1997): Monitoring „Nachwachsende Rohstoffe“. Pflanzliche Öle und andere Kraftstoffe aus Pflanzen. Dritter Sachstandsbericht. TAB-Arbeitsbericht, Nr. 053, Bonn: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.), 122 Seiten
- [93] 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 27. Braunschweig: Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut, 372 Seiten
- [94] ROßBERG, D.; MICHEL, V.; GRAF, R.; NEUKAMPF, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, Jg. 59, Nr. 7, S. 155–161, ISSN 0027-7479
- [95] ROTH AGRARHANDEL (2014): Preisliste. URL: http://www.roth-agrar.de/pdf_files/flyer/psm-preisliste-klein-gp_a6_13_roth.pd. (Stand: 21.08.2014)
- [96] SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN (2007): Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen. Berlin: Erich-Schmidt-Verlag, 124 Seiten, ISBN 978-3-503-10602-8
- [97] SCHMIDT, J. H. (2007): Life Cycle Assessment of rapeseed oil and palm oil. Department of Development and Planning, Aalborg University, Dissertation, 276 Seiten
- [98] SCHMIDT, J. H. (2009): COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF RAPESEED OIL AND PALM OIL. International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 15, Nr. 2, S. 183–197
- [99] SCHMITZ, N.; HENKE, J.; KLEPPER, G. (2009): Biokraftstoffe. Eine vergleichende Analyse. Gülzow: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 165 Seiten
- [100] 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

- [101] SMITH, K. A.; MOSIER, A. R.; CRUTZEN, P. J.; WINIWARTER, W. (2012): The role of N₂O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth climate. *Philosophical Transactions of Royal Society B*, Nr. 367, S. 1169–1174
- [102] STATISTISCHE ÄMTER DES BUNDES UND DER LÄNDER (2013): *Agrarstrukturen in Deutschland – Einheit in Vielfalt. Regionale Ergebnisse der Landwirtschaftszählung 2010*. Stuttgart: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 73 Seiten
- [103] STATISTISCHES BUNDESAMT (2014): *Wachstum und Ernte 2013. Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte Nr. 16*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, Abteilung Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, 63 Seiten
- [104] STATISTISCHES BUNDESAMT (2015): *Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis Juni 2015*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 54 Seiten
- [105] STATISTISCHES BUNDESAMT (2016): *Ein- und Ausfuhr (Außenhandel) von Sojaschrot und Sojabohnen nach Deutschland im Jahr 2013*. Wiesbaden: GENESIS Online Datenbank. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online;jsessionid=894B1D55293ED1233DB65EF77A42F1BC.tomcat_GO_2_3?Menu=Willkommen (Stand: 08.06.2016)
- [106] STATISTISCHES BUNDESAMT (2016): *Wachstum und Ernte 2015. Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte Nr. 16*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, Abteilung Land- und Forstwirtschaft, Fischerei
- [107] STEHFEST, E.; BOUWMAN, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Jg. 74, Nr. 3, S. 207–228. DOI:10.1007/s10705-006-9000-7
- [108] STRUIJS, J.; BEUSEN, A.; JAARVELD, 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
- [109] SUTOR, G.; KOLENDA, S. (2000): *Verwendung von Rapsöl als Kraftstoff in landwirtschaftlichen Zugmaschinen – eine ökologische Betrachtung. Studie zum Thema*. Freising: Technische Universität München, Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaus, 28 Seiten
- [110] SUTTER, J. (2006): *Soybean*. In: JUNGBLUTH N. (HRSG.) *Life Cycles Inventories of Bioenergy*. Ecoinvent report No. 17: Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. S. 125–140
- [111] SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2011): *Ecoinvent Database v.2.2* (Stand: 01.04.2011)
- [112] THINKSTEP AG (2015): *GABI Software and database contents for Life Cycle Assessment*. Leinfelden-Echterdingen: Thinkstep AG (Stand: Juni 2015)
- [113] THUNEKE, K. (2016): *Preisentwicklung Kraftstoffe*. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing. Unveröffentlicht

