

**Deutsches
BiomasseForschungsZentrum**
gemeinnützige GmbH

German Biomass Research Centre



**Mögliche Ansätze zur Optimierung
der THG-Bilanz
von Biodiesel aus Raps**

Stefan Majer

Katja Oehmichen

Mai 2010



Auftraggeber: **UFOP Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.**

Herr Dieter Bockey

Haus der Land- und Ernährungswirtschaft

Claire-Waldoffstr. 7

10117 Berlin

Ansprechpartner: **Deutsches BiomasseForschungsZentrum
gemeinnützige GmbH**

Torgauer Straße 116

04347 Leipzig

Tel.: +49-341-2434-112

Fax: +49-341-2434-133

E-Mail: info@dbfz.de

Internet: www.dbfz.de

Dipl.-Ing. Stefan Majer

Tel.: +49-341-2434-411

Fax: +49-341-2434-133

E-Mail: Stefan.Majer@dbfz.de

Dipl.-Ing. Katja Oehmichen

Tel.: +49-341-2434-717

Fax: +49-341-2434-133

E-Mail: Katja.Oehmichen@dbfz.de

Erstelldatum: 19.05.2010

Projektnummer DBFZ: 3510005

Alleingesellschafterin des DBFZ Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH ist die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).
Vertreter der Alleingesellschafterin: Staatssekretär Gert Lindemann

Aufsichtsrat:
Dr. Rainer Gießübel, BMELV, Vorsitzender
Reinhard Kaiser, BMU, stellvertr. Vorsitzender
Anita Domschke, SMUL
Dr. Bernd Rittmeier, BMVBS
Karl Wollin, BMBF

Geschäftsführung:
Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt (wiss.)
Daniel Mayer (admin).

Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 23991
Sitz und Gerichtsstand Leipzig
Steuernummer: 232/124/01072
Ust.-IdNr. DE 259357620
Deutsche Kreditbank AG
Konto-Nr.: 1001210689
BLZ 120 300 00

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	<i>Hintergrund und Zielstellung</i>	1
1.2	<i>Vorgehen zum Erreichen des Studienziels</i>	2
2	Prozesskettendefinition	2
3	Berechnung der THG-Minderung für die ausgewählte Prozesskette nach der Methodik der EU RED	7
3.1	<i>Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Rapsproduktion</i>	7
3.1.1	<i>Ansätze zur Verringerung von THG-Emissionen bei der Rapsproduktion</i>	9
3.2	<i>Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Rapsölproduktion</i>	10
3.2.1	<i>Ansätze zur Verringerung von THG-Emissionen bei der Rapsölproduktion</i>	12
3.3	<i>Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Biodieselproduktion</i>	14
3.3.1	<i>Ansätze zur Verringerung von THG-Emissionen bei der Biodieselproduktion</i>	16
3.4	<i>Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Transportprozesse</i>	18
3.5	<i>Zusammenführung der Berechnungsergebnisse</i>	19
4	Zusammenfassung und Ableitung von Handlungsempfehlungen	21

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
Abb.	Abbildung
Äq.	Äquivalente
BHKW	Blockheizkraftwerk
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
CaO	Calciumoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DBFZ	Deutsches BiomasseForschungsZentrum
dt	deutsch
EC	European Community
EU	Europäische Union
GJ	Gigajoule
g	Gramm
ha	Hektar
HCl	Salzsäure
H ₃ PO ₄	Phosphorsäure
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
JRC	Joint Research Centre
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
KST	Kraftstoff
K ₂ O	Kaliumoxid
MJ	Megajoule
N	Stickstoff
NaOH	Natriumhydroxid
PSM	Pflanzenschutzmittel
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
RED	Renewable Energy Directive
RES	Renewable Energy Sources
RME	Rapsmethylester
t	Tonne
Tab	Tabelle
THG	Treibhausgas
UFOP	Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V.

KURZZUSAMMENFASSUNG

Mit der Verabschiedung der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und ihrer Umsetzung in nationales Recht im Rahmen der BioKraftNachV wurden neben verschiedenen anderen, so genannten Nachhaltigkeitskriterien, auch verbindliche Vorgaben bezüglich der Treibhausgasminderung durch Biokraftstoffe eingeführt. Die Einhaltung dieser Minderungsvorgaben ist zukünftig verbindlich für die Inanspruchnahme von Steuerbegünstigungen (z.B. B 100) und die Möglichkeit zur Anrechnung eines Kraftstoffes auf die nationale Biokraftstoffquote. Nach den Vorgaben der EU Richtlinie müssen Biokraftstoffe, nach Umsetzung der Verordnung zunächst eine THG-Einsparung von mindestens 35% gegenüber dem fossilen Kraftstoff vorweisen. Diese Mindestvorgabe wird im nächsten Schritt auf 50% (im Jahr 2017) bzw. 60% (im Jahr 2018 für Neuinstallation ab 2017) angehoben. /1/, /2/

Der Nachweis der Treibhausgasminderung eines Biokraftstoffes kann nach den Vorgaben der Richtlinie durch eigene Berechnungen, die Verwendung von so genannten Standardwerten bzw. durch eine Kombination eigener Berechnungen mit den Standardwerten erfolgen. Betrachtet man die im Anhang V der Richtlinie enthaltenen Standardwerte so wird deutlich, dass die alleinige Verwendung der Standardwerte zum Nachweis der THG-Minderungsvorgabe von 50% bzw. 60% nicht ausreichend ist. (vgl. Abb. 1)

Die Standardwerte sollen einen konservativen Durchschnitt der im Anhang V der Richtlinie abgebildeten Biokraftstoffoptionen repräsentieren. Es stellt sich jedoch die Frage, auf welcher Datenbasis die Standardwerte bestimmt wurden und welche THG-Minderungsmenge mit einer, hinsichtlich der THG-Bilanz optimierten Prozesskette theoretisch zu erreichen wäre. Im Rahmen dieser Studie wurde diese Fragestellung am Beispiel der Prozesskette von Biodiesel aus Raps untersucht. Zu diesem Zweck wurden zunächst die Hintergrunddaten zur Berechnung des Standardwertes für Biodiesel aus Raps dargestellt sowie das grundsätzliche Berechnungsverfahren zur Bestimmung der THG-Emissionen eines Biokraftstoffes im Rahmen der EU Richtlinie dargestellt. Im nächsten Schritt wurden die Parameter mit dem größten Ergebnisbeitrag der einzelnen Stufen der Prozesskette identifiziert. Diese Parameter wurden wenn möglich substituiert, um im Rahmen einer Sensitivitätsrechnung das mögliche Optimierungspotential auf der jeweiligen Prozessstufe abzuschätzen. Im letzten Schritt der Berechnungen wurden die Ergebnisse der einzelnen Prozessstufen sowie die durchgeführten Sensitivitätsrechnungen zusammengeführt und das resultierende THG-Einsparpotential der Beispielrechnung bestimmt.

Als Haupteinflussparameter für das Gesamtergebnis zeigten sich auf der Stufe der Rapsproduktion die Produktion und Nutzung von industriellem N-Düngemittel sowie auf den Stufen der Biomassekonversion (Rapsölproduktion und Biodieselproduktion) der Einsatz von Wärme, Strom und Methanol.

Durch eine Variation des eingesetzten industriellen Stickstoffdüngemittels und des verwendeten Kraftstoffs für die landwirtschaftlichen Produktionsprozesse (von Diesel zu Biodiesel) konnten die ursprünglich bilanzierten THG-Emissionen (diese repräsentieren den Standardwert für den Anbau) von 29 auf ca. 21 kg CO₂-Äq./GJ Biodiesel verringert werden. Die durchgeführten Beispielrechnungen zeigten weiter, dass die THG-Emissionen auf den beiden Konversionsstufen stark von den Aufwendungen zur Bereitstellung des benötigten Wärmebedarfs dominiert werden. Im Rahmen einer Sensitivitätsrechnung wurde der Energieträger zur Prozesswärmeversorgung variiert, um eine mögliche Verbesserung des Ergebnisses durch den Einsatz eines alternativen, biogenen Energieträgers zu untersuchen. Im Ergebnis konnten die Emissionen aus dem Prozess der Rapsölproduktion von ca. 3 auf ca. 1,5 kg CO₂-Äq./GJ Biodiesel und aus dem Prozess der Biodieselproduktion (Raffination + Umesterung) von ca. 11 auf ca. 6,4 kg CO₂-Äq./GJ RME reduziert werden. Bei den Berechnungen für den Prozess der Umesterung wurde zusätzlich das mögliche THG-Einsparpotential durch den Einsatz von Biomethanol als Additiv betrachtet. Dieser Ansatz zeigte allerdings nur eine eher moderate Emissionsverringernung.

Neben den Hilfs- und Betriebsstoffen sowie den Energieträgern für die Prozessenergieversorgung wurden auf den Stufen der Rapsölproduktion und der Biodieselproduktion auch die Prozessinputdaten variiert. Zu diesem Zweck wurden die entsprechenden Verbrauchsdaten auf beiden Prozessstufen auf das Niveau durchschnittlicher Anlagen nach dem Stand der Technik angepasst.

Das für die beispielhaft betrachtete Prozesskette zur Produktion von Biodiesel aus Raps berechnete maximale theoretische Optimierungspotential, liegt mit einem THG-Emissionswert von ca. 28 kg CO₂-Äq./GJ RME bei einer Verbesserung von ca. 46 % gegenüber dem Default-Wert für RME und bei ca. 67 % gegenüber dem in der EU RED definierten fossilem Referenzwert von 83,8 kg CO₂-Äq./GJ. Dabei ist zu bemerken, dass sich die in dieser Studie untersuchten Optimierungsansätze vollständig auf eine mögliche Verbesserung der THG-Bilanz konzentrieren. Eine Kombination dieser Berechnungsansätze mit einer ökonomischen Betrachtung war nicht Gegenstand der Studie.

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund und Zielstellung

Die Realisierung der politisch definierten, anspruchsvollen Klimaschutzziele setzt neben der allgemeinen Steigerung der Energieeffizienz auch die intensive und nachhaltige Nutzung der verfügbaren Potentiale im Bereich der erneuerbaren Energien voraus. Der vielfach geäußerte politische Wunsch eines stärkeren Einsatzes dieser Energieträger findet sich in verschiedenen Zielvorgaben auf nationaler und europäischer Ebene wieder (zum Beispiel in der Renewable Energy Directive 2009/28/EC) /1/. Einer der vielversprechenden Energieträger ist dabei die Bioenergie. Allerdings befinden sich Bioenergiesysteme und insbesondere Kraftstoffe aus Biomasse derzeit im Fokus einer äußerst kontrovers geführten politischen und gesellschaftlichen Debatte, vor deren Hintergrund auch die ökologische Beurteilung dieser Kraftstoffe im Kontext der Nachhaltigkeitsanforderungen zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Im Zusammenhang mit der Umsetzung der Dekarbonisierungsstrategie auf europäischer Ebene ist zu erwarten, dass zunächst Biokraftstoffe, später aber auch andere Bioenergieträger bzw. Biomasseprodukte, mit einem vergleichsweise hohen Treibhausgasemissionen-Einsparpotenzial (im Vergleich zu ihrer fossilen Referenz) gegenüber anderen Biokraftstoff- und Bioenergieoptionen begünstigt werden.

Daher ist es für Biokraftstoffproduzenten zukünftig ein entscheidender Faktor die wesentlichen Einflussparameter in der THG-Bilanzierung ihres Biokraftstoffpfades zu kennen, um mögliche ökologische Optimierungspotentiale zu identifizieren und nutzen zu können. Auf diese Weise kann die Wettbewerbsfähigkeit der Produzenten erhöht und ein zusätzlicher Beitrag zum Erreichen nationaler und europäischer Kraftstoffquoten- und Klimaschutzziele erreicht werden.

