

Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen

Mathematisches Modell für die Berechnung und Optimierung
der Treibhausgasemissionseinsparung durch den Einsatz von
Pflanzenöl als Kraftstoff insbesondere in Landwirtschaftsmaschinen in
Übereinstimmung mit der Kraftstoffqualitätsrichtlinie 2009/30/EG

Agrartechnische Berichte aus Sachsen-Anhalt, Nr. 5

Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Institutsbereich Agrartechnik



BAU.M. Dr. Michael Stöhr
B.A.U.M. Consult GmbH



JOHN DEERE

Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel
John Deere European Technology Innovation Center

Diese Publikation wurde im Zusammenhang mit dem Projekt 2ndVegOil erstellt. Das Projekt 2ndVegOil wird von der Europäischen Kommission im 7. Forschungsrahmenprogramm unter der Fördernummer N° TREN/FP7EN/219004/„2ndVegOil“ finanziell unterstützt.

Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Diese gibt nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Kommission wieder. Die Europäische Kommission ist nicht verantwortlich für die Nutzung der darin enthaltenen Informationen.

Veröffentlicht im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt:

Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines (2ndVegOil)

www.2ndvegoil.eu

Autoren:

Dr. Michael Stöhr, B.A.U.M. Consult GmbH, München

m.stoehr@baumgroup.de

Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel, John Deere European Technology Innovation Center, Kaiserslautern

PickelPeter@JohnDeere.com

Gestaltung:

Axel Bachner, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

axel.bachner@landw.uni-halle.de

Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen

Agrartechnische Berichte aus Sachsen-Anhalt, Nr. 5

Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg,
Institutsbereich Agrartechnik

Julius-Kühn-Str. 23
06112 Halle

Halle 2012

Inhalt

1.	Kurzfassung	6
2.	Klimaschutzanforderungen an mobile Arbeitsmaschinen	9
2.1	Anforderungen der EU	9
2.2	Die Option Biokraftstoffe	9
2.3	Spezifische Aspekte des Landwirtschaftssektors	9
2.4	Erfahrungen mit dem Einsatz von reinen Pflanzenölkraftstoffen	10
3.	Mathematische Modellierung der Option Biokraftstoffe	11
3.1	Motivation für mathematische Modellierung	11
3.2	Vorgaben der Kraftstoffqualitätsrichtlinie für die mathematische Modellierung	12
3.3	Mathematische Modellierung eines allgemeinen Biokraftstoffherstellungsprozesses	14
3.4	Zusammenhang von Allokationsfaktoren und Prozesswirkungsgraden	17
3.5	Berechnung der Treibhausgasemissionen	20
3.5.1	Absolute und relative THGE	20
3.5.2	Allokation der THGE	23
3.6	Einsatz des Biokraftstoffs als Hilfsmittel bei seiner eigenen Herstellung	26
4.	Modellierung der Klimabilanz von reinem Rapsöl als Treibstoff	29
4.1	Parameterwerte und Ergebnisse nach dem BioGrace GHG Tool vs4-public	29
4.2	Anbaustufe bei reinem Rapsöltreibstoff	30
4.3	Prozessstufe 1: Rapssaattrocknung	32
4.4	Prozessstufe 2: Rapssaattransport	34
4.5	Prozessstufe 3: Rapssaatpressung	36
4.6	Prozessstufe 4: Rapsölreinigung	38
4.7	Prozessstufe 5: Rapsöltransport	40
4.8	Prozessstufe 6: Rapsölabgabe an Tankstelle	42
4.9	THGE des gesamten Rapsölpfads	43
5.	Optimierung der Klimabilanz von Rapsölkraftstoff	45
5.1	Nutzung des Rapsöls als Kraftstoff beim Anbau	46
5.2	Ersatz von Diesel durch Rapsöl bei weiteren Stufen der Rapsölherstellung	47
6.	Modellierung der Klimabilanz von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau	49
6.1	Mischfruchtanbau von Leindotter mit Körnerfrüchten	49
6.2	Modellierung des Mischfruchtanbaus von Leindotter mit Weizen	50
6.3	Berechnung der THGE für eine Leindotter-Weizen-Mischung	53
6.4	Schlüssel-Parameter zur Auswahl geeigneter Mischungen	55

7.	Schlussfolgerungen und Ausblick	57
7.1	Korrekturbedarf bei der KQR.....	57
7.2	Klima-Optimierungspotenzial für Pflanzenölkraftstoff aus Rapssaat	57
7.3	Klimadesign-Richtlinien für Pflanzenölkraftstoffe aus Mischfruchtanbau.....	58
7.4	Weitere Berechnungen und Forschungsbedarf	58
7.5	Notwendige Fortentwicklung des gesetzlichen Rahmens.....	59
8.	Literaturverzeichnis.....	60
9.	Die Autoren	62

1. Kurzfassung

Der Einsatz von Biokraftstoffen in landwirtschaftlichen Maschinen ist eine Option, auf Klimaschutzanforderungen zu reagieren, welche derzeit von der Europäischen Kommission an die Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen herangetragen werden. Pflanzenöl ist ein interessanter Kandidat unter den Biokraftstoffen, da die Herstellung vom Acker bis zum Tank in landwirtschaftlichen Betrieben selbst erfolgen kann. Das in Deutschland überwiegend genutzte Rapsöl verfehlt jedoch mit einer Einsparung von 57% der Treibhausgasemissionen (THGE) bezogen auf die THGE von Dieselmotoren knapp die ab 2018 geforderte Mindestreduktion von 60%. Einen Ausweg bieten optimierte Anbau- und Herstellungsmethoden für Rapsöl, insbesondere aber von Phosphor, Calcium und Magnesium vollständig gereinigtes Öl aus in Mischfruchtanbauweise angebautem Leindotter (*Camelina sativa*). Dessen Einsatzfähigkeit in fortgeschrittenen Traktormotoren wurde kürzlich von John Deere im EU-Projekt 2ndVegOil nachgewiesen.

In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell formuliert, das die Bestimmungen der EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (KQR)¹ für komplexe Herstellungsprozesse in Berechnungsvorschriften umsetzt. Die für diese Arbeit relevanten Bestimmungen der KQR finden sich gleichlautend auch in der Erneuerbare Energien Richtlinie (EER)². Das entwickelte Modell ist äquivalent zum BioGrace GHG Tool in der öffentlichen Version 4³, im Gegensatz zu diesem aber insbesondere darauf ausgelegt, Prozessketten mit beliebig vielen Stufen und beliebig vielen Nebenerzeugnissen je Prozessstufe mit einer klaren Notation übersichtlich zu erfassen. Damit können die THGE bei der Herstellung von Pflanzenölen im Mischfruchtanbau und vor allem der Einfluss von Änderungen der Eingangsparameter auf das Ergebnis stringent und transparent berechnet werden. Zugleich ist das Modell offen, weitere Verfahrensschritte oder mögliche weitere Nebenerzeugnisse zu berücksichtigen. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit eines zielgerichteten Klimadesigns von Pflanzenölkraftstoffen.

Dieses Modell wurde zunächst am Beispiel des Standard-Herstellungsprozesses von reinem Rapsöl, welcher Eingang in die KQR und das BioGrace GHG Tool gefunden hat, getestet und verifiziert. Sodann wurden Optimierungsmöglichkeiten für die Herstellung von Rapsöl ausgelotet. Entscheidend ist dabei die Anbauweise. Bei reinem Rapsöl werden 82% der dem Öl zuzuordnenden THGE beim Anbau und nur 18% in den nachfolgenden Prozessstufen erzeugt. Die größten Einzelbeiträge sind Feldemissionen von N₂O, Stickstoffdüngerherstellung und Treibstoff für landwirtschaftliche Maschinen, welche 36%, 32% und 10% der THGE verursachen. Der Mindestwert von 60% THGE-Einsparung kann jedoch bereits dann erreicht werden, wenn lediglich beim Anbau des Rapses das hergestellte Rapsöl selbst wieder an Stelle von Diesel als Kraftstoff verwendet wird.

Schließlich wurde das Modell für eine Berechnung der THGE von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau mit Weizen angewandt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 gezeigt. Die Mindesteinsparung von 60% der THGE wird für Leindotteröl aus Mischfruchtanbau mit Weizen (CS-W Kurven) die für einen großen Bereich von Mischungsverhältnissen deutlich überschritten.

Der Schlüsselparаметer ist das Heizenergie-Treibhausgas-Emissionen-Verhältnis (HEV), d.h. das Verhältnis des unteren Heizwerts der produzierten Frucht zu den mit dem Anbau verbundenen THGE. Weizen hat ein besseres HEV als 36,79 MJ/g CO_{2-eq}. Nach den durchgeführten Berechnungen ist dies der Minimalwert, den eine Ölf Frucht haben muss, damit das Öl die Mindestminderung der THGE von 60% erreicht, vorausgesetzt, die Ölf Frucht wird in ähnlicher Weise weiterverarbeitet wie Raps beim Standard-Rapsölproduktionsprozess (s. schwarze horizontale Kurve für eine fiktive Mischung, bei der beide Komponenten ein HEV von 36,79 MJ/g CO_{2-eq} haben. Der Minimalwert für das HEV ist ein anderer, wenn Abweichungen vom Standard-Rapsölproduktionsprozess erfolgen (z.B. andere Ölausbeute beim Pressen), doch der Unterschied ist in den meisten Fällen gering.

¹ Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009

² Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009

³ www.biograce.net

Das hohe HEV des Weizens kompensiert also für einen weiten Bereich von Mischungen das niedrige HEV von Leindotter. Würde Leindotter mit einer Frucht X mit gleichem HEV kombiniert, bliebe die THGE-Minderung für alle Mischungen unter 60% (s. CS-X Kurven).

Versuche mit Mischfruchtanbau haben gezeigt, dass damit ein höherer Ertrag der Fruchtspartner erzielt werden kann als man bei einer linearen Interpolation der Reinkulturerträge erwarten würde^{4,5}. Darum wurden die Erträge nicht nur linear, sondern auch an Hand von Literaturwerten mit einer quadratischen Funktion interpoliert. Die gekrümmten Kurven in Abbildung 1 zeigen im Vergleich zu den Geraden den Effekt dieser quadratischen Interpolation, d.h. den Effekt der höheren Erträge, die beim Mischfruchtanbau im Vergleich zu Reinkulturen erzielt werden können. Der Mischeffekt führt zu einem Gewinn von mehreren Prozent THGE-Einsparung!

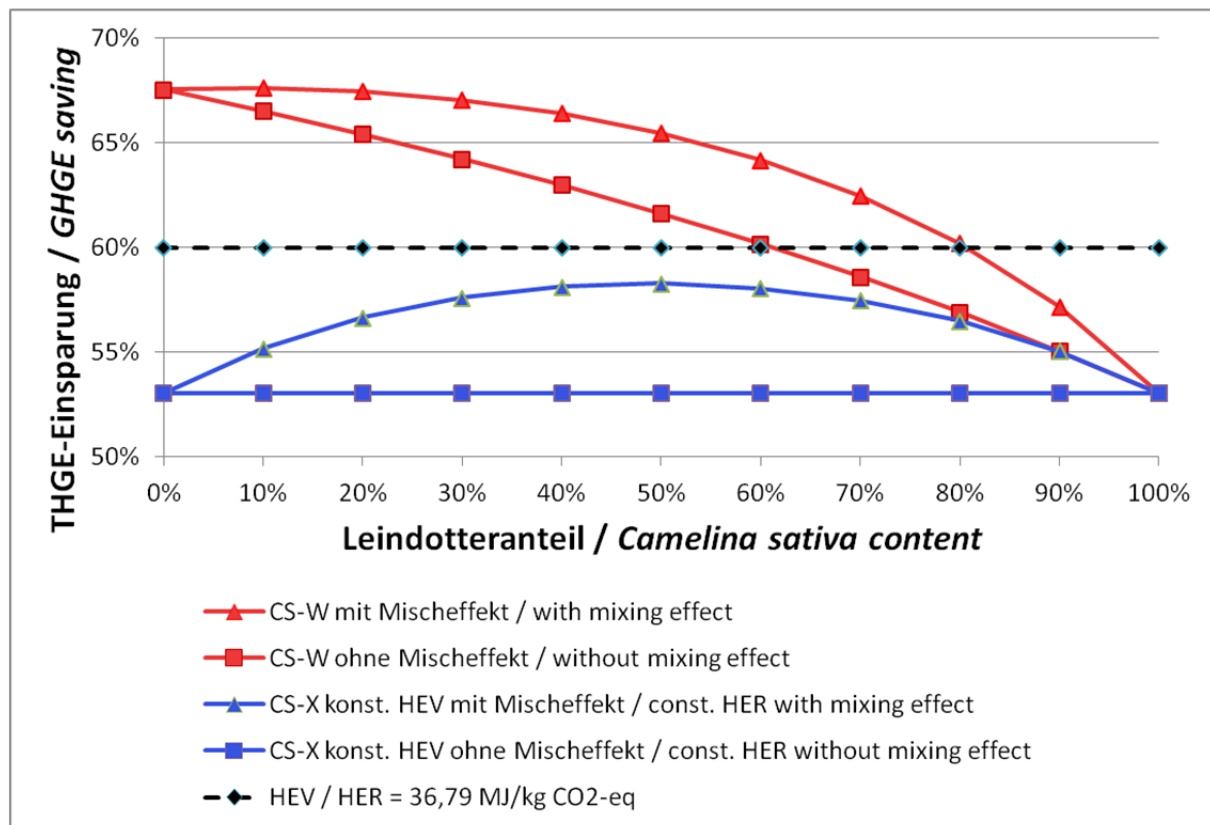


Abbildung 1: THGE-Einsparung als Funktion des Leindotteranteils (*Camelina sativa*, CS) in Mischungen mit Weizen (W) oder einer fiktiven Körnerfrucht mit gleichem HEV wie Leindotter (X)

Die Methode des Mischfruchtanbaus von Öl- mit Körnerfrüchten bietet folglich eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Reduktion der dem Pflanzenöltreibstoff zuzuordnenden THGE mittels eines gezielten Klimadesigns. Der entscheidende Parameter ist das HEV, gefolgt von den Parametern, die den

⁴ Paulsen H M (2007) Mischfruchtanbausysteme mit Ölpflanzen im ökologischen Landbau: 1. Ertragsstruktur des Mischfruchtanbaus von Leguminosen oder Sommerweizen mit Leindotter (*Camelina sativa* L. Crantz). Landbauforschung Völknerode 57(1):107-117

⁵ Gollner, G., et al., Körnerleguminosen in Mischkulturen mit Leindotter (*Camelina sativa*) im Ökologischen Landbau unter pannonischen Standortbedingungen, Journal für Kulturpflanzen, 62 (11). S. 402–408, 2010, ISSN 0027-7479

Mehrertrag dank des Mischeffekts beschreiben. Anhand dieser Parameter können geeignete Mischungen von Ölpflanzen mit anderen Früchten ausgewählt werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der funktionalen Zusammenhänge von N_2O -Feldemissionen, Stickstoffdüngung, Bodenbeschaffenheit und Klima/ Wetter. Es ist bei dieser Arbeit auch offensichtlich geworden, dass THGE-Berechnungen mit europäischen Mittelwerten, wie sie von der KQR zugrunde gelegt werden, zu sehr großen Differenzen zu den tatsächlichen THGE unter realen Anbau- und Herstellungsbedingungen führen. Hier besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Möglichkeiten, eine genauere Berechnung mittels regionaler Differenzierung mit einem sinnvollen Aufwand durchzuführen.

Bei der Arbeit fiel eine Inkonsistenz in der Verwendung des THGE-Referenzwerts für Dieselmotorkraftstoff in der KQR und ihrer Umsetzung auf. Dies bedarf einer Bereinigung bei der nächsten Überarbeitung der KQR. Die Autoren plädieren ferner dafür bei der Berücksichtigung von Kohlenstoffbestandsänderungen infolge indirekter Landnutzungsänderungen eine Unerheblichkeitsgrenze für Biokraftstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion zu ziehen, sofern diese im landwirtschaftlichen Betrieb selbst oder in der näheren Region verwendet werden. So könnte es als unerheblich gelten, wenn maximal 10% der Ackerfläche eines Landes oder einer Region für die Produktion von Biokraftstoffen zur Eigenbedarfsdeckung der Landwirtschaft und landwirtschaftsnaher Verbraucher verwendet werden.

Um die regional sehr unterschiedlichen realen THGE präziser zu erfassen, bietet sich eine Zusammenarbeit mit Regionalmarken an, die Produkte einer Region kennzeichnen. Für Biokraftstoffe, für deren THGE-Berechnung regional typische Kennwerte verwendet wurden, könnte dies damit legitimiert werden, dass diese Biokraftstoffe nach dem Zertifizierungssystem einer Regionalmarke zertifiziert werden.

2. Klimaschutzanforderungen an mobile Arbeitsmaschinen

2.1 Anforderungen der EU

Die Europäische Union (EU) verfolgt das Ziel, die Emission von anthropogenen Treibhausgasen (THGE) in die Atmosphäre zu verringern. Dies schlägt sich gegenwärtig u.a. in Bestrebungen der Europäischen Kommission (EC) nieder, die CO₂-Emissionen auch bei mobilen Arbeitsmaschinen zu begrenzen. In diesem Zusammenhang ist die EC in einen Dialog mit dem Europäischen Landwirtschaftsmaschinen-Verband (CEMA) und dem Europäischen Baumaschinen-Verband (CECE) getreten, in dem mögliche Maßnahmen erörtert werden.

2.2 Die Option Biokraftstoffe

Eine mögliche Maßnahme ist der Einsatz von Biokraftstoffen in mobilen Arbeitsmaschinen. Die Berechnung der dadurch erzielten THGE-Minderung ist durch die EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (KQR)⁶ geregelt. Im Fall von Landwirtschaftsmaschinen ist reines Pflanzenöl als Kraftstoff von besonderem Interesse, da dieses von landwirtschaftlichen Betrieben selbst hergestellt werden kann. Die KQR gibt für reines Pflanzenöl aus Rapssaat in Annex IV.A eine Standard-THGE-Einsparung von 57% bezogen auf die THGE von Dieselreferenzkraftstoff vor, beziehungsweise in Annex IV.C Vorgaben für eine Berechnungsweise, die bei Verwendung von Standardwerten zu einer THGE-Einsparung von 57% führt. Damit weist reines Rapsöl als Treibstoff ein höheres Potential zur Einsparung von THGE auf, als die meisten anderen Biokraftstoffe. Allerdings verlangt die KQR in Art. 7b (2), dass ab dem Jahr 2018 das THGE-Minderungspotenzial von Biokraftstoffen mindestens 60% beträgt. Das Ziel und Zweck dieser Arbeit ist aufzuzeigen, welche Wege es gibt, auch mit Pflanzenölkraftstoffen diese Vorgabe der KQR zu erfüllen. Dies geschieht am Beispiel von Rapsöl und Leindotteröl aus Mischfruchtanbau.

2.3 Spezifische Aspekte des Landwirtschaftssektors

Im Fall reiner Pflanzenölkraftstoffe kann die gesamte Herstellungskette von landwirtschaftlichen Betrieben beherrscht werden. Daraus ergeben sich einige besondere Aspekte, vor allem, wenn der in einem landwirtschaftlichen Betrieb hergestellte Pflanzenölkraftstoff im landwirtschaftlichen Betrieb selbst wieder als Kraftstoff eingesetzt wird. Der Kraftstoff wird dann zu einem Zwischenprodukt des landwirtschaftlichen Produktionsprozesses. Überträgt man die allgemeine Besteuerungsregel, dass innerbetriebliche Zwischenprodukte eines Herstellungsprozesses nicht der Steuer unterliegen, auf diese Situation, darf nach Meinung der Autoren schon um der Steuersystematik willen auf solcherart hergestellten und genutzten Pflanzenölkraftstoff keine Steuer erhoben werden. Die aktuelle Steuerbefreiung für Pflanzenölkraftstoff in der Landwirtschaft in Deutschland ist folglich keine Regelung, die auch beliebig anders lauten könnte, sondern entspricht fundamentalen Grundsätzen der Besteuerung.

Werden nun Zwischenschritte des Herstellungsprozesses, z.B. die Ölpressung, nicht von dem landwirtschaftlichen Betrieb selbst durchgeführt, ändert das die Situation nicht. Diese ist dann vergleichbar damit, dass ein Winzer eine Anlage zum Abfüllen von Wein in Flaschen pachtet, die einem anderen Betrieb gehört. Dabei wird kein steuerbegründender Eigentumswechsel erkannt. Die Pressung von Ölsaaten in einem anderen Betrieb als dem eigenen ist dazu völlig äquivalent.

In ähnlicher Weise muss die Eigenerzeugung und –nutzung von Kraftstoffen in landwirtschaftlichen Betrieben mit Blick auf weitere gesetzliche Regelungen gesehen werden, die aktuell in der Diskussion stehen, z.B. mit Blick auf die Anrechnung von indirekten Landnutzungsänderungen bei der

⁶ Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009

Treibhausgasbilanz von Biokraftstoffen. Es stellt einen großen Unterschied dar, ob ein Biokraftstoff aus Pflanzen hergestellt wird, die auf gerodeten Primärurwaldflächen angebaut werden, oder aus Pflanzen von Flächen, die sich seit Jahren in landwirtschaftlicher Nutzung befinden, und wo z.B. eine Ölpflanze im Zuge des Fruchtwechsels angebaut wird.

Aus diesen Überlegungen heraus plädieren die Autoren dafür, solche innerbetrieblichen Landnutzungswechsel, bei denen das eine oder andere Mal auch Pflanzen zur Biokraftstoffherstellung angebaut werden grundsätzlich nicht als Landnutzungsänderungen anzusehen, die bei der Erstellung der Klimabilanz des Biokraftstoffs zu berücksichtigen sind, auch nicht als indirekte, zumindest sofern der Biokraftstoff ohne Eigentumswechsel im landwirtschaftlichen Betrieb selbst hergestellt und in der Region selbst genutzt wird.