- [114] RICHTER, R.; GRAF, T.; REINHOLD, G. (2008): Betriebswirtschaftliche Betrachtung der dezentralen Ölsaatenverarbeitung. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 11 Seiten
- [115] TZSCHEUTSCHLER, P.; DREIER, T.; WAGNER, U. (2001): Ganzheitliche Systemanalyse für die Erzeugung und Anwendung von Biodiesel und Naturdiesel im Verkehrssektor. Gelbes Heft, Nr. 72, München: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (StMLF), 81 Seiten
- [116] UHL, A.; HAAS, R.; REMMELE, E. (2007): Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen. Im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. Berichte aus dem TFZ, Nr. 15. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 68 Seiten
- [117] 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
- [118] VERBAND DER ÖLSAATENVERARBEITENDEN INDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E. V. (OVID) (2014): Merkblatt über die Angabe regionaler CO₂-Werte beim Handel von Rapssaaten zur Biodieselherstellung. URL: http://www.ovid-verband.de/fileadmin/downloads/hintergr%C3%BCnde/OVID_Merkblatt_Angaben_THG_Werte_NUTS_2_September.pdf (Stand: 21.04. 2016)
- [119] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (1997): VDI 4600. Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI). Berlin: Beuth-Verlag, 22 Seiten
- [120] 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
- [121] 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
- [122] WOLF, C.; DRESSLER, D.; ENGELMANN, K.; KLEIN, D.; WEBER-BLASCHKE, G.; BÖSWIRTH, T.; BRYZINSKI, T.; EFFENBERGER, M.; HIJAZI, O.; HÜLSBERGEN, K.-J.; MAZE, M.; REMMELE, E.; RÖDER, H.; SCHULZ, C.; SERDJUK, M.; THUNEKE, K.; TIEMANN, A.; ZERLE, P. (2016): ExpResBio – Methoden. Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 45. Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 166 Seiten. ISSN 1614-1008
- [123] 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. DOI: 10.1111/jiec.12321
- [124] ZAH, R.; BÖNI, H.; GAUCH, M.; HISCHIER, R.; LEHMANN, M.; WÄGER, P. (2007): Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Schlussbericht. St. Gallen, Switzerland: EMPA, 206 Seiten

- [125] ZENGER, X. (2001): Agrarstrukturentwicklung in Bayern. LfL-Information. 1. Aufl. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 13 Seiten

Glossar

Die im Glossar angeführten Definitionen beschreiben die wichtigsten Begriffe dieser Studie in alphabetischer Reihenfolge. In der Literatur werden manche Begriffe in unterschiedlichem Kontext oder gar als Synonyme verwendet (z. B. Reststoff, Koppelprodukt, Abfall). Um Missverständnisse zu vermeiden, ist in nachfolgenden Erläuterungen festgeschrieben, was unter den jeweiligen Begriffen im Projekt ExpResBio konkret zu verstehen ist.

Abfall

Abfälle im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [23] 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 [91].

Abschneidekriterien (Cut-off-Kriterien)

Abschneidekriterien beschreiben in Ökobilanzen getroffene Entscheidungen über den Ausschluss von geringfügigen Stoffmengen, Energieflüssen oder des Grades von Umweltrelevanz aus einem betrachteten System [30]. Bei der Analyse eines Produktsystems (z. B. Bereitstellung einer bestimmten Menge an Kraftstoff) ist festzustellen, dass alle erdenklichen Teilsysteme in gewisser Weise miteinander verknüpft sind. Um ein spezifisches System für sich untersuchen zu können, ist es zwangsläufig notwendig, bestimmte „geringfügige“ Teilsysteme aus der Betrachtung auszuschließen. Was unter „geringfügig“ zu verstehen ist, ist durch spezifische Abschneidekriterien (z. B. definierte Anteile an Masse, Energie, Umweltrelevanz) definiert. Der Ausschluss dieser Teilsysteme darf das Ergebnis nur marginal beeinflussen.

Aktivitätsdaten

Aktivitätsdaten bezeichnen alle Material-, Energie- und Transportmengen, die als Input und Output im Produktlebenszyklus relevant sind [22].