Aufbauend auf einer repräsentativen Prozesskette für die Produktion von Biodiesel soll beispielhaft und schrittweise die Bilanzierung des THG-Einsparpotentials nach der in der EU Renewable Directive (im Folgenden RED, 2009/28/EC) festgeschriebenen Methodik dargestellt werden. Auf der Grundlage dieses Bilanzierungsergebnisses werden für die jeweiligen Hauptabschnitte der Prozesskette (d. h. Biomasseproduktion, Biomassetransport, Biomassekonversion, Biodieseldistribution) die wesentlichen Einflussfaktoren identifiziert und zusammenfassend dargestellt. /1/

Im letzten Schritt sollen mögliche Optimierungspotentiale zur Verbesserung der THG-Bilanz aufgezeigt werden. Dies geschieht in Form von Sensitivitätsanalysen, in denen die identifizierten Haupteinflussparameter auf Basis der Eingangsgrößen des Ergebnisses näher untersucht und ggf. durch Alternativen mit einer besseren THG-Bilanz substituiert werden. Für Hilfsstoffe, deren Substitution nicht ohne Weiteres möglich ist, soll zusätzlich abgeschätzt werden, wieweit sich deren THG-Bilanz durch verschiedene Optimierungsmaßnahmen verbessern lässt. Als Resultat dieser Sensitivitätsrechnungen soll das Ergebnis für eine vollständig (hinsichtlich der THG-Bilanz) optimierte Prozesskette zur Biodieselproduktion aus heimischem Raps abgeschätzt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeitsstufen werden aufbereitet und in einer, für die Öffentlichkeitsarbeit der UFOP geeigneten, nachvollziehbaren und anschaulichen Form bereitgestellt.

1.2 Vorgehen zum Erreichen des Studienziels

Aufbauend auf der dargestellten Zielstellung gliedern sich die Arbeiten zu dieser Studie in folgende Teilabschnitte:

- Definition einer „repräsentativen“ Prozesskette zur Produktion von Biodiesel aus Raps/ transparente Darstellung des Default-Wertes für Biodiesel aus Raps der EU RED (2009/28/EC)
- Berechnung des resultierenden THG-Einsparpotentials der definierten Biodieselbereitstellungskette gemäß dem, durch die EU RED (2009/28/EC), vorgegebenen Berechnungsverfahren;
- Durchführung von Sensitivitätsrechnungen, Identifizierung und Variation der Haupteinflussparameter; Abschätzung des vorhandenen Optimierungspotentials.

Diese drei Teilschritte werden im Folgenden in einzelnen Kapiteln der Studie beschrieben.

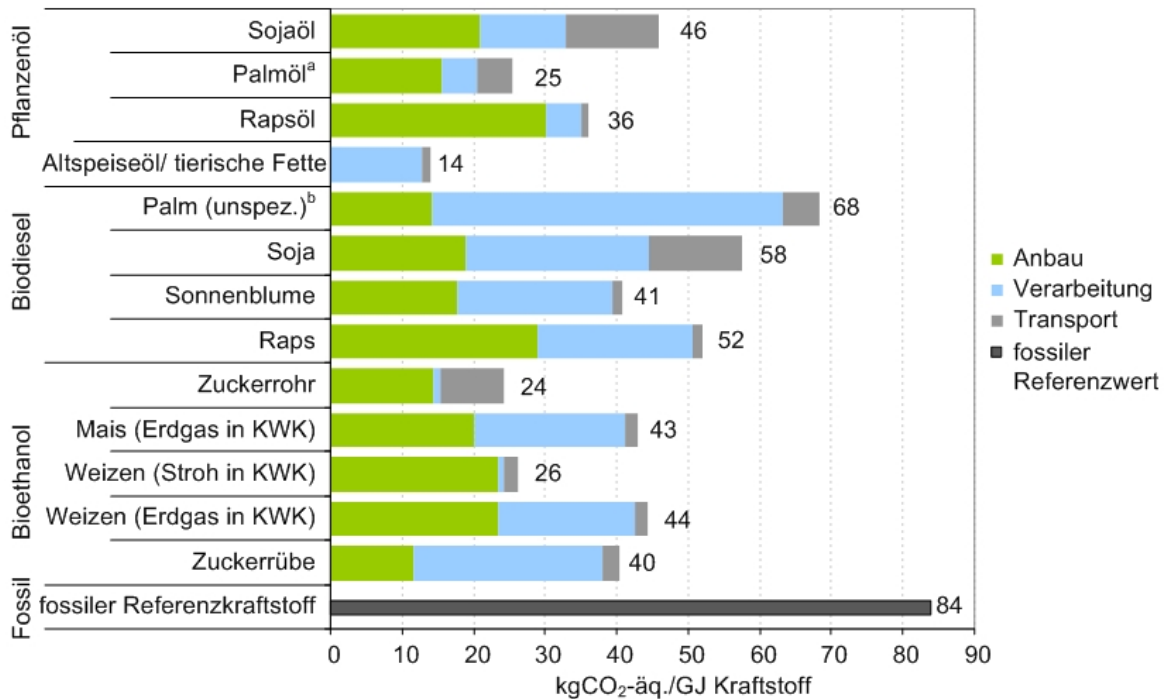
2 PROZESSKETTENDEFINITION

Grundlage und Motivation der Arbeiten zu dieser Studie bilden die aktuellen politischen Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe und die mit diesen Rahmenbedingungen verbundenen verbindlichen Vorgaben zur Minderung von THG-Emissionen durch den Biokraftstoffeinsatz. So schreiben die wesentlichen gesetzlichen Regelwerke, in Deutschland sind dies die EU Richtlinie 2009/28/EC und die entsprechende Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung, neben verschiedenen anderen Nachhaltigkeitsanforderungen verbindliche THG-Einsparziele für Biokraftstoffe gegenüber der fossilen Referenz vor. So müssen Biokraftstoffe nach Umsetzung der Verordnung zunächst eine THG-Einsparung von mindestens 35% vorweisen. Dieses Einsparziel wird im nächsten Schritt auf 50% (im Jahr 2017) bzw. 60% (im Jahr 2018 für Neuinstallation ab 2017) angehoben. Das Erreichen dieses vorgegebenen THG-Einsparziels ist dabei für individuelle Biokraftstoffpfade nachzuweisen und stellt die Voraussetzung für deren Anrechnung auf die nationale Biokraftstoffquote dar. Die EU Richtlinie und die Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (BioKraftNachV) enthalten konkrete Vorgaben zur Berechnung dieses THG-Einsparwertes /1/, /2/. Zusätzlich zur Berechnungsmethodik enthalten beide Regelwerke eine Reihe von aggregierten bzw. disaggregierten „Default-Werten“ für verschiedene Biokraftstoffoptionen. Diese „Default-Werte“ können von Biokraftstoffproduzenten zur Bestimmung des THG-Einsparpotentials herangezogen werden, wenn diese keine eigene Berechnung erstellen wollen oder können. Für die Bestimmung des THG-Einsparpotentials eines Biokraftstoffes sind nach den Vorgaben der Richtlinie bzw. der BioKraftNachV folgende drei Möglichkeiten zulässig:

1. Berechnung des THG-Einsparpotentials gemäß der definierten Berechnungsmethodik,
2. Verwendung des aggregierten Default-Wertes für den betrachteten Biokraftstoffpfad,
3. Kombination eigener Berechnungen für einzelne Elemente der Prozesskette (z.B. Biomasseproduktion) mit den disaggregierten Default-Werten für den Rest der Prozesskette.

Aufgrund dieser Regelung stellt die Verwendung des Default-Wertes immer den „schlechtmöglichsten“ THG-Minderungswert eines Biokraftstoffes dar, da Biokraftstoffproduzenten sich, im Kontext der gesetzlichen Vorgaben, immer auf diesen Wert „zurückziehen“ können.

Ausgehend von dieser Betrachtung ist die Zielstellung des ersten Arbeitspaketes dieser Studie die Hintergrundprozesskette des Default-Wertes für Biodiesel aus Raps zu identifizieren und die mit dieser Prozesskette verbundenen Stoff- und Energieflüsse detailliert darzustellen. Die folgende Abb. 1 stellt die in der EU RED 2009/28/EC enthaltenen Default-Werte auszugswise dar.



^a Palmölproduktion mit Methanabscheidung an der Mühle
^b Palmölproduktion ohne Methanabscheidung an der Mühle

Abb. 2 Ausgewählte Default-Werte der EU Richtlinie 2009/28/EC /1/

Der entsprechende Default-Wert für Biodiesel aus Raps entspricht mit 52 kg CO₂-Äq./GJ Biokraftstoffe einem THG-Einsparpotential von ca. 38% gegenüber dem ebenfalls in der Richtlinie enthaltenen fossilen Referenzwert von ca. 84 kg CO₂-Äq. Der Default-Wert ist dabei in drei Teilwerte für (Biomasse-) Anbau (ca. 29 kg CO₂-Äq./GJ Kraftstoff), (Biomasse-) Verarbeitung (ca. 22 kg CO₂-Äq./GJ Kraftstoff) und Transportprozesse (ca. 1 kg CO₂-Äq./GJ Kraftstoff) untersetzt.

Die grundsätzlichen Systemgrenzen der Bilanzierung orientieren sich an den Vorgaben der EU Richtlinie („Well-to-Wheel“) und sind in der Abbildung 2 dargestellt.

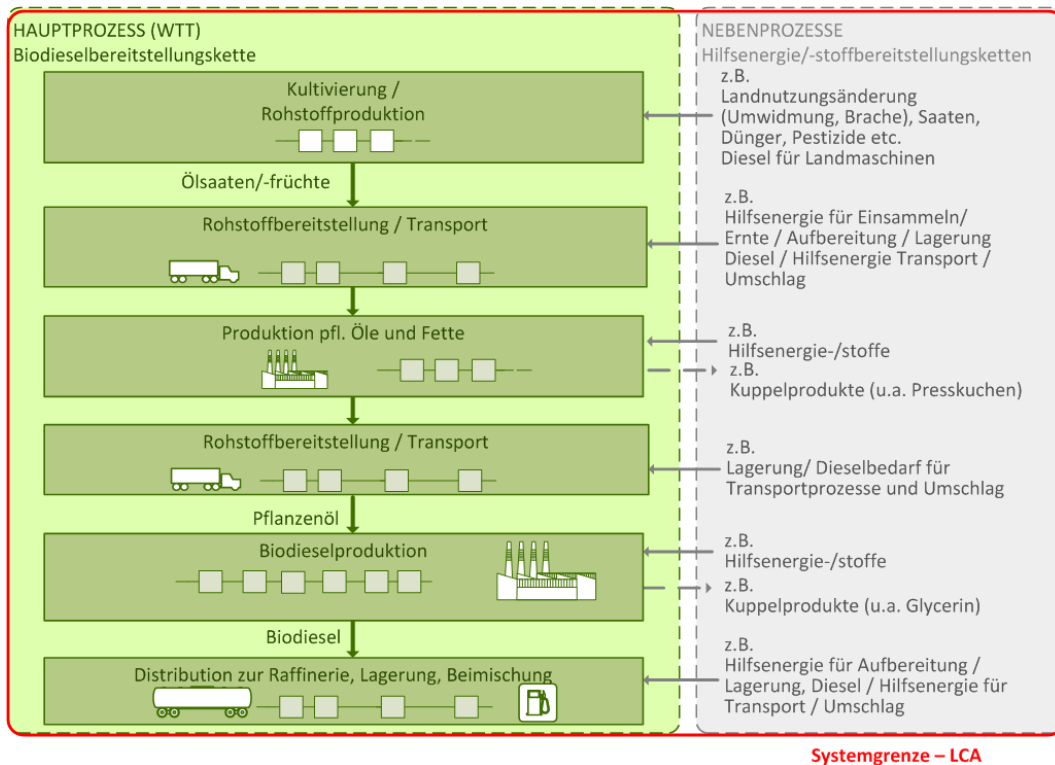
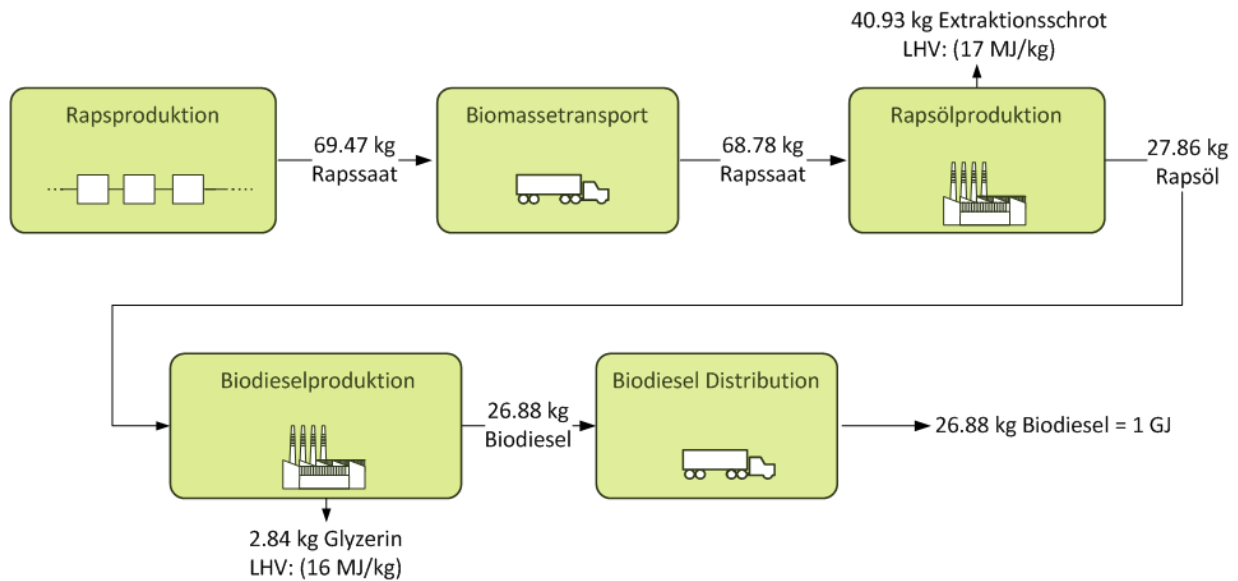