Auf die Berechnung der THGE hat dies bei Anwendung der gegenwärtig geltenden Rechenregeln keinen Einfluss und in dieser Arbeit wurden THGE aus Landnutzungsänderungen auch nicht postuliert. Für die klar umrissene Berechnung der THGE von regional genutztem Pflanzenölkraftstoff aus landwirtschaftlicher Produktion sollte dieses Vorgehen nicht nur vorübergehend, sondern dauerhaft als korrekt betrachtet werden.

2.4 Erfahrungen mit dem Einsatz von reinen Pflanzenölkraftstoffen

Erfahrungen mit dem Einsatz von reinem Rapsöl als Kraftstoff in angepassten Dieselmotoren, darunter auch landwirtschaftliche Maschinen mit Dieselmotor, liegen seit vielen Jahren vor⁷. Umfassende Erfahrungen mit dem Einsatz in Traktoren wurden z.B. im 100-Traktoren-Programm gemacht⁸. Eine führende Rolle bei der Entwicklung von Motoren für die flexible Nutzung von Pflanzenöl und Diesel (Ein-Tank-Systeme) spielten die Vereinigten Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP)⁹. Deren Entwicklungen wurden von John Deere aufgegriffen und in mehreren gemeinsamen Projekten weitergeführt.

Im Rahmen des EU-Projektes 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines (2ndVegOil) wurde unter Leitung von John Deere nachgewiesen, dass nicht nur Rapsöl, sondern auch Sonnenblumen-, Jatropha-, Leindotter- und Maiskeimöl in fortgeschrittenen Traktoren der Emissionsklassen EU Stufe 3A bis 4 eingesetzt werden können¹⁰. Insbesondere Leindotteröl, das im Mischfruchtanbau gemeinsam mit Getreide oder Futtererbsen angebaut wird, wird als geeigneter Biokraftstoffkandidat angesehen, mit dem höhere THGE-Minderungen als die ab 2018 geforderten 60% erreicht werden können.

Die Erwartungen an Leindotteröl aus Mischfruchtanbau rühren daher, dass bei dieser Anbaumethode ein höherer Ertrag als bei getrennten Reinkulturen erzielt werden und der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln deutlich reduziert werden kann¹¹. Folglich sind auch die damit verbundenen THGE bei der Produktion dieser Pflanzenschutzmittel geringer und werden auf eine größere Menge Biokraftstoff umgelegt. Eine Aufgabe dieser Arbeit war zu prüfen, wie hoch diese Effekte tatsächlich sind, und was sonst noch eine Rolle spielt.

⁷ Z.B.: Pflanzenöl als Kraftstoff in landwirtschaftlichen Maschinen, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, 2009

⁸ 100-Traktoren-Programm, <http://www.fnr-server.de/cms35/index.php?id=1140>

⁹ www.vwp-europe.com

¹⁰ Demonstration of 2nd Generation Vegetable Oil Fuels in Advanced Engines (2ndVegOil), Deliverable 2.3,

www.2ndvegoil.eu

¹¹ www.mischfruchtanbau.de

3. Mathematische Modellierung der Option Biokraftstoffe

3.1 Motivation für mathematische Modellierung

Im Rahmen des 2ndVegOil Projektes wurde von der B.A.U.M. Consult GmbH, München, im Auftrag von John Deere ein begleitendes Project Assessment durchgeführt. Der Schwerpunkt liegt darin auf der Analyse der erzielbaren THGE-Minderung durch den Einsatz von reinen Pflanzenölen in Traktoren. Dazu wird u.a. das BioGrace Green House Gas (GHG) Tool vs4-public verwendet, welches im EU-Projekt BioGrace entwickelt und als kostenloses und veränderbares Excel-Tool allgemein verfügbar gemacht wurde¹². Im Rahmen des Project Assessments des 2ndVegOil Projekts hat B.A.U.M. zunächst das BioGrace GHG Tool vs3-public angepasst, um es für die Berechnung der THGE-Minderungspotentiale verschiedener Öle nutzen zu können.

Das BioGrace GHG Tool vs3/vs4-public bietet für reines Pflanzenöl aus zentraler Pressung und Raffination einen Rechenweg an. Dieser ist u.a. mit den Daten für Rapsöl ausgeführt. Die Kalkulation für Pflanzenöl aus dezentraler Pressung und Reinigung ohne Raffination erfordert kleinere Abänderungen. Damit lässt sich die THGE-Reduktion für den Einsatz dieser Öle in Dieselmotoren berechnen. Allerdings werden bei reinem Rapsöl 82% der dem Öl zuzuordnenden THGE ($29,6 \text{ g CO}_2\text{-eq/MJ}_{\text{Öl_im_Tank}}$) beim Anbau und nur 18% ($6,5 \text{ g CO}_2\text{-eq/MJ}_{\text{Öl_im_Tank}}$) in den nachfolgenden Prozessstufen erzeugt. Die größten Einzelbeiträge sind Feldemissionen von N_2O , Stickstoffdüngung und Treibstoff für landwirtschaftliche Maschinen, welche 36%, 32% und 10% der gesamten THGE verursachen. Der Schwerpunkt der Betrachtung muss folglich auf der Anbaustufe liegen, während Änderungen in der Verarbeitung weniger bedeutend sind.

Der Fall von Leindotteröl ist im BioGrace GHG Tool nicht ausgeführt, weder für Öl aus einer Leindotterreinkultur noch für Öl aus Mischfruchtanbau mit einer weiteren Ackerfrucht. Der im BioGrace GHG Tool explizit ausgeführte Fall von Rapsöl enthält einen Prozessschritt, nämlich die Ölpressung, bei dem eine Allokation der THGE auf das Haupterzeugnis, das Öl, und ein Nebenerzeugnis, den Ölkuchen, erfolgt. Zur Berechnung der THGE von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau ist die Einführung eines weiteren Allokationsschrittes notwendig, da in der Anbauphase bzw. im Prozessschritt der Saattrennung neben einem Pflanzenöl und Ölkuchen noch ein weiteres Erzeugnis entsteht, dem die bei Anbau und Saattrennung direkt oder indirekt emittierten THGE zuzuordnen sind.

Nun ist Leindotteröl beim Mischfruchtanbau nur ein Nebenprodukt mit einem geringen Anteil am Gesamtertrag und einem geringen Anteil an den zuzuordnenden Gesamtemissionen. Das Hauptprodukt sind in der Regel Getreide oder Futtererbsen. Im Sinne der Berechnung der THGE des Biokraftstoffs ist jedoch Leindotteröl das Haupterzeugnis und Leindotterschrot und Getreide bzw. Futtererbsen sind Nebenerzeugnisse. Zur klaren Unterscheidung zwischen diesen beiden Sichtweisen, wird hier immer dann von „Haupt- bzw. Nebenprodukt“ gesprochen, wenn damit ausgedrückt werden soll, welchen Anteil ein Produkt an der Gesamtproduktion hat. Dagegen wird der KQR Annex IV.C folgend von „Haupt- bzw. Nebenerzeugnis“ gesprochen, wenn damit ausgedrückt werden soll, ob etwas ein Kraftstoff, für den anteilige THGE berechnet werden, oder etwas anderes ist. Das Haupterzeugnis ist immer der Biokraftstoff bzw. seine Vorerzeugnisse, egal welchen Anteil an den Erzeugnissen des gesamten Herstellungsprozesses er hat.

Erste überschlägige Berechnungen der THGE mit Hilfe eines angepassten BioGrace GHG Tool vs3-public für Leindotteröl aus Mischfruchtanbau führten zu breit gestreuten Ergebnissen. Bei der Untersuchung der Gründe kam die Vermutung auf, dass der gewählte Rechenweg zu sensibel auf kleine Änderungen bei den Eingangsparametern reagiert und die Ergebnisse damit sehr ungewiss sind.

¹² Biograce - Harmonised Calculation of Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe, 2011, www.biograce.net

Um zu einer verlässlichen Berechnung der THGE zu kommen, wurde ergänzend zu den in 2ndVegOil durchgeführten Arbeiten von B.A.U.M. das hier präsentierte mathematische Modell entwickelt, das die Bestimmungen der KQR für komplexe Herstellungsprozesse in Berechnungsvorschriften umformuliert. Es ist insbesondere darauf ausgelegt, Prozessketten mit beliebig vielen Stufen und beliebig vielen Nebenerzeugnissen je Prozessstufe zu erfassen. Mit seiner Hilfe kann das THGE-Potenzial von Pflanzenölkraftstoffen aus Mischfruchtanbau stringent berechnet und die Abhängigkeit der Ergebnisse von Variationen der Eingangsparameter, sprich der Anbau- und Verarbeitungsmethoden klar ermittelt werden.

Zugleich ist das Modell offen, weitere Verfahrensschritte oder mögliche weitere Nebenerzeugnisse zu berücksichtigen. Dies erlaubt im Zuge der weiteren Entwicklung von Pflanzenölkraftstoffen für fortgeschrittene Verbrennungsmotoren auch die Klimaeffekte von weiteren Zuschlagsstoffen bei der Pflanzenölherstellung oder von Additiven genauer zu berücksichtigen. Auch können im Zuge der Weiterentwicklung der Berechnungsvorschriften für den Klimaeffekt von Biokraftstoffen durch die EC oder nationale Behörden weitere Nebenprodukte wie Rapsstroh, Weizenstroh beim Mischfruchtanbau, etc. berücksichtigt werden.

3.2 Vorgaben der Kraftstoffqualitätsrichtlinie für die mathematische Modellierung

Die wichtigsten Anforderungen an die mathematische Modellierung werden in der KQR Annex IV.C formuliert¹³. Die folgenden Absätze geben diese soweit im originalen Wortlaut oder sinngemäß gekürzt wieder, wie es für die hier präsentierte Modellierung erforderlich ist:

1. Mit der Herstellung und dem Einsatz von Biokraftstoffen verbundene THGE (E) sind wie folgt zu berechnen:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee}$$

wobei gilt:

- E = Gesamtemissionen bei der Verwendung des Kraftstoffs;
- e_{ec} = Emissionen bei der Gewinnung oder beim Anbau der Rohstoffe;
- e_l = auf das Jahr umgerechnete Emissionen aufgrund von Kohlenstoffbestandsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen;
- e_p = Emissionen bei der Verarbeitung;
- e_{td} = Emissionen bei Transport und Vertrieb;
- e_u = Emissionen bei der Nutzung des Kraftstoffs;
- e_{sca} = Emissionseinsparungen durch Kohlenstoffanreicherung im Boden infolge besserer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungspraktiken;
- e_{ccs} = Emissionseinsparungen durch Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlendioxid;
- e_{ccr} = Emissionseinsparungen durch Abscheidung und Ersetzung von Kohlenstoffdioxid; und
- e_{ee} = Emissionseinsparungen durch überschüssige Elektrizität aus Kraft-Wärme-Kopplung.

Die mit der Herstellung von Maschinen und Ausrüstungen verbundenen Emissionen werden nicht berücksichtigt.

2. Die durch Kraftstoffe verursachten THGE (E) werden in der äquivalenten Masse CO₂, also der Masse an CO₂, die das gleiche Treibhausgaspotenzial wie die erzeugten Emissionen hat, bezogen auf den unteren Heizwert des Kraftstoffs angegeben. Die verwendete physikalische Einheit ist

¹³ Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009, Annex IV.C

g CO_{2-eq}/MJ.

3. In begründeten Fällen kann die Treibhausemission auch in km/MJ statt in g CO_{2-eq}/MJ angegeben werden.
4. Die durch Biokraftstoffe erzielten Einsparungen bei den THGE sind wie folgt zu berechnen:

$$\text{Einsparung} = (E_F - E_B)/E_F$$

dabei sind:

E_B = Gesamtemissionen bei der Verwendung des Biokraftstoffs; und
 E_F = Gesamtemissionen der fossilen Vergleichsgröße.

5. Die zu berücksichtigenden Treibhausgase sind CO₂, N₂O und CH₄. Zur Berechnung der CO₂-Äquivalenz schreibt Annex IV.C der KQR folgende Gewichtungsfaktoren vor:

CO₂: 1
 N₂O: 296
 CH₄: 23

Nach dem Befund des BioGrace Projekts ist der EC bei der Redaktion des Annex IV eine Inkonsistenz unterlaufen. Die der EC vom Joint Research Center (JRC) zugeleiteten, korrekten und im Folgenden auch hier verwendeten Werte, welche u.a. auch in die Berechnung der Standard-THGE-Minderungspotenziale des Annex IV.A eingeflossen sind, sind leicht von den in Annex IV.C genannten abweichend:

CO₂: 1
 N₂O: 298
 CH₄: 25

Die Gewichtungsfaktoren sind physikalisch dimensionslos. Zur größeren Klarheit und zur Überprüfung hergeleiteter Rechenformeln anhand der physikalischen Dimension, wurden bei der hier präsentierten Modellbildung jedoch den Kennzahlen dimensionslose Einheitenquotienten beigefügt, die deutlich machen, welche Einheitenumwandlung bei der Multiplikation mit einem Gewichtungsfaktor erfolgen:

CO₂: 1 g CO_{2-eq}/g CO₂
 N₂O: 298 g CO_{2-eq}/g N₂O
 CH₄: 25 g CO_{2-eq}/g CH₄

6. Die Emissionen bei der Gewinnung oder dem Anbau der Rohstoffe (e_{ec}) schließen die Emissionen des Gewinnungs- oder Anbauvorgangs selbst, beim Sammeln der Rohstoffe, aus Abfällen und Leckagen sowie bei der Herstellung der zur Gewinnung oder zum Anbau verwendeten Chemikalien ein.

(.....)

11. Die Emissionen bei der Verarbeitung (e_p) schließen die Emissionen bei der Verarbeitung selbst, aus Abfällen und Leckagen sowie bei der Herstellung der zur Verarbeitung verwendeten Chemikalien oder sonstigen Produkte ein.

- Bei der Berücksichtigung des Verbrauchs an nicht in der Anlage zur Kraftstoffherstellung erzeugter Elektrizität wird angenommen, dass die THGE-Intensität bei der Produktion und Verteilung dieser Elektrizität der durchschnittlichen Emissionsintensität bei der Erzeugung und Verteilung von Elektrizität in einer bestimmten Region entspricht. (.....)
12. Die Emissionen beim Transport und Vertrieb (e_{td}) schließen die bei Transport und Lagerung von Rohstoffen und Halbfertigerzeugnissen sowie bei Lagerung und Vertrieb von Fertigerzeugnissen anfallenden Emissionen ein. (.....)
 13. Die Emissionen bei der Nutzung des Kraftstoffs (e_u) werden für Biokraftstoffe mit null angesetzt. (.....)
 17. Werden bei einem Kraftstoffherstellungsverfahren neben dem Kraftstoff, für den die Emissionen berechnet werden, weitere Erzeugnisse („Nebenerzeugnisse“) hergestellt, so werden die anfallenden THGE zwischen dem Kraftstoff oder dessen Zwischenerzeugnis und den Nebenerzeugnissen nach Maßgabe ihres Energiegehalts (der bei anderen Nebenerzeugnissen als Elektrizität durch den unteren Heizwert bestimmt wird) aufgeteilt.
 18. Für die Zwecke der Berechnung nach Nummer 17 sind die aufzuteilenden Emissionen $e_{ec} + e_l +$ die Anteile von e_p , e_{td} , und e_{ee} , die bis einschließlich zu dem Verfahrensschritt anfallen, bei dem ein Nebenerzeugnis erzeugt wird. Wurden in einem früheren Verfahrensschritt Emissionen Nebenerzeugnissen zugewiesen, so wird für diesen Zweck anstelle der Gesamtemissionen der Bruchteil dieser Emissionen verwendet, der im letzten Verfahrensschritt dem Zwischenerzeugnis zugeordnet wird.
Sämtliche Nebenerzeugnisse, einschließlich nicht unter Nummer 16 anfallender Elektrizität, werden für die Zwecke der Berechnung berücksichtigt, mit Ausnahme von Ernterückständen wie Stroh, Bagasse, Hülsen, Maiskolben und Nussschalen. Für die Zwecke der Berechnung wird der Energiegehalt von Nebenerzeugnissen mit negativem Energiegehalt mit null veranschlagt.
Die Lebenszyklus-THGE von Abfällen, Ernterückständen wie Stroh, Bagasse, Hülsen, Maiskolben und Nussschalen sowie Produktionsrückständen einschließlich Rohglycerin (nicht raffiniertes Glycerin) werden bis zur Sammlung dieser Materialien mit null veranschlagt.
Bei Kraft- und Brennstoffen, die in Raffinerien hergestellt werden, ist die Analyseeinheit für die Zwecke der Berechnung nach Nummer 17 die Raffinerie.
 19. Bei Biokraftstoffen ist für die Zwecke der Berechnung nach Nummer 4 die fossile Vergleichsgröße E_f der gemäß dieser Richtlinie gemeldete letzte verfügbare tatsächliche Durchschnitt der Emissionen aus dem fossilen Teil des Otto- und Dieselmotorkraftstoffverbrauchs in der Gemeinschaft. Liegen diese Daten nicht vor, so ist der Wert $83,8 \text{ g CO}_2\text{-eq/MJ}$ zu verwenden.

Weitere Regelungen der KQR betreffen verschiedene Boni, Kohlenstoffbestandsänderungen, überschüssige Elektrizität aus Kraft-Wärme-Kopplung, etc. Diese Regelungen sind für die hier präsentierte Arbeit irrelevant, da sie die Situationen für die die vorgestellte mathematische Modellierung entwickelt wurde nicht betreffen.

Die für den mit der hier präsentierten Modellierung näher untersuchten Fall von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau wichtigsten Nummern des Annex IV.C sind 17 und 18, worin die Allokation von Emissionen auf Nebenprodukte geregelt wird.

3.3 Mathematische Modellierung eines allgemeinen Biokraftstoffherstellungsprozesses

Es wird ein allgemeiner Herstellungsprozess eines beliebigen Biokraftstoffs modelliert, der sich aus einer landwirtschaftlichen Anbau- und insgesamt m Prozessstufen zusammensetzt. Die m Prozessstufen schließen jede Form der Verarbeitung, Transport und Verteilung ein. Die THGE aus der Anbaustufe entsprechen dem Term e_{ec} in KQR Annex IV.C, Punkt 1. Die THGE bzw. THGE-Gutschriften aus den Prozessstufen entsprechen jeweils Teiltermen von e_p , e_{td} und e_{ee} , sprich Teilen genau der

THGE-Komponenten, ausgenommen THGE aus Landnutzungsänderungen, e_l , die gemäß KQR Annex IV.C, Punkt 18 bei der Allokation auf verschiedene Nebenerzeugnisse zu berücksichtigen sind. Allerdings treten in den im Folgenden näher untersuchten Situationen auch keine THGE-Einsparungen e_{ee} auf. Alle sonstigen in KQR Annex IV.C, Punkt 1 aufgeführten THGE-Komponenten werden nicht berücksichtigt, da sie für die untersuchten Fragestellungen irrelevant sind. Jedoch ist das Modell leicht so zu erweitern, dass diese Einschränkung entfällt.

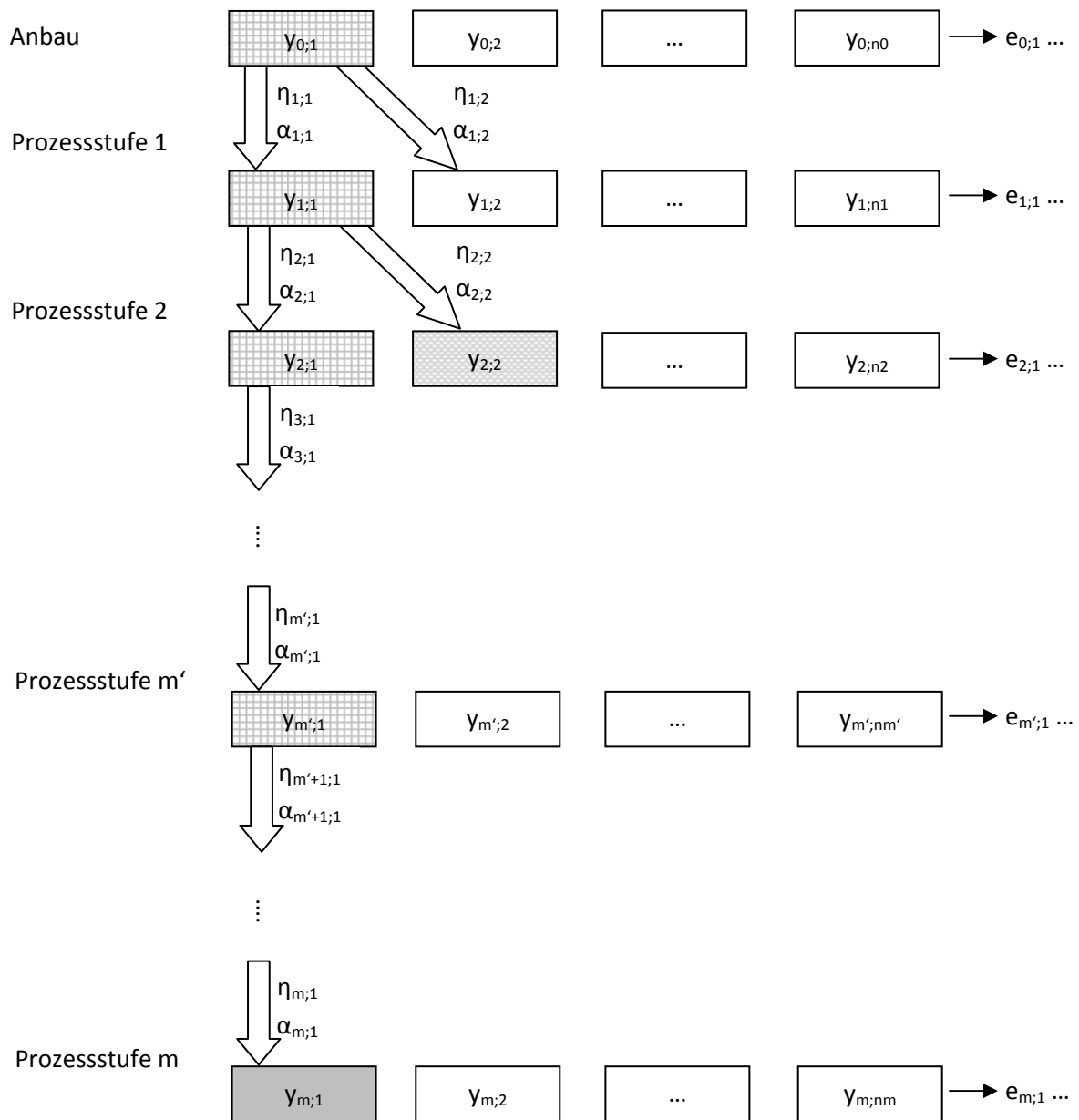


Abbildung 2: Prozesskettenbaum einer Biokraftstoffherstellung mit einem Haupterzeugnis je Prozessstufe

Die Prozessstufen werden gemäß der zeitlichen Reihenfolge nummeriert, in der sie bei der Biokraftstoffherstellung durchlaufen werden, nicht nach der Zuordnung der dabei entstehenden THGE zu den Komponenten e_p und e_{td} . So können an verschiedenen Stellen Prozesse stehen, die jeweils einen Teil der THGE e_p verursachen. Das gleiche gilt für e_{td} .