Allokation

Zuordnung der über den Lebensweg auftretenden Umweltbelastungen auf mehrere in einem Produktionsprozess entstehende Produkte gemäß einem physikalischen oder ökonomischen Zusammenhang [22].

Allokationsfaktor

Größe für die Zuordnung der Umweltlasten (→ Allokation) über einen physikalischen oder ökonomischen Zusammenhang auf mehrere Produkte.

Arbeitszeitbedarf

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

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 (H_s)

Wärmemenge, die bei vollständiger Oxidation eines Brennstoffes, inklusive der Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wasserdampfs, nutzbar gemacht wird.

Charakterisierungsfaktor

Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses (z. B. N_2O -Emission) in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators (z. B. CO_2) angewendet wird (DIN EN ISO 14040, 2006, S. 12) [30]. Ein Beispiel für einen Charakterisierungsfaktor in Ökobilanzen ist das → „Global Warming Potential“.

Direkte Landnutzungsänderungen (direct Land Use Change, dLUC)

Direkte Landnutzungsänderungen beschreiben die Umwandlung von Land einer der vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) definierten Kategorien (Wald, Ackerland, Grasland, Siedlungen, Feuchtgebiete, Sonstiges) in eine andere. Die Renewable Energy Directive (Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42]) unterscheidet eine weitere Kategorie, nämlich sog. Dauerkulturen. Landnutzungsänderungen sind mit einer Änderung von Umweltwirkungen verbunden.

Emissionsfaktor

Im Bereich von Product Carbon Footprints (PCFs) werden Emissionsfaktoren verwendet, die das Verhältnis von THG-Emissionen zur eingesetzten Menge eines Ausgangsstoffes (z. B. Benzin) darstellen, der in einem Prozess eingesetzt wird (z. B. THG-Emissionen von Heizöl bei der Wärmebereitstellung bzw. Heizung). Die Multiplikation eines Ausgangsstoffes mit einem spezifischen Emissionsfaktor ergibt die emittierte Menge eines Schadstoffes.

Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit beschreibt den Nutzen eines untersuchten Produktes und somit die Basis, auf die die Ergebnisse der Ökobilanz (oder des PCF) bezogen werden (z. B. die Bereitstellung von einem Liter Rapsölmethylester an einer Tankstelle). Die internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization, ISO) definiert die funktionelle Einheit als „quantifizierte[n] Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ (DIN EN ISO 14040, 2006, S. 10) [30].

Global Warming Potential (GWP)

Das Global Warming Potential (GWP) beschreibt den potenziellen Beitrag eines Stoffes zum Klimawandel, ausgedrückt in der Masse an Kohlendioxid-Äquivalenten (CO_2 -Äq.) GWPs werden vom IPCC [68] definiert und veröffentlicht. Die THG werden anhand des

THG-Potenzials in CO₂-Äq umgerechnet, um eine Vergleichbarkeit und Verrechnung verschiedener THG zu ermöglichen. Da die unterschiedlichen THG aufgrund ihrer Stabilität eine unterschiedliche troposphärische Lebensdauer aufweisen, wird bei der Modellberechnung ein Zeithorizont vorgegeben, für den die Rechnung gelten soll. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse führen dazu, dass sich diese Werte verändern können, weshalb immer mit den neuesten GWP gerechnet werden sollte. Als gängige Zeithorizonte werden 20, 100 und 500 Jahre verwendet. Standard ist üblicherweise das 100-Jahr GWP.

Heizwert (H_i)

Diejenige Wärmemenge, die bei vollständiger Oxidation eines Brennstoffes ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wasserdampfs freigesetzt wird.

Indirekte Landnutzungsänderung (indirect Land Use Change, iLUC)

Indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC) entstehen, wenn auf Flächen zum Biomasseanbau eine vorherige andere Nutzung (z. B. Nahrungs- oder Futtermittelanbau) verdrängt wird. Falls weiterhin der Bedarf an den vorher produzierten Nahrungs- oder Futtermitteln besteht, wird deren Produktion zumindest teilweise auf andere Flächen verlagert. Diese anderen Flächen können einen hohen Kohlenstoffvorrat aufweisen (z. B. Feuchtgebiete), der bei Umwandlung dieser Flächen für die Bereitstellung der „verdrängten“ Nahrungs- oder Futtermittel teilweise freigesetzt wird.