Abb. 3 Systemgrenzen der THG-Bilanzierung nach EU Richtlinie 2009/28/EC

Um zum Einen die grundlegende Berechnungsmethodik der THG-Bilanzierung darzustellen und zum Anderen eine Datenbasis für die weiteren Arbeiten, d.h. das Identifizieren möglicher Optimierungspotentiale in der Bilanz, zu schaffen, wird im folgenden das Hintergrundsystem und die Berechnung des Default-Wertes für Biodiesel aus Raps erläutert. Dabei wurde im Wesentlichen auf die Dokumente JRC 1 (/3/) bzw. JRC 2 (/4/) zurückgegriffen.

Auf der Basis dieser Dokumente ist es möglich, zunächst den Massenstrom der Prozesskette für die Biodieselproduktion aus Raps zu bestimmen auf deren Grundlage der entsprechende Default-Wert berechnet wurde. Dieser Massenstrom und die in der Bilanz zu berücksichtigenden Nebenprodukte sind in der Abbildung 3 dargestellt. Die dargestellten Massenströme sowie die Nebenprodukte beziehen sich auf einen GJ produzierten Biodiesel. Laut JRC 1 wurde dabei für den Biodiesel ein Heizwert von 37,2 MJ/kg angenommen.



© DBFZ 2009 basierend auf JRC und EU Default-Werten

Abb. 4 Massenbilanz des Materialstroms zur Produktion von 1 GJ Rapsmethylester (RME) nach /3/ und /4/

Auf der Basis dieses identifizierten Massenstromes sowie der herausgearbeiteten Informationen (Masse und Heizwert) zu den produzierten Nebenprodukten (Rapsextraktionsschrot und Glycerin) ist es möglich, die bereits allozierten Default-Werte rückzurechnen und Default-Werte ohne Allokation für jedes Prozesskettenelement zu bestimmen. Allozierte Default-Werte bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die auf den einzelnen Stufen der Prozesskette produzierten Nebenprodukte bereits in der Bilanz verrechnet wurden. D. h. auf der Stufe der Rapsölproduktion bspw., dass die bis zu diesem Prozess aufgetretenen und aus diesem Prozess resultierenden Emissionen (in diesem Bsp. sind das die Emissionen aus der Rapsproduktion, dem Biomassetransport und der Rapsölproduktion) zwischen den beiden Produkten des Ölproduktionsprozesses (Rapsöl und Extraktionsschrot) aufgeteilt werden. Nach den Vorgaben der EU Richtlinie 2009/28/EC erfolgt diese Zuweisung (Allokation) auf der Basis der unteren Heizwerte dieser Produkte.

Um diese Allokationsrechnung zurückzurechnen, ist es zunächst notwendig zu verstehen, dass die in der Abbildung 1 dargestellten Default- bzw. Standardwerte auf der Basis von so genannten typischen Werten abgeleitet wurden. Diese typischen Werte finden sich ebenfalls im Anhang V der EU Richtlinie 2009/28/EC. Die typischen Werte und die so genannten Standard- bzw. Default-Werte unterscheiden sich dabei nur auf der Stufe der Verarbeitung (Biomassekonversion), wobei der Unterschied einem ca. 40 prozentigen Aufschlag auf den typischen Wert entspricht.

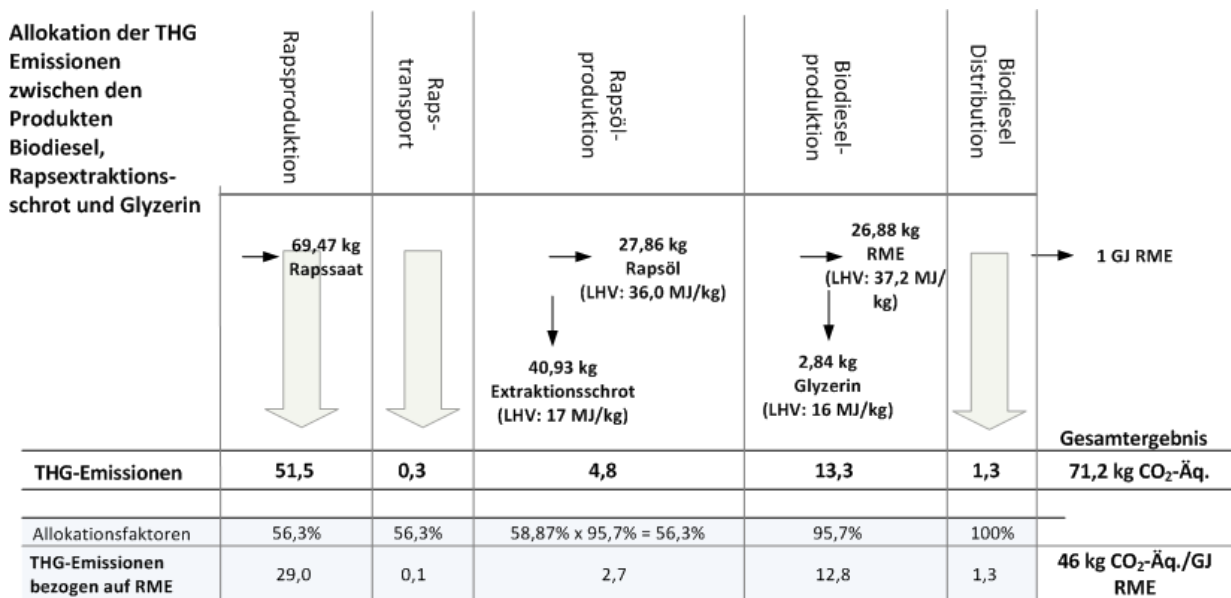
Die Zahlenwerte des disaggregierten typischen Emissionswertes und des Standardwertes für Biodiesel aus Raps zeigt Tabelle 1.

Tab. 1 Disaggregierte Default-Werte für RME nach /1/

	Typische Treibhausgasemissionen (gCO ₂ -Äq./MJ)	Standard Treibhausgasemissionen (gCO ₂ -Äq./MJ)
Anbau	29	29
Verarbeitung	16	22
Transport	1	1

Die Rückrechnung der Allokation, d. h. die Bildung nicht allozierter disaggregierter typischer Emissionswerte erfolgt nun auf der Grundlage der verfügbaren Informationen zur Prozesskette (siehe Abbildung 2 und JRC 1) und den Ergebnissen der Allokation (d. h. den typischen Werten aus dem Anhang V der Richtlinie 2009/28/EC und JRC 1). In JRC 1 sind darüber hinaus Informationen enthalten, die es erlauben die disaggregierten typischen Werte noch weiter, in kleinere Prozesskettenelemente aufzulösen. So sind hier bspw. typische Werte für den Biomassetransport und die beiden Konversionsschritte enthalten.

Die Rückrechnung der Allokation und die Berechnung von nicht-allozierten typischen Emissionswerten für die einzelnen Elemente der Prozesskette zur Biodieselpromotion aus Raps sind in der Abbildung 4 dargestellt. Dabei zeigt die untere Zeile die aus der EU Richtlinie 2009/28/EC bzw. aus JRC 1 entnommenen typischen Emissionswerte für Biodiesel aus Raps.



© DBFZ 2009 basierend auf JRC concawe und EU comission values

Abb. 5 Allokationsrechnung für den „typischen THG-Emissionswert“ für RME (DBFZ; basierend auf /3/ und /4/)

Die mit „Allokationsfaktoren“ bezeichnete Zeile gibt an, mit welchem Allokationsfaktor die in dem jeweiligen Prozess auftretenden Emissionen (angegeben in der Zeile THG-Emissionen) dem Produkt Biodiesel zugerechnet werden. Der Allokationsfaktor bestimmt sich dabei, auf Basis der unteren Heizwerte, zwischen den Produkten Rapsöl und Rapspresskuchen sowie RME und Glycerin.

Mit Hilfe der Informationen aus den beiden unteren Zeilen ist es möglich die Emissionen in der obersten Zeile (THG-Emissionen) zurückzurechnen und für die einzelnen Prozesskettenelemente jeweils einen Emissionswert ohne Allokation zu erhalten. Mithilfe dieses Wertes sowie der in JRC 1 enthaltenen Annahmen und Eingangsparameter für die einzelnen Prozesskettenelemente können nun im nächsten Schritt die Berechnungen der Teilergebnisse für die Prozesse Biomasseanbau, Rapsölproduktion, Biodieselproduktion, Transport nachvollzogen werden.

3 BERECHNUNG DER THG-MINDERUNG FÜR DIE AUSGEWÄHLTE PROZESSKETTE NACH DER METHODIK DER EU RED

Im Folgenden wird zunächst die Prozesskette für die Biodieselproduktion aus Raps, welche die Grundlage der Berechnung des Default-Wertes bildet, detailliert dargestellt. Dabei werden für die einzelnen Prozesskettenelemente die jeweiligen Eingangsparameter und Annahmen erläutert und darauf aufbauend der THG-Emissionswert für die jeweilige Stufe berechnet. Im Anschluss werden auf jeder Prozessstufe mögliche Optimierungsansätze diskutiert und hinsichtlich Ihres möglichen Einflusses auf das Ergebnis ausgewertet.

3.1 Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Rapsproduktion

Für die Bilanzierung des THG-Emissionswertes der Rapsproduktion lassen sich aus JRC 1 folgende Informationen zu Eingangsparametern und Annahmen herausarbeiten.

Tab. 2 *Hintergrunddaten der Kalkulation des disaggregierten Default-Wertes für den Rapsanbau /3/*

	Einheit	Menge
Ertrag	t pro ha*a	3,1
Dieserverbrauch	kg pro ha*a	69,2
N-Düngemittel	kg pro ha*a	137,4
CaO-Düngemittel	kg pro ha*a	19,0
K ₂ O-Düngemittel	kg pro ha*a	49,5
P ₂ O ₅ -Düngemittel	kg pro ha*a	33,7
Pflanzenschutzmittel	kg pro ha*a	1,2
Saatgut	kg pro ha*a	6
Strombedarf Trocknung	kWh pro t Rapssaat	22,6
Einsatz Diesel zur Trocknung	MJ pro t Rapssaat	4,8

Bei Betrachtung der verwendeten Eingangsparameter fallen zunächst der geringe Einsatz von N-Düngemitteln sowie der relativ geringe Ertrag auf. Literatur (bspw. KTBL 2008 /8/, IFEU 2007 /9/) und Erfahrungswerte lassen für die Rapsproduktion in Deutschland sowohl höhere Düngemittelgaben als auch höhere Erträge erwarten.