Sowohl auf der Anbau- als auch auf jeder Prozessstufe kann eine beliebige Anzahl an Erzeugnissen entstehen, wovon jeweils eines für die Weiterverarbeitung zu Biokraftstoff in der nächsten Prozessstufe verwendet wird. Es werden hier nur Situationen abgebildet, bei denen ein einziger Biokraftstoff produziert wird und in jeder Prozessstufe nur ein einziges Zwischenerzeugnis für diesen Biokraftstoff. Der Prozesskettenbaum erlaubt damit z.B. nicht die Beschreibung einer Kopplung von Pflanzenölkraftstoff- und Biogaserzeugung, bei der der Ölkuchen der Biogasanlage zugeführt und zusätzlich zu dem Pflanzenöl auch das Biogas als Treibstoff eingesetzt wird. Dafür müsste ein noch allgemeinerer Prozesskettenbaum erstellt werden, was im Rahmen der hier angestellten Untersuchung ausgeklammert wird. Das hier vorgestellte Modell ist jedoch für solche noch allgemeineren Prozesskettenbäume stringent erweiterbar.

Unterschieden werden m Prozessstufen und die Anbaustufe, die als nullte Prozessstufe verstanden und mit Null indiziert wird. Die wesentlichen Elemente des allgemeinen Prozesskettenbaums sind Erzeugnisse, gekennzeichnet durch ihre jeweiligen absoluten ($Y_{m';i}$) oder spezifischen Erträge ($y_{m';i}$), Prozesswirkungsgrade ($\eta_{m';i}$), Allokationsfaktoren ($\alpha_{m';i}$) für die Zuordnung der THGE zu den einzelnen Erzeugnissen und die damit berechneten THGE-Anteile ($e_{m';i}$).

Alle diese Größen können als Vektoren notiert werden. Dies wird hier jedoch nur dann gemacht, wenn es zu einer kompakteren oder übersichtlicheren Darstellung der erforderlichen Rechenwege führt, sprich der Verkomplizierung der hier durchgeführten Untersuchung ein adäquater Gewinn gegenüber steht. Dies ist bei einigen Größen der Fall, die in der Berechnung der THGE auftauchen, wie weiter unten gezeigt wird. Dort ist eine Notation als Vektoren und Matrizen sinnvoll, da damit Rechenwege deutlich kompakter und übersichtlicher dargestellt werden können.

Genauso verhält es sich hier mit der allgemeinen Indizierung der Größen Y , y , η und α . Die dadurch vorgenommene Verkomplizierung erlaubt das Modell so allgemein und hinreichend komplex zu halten, dass damit Rechenverfahren für eine vergleichsweise große Anzahl verschiedener Situationen hergeleitet werden können. Das rechtfertigt den Aufwand.

In jeder Stufe m' gibt es nun jeweils $n_{m'}$ unterschiedliche Erträge. Die absoluten Erträge werden durchgängig in der physikalischen Dimension Energie (üblicherweise in der Einheit MJ), die spezifischen Erträge in der Dimension Energie pro Anbauflächenjahre, d.h. pro Anbaufläche und pro Jahr, angegeben (üblicherweise in der Einheit MJ/(ha·yr), d.h. MJ/ha/yr). Mit der stringenten Angabe der Erträge durch ihren Energiegehalt wird der KQR Annex IV.C, Punkte 2 und 17, in der übersichtlichsten Weise Rechnung getragen. In der Regel handelt es sich bei der Energieform nicht um Elektrizität, sondern um in Biomasse chemisch gebundene Energie, so dass die betrachtete Energie der untere Heizwert des betreffenden Erzeugnisses ist. Dies entspricht der Forderung von KQR Annex IV.C, Punkt 17.

Die absoluten und die spezifischen Erträge sind durch die Anbauflächenjahre (A) verknüpft:

$$(1) \quad Y_{m';i} = y_{m';i} \cdot A$$

Bei der Berechnung von Biokraftstoffpfaden werden nun durchgängig spezifische Erträge betrachtet, keine absoluten. Relevant ist allein, welcher Ertrag je Anbaufläche und -jahr erzielt werden kann und die Größe A muss nicht bekannt sein. Die Kenntnis der spezifischen Erträge genügt zur Bestimmung der spezifischen, auf den Energiegehalt des Biokraftstoffs bezogenen THGE. Für die klarere Darstellung der mathematischen Bezüge und die Transparenz der daraus hergeleiteten Rechenverfahren ist es jedoch hilfreich auch die absoluten Erträge mitzuführen.

Die Prozesswirkungsgrade $\eta_{m';i}$ und die Allokationsfaktoren $\alpha_{m';i}$ sind dimensionslos, doch ist es sinnvoll bei den Prozesswirkungsgraden einen dimensionslosen Einheitenquotienten anzugeben, der ausdrückt, welches Eingangs- und Ausgangserzeugnis die jeweilige Prozessstufe hat, etwa

$MJ_{\text{öl_roh}}/MJ_{\text{Saat_trans}}$ beim Wirkungsgrad der Ölsaatzpressung oder $MJ_{\text{öl_rein}}/MJ_{\text{öl_roh}}$ beim Wirkungsgrad der Öltreinigung. Die durch Indices präzisierten physikalischen Einheiten dienen bei der Modellentwicklung als Fehlerdetektor für die hergeleiteten Berechnungsvorschriften.

Mit Blick auf die THGE werden nun viererlei Kategorien von Erzeugnissen unterschieden:

1. Der Biokraftstoff selbst ($y_{m;1}$). Ihm werden von der Anbau- und jeder Prozessstufe alle oder ein Teil der dort entstehenden THGE zugeordnet. Er ist in Abbildung 2 dunkel gekennzeichnet.
2. Nebenerzeugnisse ($y_{m';i}$, mit $0 \leq m' \leq m$ und $2 \leq i \leq n_{m'}$), die in der Anbau- oder auf einer Prozessstufe entstehen und denen ebenfalls ein Teil der in dieser, in der Anbau- und in den vorangehenden Prozessstufen entstehenden THGE zugeordnet werden. Davon gibt es ganz wenige. In Abbildung 2 ist nur eines gezeigt und hell gemustert gekennzeichnet.
3. Zwischenerzeugnisse des Biokraftstoffs ($y_{m';1}$, mit $0 \leq m' \leq m-1$). Davon gibt es in dem hier entwickelten Modell in jeder außer der letzten Prozessstufe genau eines. Diese sind in Abbildung 2 rautiert gekennzeichnet. Ihnen werden keine Teile der THGE zugeordnet.
4. Nebenerzeugnisse ($y_{m';i}$, mit $0 \leq m' \leq m$ und $2 \leq i \leq n_{m'}$), denen ebenfalls keine THGE zugeordnet werden. Diese sind in Abbildung 2 weiß gekennzeichnet. Davon gibt es üblicherweise pro Prozessstufe auch eines und meistens handelt es sich um Verluste, z.B. Öl, das beim Abfüllen verschüttet wird, etc., also Dinge, die zwecks stringenter mathematischer Beschreibung als „Nebenerzeugnisse“ in einem allgemeinen Sinn bezeichnet werden, auch wenn sie gemeinhin nicht als Produkt oder Erzeugnis angesehen werden. Bei einigen wenigen Nebenerzeugnissen, bei denen diese Einstufung dagegen nahe liegt, z.B. Stroh, ist in der KQR explizit geregelt, dass diesen keine THGE zugeordnet werden dürfen.

Der Biokraftstoff selbst und die Nebenerzeugnisse, denen THGE zugeordnet werden, seien im Folgenden als allokatonsfähige Erzeugnisse bezeichnet. Davon kann es mehr oder weniger geben, als es Prozessstufen gibt, aber meist gibt es weniger. Die Zuordnung der THGE zu den allokatonsfähigen Erzeugnissen erfolgt dann dergestalt:

- Die THGE der Anbaustufe werden auf alle allokatonsfähigen Erzeugnisse aufgeteilt.
- Die THGE der Prozessstufe 1 werden auf alle allokatonsfähigen Erzeugnisse aufgeteilt, ausgenommen die Nebenerzeugnisse der Anbaustufe. Anders ausgedrückt: auf alle allokatonsfähigen Erzeugnisse ab einschließlich der Prozessstufe 1.
- Die THGE einer beliebigen Stufe m' werden auf alle allokatonsfähigen Erzeugnisse ab einschließlich der Stufe m' aufgeteilt.

Je näher eine Stufe am Ende der Prozesskette steht, desto größer ist der Anteil der in ihr erzeugten THGE, der dem Biokraftstoff zugeordnet wird. Die Anbaustufe ist diejenige, bei der die erzeugten THGE auf die größte Anzahl an Erzeugnissen aufgeteilt werden.

Gelingt es also den Anbau so zu gestalten, dass ein möglichst geringer Teil der in ihr erzeugten THGE dem Biokraftstoff zugeordnet werden muss und ein möglichst großer Anteil allokatonsfähigen Nebenerzeugnissen, kann das THGE-Minderungspotential des Biokraftstoffs rechnerisch optimiert werden. Die Anbaustufe ist umso bedeutender, als hier der größte Teil der THGE überhaupt entsteht. An diesen Überlegungen knüpft die Arbeitshypothese an, dass das THGE-Minderungspotential durch Erzeugung von Pflanzenöl aus Mischfruchtanbau gesenkt werden kann.

Die genaue Diskussion, ob der hier skizzierte Allokationsmechanismus den Bestimmungen der KQR entspricht, erfolgt weiter unten beim Herleiten der Rechenregeln für die Allokation der THGE.

3.4 Zusammenhang von Allokationsfaktoren und Prozesswirkungsgraden

Die Erträge einer Prozessstufe m' mit $1 \leq m' \leq m$ sind mit dem Ertrag des Biokraftstoffzwischenproduktes der vorangehenden Prozessstufe $m'-1$, d.h. dem Haupterzeugnis

der Prozessstufe $m'-1$, über die Prozesswirkungsgrade der Prozessstufe m' ($\eta_{m',i}$) wie folgt miteinander verknüpft:

$$(2) \quad y_{m',i} = y_{m'-1,i} \cdot \eta_{m',i}$$

Wirkungsgrade zwischen Nebenerzeugnissen werden hier nicht betrachtet, da die Weiterverarbeitung und Verwendung von Nebenerzeugnissen nicht in den Rahmen fällt, für den die hier präsentierte Modellierung entwickelt wurde.

Die Allokationsfaktoren ($\alpha_{m',i}$) seien nun wie folgt definiert:

$$(3) \quad \alpha_{m',i} := \frac{\eta_{m',i} \cdot \sigma_{m',i}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_{m'}} \eta_{m',j} \cdot \sigma_{m',j} \right\}}, \text{ falls } 1 \leq m' \leq m \text{ und}$$

$$(4) \quad \alpha_{0,i} := \frac{y_{0,i} \cdot \sigma_{0,i}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_0} y_{0,j} \cdot \sigma_{0,j} \right\}}$$

Dabei nimmt die binäre Funktion $\sigma_{m',i}$ den Wert 1 an, wenn das Erzeugnis mit dem Ertrag $y_{m',i}$ allokatonsfähig ist, und 0 sonst. Durch diese Definitionen wird ein enger Zusammenhang zwischen Prozesswirkungsgraden und Allokationsfaktoren hergestellt. Angemerkt sei, dass die Allokationsfaktoren im Folgenden als konsequent physikalisch dimensionslose Größen behandelt werden, da hier im Gegensatz zu den Wirkungsgraden kein sinnvoller Quotient von Energieeinheiten mit unterschiedlichem Bezug auf verschiedene Erzeugnisse definiert werden kann.

Es ist nun zu zeigen, dass diese Definitionen für die zu untersuchenden Situationen adäquat gewählt wurden und zielführend sind. Dazu müssen sie zunächst der Forderung von KQR Annex IV.C, Punkt 17 genügen, dass das Verhältnis der Allokationsfaktoren zweier Zwischenerzeugnisse derselben Prozessstufe gleich dem Verhältnis der unteren Heizwerte dieser Zwischenerzeugnisse ist. Dabei geht KQR Annex IV.C, Punkt 17 implizit davon aus, dass die betrachteten Allokationsfaktoren nicht null und damit durcheinander teilbar sind. Zwecks Herleiten eines übersichtlichen und damit fehlerresistenten Rechenverfahrens sind die Definitionen (3) und (4) etwas allgemeiner gehalten und lassen auch Allokationsfaktoren zu, die null sein können. Die Prüfung, ob sie der KQR Annex IV.C, Punkt 17 genügen, wird darum auf den Fall eingeschränkt, dass die betrachteten beiden Allokationsfaktoren der gleichen Prozessstufe von null verschieden sind. Die folgenden Gleichungsketten zeigen, dass dann die Definitionen (3) und (4) der Forderung von KQR Annex IV.C, Punkt 17 genügen:

$$(5) \quad \frac{\alpha_{m',i}}{\alpha_{m',i'}} = \frac{\frac{\eta_{m',i} \cdot \sigma_{m',i}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_{m'}} \eta_{m',j} \cdot \sigma_{m',j} \right\}}}{\frac{\eta_{m',i'} \cdot \sigma_{m',i'}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_{m'}} \eta_{m',j} \cdot \sigma_{m',j} \right\}}} = \frac{\eta_{m',i} \cdot \sigma_{m',i}}{\eta_{m',i'} \cdot \sigma_{m',i'}} = \frac{\eta_{m',i}}{\eta_{m',i'}} = \frac{y_{m'-1,i} \cdot \eta_{m',i}}{y_{m'-1,i'} \cdot \eta_{m',i'}} = \frac{y_{m',i}}{y_{m',i'}} = \frac{A \cdot y_{m',i}}{A \cdot y_{m',i'}} = \frac{y_{m',i}}{y_{m',i'}}$$

falls $1 \leq m' \leq m$ und

$$(6) \quad \frac{\alpha_{0,i}}{\alpha_{0,i'}} = \frac{\frac{y_{0,i} \cdot \sigma_{0,i}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_0} y_{0,j} \cdot \sigma_{0,j} \right\}}}{\frac{y_{0,i'} \cdot \sigma_{0,i'}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_0} y_{0,j} \cdot \sigma_{0,j} \right\}}} = \frac{y_{0,i} \cdot \sigma_{0,i}}{y_{0,i'} \cdot \sigma_{0,i'}} = \frac{y_{0,i}}{y_{0,i'}} = \frac{Y_{0,i}}{Y_{0,i'}}$$

Die erste Umwandlung in der Gleichungskette (5) folgt aus der Definition (3). Die zweite, vierte und sechste Umwandlung sind triviale Bruchkürzungen bzw. –erweiterungen. Die dritte Umwandlung ergibt sich daraus, dass die betrachteten Allokationsfaktoren $\alpha_{m',i}$ und $\alpha_{m',i'}$ nicht null sind, mithin $\sigma_{m',i}$ und $\sigma_{m',i'}$ also beide gleich 1 sein müssen. Die fünfte Umwandlung folgt aus Gleichung (2) und die siebte aus Gleichung (1).

Die erste Umwandlung in der Gleichungskette (5) folgt aus der Definition (4). Die zweite ist eine triviale Bruchkürzung. Die dritte Umwandlung ergibt sich daraus, dass die betrachteten Allokationsfaktoren $\alpha_{0,i}$ und $\alpha_{0,i'}$ nicht null sind, mithin $\sigma_{0,i}$ und $\sigma_{0,i'}$ also beide gleich 1 sein müssen. Die fünfte Umwandlung folgt aus Gleichung (1).

Die Zulassung von verallgemeinerten Allokationsfaktoren, die auch null sein können, wie in den Definitionen (3) und (4), ist durch KQR Annex IV.C, Punkt 18 gedeckt. Die dortige Aufzählung der Nebenerzeugnisse, welche bei der Berechnung der THGE zu berücksichtigen sind, impliziert, dass Allokationsfaktoren für alle anderen als die dort genannten Nebenerzeugnisse null sein müssen, sofern man solche definiert. Da diesen aber keine THGE zugeordnet werden, sind auch keine Berechnung und keine Division erforderlich, welche mathematisch unzulässig wären.

Für Prozesswirkungsgrade und Allokationsfaktoren muss auf Grund des Energieerhaltungssatzes weiterhin gelten, dass ihre Prozessstufensummen den Wert 1 annehmen, wenn Verluste abzüglich im Prozess zugeführter und in einem Erzeugnis gespeicherter Energie auch als „Erzeugnisse“ im verallgemeinerten Sinn behandelt werden:

$$(7) \quad \sum_{i=1}^{n_{m'}} \eta_{m',i} = 1$$

$$(8) \quad \sum_{i=1}^{n_{m'}} \alpha_{m',i} = 1$$

(7) folgt aus dem Energieerhaltungssatz für eine beliebige Prozessstufe m' . Dieser kann wie folgt notiert werden:

$$(9) \quad \sum_{i=1}^{n_{m'}} Y_{m',i} = Y_{m'-1,1}$$

Diese Gleichung besagt, dass die Summe aller Energiegehalte der Erzeugnisse der Prozessstufe m' , eingeschlossen „Nebenerzeugnisse“ im allgemeinen Sinn wie Verluste abzüglich im Prozess erfolgter Energiezufuhr und –bindung und zuzüglich Energiefreisetzungen, gleich dem Energiegehalt des Haupterzeugnisses der Prozessstufe $m'-1$ sein muss. Da nur dieses Haupterzeugnis in der Prozessstufe m' weiterverarbeitet wird, ist (9) die Formulierung des Energieerhaltungssatzes für den Prozess m' . Dividiert man beide Seiten der Gleichung (9) durch die Anbauflächenjahre A , folgt mit (1):

$$(10) \quad \sum_{i=1}^{n_{m'}} y_{m',i} = y_{m'-1,1}$$

Eine weitere Division beider Seiten der Gleichung (10) durch $y_{m'-1;1}$ führt mit (2) zu (7).

Dass auch Gleichung (8) gilt, ergibt sich für m' mit $1 \leq m' \leq m$ aus der Definition der Allokationsfaktoren (3) durch schlichtes Einsetzen in die linke Seite von (8) (erste Umwandlung) und Ausführen des Distributivgesetzes (zweite Umwandlung) sowie Bruchkürzung (dritte Umwandlung):

$$(11) \quad \sum_{i=1}^{n_{m'}} \alpha_{m';i} = \sum_{i=1}^{n_{m'}} \frac{\eta_{m';i} \cdot \sigma_{m';i}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_{m'}} \eta_{m';j} \cdot \sigma_{m';j} \right\}} = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{n_{m'}} \eta_{m';i} \cdot \sigma_{m';i} \right\}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_{m'}} \eta_{m';j} \cdot \sigma_{m';j} \right\}} = 1$$

Für $m'=0$ erfolgt der Nachweis von (8) analog:

$$(12) \quad \sum_{i=1}^{n_0} \alpha_{0;i} = \sum_{i=1}^{n_0} \frac{y_{0;i} \cdot \sigma_{0;i}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_0} y_{0;j} \cdot \sigma_{0;j} \right\}} = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{n_0} y_{0;i} \cdot \sigma_{0;i} \right\}}{\left\{ \sum_{j=1}^{n_0} y_{0;j} \cdot \sigma_{0;j} \right\}} = 1$$

Tabelle 1 illustriert am Beispiel der Ölsaatenpressung den Zusammenhang von Allokationsfaktoren und Prozesswirkungsgraden. Der Wirkungsgrad der Pressung ist für das Öl höher als für den Ölpresskuchen, da hier der Energiegehalt der Erzeugnisse betrachtet wird, und nicht wie üblich die Masse. Zwar ist der Masseanteil des Ölpresskuchens höher als der des Öls, doch der spezifische Energiegehalt des Öles liegt deutlich über dem des Ölpresskuchens. Daher verkehrt sich das Verhältnis beider Erzeugnisse bei der Betrachtung der Energieinhalte im Vergleich zur Betrachtung der Massen. Die hier angegebenen Verluste sind jedoch in der Realität geringer und hier nur zwecks besserer Illustration des Unterschieds zwischen Wirkungsgraden und Allokationsfaktoren unrealistisch hoch angesetzt.

Tabelle 1: Allokationsfaktoren und Prozesswirkungsgrade bei der Ölpressung

Erzeugnis	Öl	Ölpresskuchen	Verluste
$\eta_{m';i}$	55%	35%	10%
$\sigma_{m';i}$	1	1	0
$\alpha_{m';i}$	61%	39%	0%

Im gezeigten Beispiel ist das Haupterzeugnis der vorangehenden Prozessstufe $m'-1$ die an die Ölpresse gelieferte Ölsaate. Das Haupterzeugnis der Ölpressung ist das rohe Öl. Ihm wie einem Nebenerzeugnis, nämlich dem Ölpresskuchen, werden THGE zugeordnet, den anderen, hier nur Verluste, nicht.