Koppelprodukt

Fällt ein Stoff oder Gegenstand bei einem Herstellungsverfahren an, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstandes gerichtet ist, ist er als Koppelprodukt bzw. → Nebenprodukt und nicht als Abfall anzusehen, wenn

1. sichergestellt ist, dass der Stoff oder Gegenstand weiterverwendet 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.

Lebensweg

Der Lebensweg eines Produktes ist definiert als „aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen eines Produktsystems von der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung“ (DIN EN ISO 14040, 2006, S. 7 [30]).

In dieser Studie wird der „physikalische“ Lebensweg eines Produktes (von der Wiege bis zur Bahre, engl. „cradle to grave“) untersucht und nicht der betriebswirtschaftliche „Lebenszyklus“, welcher üblicherweise dann endet, wenn ein Produkt vom Markt genommen wird.

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.

Nebenprodukt

→ Koppelprodukt

Nutzungspotenzial, technisches

Anzahl der Nutzungseinheiten, nach deren Ablauf/Ausstoß die Maschine durch Nutzung verschlissen ist, gemessen in maschinenspezifischen Nutzungseinheiten (h, ha, t, m³ ...) [81].

Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA)

Eine Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) ist eine international genormte Methode (DIN EN ISO 14040/44 [30][32]) zur ökologischen Produktanalyse. Sie erfasst und analysiert die Umweltaspekte und potenziellen ökologischen Auswirkungen von Produktsystemen systematisch über den gesamten Lebensweg („von der Wiege bis zur Bahre“). Dazu zählen die Umweltwirkungen (z. B. umweltrelevante Entnahmen aus der Umwelt sowie Emissionen in die Umwelt) während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung des Produktes sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z. B. Herstellung der Rohstoffe).

Primärdaten

Unter Primärdaten versteht man bei Ökobilanzen und PCF jene Daten, die direkt und spezifisch bei einem Unternehmen oder Prozess erhoben bzw. gemessen werden. Sowohl Aktivitätsdaten als auch Emissionsfaktoren können aus primären oder sekundären Datenquellen stammen.

Product Carbon Footprint (PCF)

Der Product Carbon Footprint („CO₂-Fußabdruck“) bezeichnet die Bilanz der THG-Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes in einer definierten Anwendung und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit [11]. Der PCF stellt ein Instru-

ment dar, um Möglichkeiten der Reduzierung von THG-Emissionen von Produkten entlang des gesamten Produktlebensweges zu ermitteln.

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.

Prozess

Definierte Vorgänge innerhalb der Lebenszyklusabschnitte eines Produktsystems z. B. nach Systemdarstellung.

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.

Sachbilanz

Unter dem Begriff Sachbilanz versteht man einen „Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“ (DIN EN ISO 14040, 2006, S. 7 [30]). Das Ergebnis einer Sachbilanz ist demnach eine deskriptive Auflistung aller Inputs und Outputs, die über die Systemgrenze hinweg mit der Systemumgebung ausgetauscht werden. Dies stellt den Ausgangspunkt für die spätere → Wirkungsabschätzung dar.

Sekundärdaten

Aus Primärdaten abgeleitete und zusammengefasste Daten bezeichnet man als Sekundärdaten (z. B. durchschnittliche Emissionen bei der Herstellung von Strom in Deutschland). Sie sind weniger spezifisch, sondern stellen meist einen Durchschnitt oder eine generelle Größe zu vergleichbaren Prozessen dar.

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 z. B. die Produktivität von Maschinen bzw. von Prozessen, der Kraftstoffverbrauch, die Kraftstoffart oder die Nutzungspotenziale von Maschinen und Aggregaten.

Substitutionsfaktor

Der Substitutionsfaktor gibt an, in welchem Umfang ein Koppelprodukt (bezogen auf die Bezugsgröße/funktionelle Einheit) 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 Substitutionspotenzial und Gutschriften.