Aus den genannten Veröffentlichungen geht nicht hervor, mit Hilfe welcher Emissionsfaktoren die aus dem Einsatz der dargestellten Einsatzstoffe resultierenden Emissionen berechnet wurden. Demzufolge wurden für die Berechnung Emissionsfaktoren aus der Literatur bzw. aus der Datenbank des DBFZ und der Datenbank Ecoinvent 2.0 [5/] verwendet. Die verwendeten Emissionsfaktoren sind in der folgenden Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 3 Emissionsfaktoren zur Berechnung des disaggregierten Default-Wertes für den Rapsanbau[5/], [6/]

	Einheit	Emissionsfaktor	Quelle
Diesel	kg CO ₂ -Äq. pro kg	3,8	IFEU Institut
N-Düngemittel	kg CO ₂ -Äq. pro kg	7,0	DBFZ Datenbank
CaO-Düngemittel	kg CO ₂ -Äq. pro kg	0,3	DBFZ Datenbank
K ₂ O-Düngemittel	kg CO ₂ -Äq. pro kg	0,5	DBFZ Datenbank
P ₂ O ₅ -Düngemittel	kg CO ₂ -Äq. pro kg	1,3	IFEU Institut
Pflanzenschutzmittel	kg CO ₂ -Äq. pro kg	9,5	DBFZ Datenbank
Saatgut	kg CO ₂ -Äq. pro kg	1,9	Ecoinvent Datenbank
Strombedarf Trocknung	kg CO ₂ -Äq. pro kWh	0,46	Ecoinvent Datenbank
Einsatz Diesel zur Trocknung	kg CO ₂ -Äq. pro kg	3,8	IFEU Institut

Zur Berechnung der THG-Emissionen für den Prozess der Rapsproduktion werden zunächst die in Tabelle 2 dargestellten Eingangsparameter mit den entsprechenden Emissionsfaktoren aus Tabelle 3 verrechnet. Es ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten Emissionen für den Anbauprozess.

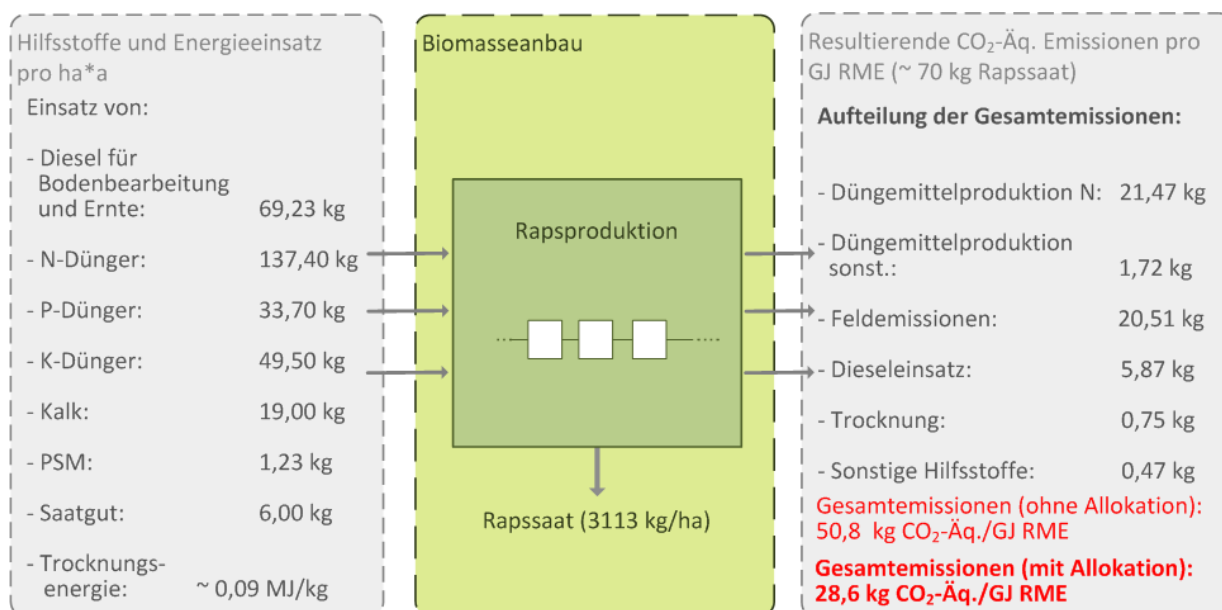


Abb. 6 Ergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Rapsproduktion

Die aus dem Einsatz der auf der linken Seite der Abbildung dargestellten Einsatzstoffe resultierenden Emissionen sind auf der rechten Abbildungsseite dargestellt.

Die Summe dieser einzelnen Emissionen ergibt eine Gesamtemission von 50,8 kg CO₂-Äq./GJ RME. Gemäß der in der Abbildung 4 dargestellten Methodik wird dieser Wert zwischen dem Hauptprodukt der Prozesskette (Biodiesel) und den Nebenprodukten dieser Kette (Extraktionsschrot, Glycerin) alloziert. Nach der Allokation ergibt sich für den Prozess des Rapsanbaus zur Biodieselproduktion ein Emissionswert von 28,6 kg CO₂-Äq./GJ RME.

Das dargestellte Ergebnis zeigt deutlich den großen Einfluss des Einsatzes von Stickstoffdüngern auf die Gesamtemissionen des Anbauprozesses. Emissionen entstehen hier zum Einen bei der Düngemittelproduktion und zum Anderen als Lachgasemissionen durch die Stickstoffnutzung. Die Höhe der Lachgasemissionen wurde nach dem Ansatz IPCC 2006 (/10/) berechnet. Demnach wurde 1% des Düngerstickstoffes in N₂O umgewandelt. Diese Emission wurde im Folgeschritt, zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit über den Konversionsfaktor 296 in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass zur Berechnung der, in der EU Richtlinie 2009/28/EC enthaltenen, Default-Werte je nach betrachteter Kultur, unterschiedlich hohe Umwandlungsraten von Stickstoff zu Lachgas angesetzt wurden. Die Bandbreite beträgt nach JRC 1 zwischen 1% für Körnermais über ca. 1,4% für Raps bis zu ca. 1,8% für Zuckerrübe /10/. Die Datengrundlage für diese kulturspezifische Unterscheidung bei der Lachgasbilanzierung ist in dem entsprechenden Dokument nicht näher erläutert.

3.1.1 Ansätze zur Verringerung von THG-Emissionen bei der Rapsproduktion

Für den Prozess der Rapsproduktion sollen im Rahmen dieser Studie nur „Optimierungsansätze“ auf der Basis der vorgegebenen Eingangsgrößen betrachtet werden. D.h. pflanzenbauliche Optimierungsansätze, Variationen der Düngemittelhöhe bzw. die Variation der Ertragshöhe werden nicht betrachtet. Stattdessen werden mögliche THG-Einsparungen durch folgende zwei Ansatzpunkte untersucht:

- Variation des eingesetzten Kraftstoffes in der landwirtschaftlichen Produktion
- Variation des eingesetzten industriellen (oder mineralischen) N-Düngers.

Das in Abbildung 5 dargestellte Ergebnis zeigt, dass der Einsatz von fossilem Diesel in der landwirtschaftlichen Produktion für ca. 12% der Gesamtemissionen aus diesem Prozess verantwortlich ist. Unterstellt man statt der Nutzung von fossilem Kraftstoff den Einsatz von Biodiesel in der landwirtschaftlichen Produktion, lassen sich die Emissionen aus der Kraftstoffnutzung von ca. 5,87 kg CO₂-Äq./GJ RME auf ca. 3,44 kg CO₂-Äq./GJ RME reduzieren. Dabei wurde für die Berechnung der entsprechenden THG-Emissionen aus der Biodieselnutzung der Default-Wert für Biodiesel aus Raps als Emissionsfaktor verwendet (dieser entspricht 52 kg CO₂-Äq./GJ RME gegenüber dem Emissionsfaktor für fossilen Diesel von 88,79 kg CO₂-Äq./GJ Diesel).

Die Produktion der eingesetzten industriellen Stickstoffdüngemittelmenge ist mit ca. 42% der Gesamtemissionen aus der Rapsproduktion verbunden. Darüber hinaus sind die aus dem Einsatz dieser Stickstoffmenge resultierenden Lachgasemissionen für ca. 40% der Gesamtemissionen verantwortlich. Betrachtet man die auftretenden Emissionen aus der Produktion industrieller Stickstoffdüngemittel wird deutlich, dass sich die Höhe dieser Emissionen deutlich zwischen unterschiedlichen industriellen Stickstoffdüngemitteln unterscheidet.

So wurde in den durchgeführten Berechnungen zunächst ein Emissionsfaktor aus der DBFZ Datenbank von ca. 7 kg CO₂-Äq./kg N verwendet. In der Literatur findet sich allerdings eine Bandbreite von ca. 2,7 kg CO₂-

Äq./kg N (Wert für ein kg N aus Ammoniumsulfat, nach /5/) bis ca. 15,9 N kg CO₂-Äq./kg N (Wert für ein kg N aus Kaliumnitrat, nach /5/). Diese Bandbreite zeigt den deutlichen Einfluss der Düngemittelwahl auf das Ergebnis der THG-Bilanz der Rapsproduktion. Um die Größenordnung einer möglichen THG-Einsparung durch die Wahl eines alternativen Stickstoff-Düngemittels im Rapsanbauprozess einzuordnen, wurde alternativ zur durchgeführten Basisrechnung der Einsatz von Harnstoff als Düngemittel unterstellt. Durch diese Variation lassen sich die Emissionen aus der Stickstoffproduktion von ca. 21,47 kg CO₂-Äq./GJ RME auf ca. 10,17 kg CO₂-Äq./GJ RME reduzieren. Abbildung 6 stellt das Ergebnis der beiden diskutierten Ansätze sowie das Ergebnis ihrer Kombination noch einmal graphisch dar.

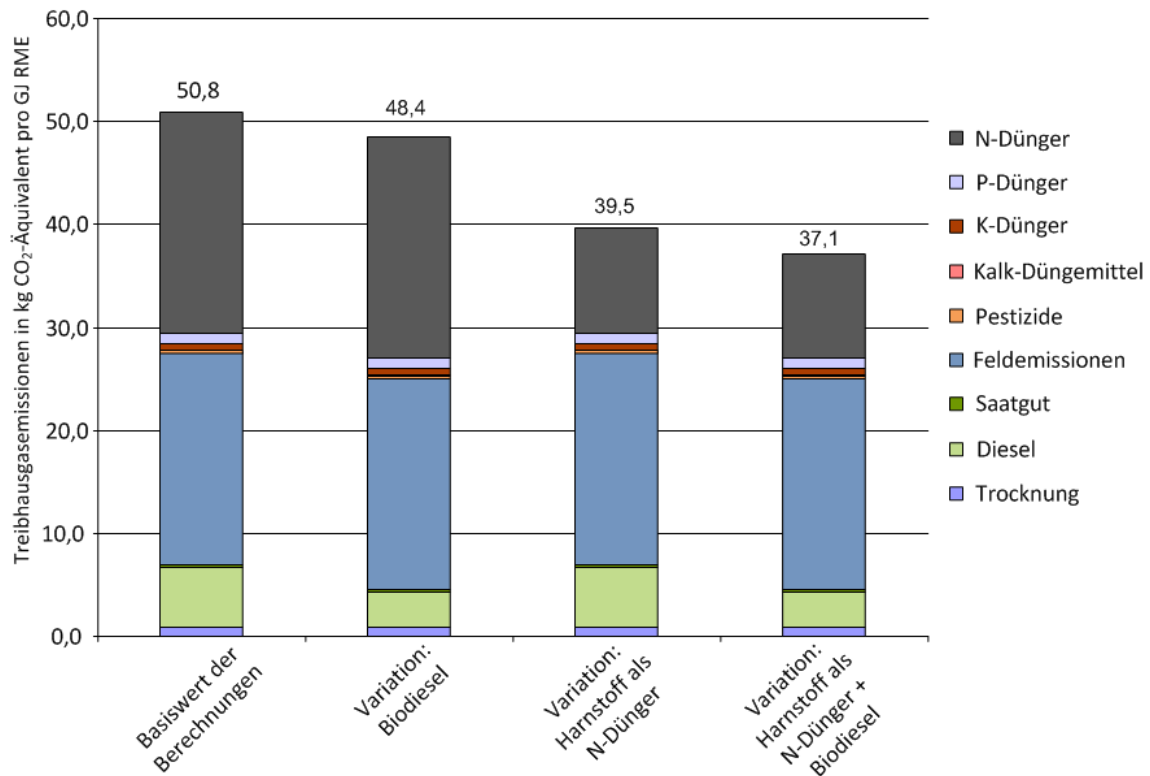


Abb. 7 Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Rapsproduktion

Die Variation des eingesetzten Kraftstoffes (von fossilem Diesel zu Biodiesel) und der verwendeten Stickstoffquelle geben die Indikation für ein deutliches THG-Minderungspotential im Prozess der Rapsproduktion gegenüber dem Default-Wert. Durch die Variation beider Parameter konnte in der Beispielrechnung der Emissionswert um ca. 27 % von 50,8 kg CO₂-Äq./GJ RME auf ca. 37,1 kg CO₂-Äq./GJ RME reduziert werden.