3.5 Berechnung der Treibhausgasemissionen

3.5.1 Absolute und relative THGE

In der Anbau- und auf jeder Prozessstufe entstehen THGE oder werden eingespart. Diese THGE entstehen direkt, z.B. bei der Verbrennung von Treibstoffen in landwirtschaftlichen Maschinen, oder indirekt, z.B. bei der Herstellung von Stickstoffdünger. Die gesamten in einer Prozessstufe m' entstehenden absoluten THGE seien mit $\epsilon_{m';\text{tot}}$ bezeichnet. Dabei sind die drei zu berücksichtigenden THG CO_2 , N_2O und CH_4 gemäß ihrem THG-Potenzial gewichtet und aufsummiert. Die physikalische Dimension von $\epsilon_{m';\text{tot}}$ ist dann $\text{g CO}_2\text{-eq}$.

Bei der Berechnung der relativen THGE ist die Anbaustufe von den Prozessstufen zu unterscheiden. Es seien zunächst die Prozessstufen betrachtet ($1 \leq m' \leq m$). Werden die absoluten THGE auf den absoluten Prozessstrominput der Prozessstufe m' bezogen, d.h. durch den absoluten Ertrag der Vorstufe $Y_{m'-1;1}$ dividiert, erhält man die relativen, genauer gesagt die vorstufenbezogenen THGE. Diese seien mit $\epsilon_{m';tot}$ bezeichnet. Die physikalische Dimension ist $g \text{ CO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}$, wobei der Nenner durch Indices zu präzisieren ist, die deutlich machen, auf wessen Energiegehalt sich die jeweiligen THGE-Anteile beziehen. Z.B.: $g \text{ CO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}_{\text{Saat_trans}}$, $g \text{ CO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}_{\text{Öl_roh}}$, $g \text{ CO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}_{\text{Öl_im_Tank}}$, etc.

Bei der Anbaustufe ($m'=0$) gibt es kein Vorerzeugnis. Hier werden die absoluten THGE auf die Anbauflächenjahre bezogen, also durch $ha \cdot yr$ geteilt. Die physikalische Dimension von $\epsilon_{0;tot}$ ist folglich $g \text{ CO}_{2\text{-eq}}/(ha \cdot yr)$, oder äquivalent ausgedrückt $g \text{ CO}_{2\text{-eq}}/ha/yr$. Die mathematischen Ausdrücke für diese Definitionen sind:

$$(13) \quad \epsilon_{m';tot} := \frac{\epsilon_{m';tot}}{Q_{m'-1;1}}, \text{ falls } 0 < m' \leq m \text{ und}$$

$$(14) \quad \epsilon_{0;tot} := \frac{\epsilon_{0;tot}}{A}$$

Genauso wie bei der Entwicklung von Rechenvorschriften für Biokraftstoffpfade keine Anbauflächenjahre A und auch keine absoluten Erträge, $Y_{m';i}$, sondern nur relative Erträge, $y_{m';i}$, auftauchen, werden auch keine absoluten THGE, $\epsilon_{m';tot}$, sondern nur relative THGE, $\epsilon_{m';tot}$, aus den spezifischen Hilfsmiteleinheiten mittels spezifischer Emissionskennzahlen berechnet. Dabei werden die in der Anbau- oder der jeweiligen Prozessstufe benötigten Hilfsmittel, deren Einsatz mit THGE verbunden ist, mit Kennzahlen verknüpft, welche die THGE je Einheit des jeweiligen Hilfsmittels angeben. Die Hilfsmittel selbst werden als relative Größen, bezogen auf den Energiegehalt des Zwischenerzeugnisses der Anbau- bzw. Prozessstufe angegeben.

Es seien die relativen Hilfsmittelmengen der Anbau- oder Prozessstufe m' mit $I_{m';k}$ bezeichnet. Dabei läuft der Index i von 1 bis $p_{m'}$ wobei $p_{m'}$ die Anzahl der in Stufe m' eingesetzten Hilfsmittel bezeichne. Es seien ferner die Kennzahlen für die THGE je Hilfsmiteleinheit mit y_k bezeichnet. Notiert man die Größen $I_{m';k}$ und $y_{m';k}$ als Komponenten von Vektoren eines $p_{m'}$ -dimensionalen Vektorraums über der Menge der reellen Zahlen ($I_{m'} \in \mathbb{R}^{p_{m'}}$, $y_{m'} \in \mathbb{R}^{p_{m'}}$), lässt sich die Berechnung der relativen THGE $\epsilon_{m';tot}$ kompakt als Skalarproduktbildung notieren:

$$(15) \quad \epsilon_{m';tot} = (y_{m';k}) \cdot (I_{m';k}) = \begin{pmatrix} y_{m';1} \\ \vdots \\ y_{m';p_{m'}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{m';1} \\ \vdots \\ I_{m';p_{m'}} \end{pmatrix}$$

Zu beachten ist hier, dass der Index m' den jeweiligen Vektor als Ganzes, der Index k jedoch die einzelnen Komponenten indiziert. Es handelt sich um zwei von ihrer Natur her verschiedene Indices, die darum im Unterschied zu den Doppelindices einer Matrix nicht durch Kommata, sondern durch Semikola voneinander getrennt werden.

Die Kennzahlen y_k sind üblicherweise nicht als solche verfügbar, sondern müssen selbst erst berechnet werden. Ein wesentlicher Schritt dabei ist die Gewichtung der unterschiedlichen THGE. Diese kann kompakt als Matrizenmultiplikation notiert werden:

$$(16) \quad (\mathbf{y}_{m';j})^T = \mathbf{w}^T \times (\mathbf{g}_{m';j,k})$$

$$= \left(1 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{g CO}_2} \quad 298 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{g N}_2\text{O}} \quad 25 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{g CH}_4} \right) \times \begin{pmatrix} \mathbf{g}_{m';1,1} & \cdots & \mathbf{g}_{m';1,p_{m'}} \\ \mathbf{g}_{m';2,1} & \cdots & \mathbf{g}_{m';2,p_{m'}} \\ \mathbf{g}_{m';3,1} & \cdots & \mathbf{g}_{m';3,p_{m'}} \end{pmatrix}$$

mit dem Gewichtungsvektor $\mathbf{w} \in \mathbf{R}^3$ und der Kennzahlenmatrix $(\mathbf{g}_{m';j,k}) \in \mathbf{R}^3 \times \mathbf{R}^{p_{m'}}$. Für die vorstufenbezogenen THGE gilt dann folgende Rechenregel:

$$(17) \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{m';\text{tot}} = \mathbf{w}^T \times (\mathbf{g}_{m';j,k}) \times (\mathbf{I}_{m';k})$$

Auf Grund des Assoziativgesetzes der Matrizenmultiplikation ist es zulässig, wahlweise zuerst die linke Matrizenmultiplikation auszuführen und damit die Kennziffern $\mathbf{y}_{m';k}$ gemäß (16) zu berechnen, oder zuerst die rechte und das Produkt $(\mathbf{g}_{m';j,k}) \times (\mathbf{I}_{m';k})$ zu berechnen.

Der zweite Weg ergibt als Zwischenergebnis einen dreidimensionalen Vektor dessen Komponenten die vorstufenbezogenen THGE für jedes einzelne THG, CO₂, N₂O und CH₄, sind. Mithin enthält die Matrix $(\mathbf{g}_{m';j,k})$ die Kennziffern für die THGE der einzelnen THG je Einheit des Hilfsmitelesinsatzes in der ersten Zeile für CO₂, in der zweiten Zeile für N₂O und in der dritten für CH₄. Die physikalische Dimension der Matrizenelemente ist üblicherweise g THG/kg Stoffinput (z.B. g N₂O/ kg N-Dünger) oder g THG/MJ Betriebsenergie).

Bei den Gewichtungsfaktoren, d.h. den Komponenten von $\mathbf{w}$, werden wie oben begründet abweichend von KQR Annex IV.C, Punkt 5 die die vom BioGrace Projektkonsortium bevorzugten Werte, 1 g CO₂-eq/g CO₂, 298 g CO₂-eq/g N₂O und 25 g CO₂-eq/g CH₄, genommen, die auch in die Berechnung der Standardemissionswerte in KQR Annex IV.A eingeflossen sind.

Die Elemente $\mathbf{g}_{m';j,k}$ können selbst wieder Gegenstand einer komplexeren Berechnung sein, je nachdem, um welches Hilfsmittel bei der Herstellung des Biokraftstoffs es sich genau handelt, und wie es in den Herstellungsprozess einfließt.

Es seien z.B. die drei Elemente $\mathbf{g}_{0;1,2}$, $\mathbf{g}_{0;2,2}$ und $\mathbf{g}_{0;3,2}$ die Kennwerte der THGE, die durch die Herstellung von Stickstoffdünger emittiert werden. Der Kennwert $\mathbf{y}_{0;2}$ für die aggregierten THGE der Stickstoffdüngerherstellung für die Anbaustufe berechnet sich dann mit den Standard THGE-Kennwerten für Stickstoffdüngerherstellung aus dem BioGrace GHG Tool vs4-public folgendermaßen:

$$(18) \quad \mathbf{y}_{0;2} = \begin{pmatrix} 1 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{g CO}_2} \\ 298 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{g N}_2\text{O}} \\ 25 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{g CH}_4} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2827 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kg N}} \\ 9,64 \frac{\text{g N}_2\text{O}}{\text{kg N}} \\ 8,68 \frac{\text{g CH}_4}{\text{kg N}} \end{pmatrix} = 5.917 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{kg N}}$$

Eine weitere Multiplikation mit der Stickstoffdüngergabe je Anbauflächenjahr ergibt dann den Beitrag der Stickstoffdüngerherstellung zu den THGE des Biokraftstoffs. Sei die Stickstoffdüngung 137,43 kg N/ha/yr (der Standardwert für Rapsöl nach dem BioGrace GHG Tool vs4-public), dann beträgt dieser THGE-Beitrag:

$$(19) \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{0;\text{N-Düngung}} = 5917 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{kg N}} \cdot 137,43 \frac{\text{kg N}}{\text{ha-yr}} = 813.200 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{ha-yr}}$$

Die THGE der Stickstoffdüngerherstellung sind mit einem Anteil von 32% der dem Rapsöl zuzuordnenden THGE einer der größten Beiträge zur THGE-Bilanz von Rapsöl, wie im nächsten Kapitel gezeigt werden wird. Sie sind nicht zu verwechseln mit den 37% der THGE beitragenden N₂O-Feldemissionen, die auch durch den Stickstoffdüngereinsatz beeinflusst werden.

Die für die letztlich zu berechnenden THGE gewählten Ausdrücke müssen der Forderung von KQR Annex IV.C, Punkt 2 genügen, sich auf den unteren Heizwert des am Ende der Prozesskette in den Tank gefüllten Treibstoffs zu beziehen. Die nach (13) und (14) definierten Größen $\epsilon_{m';tot}$ haben diese Eigenschaft nicht. Es sind zwar relative, aber auf das Vorerzeugnis der jeweiligen Prozessstufe und nicht auf das Enderzeugnis der gesamten Prozesskette bezogene THGE. Darum sind als weitere Größen noch die Enderzeugnis-spezifischen THGE zu definieren. Deren in der Prozessstufe m' erzeugter Teil sei mit $e_{m';tot}$ bezeichnet. Ihre physikalische Dimension ist g CO_{2-eq}/MJ_{allokationsfähige Erzeugnisse der Stufe m'} , und zwar unabhängig davon ob $m'=0$ oder $1 \leq m' \leq m$ ist, wie die folgenden Zeilen zeigen.

Für eine Prozessstufe m' mit $1 \leq m' \leq m$ sei nun:

$$(20) \quad e_{m';tot} := \frac{\epsilon_{m';tot}}{Y_{m;1}} = \frac{\epsilon_{m';tot}/Y_{m'-1;1}}{Y_{m;1}/Y_{m'-1;1}} = \frac{\epsilon_{m';tot}}{y_{m;1}/y_{m'-1;1}} = \frac{\epsilon_{m';tot}}{\prod_{l=m'}^m \eta_{l;1}}$$

Die erste Umwandlung ist der mathematische Ausdruck der Definition von $e_{m';tot}$. Sie genügt der Anforderung, die sich aus KQR Annex IV.C, Punkt 2 ergibt: Die absoluten THGE werden auf den Energiegehalt des Biokraftstoffs bezogen. Die zweite Umwandlung ist eine triviale Bruchkürzung. Die dritte folgt aus (1) und (13), die vierte aus wiederholter Anwendung von (2).

Für die Anbaustufe $m'=0$ sei:

$$(21) \quad e_{0,tot} := \frac{\epsilon_{0,tot}}{Y_{m;1}} = \frac{\epsilon_{0,tot}/A}{Y_{m;1}/A} = \frac{\epsilon_{0,tot}}{y_{m;1}} = \frac{\epsilon_{0,tot}}{y_{0;1} \cdot \prod_{l=1}^m \eta_{l;1}}$$

Analog zu (20) ist die erste Umwandlung der mathematische Ausdruck der Definition von $e_{0,tot}$. Auch sie genügt der Anforderung, die sich aus KQR Annex IV.C, Punkt 2 ergibt. Die zweite Umwandlung ist eine Bruchkürzung. Die dritte Umwandlung folgt aus (1) und (14), die vierte aus wiederholter Anwendung von (2).

Das Produkt im Nenner des Ausdrucks ganz rechts in Gl. (21), $y_{0;1} \cdot \prod_{l=1}^m \eta_{l;1}$, hat die Dimension Energie (des Biokraftstoffs) je Anbauflächenjahr und kann als Gesamteffizienz der gesamten Herstellungskette verstanden werden.

3.5.2 Allokation der THGE

Die gemäß (20) und (21) für die Anbau- und jede Prozessstufe berechneten THGE $e_{m';tot}$ müssen nun nach KQR Annex IV.C, Punkt 17-18 noch auf die allokatonsfähigen Erzeugnisse aufgeteilt werden. Alle in der hier vorgenommenen Modellbildung betrachteten THGE-Komponenten gehören zu den „für die Zwecke der Berechnung nach Nummer 17 ... aufzuteilenden Emissionen $e_{ec} + e_i$ + die Anteile von e_p , e_{td} , und e_{ee} , die bis einschließlich zu dem Verfahrensschritt anfallen, bei dem ein Nebenerzeugnis erzeugt wird“ wie in KQR Annex IV.C, Punkt 18 formuliert ist.

Zur Entwicklung einer Rechenvorschrift, die den Bestimmungen von KQR Annex IV.C, Punkt 17 und 18 entspricht, sei ein Herstellungsprozess betrachtet, bei dem auf l verschiedenen Stufen ein oder mehrere allokatonsfähige Nebenerzeugnisse hergestellt werden. Diese Stufen seien mit $m_1, \dots, m_l$

indiziert. Es sei $m_l < m$, d.h. die letzte Stufe mit allokatonsfähigen Nebenerzeugnissen liege vor der letzten Prozessstufe. Dies entspricht der Realität, da die letzte Stufe gemeinhin die Abfüllung des Biokraftstoffs in den Tank ist, bei der zwar Verluste, aber keine allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse entstehen. Dasselbe gilt für die unmittelbar davor gelagerten Vertriebs- und Lagerungsstufen.

Alle in einer m_l nachgelagerten Prozessstufe m' , also mit $m_l+1 \leq m' \leq m$, entstehenden THGE werden dann ausschließlich dem Biokraftstoff zugeordnet und die Bestimmungen von KQR Annex IV.C, Punkt 17 und 18 greifen nicht. Es gilt:

$$(22) \quad e_{m';1} = e_{m';tot}$$

Für die letzte Prozessstufe, bei der allokatonsfähige Nebenerzeugnisse hergestellt werden, m_l , sowie auf allen davor liegenden Stufen, die nach der vorletzten Prozessstufe kommen, in der allokatonsfähige Nebenerzeugnisse hergestellt werden, m_{l-1} , also für alle Prozessstufen m' mit $m_{l-1}+1 \leq m' \leq m_l$ gilt:

$$(23) \quad e_{m';i} = e_{m';tot} \cdot \alpha_{m_l;i}$$

Bei jeder dieser Prozessstufen m' mit $m_{l-1}+1 \leq m' \leq m_l$ erfolgt also eine Aufteilung der dort entstehenden THGE auf $1+r_l$ Teile, wenn r_l die Anzahl der in der Stufe m_l erzeugten allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse ist. Davon entfallen r_l Teile auf die allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse der Stufe m_l und einer auf den Biokraftstoff.

Es ist mit Hilfe der Gleichungen (2), (3) und (9), leicht ersichtlich, dass innerhalb dieser Prozessstufen jeder THGE-Anteil $e_{m';i}$ zum Anteil $e_{m';i'}$ im Verhältnis der Energiegehalte der entsprechenden Erzeugnisse steht, wie in KQR Annex IV.C, Punkt 17 gefordert, falls die Erzeugnisse i und i' allokatonsfähig und damit $\alpha_{m_l;i} \neq 0$ und $\alpha_{m_l;i'} \neq 0$ sind:

$$(24) \quad \frac{e_{m';i}}{e_{m';i'}} = \frac{\alpha_{m_l;i}}{\alpha_{m_l;i'}} = \frac{Y_{m_l;i}}{Y_{m_l;i'}}, \text{ für alle } m' \text{ mit } m_{l-1}+1 \leq m' \leq m_l$$

Gleichung (23) spiegelt ferner folgende Passage von KQR Annex IV.C, Punkt 18 wieder: „... sind die aufzuteilenden Emissionen ..., die bis einschließlich zu dem Verfahrensschritt (hier: m' von $m_{l-1}+1$ bis einschließlich m_l) anfallen, bei dem ein Nebenerzeugnis erzeugt wird ...“.

Bei der Aufteilung der THGE aus Prozessstufen bis zur Stufe m_{l-1} ($0 \leq m' \leq m_{l-1}$), greift dann zusätzlich die folgende Passage aus KQR Annex IV.C, Punkt 18: „Wurden in einem früheren Verfahrensschritt Emissionen Nebenerzeugnissen zugewiesen, so wird für diesen Zweck anstelle der Gesamtemissionen der Bruchteil dieser Emissionen verwendet, der im letzten Verfahrensschritt dem Zwischenerzeugnis zugeordnet wird.“

Betrachtet man nun zunächst nur die Prozessstufen m' mit $m_{l-1}+1 < m' < m_l$, dann bezieht sich hier „frühere Prozessstufe“ nur auf m_{l-1} , das Wort „früher“ ist zu verstehen als „vor der Prozessstufe m_l liegend“, dem letzten Verfahrensschritt, bei dem eine Aufteilung der THGE stattfindet. Der Passus „... anstelle der Gesamtemissionen ...“ bedeutet hier anstelle von $e_{m_{l-1};tot}$. Der statt $e_{m_{l-1};tot}$ in Stufe m_l weiter aufzuteilende zu verwendende Bruchteil der THGE von Stufe m_{l-1} ist $e_{m_{l-1};tot} \cdot \alpha_{m_{l-1};1}$. Dieser Bruchteil erfüllt, wie analog zu (24) gezeigt werden kann, KQR Annex IV.C, Punkt 17. Der letztendlich dann dem Biotreibstoff zuzuordnende Teil der THGE aus Stufe m_{l-1} ist:

$$(25) \quad e_{m_{l-1};1} = e_{m_{l-1};tot} \cdot \alpha_{m_{l-1};1} \cdot \alpha_{m_l;1}$$

Genauso werden die THGE aus den davorliegenden Stufen aufgeteilt, die nach der drittletzten Prozessstufe kommen, in der allokatonsfähige Nebenerzeugnisse hergestellt werden:

$$(26) \quad e_{m';1} = e_{m';tot} \cdot \alpha_{m_{l-1};1} \cdot \alpha_{m_l;1}, \text{ für alle } m' \text{ mit } m_{l-2}+1 \leq m' \leq m_{l-1}$$

Bei jeder dieser Prozessstufen m' mit $m_{l-2}+1 \leq m' \leq m_{l-1}$ erfolgt eine Aufteilung der dort entstehenden THGE auf $1+r_{l-1}+r_l$ Teile, wenn r_{l-1} die Anzahl der in der Stufe m_{l-1} erzeugten allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse ist. Von diesen $1+r_{l-1}+r_l$ Teilen entfallen r_l Teile auf die allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse der Stufe m_l , r_{l-1} Teile auf die allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse der Stufe m_{l-1} und einer auf den Biokraftstoff.

Eine wiederholte Anwendung dieser Überlegungen führt dann zu folgender Allokationsformel für die THGE einer beliebigen Stufe m' :

$$(27) \quad e_{m';1} = e_{m';tot} \cdot \alpha_{m_1;1} \cdot \alpha_{m_2;1} \cdot \dots \cdot \alpha_{m_{l-1};1} \cdot \alpha_{m_l;1} = e_{m';tot} \cdot \prod_{i=m'}^m \alpha_{i;1}$$

Dabei folgt die erste Umwandlung aus der wiederholten Anwendung der bis zur Gleichung (26) angestellten Überlegungen. Für die zweite Umwandlung ist eine weitere Überlegung notwendig: Das Produkt im mittleren Term enthält l Allokationsfaktoren. Diese sind alle kleiner als eins, da es die Allokationsfaktoren für den Biotreibstoff sind, die zu den Stufen gehören, in denen auch allokatonsfähige Nebenerzeugnisse hergestellt werden. Das Produkt im rechten Term der Gleichungskette (27) enthält dagegen $m-m'+1$ Allokationsfaktoren, wovon die l Allokationsfaktoren mit Werten kleiner eins nur eine Teilmenge bilden. Hinzu kommen noch die Faktoren, die zu Stufen von m' bis einschließlich m gehören, die von allen m_i mit $1 \leq i \leq l$ verschieden sind, also zu solchen Stufen, in denen keine allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse hergestellt werden. Diese hinzukommenden Allokationsfaktoren sind jedoch alle gleich eins (die THGE der betreffenden Stufen werden ausschließlich dem Biokraftstoff zugeordnet). Multiplikationen mit eins verändern aber den Wert eines Terms nicht; sie dienen hier nur der kompakteren Darstellung. Darum ist auch die zweite Umwandlung in (27) korrekt.