Systemraumerweiterung

Unter dem Begriff Systemraumerweiterung versteht man im Kontext von Ökobilanzen eine Ausweitung des betrachteten Systems, beispielsweise um Koppelprodukte. Dabei muss die → funktionelle Einheit (z. B. Bereitstellung von einem Liter Rapsöl) ebenso um das betreffende Koppelprodukt erweitert werden (z. B. Bereitstellung von einem Liter Rapsöl und 3 kg Presskuchen). Hierdurch kann eine Allokation vermieden werden, da das gesamte Koppelprodukt im System verbleibt und mitbilanziert wird. Die Systemerweiterung wird in der DIN EN ISO 14040 und 14044 [30][32] gegenüber der Allokation empfohlen, hat jedoch den Nachteil, dass sie zwangsläufig zu komplexeren Systemen und größerem Datenbedarf führt.

Systemgrenze

Die Systemgrenze ist ein Satz von Kriterien, welcher definiert, was Teil des betrachteten Systems ist und was nicht. Systemgrenzen können auf räumlicher, zeitlicher und technischer (z. B. Umgang mit Allokation, Abschneidekriterien etc.) Ebene bestehen.

Szenarien

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

Treibhauseffekt

Unter Treibhauseffekt wird die Erwärmung der Erde bzw. der Atmosphäre infolge sogenannter THG verstanden. In der Klimadiskussion (Wirkungskategorie Klimawandel) versteht man unter dem Begriff Treibhauseffekt den zusätzlichen, anthropogen verursachten Effekt infolge der Emission klimarelevanter Gase (→ Treibhausgasemissionen).

Treibhausgasemissionen

Der Ausstoß gasförmiger Stoffe in die Atmosphäre, die zum Treibhauseffekt beitragen, wird allgemein als Treibhausgas(THG)-Emission bezeichnet. Das bekannteste und wichtigste THG ist Kohlenstoffdioxid (CO₂). Beispiele für weitere THG sind Methan (CH₄) oder Lachgas (Distickstoffmonoxid, N₂O). THG-Emissionen entstehen bei einer Vielzahl von menschlichen Aktivitäten, etwa bei der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs (CO₂), infolge industrieller Prozesse (halogenierte Lösungsmittel, N₂O), bei der Deponierung von Abfall (CH₄, CO₂) sowie in der Landwirtschaft (CH₄, N₂O). Jene CO₂-Emissionen, die aus erneuerbaren Rohstoffen stammen und erst vor relativ kurzer Zeit durch Assimilation von atmosphärischem CO₂ gebildet wurden, werden in der Regel nicht als anthropogene THG-Emissionen betrachtet. Dies kann jedoch nur für CO₂ gelten, da z. B. in die Atmosphäre emittiertes Methan (CH₄) ein höheres THG-Potenzial (→ Global Warming Poten-

tial) aufweist und nicht direkt im Zuge der Primärproduktion in den Kohlenstoffkreislauf zurückgeführt werden kann. THG-Emissionen werden in der Einheit kg CO₂-Äq (Kohlenstoffdioxid-Äquivalente) angegeben.

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 Stoffes zu dessen Nassgewicht, also dem Gesamtgewicht des trockenen Stoffes sowie des Wassers.

Wirkungsabschätzung

Der Begriff Wirkungsabschätzung beschreibt den „Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient“ (DIN EN ISO 14040, 2006, S. 7 [30]). Es gibt unterschiedliche methodische Ansätze zur Wirkungsabschätzung, welche auch subjektive Einflüsse haben (z. B. über Auswahl der Indikatoren, optionale Normierung, Ordnung oder Gewichtung etc.).

Wirkungsindikator

Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie. Eigentlich Wirkungskategorie-Indikator. Die Kurzbezeichnung „Wirkungsindikator“ wird zur besseren Lesbarkeit auch gemäß der ISO-Normen 14040 und 14044 verwendet [30][32].

Wirkungskategorie

Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können [30][32].

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 Anbauszenarien
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	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenölsauglichen 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	ExpRessBio – Methoden Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern – Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt
47	Pflanzenölsaugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayrische Anbaubedingungen



ISSN 1614-1008