3.2 Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Rapsölproduktion

Nach dem Prozess der Rapsproduktion erfolgt im nächsten Schritt die Bilanzierung der THG-Emissionen aus der Rapsölproduktion. Die Berechnung erfolgt dabei analog zur Berechnung für den Anbauprozess. Dabei werden zunächst aus JRC 1 und JRC 2 die vorhandenen Informationen zu Eingangsparametern und Annahmen für den Prozess der Ölproduktion herausgearbeitet. Diese Parameter sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tab. 4 Hintergrunddaten der Kalkulation des disaggregierten Default-Wertes für den Prozess der Rapsölproduktion /3/

	Einheit	Menge
Strom:	kWh pro t Rapssaat	37,2
Erdgas:	MJ pro t Rapssaat	644,4
Hexan:	kg pro t Rapssaat	1,0
Rapsöl	kg pro t Rapssaat	405,0
Extraktionsschrot	kg pro t Rapssaat	595,0

Analog zur Berechnung für den Anbauprozess erfolgt auch auf dieser Prozessstufe eine Verschneidung der Eingangsparameter mit den entsprechenden Emissionsfaktoren. Diese sind für die zu betrachtenden Eingangsparameter in der Tabelle 4 dargestellt und werden mit den Emissionsfaktoren aus Tabelle 3 verrechnet. Im Anschluss daran ergeben sich die in Abbildung 7 dargestellten Emissionen für den Anbauprozess.

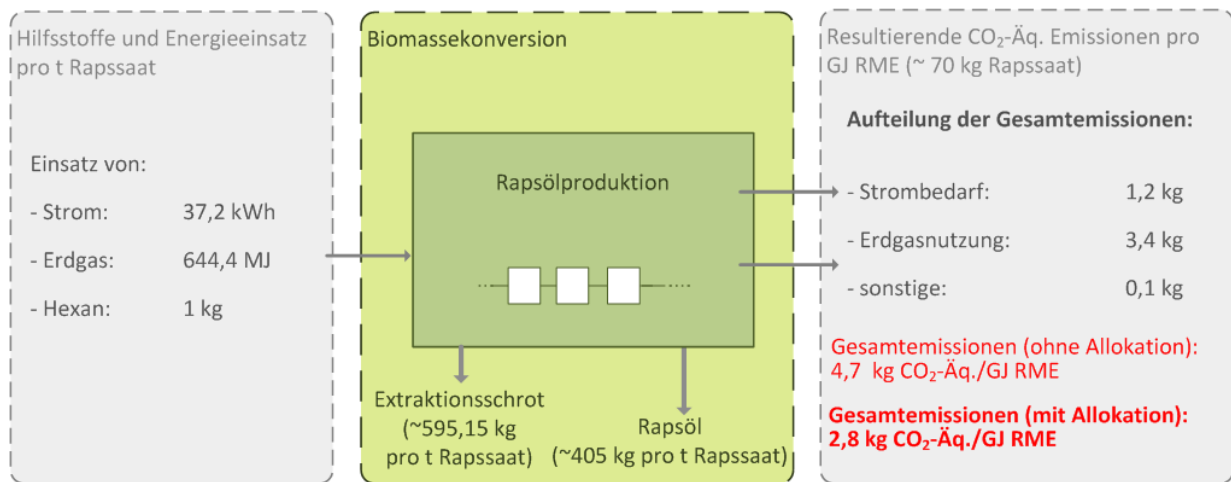


Abb. 8 Ergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Rapsölproduktion

Auch in dieser Darstellung sind auf der linken Seite die Emissionen eingezeichnet, die sich aus dem Einsatz der auf der rechten Seite dargestellten Hilfsstoffe und Energieträger ergeben. Die Summe der einzelnen Emissionen ergibt eine Gesamtemission von 4,7 kg CO₂-Äq./GJ RME. Gemäß der in der Abbildung 4 dargestellten Methodik wird dieser Wert zwischen dem Hauptprodukt der Prozesskette (Biodiesel) und den Nebenprodukten dieser Kette (Extraktionsschrot, Glycerin) alloziert. Nach der Allokation ergibt sich für den Prozess der Rapsölproduktion ein Emissionswert von 2,8 kg CO₂-Äq./GJ RME.

Die im Vergleich zum Prozess der Rapsproduktion eher geringen Gesamtemissionen des Rapsölproduktionsprozesses ergeben sich primär aus dem Bedarf an Wärme/Dampf und dem damit verbundenen Einsatz von Erdgas. Neben dem Einsatz von Erdgas ist der Strombedarf der Ölmühle für den zweithöchsten Anteil an den Gesamtemissionen verantwortlich. Die, aus dem Hexaneinsatz an der Ölmühle resultierenden Emissionen spielen im Kontext der Gesamtemissionen des Prozesses eine untergeordnete Rolle.

3.2.1 Ansätze zur Verringerung von THG-Emissionen bei der Rapsölproduktion

Analog zum Ansatz im Absatz 3.1.1 erfolgt auch für diese Prozessstufe eine Variation der Parameter mit dem größten Einfluss auf das Ergebnis und die anschließende Darstellung der Auswirkungen dieser Variationen. Für den Rapsölproduktionsprozess wurden dabei folgende Parameter betrachtet:

- Variation des Emissionsfaktors für den eingesetzten Strom von europäischem Strommix zu deutschem Strommix,
- Variation des Emissionsfaktors für die Dampfbereitstellung,
- Variation der zu Grunde gelegten Verbrauchsdaten durch eine beispielhafte Bilanzierung für eine Ölmühle nach dem Stand der Technik.

Zur Bildung des Default-Wertes für den Rapsölproduktionsprozess in der EU Richtlinie 2009/28/EC wurde ein Emissionsfaktor für den Stromverbrauch verwendet, der die Emissionen aus der Stromproduktion im europäischen Durchschnitt repräsentiert. Dieser Emissionsfaktor ist mit ca. 460 g CO₂-Äquivalent pro kWh deutlich niedriger als der Emissionsfaktor für deutschen Strom, der nach /6/ mit ca. 633 g CO₂-Äquivalent pro kWh anzusetzen ist. Durch die Variation dieses Parameters erhöht sich das Ergebnis der berechneten THG-Emissionen aus dem unterstellten Stromverbrauch von ca. 37,2 kWh pro Tonne Raps bzw. 95,2 kWh pro Tonne Biodiesel von ca. 1,2 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel (entspricht einer Menge von ca. 70 kg) auf ca. 1,6 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel.

Mit ca. 3,4 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel stellt die Dampfbereitstellung die größte Emissionsquelle im Prozess der Rapsölproduktion dar. Durch eine Variation des Energieträgers zur Dampferzeugung lassen sich die mit der Dampfbereitstellung verbundenen Emissionen reduzieren. Bei der Kalkulation des Default-Wertes wurde eine Dampfbereitstellung auf der Basis von Erdgas unterstellt /3/. Für die Kalkulation der aus diesem Erdgaseinsatz resultierenden Emissionen wurde ein Emissionsfaktor von ca. 0,078 kg CO₂-Äquivalent pro MJ Erdgas unterstellt. Um abzuschätzen, in welcher Größenordnung sich diese Emissionen durch den Einsatz einer Dampfbereitstellung auf der Basis eines biogenen Energieträgers reduzieren lassen, wurde im Rahmen einer Sensitivitätsrechnung eine Wärmebereitstellung über ein biogasbetriebenes BHKW unterstellt. Der entsprechende Emissionsfaktor für die aus dieser Feuerung resultierenden Emissionen wurde nach [Ecoinvent 2.0] mit 0,019 kg CO₂-Äquivalent pro MJ angesetzt. Durch die Variation des Energieträgers lassen sich die Emissionen aus der Wärmebereitstellung von ursprünglich ca. 3,4 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel auf ca. 0,8 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel reduzieren.

Im letzten Schritt wurden die der Berechnung zugrunde liegenden Verbrauchsdaten variiert und durch Verbrauchszahlen einer Mühle nach dem Stand der Technik ersetzt. Die entsprechenden Verbrauchswerte entstammen dabei Herstellerinformationen /7/. Die ursprünglichen und die im Rahmen der Sensitivitätsrechnung eingesetzten Verbrauchswerte sind in der Tabelle 5 gegenüber gestellt.

Tab. 5 Gegenüberstellung der Verbrauchswerte der bilanzierten Ölmühlen nach /3/ und einer Anlage nach dem Stand der Technik /7/

	Einheit	Verbrauchswert Default-Wert pro Tonne Rapssaat	Verbrauchswert „Stand der Technik“ pro Tonne Rapssaat
Strom:	kWh pro t Rapssaat	37,2	31,9
Erdgas:	MJ pro t Rapssaat	644,4	387,9
Hexan:	kg pro t Rapssaat	1,0	1

Die Verbrauchsdaten unterscheiden sich in erster Linie im Wärmebedarf. Dieser ist bei der Ölmühle nach „dem Stand der Technik“ gegenüber dem Basiswert deutlich reduziert. Das Ergebnis dieser Sensitivitätsrechnungen sowie die Ergebnisse der vorangegangenen Parametervariationen sind in der Abbildung 8 zusammengeführt.

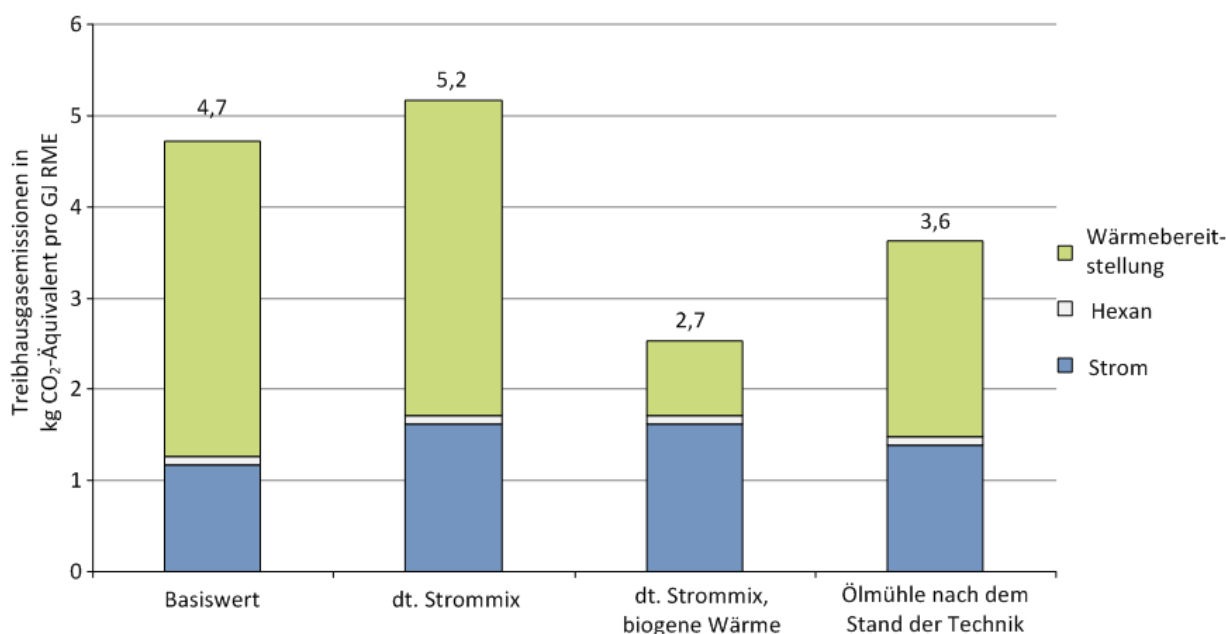


Abb. 9 Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Rapsölproduktion

Die Ergebnisse der durchgeführten Parametervariationen unterscheiden sich zum Teil deutlich vom Basiswert für die Rapsölproduktion, der auf der Basis der EU Default-Wert Hintergrunddaten berechnet wurde. Bei der Ergebnisbetrachtung wird noch einmal der große Einfluss der Wärmebereitstellung auf die Prozessemissionen der Rapsölproduktion deutlich. Durch die Variation des für die Wärmebereitstellung genutzten Energieträgers von Erdgas zu Biogas konnten die Gesamtemissionen für den Rapsölproduktionsprozess von ca. 4,7 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel auf 2,7 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel reduziert werden. Die im Rahmen einer Sensitivitätsrechnung durchgeführte Bilanzierung einer Ölmühle nach dem Stand der Technik zeigte mit ca. 3,6 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel im Vergleich zum Basiswert einen ebenfalls deutlich reduzierten THG-Emissionswert. Ursache hierfür ist der deutlich geringere Wärmebedarf der Mühle (vgl. Tabelle 5).