Bei einer beliebigen Prozessstufe m' erfolgt eine Aufteilung der dort entstehenden THGE auf $R_{m'}$ Teile, wobei gilt:

$$(28) \quad R_{m'} = 1 + \sum_{i=1}^l r_i, \text{ wenn } 0 \leq m' \leq m_1$$

$$(29) \quad R_{m'} = 1 + \sum_{i=j+1}^l r_i, \text{ wenn } m_j+1 \leq m' \leq m_l$$

$$(30) \quad R_{m'} = 1, \text{ wenn } m_l+1 \leq m' \leq m$$

D.h. bis einschließlich zur ersten Prozessstufe, bei der allokatonsfähige Nebenerzeugnisse entstehen, werden die bei diesen Prozessstufen entstehenden THGE auf den Biokraftstoff und alle allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse der gesamten Prozesskette aufgeteilt (28).

Bei einer späteren Prozessstufe werden die THGE auf den Biokraftstoff und alle allokatonsfähigen Nebenerzeugnisse der noch folgenden Prozessstufen aufgeteilt (29).

Folgt keine Prozessstufe mehr, bei der allokatonsfähige Nebenerzeugnisse hergestellt werden, werden die THGE nur dem Biokraftstoff zugeordnet (30).

Die gesamten dem Biotreibstoff zuzuordnenden THGE sind dann die Summe der ihm in den einzelnen Stufen zugeordneten Teile der THGE:

$$(31) \quad E_B = \sum_{m'=0}^m e_{m';1} = \sum_{m'=0}^m [e_{m';\text{tot}} \cdot \prod_{i=m'}^m \alpha_{i;1}]$$

Der Vergleich dieser THGE mit den THGE bei der Herstellung und Nutzung von Dieselmkraftstoff gemäß KQR Annex IV.C, Punkt 4 ergibt dann die relative THGE-Minderung, genannt Einsparung (von THGE):

$$(32) \quad \text{Einsparung} = (E_F - E_B)/E_F$$

3.6 Einsatz des Biokraftstoffs als Hilfsmittel bei seiner eigenen Herstellung

Einer gesonderten Betrachtung bedarf die Situation, dass der erzeugte Biokraftstoff bei der Herstellung des Biokraftstoffs selbst zum Einsatz kommt. Solch eine Situation liegt z.B. vor, wenn Pflanzenöl als Treibstoff der landwirtschaftlichen Maschinen verwendet wird, die bei der Herstellung des Pflanzenöls selbst zum Einsatz kommen, und dort Diesel ersetzt. Dann ist bei der Berechnung der THGE des Biokraftstoffs im Grunde bereits die Kenntnis der THGE des Biokraftstoffs erforderlich, d.h. die Berechnung setzt die Kenntnis des Ergebnisses voraus. Diese Situation lässt sich jedoch mathematisch exakt behandeln. Das sei hier in etwas verallgemeinerter Form durchgeführt.

Es sei zunächst die Situation betrachtet, in der ein Hilfsmittel für die Herstellung des Biokraftstoffs, welches grundsätzlich durch diesen ersetzt werden kann, noch nicht durch diesen ersetzt wird. Da der durch einen Hilfsmiteleinsatz erzeugte Teil der THGE eine lineare Funktion der Hilfsmittelmenge sind, lassen sich die THGE als affine Funktion des betreffenden Hilfsmittels beschreiben:

$$(33) \quad E_{B,1} = a + b \cdot I$$

Dabei bezeichnet $E_{B,1}$ die dem Biokraftstoff zuzuordnenden THGE, wenn bei der Herstellung das ersetzbare Hilfsmittel eingesetzt wird. Die Konstante a bezeichnet dann alle THGE, die nicht vom Einsatz dieses Hilfsmittels abhängen. Sie hat die Dimension THGE/Energie des Biokraftstoffs und wird üblicherweise in der Einheit $\text{g CO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}$ angegeben. Die Größe I bezeichnet die spezifischen THGE des besagten Hilfsmittels. Da es durch den Biokraftstoff ersetzt werden kann, muss es selbst ein Kraftstoff sein. Damit hat auch I die Dimension THGE/Energie und kann in der Einheit $\text{g CO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}$ angegeben werden. Der Proportionalitätsfaktor b ist dann eine einfache dimensionslose Zahl.

Es sei nun angenommen, dass der Biokraftstoff das besagte Hilfsmittel ohne sonstige Änderungen ersetzen kann, wenn der eingesetzte Energiegehalt der gleiche ist. Es sei ferner angenommen, dass der Einsatz des Biokraftstoffes weniger THGE verursacht als der des besagten Hilfsmittels; andernfalls wäre der Ersatz des Hilfsmittels durch den Biokraftstoff sinnlos und keiner näheren Untersuchung wert.

Nimmt man nun Biokraftstoff, der mit dem Hilfsmittel hergestellt wurde, und setzt diesen in der nächsten Herstellungsrunde ein, werden weniger THGE erzeugt, als in der vorangegangenen Herstellungsrunde. Die THGE betragen dann nur noch:

$$(34) \quad E_{B,2} = a + b \cdot E_{B,1} = a + a \cdot b + I \cdot b^2$$

Setzt man dies fort, sinken die THGE mit jeder „Generation“ der Biokraftstoffherstellung. Für den Biokraftstoff der n-ten Generation betragen die ihm zuzuordnenden THGE:

$$(35) \quad E_{B,n} = a \cdot \sum_{i=0}^{n-1} b^i + I \cdot b^n$$

Gleichung (35) kann mit vollständiger Induktion bewiesen werden:

1. $n = 1$; dann geht Gl. (35) in Gl. (33) über.
2. Gl. (35) gelte für ein bestimmtes $n \geq 1$. Dann folgt für $n+1$:

$$E_{B,n+1} = a + b \cdot E_{B,n} = a + a \cdot \sum_{i=0}^n b^i + I \cdot b^{n+1} = a \cdot \sum_{i=0}^n b^i + I \cdot b^{n+1}$$

D.h. Gl. (35) gilt für $n+1$, wenn sie für ein beliebiges n gilt.

3. Folglich gilt Gl. (35) für alle $n \geq 1$. Quod erat demonstrandum!

Intuition legt nahe, dass für alle Biokraftstoffe aus einer beliebigen Herstellungsgeneration $n > 1$ die THGE im Intervall $[a, a+b \cdot I]$ liegen müssen:

$$(36) \quad a < E_{B,n} < a + b \cdot I$$

Diese Ungleichungskette besagt, dass die THGE eines Biokraftstoffs der n-ten Generation mit $n > 1$ höher sein müssen, als wenn kein Hilfsmittel und nicht ersatzweise Biotreibstoff eingesetzt wird, und niedriger als beim ausschließlichen Einsatz des Hilfsmittels. Dies ist nun noch zu beweisen und die Folge $E_{B,n}$ näher zu bestimmen.

Wie folgende Ungleichungskette zeigt sinken von Herstellungsgeneration zu Herstellungsgeneration die dem Biotreibstoff zuzuordnenden THGE:

$$(37) \quad E_{B,n+1} - E_{B,n} = a \cdot [\sum_{i=0}^n b^i - \sum_{i=0}^{n-1} b^i] + I \cdot [b^{n+1} - b^n] = [E_{B,1} - I] \cdot b^n$$

Gl. (37) folgt aus Gl. (35) mit Hilfe von Gl. (33). Aus der Voraussetzung, dass der Ersatz des Hilfsmittels durch den Biokraftstoff sinnvoll ist folgt, dass $E_{B,1}$ kleiner als I ist. Folglich ist der Ausdruck in Gl. (37) negativ und die Folge $E_{B,n}$ streng monoton fallend. Die Differenz $E_{B,n+a} - E_{B,n}$ zweier benachbarter Folgenglieder konvergiert gegen Null, wenn $b < 1$ ist. Letztes folgt aber auch aus der besagten Voraussetzung:

$$(38) \quad b = \frac{E_{B,1} - a}{I} < \frac{E_{B,1}}{I} < 1$$

Die erste Umwandlung in Gl. (38) folgt durch Umwandlung von Gl. (33), die zweite daraus, dass a und I positive Größen sind, und die dritte aus der besagten Voraussetzung, dass der Einsatz des Biokraftstoffs statt des besagten Hilfsmittels sinnvoll ist, d.h. weniger THGE verursacht. Dies impliziert, wie gesagt, dass $E_{B,1}$ kleiner als I , der Quotient beider in (38) mithin kleiner als eins ist.

Daraus folgt, dass b^n mit wachsendem n gegen Null konvergiert. Aus Gl. (37) folgt dann mit dem Cauchyschen Konvergenzkriterium, dass dann auch $E_{B,n}$ selbst gegen einen (noch zu bestimmenden) Grenzwert konvergiert.

Es ist nun wenig zweckmäßig, verschiedene Herstellungsgenerationen von Biokraftstoffen der gleichen Art zu unterscheiden und diesen verschiedene THGE-Einsparungen zuzuordnen. Interessant ist dagegen der Grenzwert der Folge $E_{B,n}$, d.h. die Betrachtung, auf welchen Wert die THGE sinken, wenn in einem geschlossenen Kreisprozess bei der Herstellung des Biokraftstoffs immer ein Teil desselben als Hilfsmittel eingesetzt wird. Dieser Grenzwert ist:

$$(39) \quad E_{B,\infty} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[a \cdot \sum_{i=0}^{n-1} b^i + I \cdot b^n \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[a \cdot \frac{1-b^n}{1-b} + I \cdot b^n \right] = \frac{a}{1-b}$$

Bei der zweiten Umwandlung wurde die Summenformel für die geometrische Reihe angewandt. Den Ausdruck rechts in Gl. (39) erhält man auch unmittelbar aus Gl. (33), wenn dort statt $E_{B,1}$ und I jeweils $E_{B,\infty}$ eingesetzt und die Gl. (33) nach $E_{B,\infty}$ aufgelöst wird.

4. Modellierung der Klimabilanz von reinem Rapsöl als Treibstoff

4.1 Parameterwerte und Ergebnisse nach dem BioGrace GHG Tool vs4-public

Die Modellierung der Klimabilanz von reinem Rapsöl als Treibstoff dient zunächst dem Test des hier vorgestellten mathematischen Modells. Dazu wird überprüft, ob die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public berechneten Ergebnisse reproduziert werden, wenn die gleichen Hilfsmittelmengen für den Herstellungsprozess und die gleichen Kennziffern wie bei diesem verwandt werden. Damit wird nachgewiesen, dass beide Rechenwege äquivalent sind. Als zweites dient die Untersuchung des Rapsölpfades der Überprüfung des BioGrace GHG Tools vs4-public. Als drittes wird damit ausgeleuchtet, welche Optimierungsmöglichkeiten der Rapsölpfad bietet.

Bei dem Standardprozess zur Herstellung von reinem Rapsöltreibstoff, der der KQR Annex IV.A zugrunde liegt, liegen die Anbau- und sechs Prozessstufen vor, die in Tabelle 2 gezeigt sind.

Tabelle 2: Prozessstufen und ihre Effizienzen bei der Herstellung reinen Rapsöltreibstoffs (BioGrace-Werte)

Prozess	Anbau	Rapssaattrocknung	Rapssaattransport	Rapspressung	Rapsölreinigung	Rapsöltransport	Rapsölabfüllung	Gesamtkette
Prozessstufe	0	1	2	3	4	5	6	0-6
$y_{0,1}$ bzw. $\eta_{m';1}$	73.975,40	1,0000	0,9901	0,6125	0,9600	1,0000	1,0000	43.067,02
Einheit	MJ _{Saat f} / ha/yr	MJ _{Saat tr} / MJ _{Saat f}	MJ _{Saat trans} / MJ _{Saat tr}	MJ _{Öl roh} / MJ _{Saat trans}	MJ _{Öl rein} / MJ _{Öl roh}	MJ _{Öl trans} / MJ _{Öl rein}	MJ _{Öl im Tank} / MJ _{trans}	MJ _{Öl im Tank} / ha/yr

Beim Standard-Rapsölherstellungspfad gibt es ein einziges allokatonsfähiges Nebenerzeugnis, den Rapsölkuchen. Rapsstroh ist durch KQR Annex IV.C, Punkt 18 explizit als allokatonsfähiges Nebenerzeugnis ausgeschlossen. Darum wird auch nur eine einzige Allokation von THGE vorgenommen und eine einzige Prozessstufe, die der Rapssaatpressung, hat zwei Allokationsfaktoren die weder eins noch null sind. Der für das Rapsöl relevante Allokationsfaktor ist $\alpha_{3,1}$, $\alpha_{3,2}$ ist der für den Rapsölkuchen. Dieser wird in der Berechnung der THGE nicht weiter benötigt, jener wirkt sich auf die Verteilung aller THGE der Prozessstufen 0 bis 3 aus. Tabelle 3 zeigt die resultierenden Werte nach dem BioGrace GHG Tool vs4-public mit den in diesem Artikel definierten Bezeichnungen.

Tabelle 3: Prozessstufen und THGE-Allokation bei der Herstellung reinen Rapsöltreibstoffs (BioGrace-Werte)

Prozess	Anbau	Rapssaattrocknung	Rapssaattransport	Rapspressung	Rapsölreinigung	Rapsöltransport	Rapsölabfüllung	Gesamtkette	Einheit
Prozessstufe	0	1	2	3	4	5	6	0-6	-
$\alpha_{m';1}$	1,0000	1,0000	1,0000	0,6125	1,0000	1,0000	1,0000	-	-
$e_{m';tot}$ (BioGrace)	48,314	0,714	0,294	6,488	1,058	0,369	0,441	57,677	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}
$e_{m';1}$ (BioGrace)	29,592	0,437	0,180	3,974	1,058	0,369	0,441	36,051	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}

Mit Gl. (32) ergibt sich unter Verwendung der Parameter und Ergebnisse des BioGrace GHG Tools vs4-public die folgende THGE-Minderung:

$$(40) \quad \text{Einsparung} = \frac{(83,8 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ Diesel im Tank}} - 36,05 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ Öl im Tank}})}{83,8 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ Diesel im Tank}}} = 56,98\%$$

Das BioGrace GHG Tool vs4-public verwendet hier als Referenzwert für den fossilen Vergleichskraftstoff den in KQR Annex IV.C, Punkt 19 angegebenen Wert. Anzumerken ist, dass für die THGE-Einsparung ein Wert knapp unter 57% errechnet wird, der erst durch Runden auf die erste Stelle hinter dem Komma zu 57,0% bzw. durch Runden auf die erste Stelle vor dem Komma zu den angegebenen 57% wird. Dies steht im Einklang mit KQR Annex IV.A, wo der Standardwert für die THGE-Einsparung durch Rapsöl als Treibstoff auch ohne Nachkommastellen mit 57% angegeben wird.

4.2 Anbaustufe bei reinem Rapsöltreibstoff

Die Komponenten des Hilfsmittelvektors $\mathbf{l}_0$ zeigt Tabelle 4. Tabelle 5 zeigt die Elemente der Kennzahlenmatrix $\mathbf{G}_0$. Die physikalischen Einheiten der Elemente einer Spalte unterscheiden sich nur durch das THG, auf dessen Masse der Zähler Bezug nimmt. In Tabelle 6 sind die Gewichtungsfaktoren der berücksichtigten THG aufgeführt.

Tabelle 4: Komponenten des Hilfsmittelvektors $\mathbf{l}_0$

$\mathbf{l}_0$	Hilfsmittel	Menge	Einheit
$\mathbf{l}_{0,1}$	Diesel	2.963,00	MJ Diesel/ha/yr
$\mathbf{l}_{0,2}$	N-Dünger (kg N)	137,43	kg N/ha/yr
$\mathbf{l}_{0,3}$	CaO-Dünger (kg CaO)	19,00	kg CaO/ha/yr
$\mathbf{l}_{0,4}$	K ₂ O-Dünger (kg K ₂ O)	49,46	kg K ₂ O/ha/yr
$\mathbf{l}_{0,5}$	P ₂ O ₅ -Dünger (kg P ₂ O ₅)	33,67	kg P ₂ O ₅ /ha/yr
$\mathbf{l}_{0,6}$	Pestizide	1,23	kg Pestizide/ha/yr
$\mathbf{l}_{0,7}$	Rapssaat	6,00	kg Rapssaat/ha/yr
$\mathbf{l}_{0,8}$	N ₂ O Feldemissionen	3.102,86	g N ₂ O/ha/yr

Tabelle 5: Komponenten der Matrix $\mathbf{G}_0$

$\mathbf{G}_0$	$g_{0,j,1}$	$g_{0,j,2}$	$g_{0,j,3}$	$g_{0,j,4}$	$g_{0,j,5}$	$g_{0,j,6}$	$g_{0,j,7}$	$g_{0,j,8}$
$g_{0,1,k}$	87,6389	2.827,0049	119,1160	536,3109	964,8865	9.886,5020	412,0811	0,0000
$g_{0,2,k}$	0,0000	9,6418	0,0183	0,0123	0,0515	1,6814	1,0028	1,0000
$g_{0,3,k}$	0,0000	8,6788	0,2159	1,5709	1,3310	25,5271	0,9127	0,0000
Einheit	g THG ^{*)} / MJ Diesel	g THG ^{*)} / kg N	g THG ^{*)} / kg CaO	g THG ^{*)} / kg K ₂ O	g THG ^{*)} / kg P ₂ O ₅	g THG ^{*)} / kg Pestizide	g THG ^{*)} / kg Rapssaat	g THG ^{*)} / g N ₂ O

*) THG = CO₂ für die Matrizenelemente der ersten Zeile, N₂O für die der zweiten und CH₄ für die der dritten

Tabelle 6: Transformierter Gewichtungsvektor $\mathbf{w}^T$ für die berücksichtigten THG

$\mathbf{w}^T$	w_1	w_2	w_3
Faktor	1	298	25
Einheit	g CO _{2-eq} / g CO ₂	g CO _{2-eq} / g N ₂ O	g CO _{2-eq} / g CH ₄

Die Berechnung der spezifischen THGE je Einheit der in der Anbaustufe eingesetzten Hilfsmittel erfolgt nach Gl. (16) durch Multiplikation der transformierten Gewichtungsmatrix $\mathbf{w}^T$ mit der Kennzahlenmatrix $\mathbf{G}_0$. Das Ergebnis zeigt Tabelle 7. Diese Werte sind auch im BioGrace GHG Tool vs4-

public im Tabellenblatt „Standard values“ explizit enthalten, so dass hier im Zwischenschritt ein Abgleich möglich ist. Lediglich die N₂O-Feldemissionen werden dort nicht als Hilfsstoff aufgeführt.

Tabelle 7: Spezifische THGE je Einheit Hilfsmittel

Y ₀	Faktor	Einheit
Y _{0;1}	87,64	g CO ₂ -eq/MJ Diesel
Y _{0;2}	5.917,23	g CO ₂ -eq/kg N
Y _{0;3}	129,97	g CO ₂ -eq/kg CaO
Y _{0;4}	579,25	g CO ₂ -eq/kg K ₂ O
Y _{0;5}	1.013,51	g CO ₂ -eq/kg P ₂ O ₅
Y _{0;6}	11.025,74	g CO ₂ -eq/kg Pestizide
Y _{0;7}	733,73	g CO ₂ -eq/kg Rapssaat
Y _{0;8}	298,00	g CO ₂ -eq/g N ₂ O

Eine weitere Matrizenmultiplikation von $\mathbf{Y}_0$ mit dem Hilfsmittelvektor $\mathbf{I}_0$ ergibt die auf die Anbauflächenjahre bezogenen THGE der Anbaustufe. Sie sind in Tabelle 8 gezeigt. Dort wird sichtbar, dass die THGE der Anbaustufe fast ausschließlich durch die N₂O-Feldemissionen (44,4% der anbaubedingten THGE), die Produktion des eingesetzten Stickstoffdüngers (39,1% der anbaubedingten THGE) und den Einsatz von Diesel in den landwirtschaftlichen Maschinen beim Anbau (12,5% der anbaubedingten THGE) bestimmt werden. Da die THGE der Anbaustufe auch den größten Teil der THGE der gesamten Herstellungskette ausmachen (s. Tabelle 3), sind die drei genannten Beiträge diejenigen, deren Verringerung zu einer wirksamen Verbesserung der THGE-Bilanz von Rapsöl überhaupt beitragen kann.

Es wird hier auch sichtbar, dass die Option der Herstellung von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau keineswegs deshalb zu einer signifikant höheren THGE-Einsparung führen kann, weil beim Mischfruchtanbau der Einsatz von Pestiziden deutlich verringert ist; denn deren Beitrag zu den gesamten THGE ist verschwindend gering. Wenn, dann müssen es andere Gründe sein, aus denen der Mischfruchtanbau mit Blick auf die THGE Vorteile bietet. Als Arbeitshypothese sei die Vermutung formuliert, dass eine geschickte Allokation der THGE auf Nebenerzeugnisse die dem Biotreibstoff zuzuordnenden THGE gezielt verringern kann. Dies wird in Kap. 0 näher untersucht.

Tabelle 8: Beiträge der Hilfsmittel zu den THGE der Anbaustufe

Y ₀ ·I ₀	Beitrag	Einheit	aus:	Anteil
Y _{0;1} ·I _{0;1}	259.674	g CO ₂ -eq/ha/yr	Diesel	12,5%
Y _{0;2} ·I _{0;2}	813.200	g CO ₂ -eq/ha/yr	N-Dünger	39,1%
Y _{0;3} ·I _{0;3}	2.469	g CO ₂ -eq/ha/yr	CaO-Dünger	0,1%
Y _{0;4} ·I _{0;4}	28.648	g CO ₂ -eq/ha/yr	K ₂ O-Dünger	1,4%
Y _{0;5} ·I _{0;5}	34.128	g CO ₂ -eq/ha/yr	P ₂ O ₅ -Dünger	1,6%
Y _{0;6} ·I _{0;6}	13.562	g CO ₂ -eq/ha/yr	Pestizide	0,7%
Y _{0;7} ·I _{0;7}	4.402	g CO ₂ -eq/ha/yr	Rapssaat	0,2%
Y _{0;8} ·I _{0;8}	924.651	g CO ₂ -eq/ha/yr	N ₂ O Feldem.	44,4%
E_{0;tot}	2.080.735	g CO₂-eq/ha/yr	Summe	100,0%

Tabelle 9 zeigt den alternativen Rechenweg, bei dem zuerst die Kennzahlenmatrix $\mathbf{G}_0$ mit dem Hilfsmittelvektor $\mathbf{I}_0$ multipliziert wird. Das damit berechnete Zwischenergebnis ist der Vektor der Beiträge der einzelnen THGE zu den Gesamtemissionen. Er ist in Tabelle 9 in der zweiten Zeile gezeigt. Es

überwiegen bei weitem die Emissionen von CO₂. Im nachfolgenden Schritt wird dieser Vektor mit dem Gewichtungsvektor $\mathbf{w}$ skalar multipliziert. Die einzelnen Summanden dieser Produktsumme sind in Tabelle 9 in der vierten Spalte gezeigt. Es wird ersichtlich, dass durch die Gewichtung N₂O zum dominierenden THG der Anbaustufe, und damit der ganzen Herstellungskette, wird. Dieses N₂O stammt im Wesentlichen aus den N₂O-Feldemissionen.

Tabelle 9: Beiträge der einzelnen THG zu den gesamten THGE der Anbaustufe

$(g_{o,j,k}) \cdot (l_{o,k})$	Beitrag	Einheit	$w_j \cdot [(g_{o,j,k}) \cdot (l_{o,k})]$	Einheit
$(g_{o,1,k}) \cdot (l_{o,k})$	724.098	g CO ₂ /ha/yr	724.098	g CO _{2-eq} /ha/yr
$(g_{o,2,k}) \cdot (l_{o,k})$	4.439	g N ₂ O/ha/yr	1.322.732	g CO _{2-eq} /ha/yr
$(g_{o,3,k}) \cdot (l_{o,k})$	1.356	g CH ₄ /ha/yr	33.905	g CO _{2-eq} /ha/yr
$\epsilon_{0,tot}$	-	-	2.080.735	g CO _{2-eq} /ha/yr

Die Division nach Gl. (21) der berechneten, auf die Anbauflächenjahre bezogenen THGE durch die Gesamteffizienz der Rapsölproduktionskette, $y_{0,1} \cdot \prod_{l=1}^6 \eta_{l,1}$, von 43.067,02 MJ_{Öl im Tank}/ha/yr (s. Tabelle 2) ergibt die gesamten endproduktspezifischen THGE der Anbaustufe:

$$(41) \quad e_{0,tot} = \frac{\epsilon_{0,tot}}{y_{0,1} \cdot \prod_{l=1}^6 \eta_{l,1}} = \frac{2.080.735 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{ha} \cdot \text{yr}}}{43.067,02 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{ha} \cdot \text{yr}}} = 48,314 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die Allokation dieser THE nach Gl. (27) ergibt die dem Rapsöl zugeordneten endproduktspezifischen THGE der Anbaustufe:

$$(42) \quad e_{0,1} = e_{0,tot} \cdot \prod_{i=0}^6 \alpha_{i,1} = e_{0,tot} \cdot \alpha_{3,1} = 48,314 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}} \cdot 0,6125 = 29,592 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die in Gl. (41) und (42) ermittelten Werte stimmen exakt mit denen überein, die auch mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public ermittelt werden. Sprich, das hier präsentierte mathematische Modell reproduziert für die Anbaustufe exakt die Ergebnisse des BioGrace GHG Tools vs4-public, wenn die gleichen Hilfsmittelmengen und Kennziffern verwendet werden.

4.3 Prozessstufe 1: Rapssaattrocknung

Die Komponenten des Hilfsstoffvektors $\mathbf{l}_1$ zeigt Tabelle 10. Bezugsgröße des spezifischen Hilfsmiteileinsatzes ist der Energiegehalt des Vorprodukts, hier der feuchten Rapssaat. Dies wird durch den Index „Saat f“ deutlich gemacht. Tabelle 11 zeigt die Elemente der Kennzahlenmatrix $\mathbf{G}_1$. Die Multiplikation des transformierten Gewichtungsvektors $\mathbf{w}^T$ (s. Tabelle 6) mit $\mathbf{G}_1$ ergibt den in Tabelle 12 gezeigten Vektor $\mathbf{v}_1$ der spezifischen THGE je Einheit Hilfsstoff. Dessen Skalarprodukt mit $\mathbf{l}_1$ sind die auf den Energiegehalt des Vorprodukts, der feuchten Rapssaat, bezogenen THGE der Rapssaattrocknung, $\epsilon_{1,tot}$. Die Skalarproduktbildung ist in Tabelle 13 gezeigt.

Tabelle 10: Komponenten des Hilfsmittelvektors I_1

I_1	Hilfsmittel	Menge	Einheit
$I_{1;1}$	Diesel	0,000181	MJ Diesel/MJ _{Saat f}
$I_{1;2}$	Elektrizität EU Mix LV	0,003079	MJ Elektrizität EU Mix LV/MJ _{Saat f}

Tabelle 11: Komponenten der Kennzahlenmatrix G_1

G_1	$g_{1;j,1}$	$g_{1;j,2}$
$g_{1;1,k}$	87,6389	120,7945
$g_{1;2,k}$	0,0000	0,0055
$g_{1;3,k}$	0,0000	0,2946
Einheit	g THG ^{*)} / MJ Diesel	g THG ^{*)} / MJ Elektrizität EU Mix LV

*) THG = CO₂ für die Matrizenelemente der ersten Zeile, N₂O für die der zweiten und CH₄ für die der dritten

Tabelle 12: Spezifische THGE je Einheit Hilfsmittel

Y_1	Faktor	Einheit
$Y_{1;1}$	87,64	g CO _{2-eq} /MJ Diesel
$Y_{1;2}$	129,79	g CO _{2-eq} /MJ Elektrizität EU Mix LV

Tabelle 13: Beiträge der Hilfsmittel zu den THGE bei der Rapssaattrocknung

$Y_1 \cdot I_1$	Beitrag	Einheit	aus:
$Y_{1;1} \cdot I_{1;1}$	0,0159	g CO _{2-eq} /MJ _{Saat f}	Diesel
$Y_{1;2} \cdot I_{1;2}$	0,3996	g CO _{2-eq} /MJ _{Saat f}	Elektrizität EU Mix LV
$\epsilon_{1;tot}$	0,4155	g CO _{2-eq} /MJ _{Saat f}	Summe

Die Division nach Gl. (20) der berechneten, auf den Energiegehalt des Vorprodukts, der feuchten Rapssaat, bezogenen THGE, $\epsilon_{1;tot}$, durch die Effizienz der Rapsölproduktionsteilkette von der Rapstrocknung bis zur Abfüllung in den Tank, $\prod_{i=1}^6 \eta_{i;1}$, von 0,5822 MJ_{Öl im Tank}/MJ_{Saat f} ergibt die gesamten endproduktspezifischen THGE der Rapssaattrocknung:

$$(43) \quad e_{1;tot} = \frac{\epsilon_{1;tot}}{\prod_{i=1}^6 \eta_{i;1}} = \frac{0,4155 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Saat f}}}}{0,5822 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Saat f}}}} = 0,714 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die Allokation dieser THE nach Gl. (27) ergibt die dem Rapsöl zugeordneten endproduktspezifischen THGE der Rapssaattrocknung:

$$(44) \quad e_{1;1} = e_{1;tot} \cdot \prod_{i=1}^6 \alpha_{i;1} = e_{1;tot} \cdot \alpha_{3;1} = 0,714 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}} \cdot 0,6125 = 0,437 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die in Gl. (43) und (44) ermittelten Werte stimmen exakt mit denen überein, die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public ermittelt werden. Sprich das hier präsentierte mathematische Modell

reproduziert auch für die Rapssaattrocknung exakt die Ergebnisse des BioGrace GHG Tools vs4-public, wenn die gleichen Hilfsmittelmengen und Kennziffern verwendet werden.

4.4 Prozessstufe 2: Rapssaattransport

Es wird angenommen, dass die getrocknete Rapssaat mit einem LKW über eine Distanz von 50km transportiert werden muss. Dabei kommt ein einziger Hilfsstoff zum Einsatz, der Kraftstoff für den Betrieb des LKW. Standardmäßig wird angenommen, dass dies Diesel ist. Der Hilfsstoffparameter $I_{2,1}$ muss zunächst aus anderen Kennzahlen berechnet werden:

$$(45) \quad I_{2,1} = \frac{d_{\text{Saat}} \cdot \eta_{\text{LKW, fest}}^{-1}}{(1-f) \cdot q_{\text{Saat o. Restfeuchte}}} \cdot \eta_{2,1} = \frac{50 \text{ km} \cdot 0,9360 \frac{\text{MJ}_{\text{Diesel}}}{\text{t}_{\text{Saat trans}} \cdot \text{km}} \cdot 0,001 \frac{\text{t}_{\text{Saat trans}}}{\text{kg}_{\text{Saat trans}}}}{0,9 \frac{\text{kg}_{\text{Saat o. Restfeuchte}}}{\text{kg}_{\text{Saat trans}}} \cdot 26,4 \frac{\text{MJ}_{\text{Saat trans}}}{\text{kg}_{\text{Saat o. Restfeuchte}}}} \cdot 0,9901 \frac{\text{MJ}_{\text{Saat trans}}}{\text{MJ}_{\text{Saat tr}}}$$

$$= 0,00195 \frac{\text{MJ}_{\text{Diesel}}}{\text{MJ}_{\text{Saat tr}}}$$

Dabei ist d_{Saat} die Transportdistanz für die Rapssaat von 50 km. $\eta_{\text{LKW, fest}}^{-1}$ ist der Kehrwert der Transporteffizienz eines LKW für feste Stoffe (nicht zu verwechseln mit den Prozesseffizienzen der Rapsölherstellung!), also der Kraftstoffenergieverbrauch je Masse transportierter getrockneter Saat und je Transportdistanz, angegeben in $\text{MJ}_{\text{Diesel}}/(\text{t}_{\text{Saat trans}} \cdot \text{km})$. f ist die Restfeuchte der getrockneten Rapssaat, also $1-f$ der Trockenanteil, und q_{Saat} der spezifische Heizwert des Trockenanteils der Rapssaat, hier angegeben in $\text{MJ}_{\text{Saat trans}}/\text{kg}_{\text{Saat ohne Restfeuchte}}$. Der Index „trans“ kennzeichnet zwecks sauberer Unterscheidung der Bezugsgrößen im Gegensatz zu „tr“ die Werte am Ende des Transports, nicht am Ende der Rapssaattrocknung, was zu Beginn des Transports wäre. Wegen der Verluste beim Transport ist der Wert von $\eta_{\text{LKW, fest}}^{-1}$ ein geringfügig anderer, je nachdem, ob man den Dieseleinsatz je Tonnenkilometer auf die aufgeladene oder am Ende des Transports wieder abgeladene Menge bezieht. Der Faktor $0,001 \text{ t}_{\text{Saat trans}}/\text{kg}_{\text{Saat trans}}$ ist ein trivialer Umrechnungsfaktor zwischen Tonne und Kilogramm.

Die Werte von $\eta_{\text{LKW, fest}}^{-1}$ und q_{Saat} wurden hier der Standardkennzahlentabelle des BioGrace GHG Tools vs4-public entnommen. Dieses bezieht die Mengen der eingesetzten Hilfsstoffe in den Prozessstufen konsequent auf den Energiegehalt des Zwischenprodukts am Ende der jeweiligen Prozessstufe. Dagegen beziehen sich die Hilfsmittelgrößen $I_{m';k}$ im hier vorgestellten Modell auf den Energiegehalt des Vorprodukts. Um zwischen den verschiedenen Bezugsgrößen umzurechnen, erfolgt in Gl. (45) eine Multiplikation mit $\eta_{2,1}$. Nur so stimmen dann die Ergebnisse der weiteren hier durchgeführten Berechnungen, in die I_2 einfließt, mit den Ergebnissen des BioGrace GHG Tools vs4-public überein. Mit Hilfe der indizierten physikalischen Einheiten kann dabei nachverfolgt werden, dass die Multiplikation mit $\eta_{2,1}$ nicht nur zur Konsistenz mit dem BioGrace Tool beiträgt, sondern auch korrekt ist.

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die Berechnung der Hilfsmittelkennzahl $I_{2,1}$. Die letzten beiden Zeilen verdeutlichen, dass der Wert ein geringfügig anderer ist, je nachdem, auf welches Zwischenprodukt der Herstellung man ihn bezieht. Der Hilfsstoffvektor I_2 hat sonst keine weiteren Elemente. Er ist in Tabelle 15 vollständig gezeigt.

Tabelle 14: Berechnung der Hilfsmittelkennzahl $I_{2,1}$ des Rapssaattransports

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
Transportstrecke	50	km
Spezifischer Energieverbrauch LKW	0,9360	MJ Diesel/(t _{Saat trans} ·km)
unterer Heizwert der transportierten Rapssaat (10% Feuchte)	23,7600	MJ _{Saat trans} / kg _{Saat trans}
Dieseinsatz je Energie transportierter Saat	0,001970	MJ Diesel/MJ _{Saat trans}
Dieseinsatz je Energie aufgeladener Saat	0,001950	MJ Diesel/MJ_{Saat tr}

Tabelle 15: Komponenten des Hilfsmittelvektors I_2

I_2	Hilfsmittel	Menge	Einheit
$I_{2,1}$	Diesel	0,001950	MJ Diesel/MJ _{Saat tr}

Tabelle 16 zeigt die Elemente der Kennzahlenmatrix G_2 . Das Element $g_{2,1,1}$ reflektiert die Herstellung und Nutzung des Dieseltreibstoffs und ist nach einem Kommentar im BioGrace GHG Tool vs4-public bereits eine aggregierte Kennzahl, in der auch andere THGE als die von CO₂ bei der Herstellung von Diesel berücksichtigt wurden. Das Element $g_{2,3,1}$ berücksichtigt darüber hinaus noch CH₄-Emissionen, die bei der Nutzung des Diesels als Treibstoff beim Transport von Gütern emittiert werden. Tabelle 17 zeigt die Berechnung, die exakt der Formel aus dem BioGrace GHG Tool vs4-public entspricht.

Tabelle 16: Komponenten der Kennzahlenmatrix G_2

G_2	$g_{2,j,1}$
$g_{2,1,k}$	87,6389
$g_{2,2,k}$	0,0000
$g_{2,3,k}$	0,0053
Einheit	g THG^{*)}/MJ Diesel

*) THG = CO₂ für die Matrizenelemente der ersten Zeile, N₂O für die der zweiten und CH₄ für die der dritten

Tabelle 17: Berechnung der Kennzahl $g_{2,3,1}$

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
CH ₄ -Emissionen je Tonne und km	0,0050	g CH ₄ /(t _{Saat trans} ·km)
Spezifischer Energieverbrauch LKW	0,9360	MJ Diesel/(t _{Saat trans} ·km)
$g_{2,3,1}$	0,0053	g CH₄/MJ Diesel

Die Multiplikation des transformierten Gewichtungsvektors w^T (s. Tabelle 6) mit G_2 ergibt den in Tabelle 18 gezeigten Vektor y_1 der spezifischen THGE je Hilfsmittelleinheit. Dieser hat hier nur eine Komponente, d.h. er geht in einen Skalar über. Dessen Produkt mit $I_{2,1}$ ergibt die auf das Vorprodukt, die getrocknete Rapssaat bezogenen THGE des Rapssaattransports, $\epsilon_{2,tot}$. Die Produktbildung ist in

Tabelle 19 gezeigt.

Tabelle 18: Spezifische THGE je Hilfsmittelleinheit

y_2	Faktor	Einheit
$y_{2,1}$	87,77	g CO _{2-eq} /MJ Diesel

Tabelle 19: Beiträge der Hilfsmittel zu den THGE beim Rapssaattransport

Y_{2,I_2}	Beitrag	Einheit	aus:
$Y_{2,1} \cdot I_{2,1}$	0,1712	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat tr}	Diesel
$\epsilon_{2,tot}$	0,1712	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat tr}	Summe

Die Division nach Gl. (20) der berechneten, auf den Energiegehalt des Vorprodukts, der trockenen Rapssaat, bezogenen THGE, $\epsilon_{2,tot}$, durch die Effizienz der Rapsölproduktionsteilkette von der Rapstrochnung bis zur Abfüllung in den Tank, $\prod_{i=2}^6 \eta_{i,1}$, von 0,5822 MJ_{Öl im Tank}/MJ_{Saat tr} ergibt die gesamten endproduktspezifischen THGE des Rapssaattransports:

$$(46) \quad e_{2,tot} = \frac{\epsilon_{2,tot}}{\prod_{i=2}^6 \eta_{i,1}} = \frac{0,1712 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Saat tr}}}}{0,5822 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Saat tr}}}} = 0,294 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die Allokation dieser THGE nach Gl. (27) ergibt die dem Rapsöl zugeordneten endproduktspezifischen THGE des Rapssaattransports:

$$(47) \quad e_{2,1} = e_{2,tot} \cdot \prod_{i=2}^6 \alpha_{i,1} = e_{2,tot} \cdot \alpha_{3,1} = 0,294 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}} \cdot 0,6125 = 0,180 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die in Gl. (46) und (47) ermittelten Werte stimmen exakt mit denen überein, die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public ermittelt werden.

4.5 Prozessstufe 3: Rapssaatpressung

Bei der Rapssaatpressung werden beim Standard-Herstellungspfad, der der KQR Annex IV.A zugrunde liegt, drei Hilfsmittel eingesetzt: Elektrische Energie aus dem Mittelspannungsnetz, Erdgas und n-Hexan. Elektrische Energie wird dabei einmal direkt eingesetzt, dann bei der Herstellung von Dampf in einem Erdgasboiler. Erdgas wird nur indirekt eingesetzt, zur Dampferzeugung. Tabelle 20 und Tabelle 21 zeigen die Berechnung des Elektrizitäts- und Erdgaseinsatzes bezogen auf den Energiegehalt der angelieferten Rapssaat. Da die Kennwerte für den Hilfsmiteileinsatz aus dem BioGrace GHG Tool vs4-public genommen wurden, welches diese bezogen auf den Energiegehalt des Zwischenprodukts am Ende der Rapspressung, das rohe Öl, angibt, muss zwischen der vorletzten und letzten Zeile eine Umrechnung durch Multiplikation mit dem Wirkungsgrad der Rapsölpressung, $\eta_{3,1}$ von 61,25% MJ_{Öl roh}/MJ_{Saat trans}, erfolgen. Da $\eta_{3,1}$ deutlich von 1 verschieden ist, fällt hier auch der Unterschied der Werte der Kennzahlen deutlich auf, die sich durch unterschiedliche Bezugsgrößen ergeben. Der Energiegehalt der gelieferten Rapssaat ist deutlich größer als der des daraus gepressten rohen Öls. Es wird aber eine bestimmte absolute Menge jeden Hilfsstoffs eingesetzt, unabhängig davon, worauf man sie bezieht. Wird diese absolute Menge auf die Rapssaat bezogen, also durch den Energiegehalt der Rapssaat geteilt, erhält man einen kleineren Wert der jeweiligen Kennzahl des spezifischen Hilfsmiteileinsatzes als beim Bezug auf das gepresste Öl.

Tabelle 20: Berechnung des Elektrizitätseinsatzes, $I_{3,1}$, bei der Rapspressung

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
Direkter Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit $\dot{O}_{lroh}$	0,0117531	MJ Elektrizität/MJ $\dot{O}_{lroh}$
Dampfbedarf	0,0556927	MJ Dampf/MJ $\dot{O}_{lroh}$
Indirekter Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit Dampf	0,02	MJ Elektrizität/MJ Dampf
Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit $\dot{O}_{lroh}$	0,0128669	MJ Elektrizität/MJ $\dot{O}_{lroh}$
Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit transportierter Ölsaats	0,007881	MJ Elektrizität/MJ $\dot{O}_{lroh}$

Tabelle 21: Berechnung des Erdgaseinsatzes, $I_{3,2}$, bei der Rapspressung

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
Dampfbedarf	0,0556927	MJ Dampf/MJ $\dot{O}_{lroh}$
Erdgasbedarf je Energieeinheit Dampf	1,1111111	MJ Erdgas/MJ Dampf
Erdgasbedarf je Energieeinheit $\dot{O}_{lroh}$	0,0618808	MJ Erdgas/MJ $\dot{O}_{lroh}$
Erdgasbedarf je Energieeinheit transportierter Ölsaats	0,0379021	MJ Erdgas/MJ $\dot{O}_{lroh}$

Den vollständigen Hilfsmittelinputvektor I_3 zeigt Tabelle 22. Der dort angegebene Wert für den Energiegehalt des eingesetzten n-Hexans ist bereits das Produkt aus dem Wert aus dem BioGrace Tool und $\eta_{3,1}$.

Tabelle 22: Komponenten des Hilfsmittelvektors I_3

I_3	Hilfsmittel	Menge	Einheit
$I_{3,1}$	Elektrizität EU Mix MV	0,007881	MJ Elektrizität/MJ $\dot{O}_{lroh}$
$I_{3,2}$	Erdgas	0,037902	MJ Erdgas/MJ $\dot{O}_{lroh}$
$I_{3,3}$	n-Hexan	0,002653	MJ n-Hexan/MJ $\dot{O}_{lroh}$

Tabelle 23 zeigt die Elemente der Kennzahlenmatrix G_3 . Die Multiplikation des transformierten Gewichtungsvektors w^T (s. Tabelle 6) mit G_3 ergibt den in Tabelle 24 gezeigten Vektor y_3 der spezifischen THGE je Einheit Hilfsmittel. Dessen Skalarprodukt mit I_3 sind die auf den Energiegehalt des Vorprodukts, der transportierten Rapssaat, bezogenen THGE der Rapssaatpressung, $\epsilon_{3,tot}$. Die Skalarproduktbildung ist in Tabelle 25 gezeigt.