Das Ergebnis der durchgeführten Sensitivitätsrechnung zeigt deutlich das Optimierungspotential durch die Variation des Energieträgers für die Wärmeversorgung auf der Stufe der Rapsölproduktion.

3.3 Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Biodieselproduktion

Nach der Bilanzierung der Rapssaat- und Rapsölproduktion werden im nächsten Schritt die THG-Emissionen aus dem Schritt der Biodieselproduktion ermittelt. Die Berechnung erfolgt dabei analog zu den Berechnungen auf den vorangegangenen Prozessstufen. Für die Berechnungen auf dieser Stufe wurden die Berechnungen für die Raffination des produzierten Rapsrohöls sowie der anschließende Umesterungsprozess zusammengeführt. Dabei werden für beide Teilprozesse zunächst erneut aus den Dokumenten JRC 1 und JRC 2 die vorhandenen Informationen zu Eingangsparametern und grundsätzlichen Annahmen herausgearbeitet. Diese Parameter sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tab. 6 *Hintergrunddaten der Kalkulation des disaggregierten Default-Wertes für den Prozess der Biodieselproduktion [3/]*

	Einheit	Menge
Strom:	kWh pro t Biodiesel	44,9
Erdgas:	MJ pro t Biodiesel	2940
H ₃ PO ₄ :	kg pro t Biodiesel	2
HCl:	kg pro t Biodiesel	20
Methanol:	kg pro t Biodiesel	109
NaOH:	kg pro t Biodiesel	7
Na ₂ CO ₃ :	kg pro t Biodiesel	2,5
Kaolin:	kg pro t Biodiesel	6
Glyzerin:	kg pro t Biodiesel	105,7

Um die aus dem Biodieselprozess resultierenden Emissionen zu bestimmen, müssen die in Tabelle 6 dargestellten Verbrauchswerte mit den entsprechenden Emissionsfaktoren verschnitten werden. Da in den Veröffentlichungen JRC 1 und JRC 2 keine Emissionsfaktoren dargestellt werden, wurden für die Berechnung Emissionsfaktoren aus der Literatur bzw. aus der Datenbank des DBFZ und der Datenbank Ecoinvent 2.0 /5/ verwendet. Die verwendeten Emissionsfaktoren sind in der folgenden Tabelle 7 zusammengefasst.

Tab. 7 Emissionsfaktoren zur Berechnung des disaggregierten Default-Wertes für den Prozess der Biodieselproduktion [5/], [6/]

	Einheit	Emissionsfaktor	Quelle
Strom EU-Mix:	kg CO ₂ -Äq. pro kWh	0,46	DBFZ Datenbank
Strom nationaler Mix Dt.:	kg CO ₂ -Äq. pro kWh	0,63	Leitfaden BLE
Erdgas Wärmebereitstellung:	kg CO ₂ -Äq. pro MJ	0,078	DBFZ Datenbank
H ₃ PO ₄ :	kg CO ₂ -Äq. pro kg	1,44	DBFZ Datenbank
HCl:	kg CO ₂ -Äq. pro kg	0,35	Leitfaden BLE
Methanol:	kg CO ₂ -Äq. pro kg	1,25	Leitfaden BLE
NaOH:	kg CO ₂ -Äq. pro kg	1,12	Leitfaden BLE
Na ₂ CO ₃ :	kg CO ₂ -Äq. pro kg	0,4	DBFZ Datenbank
Kaolin:	kg CO ₂ -Äq. pro kg	0,2	Ecoinvent Datenbank

Auf der Basis der dargestellten Emissionsfaktoren und Verbrauchsdaten werden im Folgenden die THG-Emissionen für die Teilprozesse der Raffination und Umesterung berechnet. Dafür werden, wie schon bei den vorangegangenen Prozessstufen Verbrauchsdaten und Emissionsfaktoren miteinander verschnitten. Die so für den Prozess der Biodieselproduktion (Raffination + Umesterung) berechneten Gesamtemissionen sind in der Abbildung 9 dargestellt.

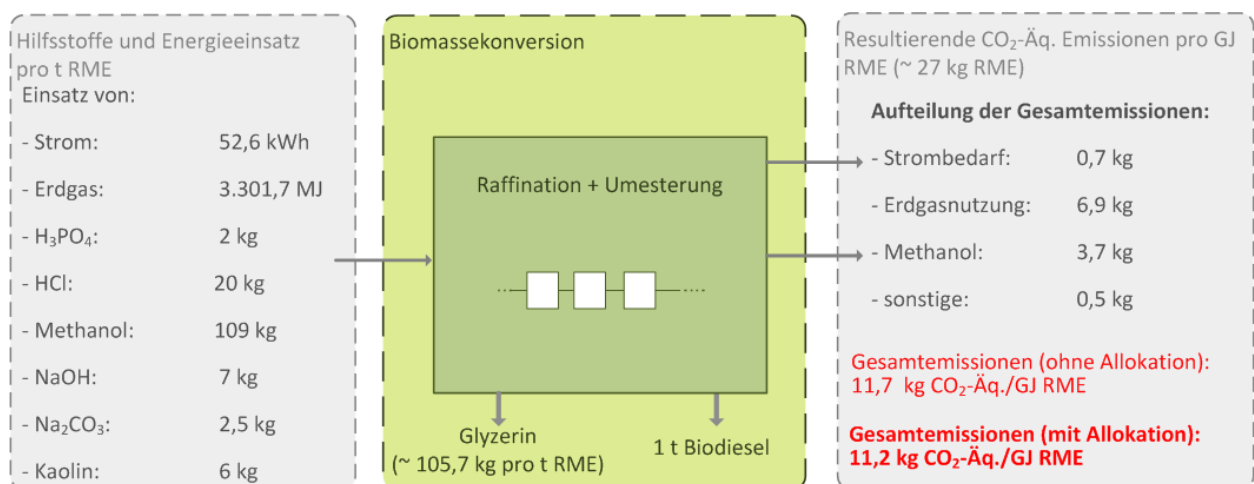


Abb. 10 Ergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Biodieselproduktion

Analog zu den Abbildungen 5 und 7 zeigt die rechte Seite der Abbildung 9 die aus dem Einsatz der auf der linken Seite dargestellten Einsatzstoffe resultierenden Emissionen. Die Summe dieser einzelnen Emissionen ergibt eine Gesamtemission von 11,7 kg CO₂-Äq./GJ RME.

Gemäß der in der Abbildung 4 dargestellten Methodik wird dieser Wert zwischen dem Hauptprodukt der Prozesskette (Biodiesel) und dem Nebenprodukt dieses Prozesses (Glyzerin) alloziert. Nach der Allokation ergibt sich für den Prozess der Biodieselproduktion ein Emissionswert von 11,2 kg CO₂-Äq./GJ RME.

In der Abbildung wird deutlich, dass auch auf der Stufe der Biodieselproduktion die Wärmebereitstellung für den größten Teil der entstandenen Gesamtemissionen (ca. 59%) verantwortlich ist. Einen mit ca. 32 % ebenfalls immer noch bedeutenden Beitrag zum Gesamtergebnis des Biodieselproduktionsprozesses ergeben die Emissionen aus der Bereitstellung des für den Umesterungsprozess benötigten Methanols.

3.3.1 Ansätze zur Verringerung von THG-Emissionen bei der Biodieselproduktion

Für den Prozess der Biodieselproduktion d.h. konkret für den Teilprozess der Umesterung sollen im Folgenden verschiedene Ansätze diskutiert werden, die ggf. geeignet sind die Emissionen aus dem Umesterungsprozess zu reduzieren. Dementsprechend wurden folgende Ansätze und ihre jeweilige Auswirkung auf das Ergebnis der THG-Emissionen des Umesterungsprozesses diskutiert:

- Variation des eingesetzten Methanols von konventionellem Methanol zu Methanol auf der Basis biogener Rohstoffe,
- Variation des Emissionsfaktors für die Dampfbereitstellung,
- Variation der zu Grunde gelegten Verbrauchsdaten durch eine beispielhafte Bilanzierung für eine Biodieselanlage nach dem Stand der Technik.

Da für eine Bilanzierung der THG-Emissionen aus dem Prozess der Biodieselproduktion in Deutschland standardmäßig mit dem Emissionsfaktor für den deutschen Strommix gerechnet wird, der EU Default-Wert allerdings auf der Basis eines Emissionsfaktors für den europäischen Strommix gebildet wurde, wird zunächst die Auswirkung der Variation dieses Emissionsfaktors auf das Gesamtergebnis untersucht. Der Emissionsfaktor für den europäischen Strommix ist mit ca. 460 g CO₂-Äquivalent pro kWh deutlich niedriger als der Emissionsfaktor für deutschen Strom, der nach /6/ mit ca. 633 g CO₂-Äquivalent pro kWh anzusetzen ist. Durch die Variation des Emissionsfaktors erhöht sich das Ergebnis der berechneten THG-Emissionen aus dem unterstellten Stromverbrauch von ca. 0,7 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel auf ca. 0,9 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel.

Den neben der Dampfbereitstellung größten Einfluss auf die THG-Emissionen der Biodieselproduktion hat die Bereitstellung des zum Umesterungsprozess eingesetzten Methanols. Für die Bilanzierung der aus diesem Methanoleinsatz resultierenden Emissionen wurde mit dem entsprechenden Emissionsfaktor aus dem Leitfaden der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) gerechnet. Dabei fällt zunächst auf, dass dieser Emissionsfaktor mit ca. 1,25 kg CO₂-Äquivalent pro kg Methanol deutlich höher ausfällt als in der Literatur verfügbare Emissionsfaktoren (z.B.: 0,77 kg CO₂-Äquivalent pro kg Methanol in /5/). Um den Emissionsfaktor für Methanol näher zu untersuchen und in der Folge abschätzen zu können, wie sich der Emissionsfaktor der Methanolproduktion durch eine alternative Produktion auf der Basis biogener Rohstoffe ändert, führte das DBFZ im Rahmen einer zu diesem Vorhaben parallelen Kurzstudie eine ökologische Bewertung unterschiedlicher Methanolbereitstellungspfade durch (siehe /11/). Dabei wurden für einen Biomethanolfeld auf der Basis von Synthesegas aus Waldrestholz THG-Emissionen von ca. 560 g CO₂-Äquivalent pro kg Biomethanol berechnet. Dieser Pfad stellte sich im Rahmen der untersuchten Bereitstellungsoptionen als der ökologisch vorteilhafteste dar. /11/

Unterstellt man bei der THG-Bilanzierung des Umesterungsprozesses nun beispielhaft den Einsatz dieses Biomethanols und passt den Emissionsfaktor in der Bilanzierung entsprechend an, lassen sich die Emissionen aus dem Methanoleinsatz von ca. 3,7 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel auf ca. 1,6 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel reduzieren. Die THG-Bilanzierung des Biodieselprozesses ergibt unter einer gemeinsamen Berücksichtigung der Emissionsfaktoren für Strom aus dem deutschen Strommix und dem Einsatz von Biomethanol eine Emission von ca. 9,9 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel im Vergleich zu ca. 12 kg CO₂-Äquivalent pro Biodiesel bei der Kalkulation auf der Basis von „konventionellem“ Methanol.