Tabelle 23: Komponenten der Kennzahlenmatrix G_3

G_3	$g_{3,j,1}$	$g_{3,j,2}$	$g_{3,j,3}$
$g_{3,1,k}$	119,3622	62,9640	80,0833
$g_{3,2,k}$	0,0054	0,0012	0,0003
$g_{3,3,k}$	0,2911	0,2006	0,0146
Einheit	g THG ^{*)} / MJ Elektrizität EU Mix MV	g THG ^{*)} / MJ Erdgas	g THG ^{*)} / MJ n-Hexan

Tabelle 24: Spezifische THGE je Einheit Hilfsmittel

y_3	Faktor	Einheit
$y_{3,1}$	128,25	g CO _{2-eq} /MJ Elektrizität
$y_{3,2}$	68,34	g CO _{2-eq} /MJ Erdgas
$y_{3,3}$	80,53	g CO _{2-eq} /MJ n-Hexan

Tabelle 25: Beiträge der Hilfsmittel zu den THGE bei der Rapssaatpressung

$\gamma_{3,13}$	Beitrag	Einheit	aus:	Anteil
$\gamma_{3,13,1}$	1,0107	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat trans}	Elektrizität	26,5%
$\gamma_{3,23,2}$	2,5904	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat trans}	Erdgas	67,9%
$\gamma_{3,33,3}$	0,2136	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat trans}	n-Hexan	5,6%
$\epsilon_{3,tot}$	3,8147	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat trans}	Summe	100,0%

Die Division nach Gl. (20) der berechneten, auf den Energiegehalt des Vorprodukts, der trockenen Rapssaat, bezogenen THGE, $\epsilon_{3,tot}$, durch die Effizienz der Rapsölproduktionsteilkette von der Rapspressung bis zur Abfüllung in den Tank, $\prod_{i=3}^6 \eta_{i,1}$, von 0,5880 MJ_{Öl im Tank}/MJ_{Saat trans} ergibt die gesamten endproduktspezifischen THGE der Rapssaatpressung:

$$(48) \quad e_{3,tot} = \frac{\epsilon_{3,tot}}{\prod_{i=3}^6 \eta_{i,1}} = \frac{3,8147 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Saat trans}}}}{0,5880 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Saat trans}}}} = 6,488 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die Allokation dieser THE nach Gl. (27) ergibt die dem Rapsöl zugeordneten endproduktspezifischen THGE der Rapspressung:

$$(49) \quad e_{3,1} = e_{3,tot} \cdot \prod_{i=3}^6 \alpha_{i,1} = e_{3,tot} \cdot \alpha_{3,1} = 6,488 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}} \cdot 0,6125 = 3,974 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die in Gl. (48) und (49) ermittelten Werte stimmen exakt mit denen überein, die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public ermittelt werden.

4.6 Prozessstufe 4: Rapsölreinigung

Bei der Rapsölreinigung werden beim Standard-Herstellungspfad, der der KQR Annex IV.A zugrunde liegt, wieder drei Hilfsmittel eingesetzt: Elektrische Energie aus dem Mittelspannungsnetz, Erdgas und Bleicherde. Für elektrische Energie und Erdgas und für die Umrechnung zwischen Bezugsgrößen gilt analog das bereits für die Rapssaatpressung gesagte. Tabelle 26 und Tabelle 27 zeigen die Berechnung des Elektrizitäts- und Erdgaseinsatzes bezogen auf den Energiegehalt des rohen Rapsöls.

Tabelle 26: Berechnung des Elektrizitätseinsatzes, $I_{4,1}$, bei der Rapsölreinigung

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
Direkter Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit Öl _{roh}	0,0008	MJ Elektrizität/MJ _{Öl roh}
Dampfbedarf	0,0115	MJ Dampf/MJ _{Öl roh}
Indirekter Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit Dampf	0,02	MJ Elektrizität/MJ Dampf
Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit Öl _{roh}	0,0011	MJ Elektrizität/MJ _{Öl roh}
Elektrizitätsbedarf je Energieeinheit Öl_{rein}	0,001	MJ Elektrizität/MJ_{Öl rein}

Tabelle 27: Berechnung des Erdgaseinsatzes, $I_{4,2}$, bei der Rapsölreinigung

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
Dampfbedarf	0,0115	MJ Dampf/MJ _{Öl roh}
Erdgasbedarf je Energieeinheit Dampf	1,1111	MJ Erdgas/MJ Dampf
Erdgasbedarf je Energieeinheit $\dot{O}_{l,roh}$	0,0128	MJ Erdgas/MJ _{Öl roh}
Erdgasbedarf je Energieeinheit $\dot{O}_{l,rein}$	0,0123	MJ Erdgas/MJ_{Öl rein}

Den vollständigen Hilfsmittelinputvektor I_4 zeigt Tabelle 28. Der dort angegebene Wert für den Energiegehalt der eingesetzten Bleicherde ist das Produkt aus dem Wert des BioGrace Tool und $\eta_{4,1}$.

Tabelle 28: Komponenten des Hilfsmittelvektors I_4

I_4	Hilfsmittel	Menge	Einheit
$I_{4,1}$	Elektrizität EU Mix MV	0,001027	MJ Elektrizität/MJ _{Öl rein}
$I_{4,2}$	Erdgas	0,012279	MJ Erdgas/MJ _{Öl rein}
$I_{4,3}$	Bleicherde	0,000224	kg Bleicherde/MJ _{Öl rein}

Tabelle 29 zeigt die Elemente der Kennzahlenmatrix G_4 . Die Multiplikation des transformierten Gewichtungsvektors w^T (s. Tabelle 6) mit G_4 ergibt den in Tabelle 30 gezeigten Vektor y_4 der spezifischen THGE je Einheit Hilfsmittel. Dessen Skalarprodukt mit I_4 sind die auf den Energiegehalt des Vorprodukts, des rohen Rapsöls, bezogenen THGE der Rapsölreinigung, $\epsilon_{4,tot}$. Die Skalarproduktbildung ist in Tabelle 31 gezeigt.

Tabelle 29: Komponenten der Kennzahlenmatrix G_4

G_4	$g_{4,j,1}$	$g_{4,j,2}$	$g_{4,j,3}$
$g_{4,1,k}$	119,3622	62,9640	197,0000
$g_{4,2,k}$	0,0054	0,0012	0,0063
$g_{4,3,k}$	0,2911	0,2006	0,0373
Einheit	g THG ⁻¹ / MJ Elektrizität EU Mix MV	g THG ⁻¹ / MJ Erdgas	g THG ⁻¹ / kg Bleicherde

Tabelle 30: Spezifische THGE je Einheit Hilfsmittel

y_4	Faktor	Einheit
$y_{4,1}$	128,25	g CO _{2-eq} /MJ Elektrizität
$y_{4,2}$	68,34	g CO _{2-eq} /MJ Erdgas
$y_{4,3}$	199,81	g CO _{2-eq} /kg Bleicherde

Tabelle 31: Beiträge der Hilfsmittel zu den THGE bei der Rapsölreinigung

$y_4 \cdot I_4$	Beitrag	Einheit	aus:	Anteil
$y_{4,1} \cdot I_{4,1}$	0,1318	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl roh}	Elektrizität	13,0%
$y_{4,2} \cdot I_{4,2}$	0,8392	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl roh}	Erdgas	82,6%
$y_{4,3} \cdot I_{4,3}$	0,0448	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl roh}	Bleicherde	4,4%
$\epsilon_{4,tot}$	1,0157	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl roh}	Summe	100,0%

Die Division nach Gl. (20) der berechneten, auf den Energiegehalt des Vorprodukts, der rohen Rapsöls, bezogenen THGE, $\epsilon_{4,tot}$, durch die Effizienz der Rapsölproduktionsteilkette von der Rapsölreinigung bis zur Abfüllung in den Tank, $\prod_{i=4}^6 \eta_{i,1}$, von $0,9600 \text{ MJ}_{\text{Öl im Tank}}/\text{MJ}_{\text{Öl roh}}$ ergibt die gesamten endproduktspezifischen THGE der Rapsölreinigung:

$$(50) \quad e_{4,tot} = \frac{\epsilon_{4,tot}}{\prod_{i=4}^6 \eta_{i,1}} = \frac{1,0157 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl roh}}}}{0,9600 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Öl roh}}}} = 1,058 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die Allokation dieser THE nach Gl. (27) ergibt die dem Rapsöl zugeordneten endproduktspezifischen THGE der Rapsölreinigung:

$$(51) \quad e_{4,1} = e_{4,tot} \cdot \prod_{i=4}^6 \alpha_{i,1} = e_{4,tot} = 1,058 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die in Gl. (50) und (51) ermittelten Werte stimmen exakt mit denen überein, die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public ermittelt werden.

4.7 Prozessstufe 5: Rapsöltransport

Es wird angenommen, dass das gereinigte Rapsöl mit einem LKW über eine Distanz von 150 km transportiert werden muss. Dabei kommt ein einziger Hilfsstoff zum Einsatz, der Kraftstoff für den Betrieb des LKW. Standardmäßig wird angenommen, dass dies Diesel ist. Der Hilfsstoffparameter $I_{5,1}$ muss zunächst aus anderen Kennzahlen berechnet werden:

$$(52) \quad I_{5,1} = \frac{d_{\text{Öl}} \cdot \eta_{\text{LKW,flüssig}}^{-1}}{q_{\text{Öl trans}}} \cdot \eta_{5,1} = \frac{150 \text{ km} \cdot 1,008 \frac{\text{MJ}_{\text{Diesel}}}{\text{t}_{\text{Öl trans}} \cdot \text{km}} \cdot 0,001 \frac{\text{t}_{\text{Öl trans}}}{\text{kg}_{\text{Öl trans}}}}{36,0 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl trans}}}{\text{kg}_{\text{Öl trans}}}} \cdot 1 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl trans}}}{\text{MJ}_{\text{Öl rein}}} = 0,0042 \frac{\text{MJ}_{\text{Diesel}}}{\text{MJ}_{\text{Öl rein}}}$$

Dabei ist $d_{\text{Öl}}$ die Transportdistanz von 150 km. $\eta_{\text{LKW,flüssig}}^{-1}$ ist der Kehrwert der Transporteffizienz eines LKW für flüssige Stoffe, also der Kraftstoffenergieverbrauch je Masse transportierten Öls und je Transportdistanz, angegeben in $\text{MJ}_{\text{Diesel}}/(\text{t}_{\text{Öl rein}} \cdot \text{km})$. $q_{\text{Öl trans}}$ ist der spezifische Heizwert des transportierten Rapsöls, angegeben in $\text{MJ}_{\text{Öl trans}}/\text{kg}_{\text{Öl trans}}$. Der Index „trans“ kennzeichnet zwecks sauberer Unterscheidung der Bezugsgrößen im Gegensatz zu „rein“ den Wert der jeweiligen Größe am Ende des Öltransports, nicht am Ende der Ölreinigung, was zu Beginn des Öltransports wäre. Die Unterscheidung dient wieder dazu, die Bezugsgröße klar herauszustellen.

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die Berechnung der Hilfsmittelkennzahl $I_{5,1}$. Hier ist der Wert der gleiche, egal auf welches Zwischenprodukt der Herstellung man ihn bezieht, da der Wirkungsgrad des Öltransports 1 ist. Nur die physikalischen Einheiten unterscheiden sich im Index. Der Hilfsmittelvektor I_5 hat sonst keine weiteren Elemente. Er ist in Tabelle 33 vollständig gezeigt.

Tabelle 32: Berechnung der Hilfsmittelkennzahl $I_{5,1}$ des Rapsöltransports

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
Transportstrecke	150	km
Spezifischer Energieverbrauch LKW	1,0080	MJ Diesel/(t _{Öl trans} ·km)
unterer Heizwert von Rapsöl	36,0000	MJ _{Öl trans} / kg _{Öl trans}
Dieseinsatz je Energie geladenen Öls	0,0042	MJ Diesel/MJ _{Öl trans}
Dieseinsatz je Energie geladenen Öls	0,0042	MJ Diesel/MJ_{Öl rein}

Tabelle 33: Komponenten des Hilfsmittelvektors I_5

I_5	Hilfsmittel	Menge	Einheit
$I_{5,1}$	Diesel	0,0042	MJ Diesel/MJ _{Öl rein}

Tabelle 34 zeigt die Elemente der Kennzahlenmatrix G_5 . Die Komponente $g_{5,1,1}$ reflektiert die Herstellung und Nutzung des Dieseltreibstoffs und ist nach einem Kommentar im BioGrace GHG Tool vs4-public bereits eine aggregierte Kennzahl, in der auch andere THGE als die von CO₂ bei der Herstellung von Diesel berücksichtigt wurden. Die Komponente $g_{5,3,1}$ berücksichtigt darüber hinaus noch CH₄-Emissionen, die bei der Nutzung des Diesels als Treibstoff beim Transport von Gütern emittiert werden. Tabelle 34 zeigt die Berechnung, die exakt der Formel aus dem BioGrace GHG Tool vs4-public entspricht.

Tabelle 34: Komponenten der Kennzahlenmatrix G_5

G_5	$g_{5,j,1}$
$g_{5,1,k}$	87,6389
$g_{5,2,k}$	0,0000
$g_{5,3,k}$	0,0050
Einheit	g THG⁺/MJ Diesel

Tabelle 35: Berechnung der Kennzahl $g_{5,3,1}$

Hilfsmittelparameter	Menge	Einheit
CH ₄ -Emissionen je Tonne und km	0,0050	g CH ₄ /(t _{Öl trans} ·km)
Spezifischer Energieverbrauch LKW	1,0080	MJ Diesel/(t _{Öl trans} ·km)
$g_{5,3,1}$	0,0050	g CH₄/MJ Diesel

Die Multiplikation des transformierten Gewichtsvektors w^T (s. Tabelle 6) mit G_5 ergibt den in Tabelle 36 gezeigten Vektor y_5 der spezifischen THGE je Einheit Hilfsmittel. Dessen Skalarprodukt mit I_5 sind die auf den Energiegehalt des Vorprodukts, des gereinigten Rapsöls, bezogenen THGE des Rapsöltransports, $\epsilon_{5,tot}$. Die Skalarproduktbildung ist in Tabelle 37 gezeigt.

Tabelle 36: Spezifische THGE des Rapsöltransports je Einheit Hilfsmittel

y_5	Faktor	Einheit
$y_{5,1}$	87,76	g CO _{2-eq} /MJ Diesel

Tabelle 37: Beiträge der Hilfsmittel zu den THGE beim Rapsöltransport

$\mathbf{Y_5 \cdot I_5}$	Beitrag	Einheit	aus:
$\mathbf{Y_{5;1} \cdot I_{5;1}}$	0,3686	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl rein}	Diesel
$\mathbf{\epsilon_{5;tot}}$	0,3686	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl rein}	Summe

Die Division nach Gl. (20) der berechneten, auf den Energiegehalt des Vorprodukts, des gereinigten Rapsöls, bezogenen THGE, $\epsilon_{5;tot}$, durch die Effizienz der Rapsölproduktionsteilkette vom Rapsöltransport bis zur Abfüllung in den Tank, $\prod_{i=5}^6 \eta_{i;1}$, von 1 MJ_{Öl im Tank}/MJ_{Öl rein} ergibt die gesamten endproduktspezifischen THGE des Rapsöltransports:

$$(53) \quad e_{5;tot} = \frac{\epsilon_{5;tot}}{\prod_{i=5}^6 \eta_{i;1}} = \frac{0,3686 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl rein}}}}{1 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Öl rein}}}} = 0,369 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die Allokation dieser THE nach Gl. (27) ergibt die dem Rapsöl zugeordneten endproduktspezifischen THGE des Rapsöltransports:

$$(54) \quad e_{5;1} = e_{5;tot} \cdot \prod_{i=5}^6 \alpha_{i;1} = e_{5;tot} = 0,369 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die in Gl. (53) und (54) ermittelten Werte stimmen exakt mit denen überein, die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public ermittelt werden.

4.8 Prozessstufe 6: Rapsölabgabe an Tankstelle

Bei der Rapsölabgabe an der Tankstelle wird nur elektrische Energie aus dem Niederspannungsnetz als Hilfsmittel eingesetzt. Tabelle 38 zeigt den entsprechenden Hilfsmittelvektor I_6 , der nur eine Komponente hat.

Tabelle 38: Komponenten des Hilfsmittelvektors I_6

$\mathbf{I_6}$	Hilfsmittel	Menge	Einheit
$\mathbf{I_{6;1}}$	Elektrizität EU Mix NV	0,0034	MJ Elektrizität/MJ _{Öl trans}

Tabelle 39: Komponenten der Kennzahlenmatrix G_6

$\mathbf{G_6}$	$\mathbf{g_{6;j,1}}$
$\mathbf{g_{6;1,k}}$	120,7945
$\mathbf{g_{6;2,k}}$	0,0055
$\mathbf{g_{6;3,k}}$	0,2946
Einheit	g THG ^{*)} / MJ Elektrizität EU Mix NV

Die Multiplikation des transformierten Gewichtungsvektors $\mathbf{w}^T$ (s. Tabelle 6) mit $\mathbf{G_6}$ ergibt den in Tabelle 40 gezeigten Vektor $\mathbf{y_6}$ der spezifischen THGE je Einheit Hilfsmittel. Dessen Skalarprodukt mit

I_6 sind die auf den Energiegehalt des Vorprodukts, des transportierten Rapsöls, bezogenen THGE der Rapsölabgabe, $\epsilon_{6;tot}$. Die Skalarproduktbildung ist in Tabelle 41 gezeigt.

Tabelle 40: Spezifische THGE der Rapsölabgabe je Einheit Hilfsmittel

Y_6	Faktor	Einheit
$Y_{6;1}$	129,79	g CO ₂ -eq/MJ Elektrizität EU Mix NV

Tabelle 41: Beiträge der Hilfsmittel zu den THGE bei der Rapsölabgabe

$Y_6 \cdot I_6$	Beitrag	Einheit	aus:
$Y_{6;1} \cdot I_{6;1}$	0,4413	g CO ₂ -eq/MJ _{Öl trans}	Elektrizität EU Mix NV
$\epsilon_{6;tot}$	0,4413	g CO ₂ -eq/MJ _{Öl trans}	Summe

Die Division nach Gl. (20) der berechneten, auf den Energiegehalt des Vorprodukts, der rohen Rapsöls, bezogenen THGE, $\epsilon_{6;tot}$, durch die Effizienz der Rapsölabgabe in den Tank, $\eta_{6;1}$, von $1 \text{ MJ}_{\text{Öl im Tank}} / \text{MJ}_{\text{Öl trans}}$ ergibt die gesamten endproduktspezifischen THGE der Rapsölabgabe:

$$(55) \quad e_{6;tot} = \frac{\epsilon_{6;tot}}{\eta_{6;1}} = \frac{0,441 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl trans}}}}{1 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Öl trans}}}} = 0,441 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die Allokation dieser THE nach Gl. (27) ergibt die dem Rapsöl zugeordneten endproduktspezifischen THGE der Rapsölabgabe:

$$(56) \quad e_{6;1} = e_{6;tot} \cdot \prod_{i=6}^6 \alpha_{i;1} = e_{6;tot} = 0,441 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}$$

Die in Gl. (55) und (56) ermittelten Werte stimmen exakt mit denen überein, die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public ermittelt werden.

4.9 THGE des gesamten Rapsölpfads

Addiert man die allokierten THGE der Anbau- und der einzelnen Prozessstufen, erhält man folgende THGE für den gesamten Standard-Rapsölkraftstoffherstellungspfad:

Tabelle 42: Prozessstufen und THGE-Allokation bei der Herstellung reinen Rapsöltreibstoffs

Prozess	Anbau	Rapssaattrocknung	Rapssaattransport	Rapspressung	Rapsölreinigung	Rapsöltransport	Rapsölabfüllung	Gesamtkette	Einheit
Prozessstufe	0	1	2	3	4	5	6	0-6	-
$\alpha_{m';1}$	1,0000	1,0000	1,0000	0,6125	1,0000	1,0000	1,0000	-	-
$e_{m';tot}$ (BioGrace)	48,314	0,714	0,294	6,488	1,058	0,369	0,441	57,677	g CO ₂ -eq/MJ _{Öl} im Tank
$e_{m';1}$ (BioGrace)	29,592	0,437	0,180	3,974	1,058	0,369	0,441	36,051	g CO ₂ -eq/MJ _{Öl} im Tank
$e_{m';tot}$ (eigene Berechnung)	48,314	0,714	0,294	6,488	1,058	0,369	0,441	57,677	g CO ₂ -eq/MJ _{Öl} im Tank
$e_{m';1}$ (eigene Berechnung)	29,592	0,437	0,180	3,974	1,058	0,369	0,441	36,051	g CO ₂ -eq/MJ _{Öl} im Tank
Anteil	82,08%	1,21%	0,50%	11,02%	2,93%	1,02%	1,22%	100,00%	-

Mit Gl. (32) ergibt sich unter Verwendung der Parameter und Ergebnisse des BioGrace GHG Tools vs4-public die folgende THGE-Minderung:

$$(57) \quad \text{Einsparung} = \frac{(83,8 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Diesel im Tank}}} - 36,033 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}})}{83,8 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Diesel im Tank}}}} = 56,98\%$$

Sprich, das hier präsentierte mathematische Modell führt exakt zu dem Wert, den auch das BioGrace GHG Tool vs4-public errechnet. Rundet man ihn auf die erste Stelle vor dem Komma, ist er gleich dem Wert aus der KQR Annex IV.A, der bei Verwendung der Standardmengen für die eingesetzten Hilfsmittel und Standard-Kennzahlen erreicht werden sollte.