Als dritter Ansatz einer möglichen Reduzierung der THG-Emissionen aus dem Biodieselprozess wurde, analog zum Vorgehen beim Prozess der Rapsölproduktion eine Wärmebereitstellung auf Basis von Biogas bilanziert. Zu diesem Zweck wurde der entsprechende Emissionsfaktor zur Wärmeproduktion auf Erdgasbasis (ca. 0,078 kg CO₂-Äquivalent pro MJ Erdgas) in der Berechnung durch einen Emissionsfaktor für eine Wärmebereitstellung auf Biogasbasis (ca. 0,019 kg CO₂-Äquivalent pro MJ) ersetzt. Beide Emissionsfaktoren entstammen der Datenbank Ecoinvent [5]. Der Einsatz dieser biogenen Wärmebereitstellung führt in Kombination mit der Verwendung des Emissionsfaktors für den deutschen Strommix zu einer Gesamtemission von ca. 6,7 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel.

Im letzten Schritt der Berechnungen für den Biodieselprozess wurden analog zu den Betrachtungen auf der Ebene der Rapsölproduktion die der Berechnung der Default-Werte zugrunde liegenden Verbrauchsdaten variiert und durch Verbrauchszahlen einer Biodieselanlage nach dem Stand der Technik ersetzt. Dabei wurden allerdings nur die Verbrauchswerte für Strom und Wärme variiert. Die entsprechenden Verbrauchswerte entstammen dabei der Datenbasis des DBFZ. Um die Unterschiede in den Verbrauchswerten noch einmal aufzuzeigen, sind die ursprünglichen und die im Rahmen der Sensitivitätsrechnung eingesetzten Verbrauchswerte noch einmal in der Tabelle 8 gegenüber gestellt.

Tab. 8 *Gegenüberstellung der Verbrauchswerte der bilanzierten Biodieselanlagen nach /3/ und einer Anlage nach dem Stand der Technik (Datenbasis des DBFZ)*

	Einheit	Verbrauchswert Default-Wert pro Tonne Biodiesel	Verbrauchswert „Stand der Technik“ pro Tonne Biodiesel
Strom:	kWh pro t Biodiesel	52,6	46,4
Erdgas:	MJ pro t Biodiesel	3.301,7	1705,7
H3PO4:	kg pro t Biodiesel	2	2
HCl:	kg pro t Biodiesel	20	20
Methanol:	kg pro t Biodiesel	109	109
NaOH:	kg pro t Biodiesel	2,5	2,5
Kaolin:	kg pro t Biodiesel	6	6
Hexan:	kg pro t Biodiesel	1,0	1,0

Die Verbrauchsdaten unterscheiden sich erneut in erster Linie im Wärmebedarf. Dieser ist bei der Biodieselanlage nach „dem Stand der Technik“ gegenüber dem Basiswert deutlich reduziert.

Das Ergebnis dieser Sensitivitätsrechnungen sowie die Ergebnisse der vorangegangenen Parametervariationen und einer Kombination der Variation des Emissionsfaktors für den deutschen Strommix, eine biogene Wärmeversorgung sowie der Einsatz von Biomethanol sind in der Abbildung 10 zusammengeführt.

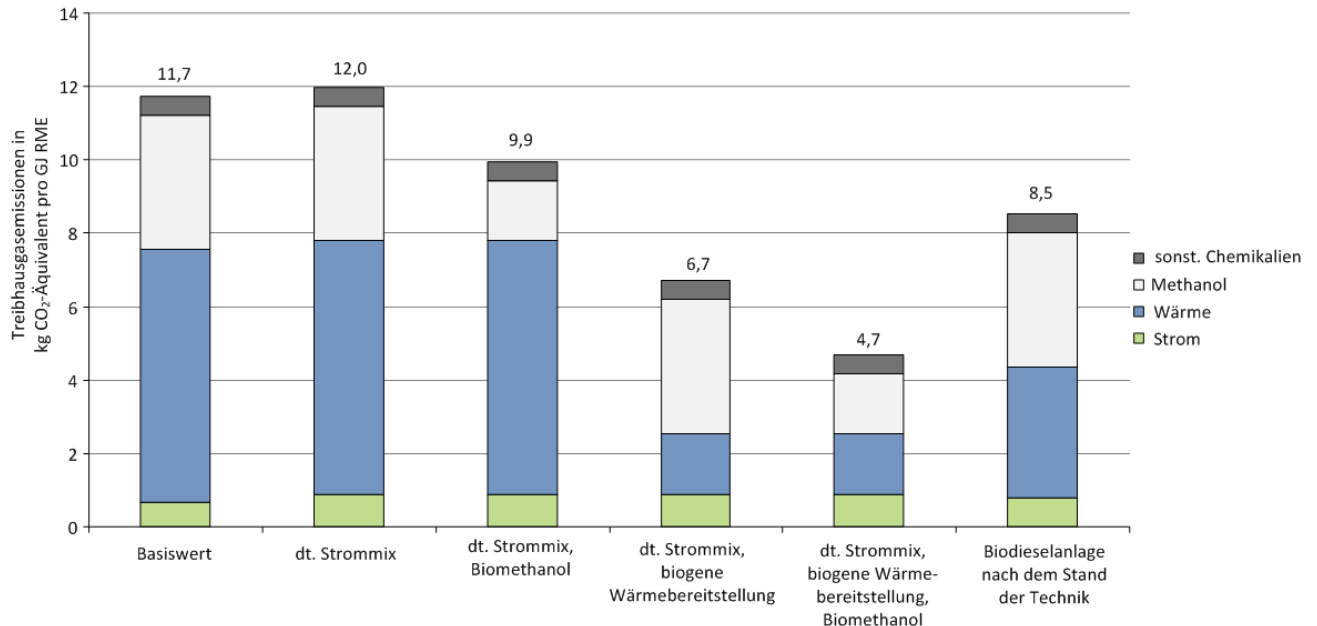


Abb. 11 Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Biodieselproduktion

Die Ergebnisse der durchgeführten Parametervariationen weisen auf ein deutliches THG-Reduktionspotential auf der Stufe der Biodieselproduktion hin. So führte allein die Überprüfung und Anpassung der Energieverbrauchswerte der Biodieselproduktion zu einer Reduktion der Emissionen um ca. 28% gegenüber dem Basiswert. In dem Szenario mit der höchsten THG-Reduktion konnte die Gesamtemission von ca. 11,7 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel für den Basiswert auf ca. 4,7 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion um ca. 60 % im Vergleich zum Basiswert.

3.4 Berechnung der THG-Emissionen auf der Stufe der Transportprozesse

Im letzten Schritt werden die einzelnen Transportprozesse, die die Basis für den entsprechenden Default-Wert der EU Richtlinie bilden, untersucht. Da der Default-Wert für alle Transportprozesse insgesamt mit 1 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel sehr gering ausfällt, werden auf dieser Prozessstufe keine tiefer gehenden Optimierungsansätze diskutiert. Es wurde allerdings abgeschätzt, in welchem Umfang sich die Emissionen auf den einzelnen Transportstufen durch den Einsatz von Biodiesel verringern lassen. Für diese Abschätzung wurde ein Emissionsfaktor auf der Basis des Default-Wertes für Biodiesel aus Raps (52 kg CO₂-Äquivalent pro GJ Biodiesel) verwendet.

Insgesamt wurden bei der Bilanzierung des disaggregierten Default-Wertes für den Transport die in der Tabelle 9 dargestellten Prozesse zusammengefasst und berücksichtigt. Die aus dem jeweiligen Transportprozess resultierenden Emissionen sowie die Größenordnung der potentiellen THG-Einsparung durch die Verwendung von Biodiesel sind ebenfalls in der Tabelle dargestellt. Der Prozess „Aufwendungen Tankstelle“ bezeichnet Aufwendungen zur Fahrzeugbetankung an der Zapfsäule.

Tab. 9 THG-Emissionen der einzelnen Transportprozesse für die RME Prozesskette nach /3/

Prozess	Transportentfernung	Basiswert (ohne Allokation) in kg CO ₂ -Äq./GJ RME	Variation: Biodieseleinsatz
Biomassetransport	50 km	0,31	0,19
Distribution	150 km	0,82	0,51
Aufwendungen Tankstelle	-	0,44	-

Für die unter dem Sammelbegriff Transport zusammengefassten Prozesse ergeben sich THG-Emissionen in Höhe von 1,57 kg CO₂-Äq./GJ RME (ohne Allokation). Durch den Einsatz von Biodiesel lassen sich diese Emissionen auf ca. 1,14 kg CO₂-Äq./GJ RME reduzieren. Da der Default-Wert für den Transport nach Allokation jedoch 1 kg CO₂-Äq. beträgt, fallen die geringen Einsparungen durch den Biodieseleinsatz rundungsbedingt praktisch nicht mehr ins Gewicht.

3.5 Zusammenführung der Berechnungsergebnisse

Um das Gesamt-THG-Einsparpotential der untersuchten Prozesskette und den Einfluss der durchgeführten Parametervariationen näher zu bestimmen, werden im Folgenden die Ergebnisse der Berechnungen für die einzelnen Teilschritte der Prozesskette zur Produktion von Biodiesel auf der Basis von Rapssaat zusammengeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen sowie die THG-Minderungen der betrachteten Prozesskette und der Parametervariationen sind in der folgenden Abbildung 11 dargestellt.

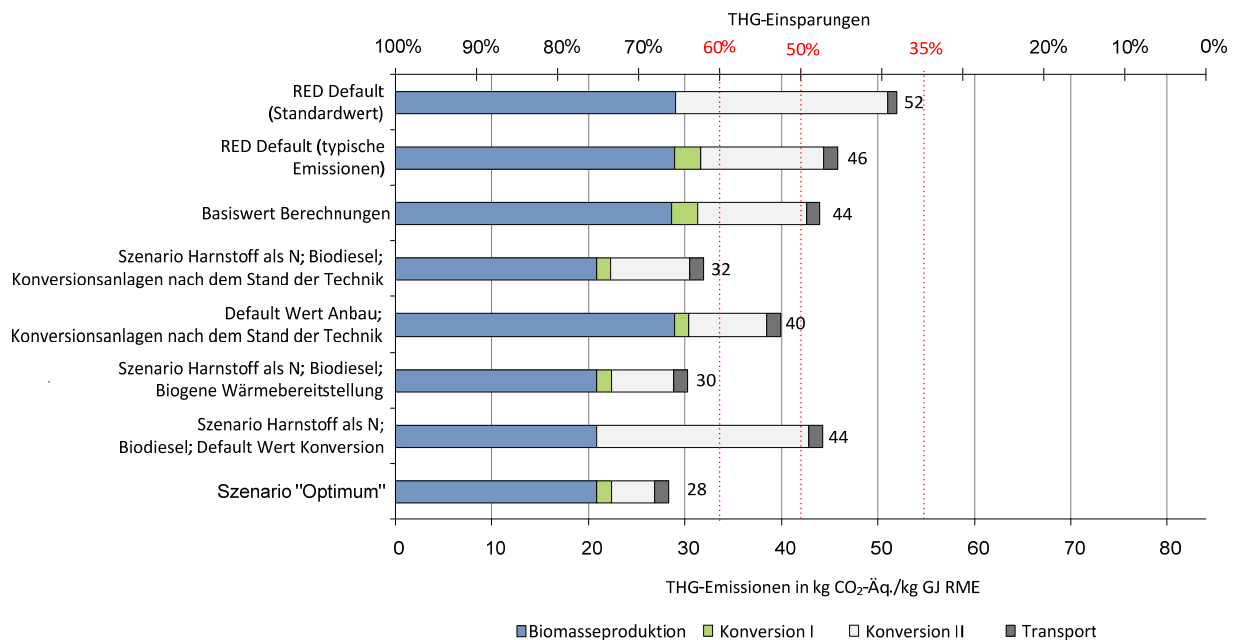


Abb. 12 Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für die gesamte RME Prozesskette

In der Abbildung sind (in der Reihenfolge von oben nach unten) zunächst noch einmal der Default-Wert sowie der so genannte typische Emissionswert für Biodiesel aus Raps aus der EU Richtlinie 2009/28/EC dargestellt.

Unter diesen beiden Werten befindet sich der Basiswert, der das Ergebnis unserer Berechnungen bzw. den nachgebildeten oder nachgerechneten typischen Emissionswert darstellt. Dieser Wert bildet die Grundlage aller Variationen bzw. aller Ansätze zur möglichen Optimierung des Gesamtergebnisses die in der Folge unter diesem Wert dargestellt sind. Direkt unter dem Basiswert befindet sich ein Berechnungsergebnis bei dem verschiedene Optimierungsansätze auf der Stufe der Rapsproduktion (Variation des Stickstoffdüngers; Einsatz von Biodiesel als Kraftstoff) mit einer Berechnung auf der Konversionsstufe auf der Basis von Verbrauchsdaten nach dem Stand der Technik kombiniert wurden. Das Ergebnis dieser Berechnungen weist mit ca. 32 kg CO₂-Äq./GJ RME ein THG-Minderungspotential von ca. 62 % auf. Unter diesem Wert befindet sich eine Betrachtung in dem der gleiche Ansatz auf der Konversionsstufe (die Berechnung der THG-Emissionen auf der Basis von Verbrauchsdaten nach dem Stand der Technik) mit dem Default-Wert für die Stufe des Rapsanbaus kombiniert wurde. Dieser Ansatz trägt dem Umstand Rechnung, dass nach den Vorgaben der EU RED individuelle THG-Minderungen auch durch eine Kombination disaggregierter Default-Werte (z.B. für den Rapsanbau) mit tatsächlichen Berechnungen für einzelne Elemente der Prozesskette berechnet werden können. Das Ergebnis dieses Ansatzes bietet mit ca. 40 kg CO₂-Äq./GJ RME eine THG-Minderung von ca. 52 % gegenüber dem in der EU Richtlinie vorgegebenen fossilen Referenzwert.

Im nächsten Ansatz (bezeichnet als „Szenario Harnstoff als N; Biodiesel; biogene Wärme“) wurde der bereits diskutierte Optimierungsansatz auf der Basis der Rapssaatproduktion mit einer Betrachtung kombiniert, bei der der Wärmebedarf der beiden Konversionsstufen (d. h. Ölmühle und Biodieselproduktion) auf der Basis biogener Energieträger gedeckt wurde. Da die Bereitstellung des notwendigen Wärmebedarfs bei der Kalkulation des Default-Wertes (bzw. des Basiswertes) den jeweils größten Anteil der Emissionen auf beiden Konversionsstufen ausmacht, bietet dieser Ansatz ein bedeutendes THG-Einsparpotential. Insgesamt ergibt sich aus der Kombination dieser beiden Parametervariationen (alternativer Stickstoffdünger und Kraftstoff (KST) im Anbau + alternative Wärmebereitstellung auf beiden Konversionsstufen) eine Gesamtemission von 44 kg CO₂-Äq./GJ RME bzw. eine THG-Minderung von ca. 47 %.

Abschließend wurden in dem zuletzt dargestellten Balken die vielversprechendsten Optimierungsansätze der einzelnen Prozesskettenelemente miteinander kombiniert. Neben dem bereits diskutierten Ansatz auf der Stufe der Rapsproduktion (alternativer Stickstoffdünger und KST) wurde auf beiden Konversionsstufen eine alternative Wärmeversorgung unterstellt. Darüber hinaus wurde bei der Bilanzierung der THG-Emissionen aus dem Prozess der Umesterung der Einsatz von Biomethanol betrachtet und die resultierenden THG-Einsparungen in der Bilanz berücksichtigt. Insgesamt ergibt sich aus der Kombination dieser Optimierungsansätze eine Gesamtemission von 28 kg CO₂-Äq./GJ RME. Dies entspricht einer THG-Minderung von 67 % gegenüber dem fossilen Referenzwert.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND ABLEITUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Zielstellung dieser Arbeit war es zunächst, den in der EU Richtlinie 2009/28/EC enthaltenen Default-Wert für Biodiesel aus Raps in seiner Berechnung transparent darzustellen und ausgehend von dieser Darstellung mögliche Optimierungsansätze in der Bilanzierung zu identifizieren. Die Berechnung des Default-Wertes und die Darstellung der diesem Wert zu Grunde liegenden Annahmen (das heißt beispielsweise: welcher Düngemittelbedarf wurde auf der Stufe der Rapsproduktion unterstellt? Welche Verbrauchsdaten lagen der Bilanzierung der Rapsölproduktion zu Grunde, etc.) war mit Hilfe der Literaturstellen JRC 1 und JRC 2 möglich. Mit Hilfe von Sekundärliteratur, der Ökobilanzdatenbank des DBFZ sowie der Datenbank Ecoinvent konnten im Folgenden die entsprechenden Teilberechnungen der so genannten disaggregierten Default-Werte nachvollzogen werden. Dafür wurden auf jeder Stufe der Prozesskette die identifizierten Hintergrundwerte (aus JRC 1 und JRC 2) mit den entsprechenden Emissionsfaktoren (z.B. aus Ecoinvent) verschnitten.

Als Haupteinflussparameter für das Gesamtergebnis zeigten sich im Anbauprozess die Produktion und Nutzung (Feldemissionen) von industriellem N-Düngemittel sowie auf den Stufen der Biomassekonversion der Einsatz von Wärme, Strom und Methanol.

Durch eine Variation des eingesetzten industriellen Stickstoffdüngers und des Emissionsfaktors für den in der landwirtschaftlichen Produktion verwendeten Kraftstoff (von Diesel zu Biodiesel) zeigte sich ein deutliches Verbesserungspotential, bei dem die Gesamtemissionen aus der Rapsproduktion von 29 auf ca. 21 kg CO₂-Äq./GJ RME verringert werden konnten. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass das berechnete Optimierungsergebnis keine verbindliche Größe darstellt, sondern lediglich dazu dient, die Größenordnungen der vorhandenen Potentiale auszuleuchten.

Die THG-Emissionen der beiden Konversionsstufen sind in erster Linie von den Aufwendungen zur Bereitstellung des benötigten Wärmebedarfs dominiert. Im Rahmen einer Sensitivitätsrechnung wurde eine mögliche Verbesserung des Ergebnisses durch den Einsatz eines alternativen, biogenen Energieträgers untersucht. Als Ergebnis dieser Betrachtungen konnten die Emissionen aus dem Prozess der Rapsölproduktion von ca. 3 auf ca. 1,5 kg CO₂-Äq./GJ RME und aus dem Prozess der Biodieselproduktion (Raffination + Umesterung) von ca. 11 auf ca. 6,4 kg CO₂-Äq./GJ RME reduziert werden. Die Berechnung beider Werte enthält dabei auch die Berücksichtigung der THG-Emissionen aus dem Einsatz von Strom aus dem deutschen Strommix, welcher im Vergleich zum EU Strommix einen vergleichsweise höheren Emissionsfaktor aufweist. Auf der Stufe der Umesterung wurde zusätzlich das mögliche THG-Einsparpotential durch den Einsatz von Biomethanol betrachtet. Dieser Ansatz zeigte eine eher moderate Verbesserung des Ergebnisses von ca. 11 kg CO₂-Äq./GJ RME als Basiswert auf ca. 9,5 kg CO₂-Äq./GJ RME

Das insgesamt durch die Sensitivitätsrechnungen identifizierte maximale theoretische Optimierungspotential liegt mit einem THG-Emissionswert von ca. 28 kg CO₂-Äq./GJ RME bei einer Verbesserung von ca. 46 % gegenüber dem Default-Wert für RME und bei ca. 67 % gegenüber dem in der EU RED definierten fossilem Referenzwert von 83,8 kg CO₂-Äq./GJ.

Die in dieser Studie untersuchten Optimierungsansätze konzentrierten sich vollständig auf eine mögliche Verbesserung der THG-Bilanz. Eine Kombination dieser Berechnungsansätze mit einer ökonomischen

Betrachtung war nicht Gegenstand der Studie. Die identifizierten Ansätze zur Optimierung der THG-Bilanz sind nun mit der ökonomischen Realität in Verbindung zu bringen um so die prinzipielle Realisierbarkeit der einzelnen Ansätze und ihre Auswirkungen auf die Kraftstoffgestehungskosten näher zu untersuchen. Darüber hinaus sind die Betrachtungen der Optimierungsansätze auf der Stufe des Rapsanbaus im Rahmen von Feldversuchen weiter zu vertiefen. Diese Studie zeigt deutlich den Einfluss des Einsatzes industrieller Düngemittel und die Breite Varianz in den Emissionsfaktoren der unterschiedlichen Stickstoffdüngemittel. Diese Arbeiten können somit eine erste Grundlage zur Anpassung von Düngemittelstrategien mit dem Ziel eines THG-optimierten Rapsanbaus bilden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1	Ausgewählte Default-Werte der EU Direktive 2009/28/EC /1/	3
Abb. 2	Systemgrenzen der THG-Bilanzierung nach EU Direktive 2009/28/EC.....	4
Abb. 3	Massenbilanz des Materialstroms zur Produktion von 1 GJ RME nach /3/ und /4/	5
Abb. 4	Allokationsrechnung für den „typischen THG-Emissionswert“ für RME (DBFZ; basierend auf /3/ und /4/).....	6
Abb. 6	Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Rapsproduktion	10
Abb. 7	Ergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Rapsölproduktion.....	11
Abb. 8	Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Rapsölproduktion	13
Abb. 9	Ergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Biodieselproduktion.....	15
Abb. 10	Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für den Prozess der Biodieselproduktion	18
Abb. 11	Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung für die gesamte RME Prozesskette.....	19

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1	Disaggregierte Default-Werte für RME nach /1/.....	6
Tab. 2	Hintergrunddaten der Kalkulation des disaggregierten Default-Wertes für den Rapsanbau /3/.....	7
Tab. 3	Emissionsfaktoren zur Berechnung des disaggregierten Default-Wertes für den Rapsanbau[/5/], [/6/].....	8
Tab. 4	Hintergrunddaten der Kalkulation des disaggregierten Default-Wertes für den Prozess der Rapsölproduktion /3/	11
Tab. 5	Gegenüberstellung der Verbrauchswerte der bilanzierten Ölmühlen nach /3/ und einer Anlage nach dem Stand der Technik /7/.....	13
Tab. 6	Hintergrunddaten der Kalkulation des disaggregierten Default-Wertes für den Prozess der Biodieselproduktion [/3/].....	14
Tab. 7	Emissionsfaktoren zur Berechnung des disaggregierten Default-Wertes für den Rapsanbau [/5/], [/6/].....	15
Tab. 8	Gegenüberstellung der Verbrauchswerte der bilanzierten Biodieselanlagen nach /3/ und einer Anlage nach dem Stand der Technik (Datenbasis des DBFZ).....	17
Tab. 9	THG-Emissionen der einzelnen Transportprozesse für die RME Prozesskette nach /3/.....	19

LITERATUR- UND REFERENZVERZEICHNIS

- /1/ Directive 2009/28/EC of the Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Brussels, 23 April 2009
- /2/ Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Erzeugung von Biomasse zur Verwendung als Biokraftstoff (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV), 30. September 2009
- /3/ „JRC (2008) Update on Data on pathways for RES Directive.XLS“ von der EU Kommission im November 2008 an verschiedene beteiligte Kreise versandte Arbeitsdatei
- /4/ „Input_data_BIO 181108.XLS“ öffentliche Excel-Datei; verfügbar unter: <http://ies.jrc.ec.europa.eu/our-activities/support-to-eu-policies/well-to-wheels-analysis/WTW.html>
- /5/ Frischknecht, R.: Ecoinvent 2007 database: Data v2.0. 2007
- /6/ Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE): Leitfaden Nachhaltige Biomasseherstellung, Bonn, Januar 2010
- /7/ Herstellerangaben der Firma CIMBRIA SKET GmbH; Stand 2009
- /8/ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL): KTBL-Datensammlung. Betriebsplanung Landwirtschaft 2008/09. Darmstadt. 2008
- /9/ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU): Greenhouse Gas Balances for the German Biofuels Quota Legislation. Methodological Guidance and Default Values. Heidelberg. 2007
- /10/ Paustian, K., et al: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; IPCC National Greenhouse Inventories Programme; published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006;
- /11/ DBFZ 2010: Majer, S. Gröngröft, A.: Ökologische und ökonomische Bewertung der Produktion von Biomethanol für die Biodieselherstellung, Kurzstudie im Auftrag der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen. Berlin. 2010