Nun ist allerdings kritisch anzumerken dass die KQR und das sie abbildende BioGrace GHG Tool vs4-public hinsichtlich der spezifischen THGE von Diesellokraftstoff widersprüchlich sind. Die verwendete Kennzahl für die bei Herstellung und Nutzung von Diesellokraftstoff entstehenden THGE liegt mit 87,64 g CO₂-eq/MJ_{Diesello im Tank} deutlich über dem Wert der für Diesel als Referenzkraftstoff verwendet wird, nämlich 83,8 g CO₂-eq/MJ_{Diesello im Tank}. Letzter ist der in KQR Annex IV.C, Punkt 19 angegebene Wert, der zu verwenden ist, wenn kein anderer „... gemeldete(r) letzte(r) verfügbare(r) tatsächliche(r) Durchschnitt der Emissionen aus dem fossilen Teil des Otto- und Diesellokraftstoffverbrauchs ...“ bekannt ist. Bei den 87,64 g CO₂/MJ_{Diesello im Tank} handelt es sich aber um einen besseren verfügbaren Wert und dieser wird fast exakt in dieser Höhe in der wesentlichen Quelle angegeben, auf den sich die KQR stützt, nämlich in der JEC Well-to-Wheel Studie. In der Textversion werden 73.2 g CO₂/MJ für die direkten und 14.3 g CO₂/MJ für die indirekten THGE von Diesellokraftstoff angegeben¹⁴. Die Summe ergibt 87,5 CO₂/MJ_{Diesello im Tank}. Im BioGrace GHG Tool vs4-public wird bei dem Wert 87,64 g CO₂-eq/MJ_{Diesello im Tank} angemerkt, dass dieser aus der JEC Datenbank von 2008 stamme. Die Autoren vermuten, dass dieser Wert genauer sei. Er wird darum nun hier im Weiteren anstatt 83,8 g CO₂-eq/MJ_{Diesello im Tank} als Referenzwert für die THGE von Diesel zu Grunde gelegt. Die THGE Einsparung beim Standard-Rapsölpfad beträgt dann gegenüber Diesel:

$$(58) \quad \text{Einsparung} = \frac{(87,64 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Diesello im Tank}}} - 36,033 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}})}{87,64 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Diesello im Tank}}}} = 58,86\%$$

¹⁴ JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context” Version 3c, Annex 1, S. 16 und 19

5. Optimierung der Klimabilanz von Rapsölkraftstoff

Tabelle 43 führt die bei der Herstellung von Rapsölkraftstoff eingesetzten Hilfsmittel nach der Rangfolge ihres Beitrags zu den anzurechnenden THGE auf. Dies erlaubt zu erkennen, an welcher Stelle die Herstellung mit Blick auf die Optimierung der Klimabilanz effizient verbessert werden kann.

Tabelle 43: Beiträge der bei der Rapsölkraftstoffherstellung eingesetzten Hilfsmittel zu den THGE

Rang	Hilfsmittel	Beitrag zu $E_{m'}^{\text{tot}}$	Einheit	Beitrag zu $E_{m'}^{\text{tot}}$	Beitrag zu $E_{m'}^{\text{1}}$	Einheit	Anteil an THGE
1	N ₂ O Feldemissionen beim Anbau	924651,43	g CO ₂ -eq/ha/yr	21,470	13,150	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	36,48%
2	N-Dünger beim Anbau	813200,08	g CO ₂ -eq/ha/yr	18,882	11,565	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	32,08%
3	Diesel beim Anbau	259674,03	g CO ₂ -eq/ha/yr	6,030	3,693	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	10,24%
4	Erdgas bei der Rapssaattrocknung	2,59	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat trans}	4,405	2,698	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	7,48%
5	Elektrizität bei der Rapssaattrocknung	1,01	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat trans}	1,719	1,053	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	2,92%
6	Erdgas bei der Rapsölreinigung	0,84	g CO ₂ -eq/MJ Öl roh	0,874	0,874	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	2,42%
7	P ₂ O ₅ -Dünger beim Anbau	34128,02	g CO ₂ -eq/ha/yr	0,792	0,485	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	1,35%
8	Elektrizität bei der Rapsölabgabe	0,44	g CO ₂ -eq/MJ Öl trans	0,441	0,441	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	1,22%
9	Elektrizität bei der Rapssaattrocknung	0,40	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat f}	0,686	0,420	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	1,17%
10	K ₂ O-Dünger beim Anbau	28647,74	g CO ₂ -eq/ha/yr	0,665	0,407	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	1,13%
11	Diesel beim Rapsöltransport	0,37	g CO ₂ -eq/MJ Öl rein	0,369	0,369	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	1,02%
12	n-Hexan bei der Rapssaattrocknung	0,21	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat trans}	0,363	0,223	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,62%
13	Pestizide beim Anbau	13561,66	g CO ₂ -eq/ha/yr	0,315	0,193	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,54%
14	Diesel beim Rapssaattrocknung	0,17	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat tr}	0,294	0,180	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,50%
15	Elektrizität bei der Rapsölreinigung	0,13	g CO ₂ -eq/MJ Öl roh	0,137	0,137	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,38%
16	Rapssaat beim Anbau	4402,40	g CO ₂ -eq/ha/yr	0,102	0,063	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,17%
17	Bleicherde bei der Rapsölreinigung	0,04	g CO ₂ -eq/MJ Öl roh	0,047	0,047	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,13%
18	CaO-Dünger beim Anbau	2469,37	g CO ₂ -eq/ha/yr	0,057	0,035	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,10%
19	Diesel bei der Rapssaattrocknung	0,02	g CO ₂ -eq/MJ _{Saat f}	0,027	0,017	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	0,05%
-	Summe	-	-	57,677	36,051	g CO ₂ -eq/MJ Öl im Tank	100,00%

Die beiden führenden Hilfsmittel sind die durch den Stickstoffdüngereinsatz ausgelösten N₂O-Feldemissionen (ein „Hilfsmittel“ im abstrakten Sinn, da diese Feldemissionen mit der Rapsölkraftstoffherstellung eng gekoppelt sind und sie wie die THGE echter Hilfsmittel in die Rechnung einfließen) und die THGE, die bei Herstellung und Transport von Stickstoffdünger entstehen. Die effizienteste Maßnahme zur Optimierung der Klimabilanz von Rapsölkraftstoff ist demnach der Ersatz von Standard-Stickstoffdünger durch anderen Dünger, der entweder bei seiner Herstellung und Transport weniger THGE verursacht und/ oder zu weniger N₂O-Feldemissionen führt oder die Reduzierung des Stickstoffdüngereinsatzes. Eine Berechnung des Optimierungspotenzials sprengt jedoch den Rahmen dieser Schrift.

Die nächste und auch sehr einfach umzusetzende Maßnahme ist der Ersatz von Diesellokstoff bei der Herstellung von Rapsölkraftstoff durch den hergestellten Rapsölkraftstoff selbst. Die dadurch erreichbare Verbesserung der Klimabilanz sei hier näher untersucht.

5.1 Nutzung des Rapsöls als Kraftstoff beim Anbau

Tabelle 44 zeigt einen Ausschnitt aus Tabelle 43, der die Beiträge der verschiedenen Verwendungen von Dieselmkraftstoff bei der Rapsölkraftstoffherstellung zu den THGE der gesamten Herstellungskette zeigt. Die Nutzung von Dieselmkraftstoff dominiert klar diese Beiträge.

Tabelle 44: Beiträge des Dieseleinsatzes an verschiedenen Stufen der Rapsölkraftstoffherstellung zu den THGE

Rang	Ort des Dieseleinsatzes	Beitrag zu $E_{m';tot}$	Einheit	Beitrag zu $E_{m';tot}$	Beitrag zu $E_{m';1}$	Einheit	Anteil an THGE
3	Anbau	259674,03	g CO _{2-eq} /ha/yr	6,030	3,693	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}	10,24%
11	Rapsöltransport	0,37	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl rein}	0,369	0,369	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}	1,02%
14	Rapssaattransport	0,17	g CO _{2-eq} /MJ _{Saat tr}	0,294	0,180	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}	0,62%
19	Rapssaattrocknung	0,02	g CO _{2-eq} /MJ _{Saat f}	0,027	0,017	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}	0,54%
-	Summe	-	-	6,719	4,258	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}	12,42%

Es sei darum zuerst untersucht, welche Optimierung der Klimabilanz von Rapsölkraftstoff sich erzielen lässt, wenn nur in den Landwirtschaftsmaschinen, die beim Anbau von Raps zum Einsatz kommen, Diesel- durch Rapsölkraftstoff ersetzt wird. Dies ist die nächstliegende Option.

Der Beitrag des Dieselmkraftstoffeinsatzes beim Anbau zu den anzurechnenden THGE beträgt 3,693 g CO_{2-eq}/MJ_{Öl im Tank}. Dieser ist direkt proportional zu den spezifischen THGE von Dieselmkraftstoff, 87,64 CO_{2-eq}/MJ_{Diesel im Tank} die für die Zwecke dieser Betrachtung (Variation der spezifischen THGE des eingesetzten Kraftstoffs) als veränderliche Variable betrachtet werden. Der Proportionalitätsfaktor, er sei **b** genannt, berechnet sich durch Division:

$$(59) \quad b = 3,693 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}} / 87,64 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Diesel im Tank}}} = 0,4214 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Diesel im Tank}}}$$

Die gesamten THGE betragen 36,051 CO_{2-eq}/MJ_{Öl im Tank}, der in der folgenden Betrachtung unveränderte Teil der THGE - sie entsprechen dem Term **a** in Gl. (33) - betragen also 32,358 CO_{2-eq}/MJ_{Öl im Tank}. Analog zu Gl. (33) lassen sich die gesamten anrechenbaren THGE dann wie folgt darstellen:

$$(60) \quad E_{B,1} = 32,358 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}} + 0,4214 \frac{\text{MJ}_{\text{Öl im Tank}}}{\text{MJ}_{\text{Diesel im Tank}}} \cdot I$$

Dabei ist **I** die zu variierende THGE-Intensität des beim Anbau eingesetzten Kraftstoffs. Da dieser in der folgenden Betrachtung variiert wird, wird die Indizierung der Einheit „MJ“ sinnlos. Sie wird darum im Folgenden weggelassen. Ferner wird der Index 1 bei **E_{B,1}** überflüssig, wenn der eingesetzte Kraftstoff variiert wird. Gl. (60) geht in eine etwas schlichtere Form über:

$$(61) \quad E_B = 32,358 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}} + 0,4214 \cdot I$$

Wird nun beim Anbau von Raps immer ausschließlich Rapsöl- statt Dieselmkraftstoff in den landwirtschaftlichen Maschinen eingesetzt, konvergieren die THGE des hergestellten Rapsölkraftstoffs gegen den nach Gl. (39) zu berechnenden Grenzwert:

$$(62) \quad E_B = \frac{32,358}{1-0,4214} \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}} = 33,78 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}}$$

Die damit erzielte THGE-Einsparung im Vergleich zum Standard-Rapsölkraftstoffherstellungspfad beträgt dann:

$$(63) \quad \text{Einsparung} = \frac{87,64 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}} - 33,78 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}}}{87,64 \frac{\text{g CO}_2\text{-eq}}{\text{MJ}}} = 61,45\%$$

Spricht, der Mindestwert für die THGE-Minderung von 60% wird für Rapsöl übertroffen, wenn dieser nach dem Standard-Herstellungspfad produziert, jedoch als das produzierte Rapsöl selbst statt Diesel als Kraftstoff für die landwirtschaftlichen Maschinen beim Rapsanbau eingesetzt wird.

Verwendet man in Gl. (63) statt 87,64 g CO₂-eq/MJ den in der KQR im Widerspruch zur JEC-Well-to-Wheel-Studie angegebenen und im BioGrace GHG Tool verwendeten Referenzwert von 83,8 g CO₂-eq/MJ, beträgt die Einsparung 59,69%. Da auf die erste Stelle vor dem Komma gerundet werden darf, erhält man 60%. Dieses Ergebnis ist also unabhängig davon, ob man die Korrektur des Referenzwerts für die THGE von Dieselmkraftstoff vornimmt oder nicht!

5.2 Ersatz von Diesel durch Rapsöl bei weiteren Stufen der Rapsölherstellung

Die zum Ersatz von Diesel- durch Rapsölkraftstoff in landwirtschaftlichen Maschinen beim Anbau des Rapses angestellten Überlegungen lassen sich auf die weiteren Verwendungen von Diesel als Hilfsmittel bei der Rapsölkraftstoffherstellung übertragen und analoge Berechnungen durchführen. Tabelle 45 zeigt die Ergebnisse solcher Berechnungen für verschiedene Kombinationen von Dieseleratz an verschiedenen Stellen der Herstellungskette. Die Ergebnisse zeigen, dass der Mindestwert von 60% THGE-Einsparung auch ohne Rundung des Ergebnisses erreicht bzw. überschritten werden kann, wenn neben den landwirtschaftlichen Maschinen beim Anbau auch noch die LKW, welche Rapssaad zur Ölmühle und Rapsöl zur Abgabestelle bringen, statt mit Diesel- mit Rapsölkraftstoff betankt werden.

Tabelle 45: Beiträge des Dieseleinsatzes an verschiedenen Stufen der Rapsölkraftstoffherstellung zu den THGE

Ersatz von Diesel durch Rapsöl bei:	Beitrag zu e _{m;1}	a	b	a/(1-b)	Einsparung
Anbau	3,693	32,358	0,042	33,782	61,45%
Anbau und Rapssaattransport	4,062	31,989	0,046	33,544	61,72%
Anbau und Rapsöltransport	3,873	32,178	0,044	33,666	61,59%
Anbau und Rapssaat- und -öltransport	4,242	31,809	0,048	33,427	61,86%
allen Dieselerwendungen	4,258	31,793	0,049	33,416	61,87%

Weitere Verbesserungen der Klimabilanz sind möglich, wenn die Ölpresse sich in dem landwirtschaftlichen Betrieb befindet, der den Raps anbaut und der Rapssaattransport entfällt oder über geringere Strecken durchzuführen ist. Auch kann die für die Trocknung und Pressung

erforderliche Wärme und Elektrizität in einem Rapsöl-BHKW erzeugt werden. All dies führt zu einer weiteren Verbesserung der Einsparung von THGE durch den Einsatz des dann noch verbleibenden Rapsöls als Kraftstoff an Stelle von Diesel.

6. Modellierung der Klimabilanz von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau

6.1 Mischfruchtanbau von Leindotter mit Körnerfrüchten

Beim Mischfruchtanbau werden zwei oder mehr Körnerfrüchte mit einer angepassten Sämaschine gemeinsam gesät, wachsen die gleiche Zeit auf dem gleichen Feld und werden dann mit einer ebenso angepassten Erntemaschine gemeinsam geerntet. Nach der Ernte werden die Saaten maschinell getrennt. Die dafür verwendeten Verfahren sind die gleichen, die sonst auch für die Saatreinigung verwendet werden. Diese Vergesellschaftung der Körnerfrüchte führt zu einem etwas höheren Flächenertrag als beim getrennten Anbau in Reinkulturen, vermindert den Unkraut-, Pilz- und Schimmelbefall und spart damit beim Anbau Pflanzenschutzmittel, Arbeitszeit und Betriebsmittel für landwirtschaftliche Maschinen. Dem stehen etwas höhere Aufwendungen durch den Bedarf an angepasster Saat- und Erntetechnik und der Notwendigkeit der Saattrennung gegenüber.^{15, 16}

Mit Blick auf die Gewinnung von Biokraftstoffen aus landwirtschaftlicher Produktion für den Einsatz in Landwirtschaftsmaschinen ist vor allem die Variante interessant, Getreide oder Körnerleguminosen zu einem kleinen Teil eine Ölfrucht beizumischen, so dass die positiven Effekte der Pflanzenvergesellschaftung erzielt und neben der Hauptfrucht noch ein kleine Menge Ölsaaten geerntet werden kann, aus der hinreichend viel Pflanzenölkraftstoff für den Eigenbedarf der Landwirtschaft gewonnen werden kann.

Als am besten geeignete Ölfrucht hat sich der Leindotter (*Camelina sativa* [L.] Crtz.) herausgestellt. Die Eignung des Leindotteröls als Pflanzenkraftstoff schien lange Zeit illusorisch zu sein. Es war eines der überraschendsten Ergebnisse des 2ndVegOil-Projekts, dass dem nicht so ist und Leindotteröl sehr wohl in geeignet angepassten Dieselmotoren der Abgasemissionsklassen 3B und 4 eingesetzt werden kann, vorausgesetzt, Verbindungen mit den Elementen Ca, Mg und P werden zuvor bis auf die Nachweisgrenze aus dem Öl entfernt.

Für die Klimabilanz ist wichtig, dass Leindotter eine sehr anspruchslose Pflanze ist, so dass der Einsatz von Inputstoffen in der Anbauphase bei Leindottermischkulturen mit Körnerfrüchten geringer ist als bei einer Reinkultur der Hauptfrucht. Hinzu kommt, dass der Gesamtertrag beim Mischfruchtanbau meistens höher ausfällt als bei getrennten Reinkulturen. Beides verbessert die Klimabilanz.^{17, 18}

Der Anbau von Leindotter-Körnerfrucht-Mischungen ist allerdings noch keine etablierte Anbaumethode und es liegen zwar gute Anhaltspunkte, aber noch keine gesicherten Werte für Input- und Ertragsparameter vor. In den hier vorgestellten Berechnungen wurden so weit wie möglich gut belegte, ansonsten plausible Werte für Hilfsstoffmengen und Erträge angenommen und die Relevanz verschiedener Parameter untersucht, um das Potenzial für ein gezieltes Klimadesign von Leindotteröl zu ermitteln.

Es wurde dafür der Fall des Mischfruchtanbaus von Leindotter mit Weizen untersucht, weil für Weizen im Zusammenhang mit der KQR Standardwerte für Input- und Ertragsparameter festgelegt worden waren, die auch im BioGrace GHG Tool niedergelegt sind. Diese Standardwerte wurden für die hier präsentierten Berechnungen verwendet.

¹⁵ Kramerbräuhof, www.kramerbraeuhof.de

¹⁶ Bundesverband Pflanzenöle: Mischfruchtanbau, <http://www.bv-pflanzenoele.de/pdf/Mischfruchtanbau.pdf>

¹⁷ Paulsen H M (2007) Mischfruchtanbausysteme mit Ölpflanzen im ökologischen Landbau: 1. Ertragsstruktur des Mischfruchtanbaus von Leguminosen oder Sommerweizen mit Leindotter (*Camelina sativa* L. Crantz). Landbauforschung Völknerode 57(1):107-117

¹⁸ Gollner, G., et al., Körnerleguminosen in Mischkulturen mit Leindotter (*Camelina sativa*) im Ökologischen Landbau unter pannonischen Standortbedingungen, Journal für Kulturpflanzen, 62 (11). S. 402–408, 2010, ISSN 0027-7479

6.2 Modellierung des Mischfruchtanbaus von Leindotter mit Weizen

Betrachtet seien zunächst die dem Anbau folgenden Prozessschritte. Zur Vereinfachung sei angenommen, dass bei der Trennung von Leindotter- und Weizensaat nach der Ernte nur vernachlässigbar kleine Mengen an Hilfsstoffen benötigt werden. Die in diesem Prozessschritt anzusetzenden THGE sind dann gleich Null. Für die weiteren Prozessschritte von der Leindottersaattrocknung bis zur Leindotterölabgabe in den Tank werden die gleichen Prozesseffizienzen, Allokationsfaktoren und THGE angesetzt wie bei Raps. Dies ist im Rahmen dieser Untersuchung gerechtfertigt, da die THGE der Prozessstufen nur einen kleinen Beitrag zu den gesamten THGE darstellen und kleine Unterschiede etwa beim Energieaufwand für die Pressung von Leindotter im Vergleich zu Raps vernachlässigt werden können. Die Unterschiede zwischen den THGE von Leindotter- und Rapsöl rühren bei diesen Annahmen allein vom Anbau her.

Für den Grenzfall von 0% Leindotteranteil werden die gleichen Werte für die Hilfsstoffmengen und den Ertrag von Weizen angesetzt wie im BioGrace GHG Tool vs4-public. Die für die Berechnung der Klimabilanz wichtigen Parameter des Leindotters (Ölanteil, unterer Heizwert des Öls) liegen im gleichen Bereich wie die von Rapsöl.¹⁹ Für den Grenzfall von 100% Leindotteranteil wurden darum die gleichen Standardwerte für die Hilfsstoffmengen und der gleiche untere Heizwert der Saat angesetzt wie für Raps. Für den Stickstoffbedarf, der sich auf die Klimabilanz am stärksten auswirkt, ist ein genauerer Wert bekannt: 80 statt 137,4 kg N/ha/yr. Dieser wird darum verwendet. Für den Ertrag einer Leindotter-Reinkultur wird hier vorsichtigerweise der niedrige Wert von 2000 kg Trockenmasse/ha/yr angesetzt²⁰.

Der Skalierungsparameter, welcher den Grad der Mischung beschreibt, sei mit x bezeichnet. Er ist ein Maß für die eingesetzten Hilfsstoffe, nicht die Erträge. Für $x = 0$ werden die angegebenen Hilfsstoffmengen für eine Weizen-Reinkultur angesetzt, für $x = 1$ die für eine Leindotter-Reinkultur. Diese Definition des Skalierungsparameters deckt sich mit der Verwendung des Begriffs „Leindotteranteil“ bei Gollner et al.²¹ Dort ist das Mischungsverhältnis MV anhand der Saatstärken folgendermaßen definiert:

$$(64) \quad MV = \left[\frac{\text{Leindottersaat bei Mischfrucht}}{\text{Leindottersaat bei Reinsaat}} \cdot 100 \right] : \left[\frac{\text{Weizensaat bei Mischfrucht}}{\text{Weizensaat bei Reinsaat}} \cdot 100 \right]$$

Das Mischungsverhältnis kann Werte zwischen 0:100 und 100:0 annehmen, wobei i.d.R. nur substitutive Mischungen betrachtet werden, bei denen die Summe von Zähler und Nenner immer 100 ergibt.

Der Begriff „Mischungsanteil“ wird bei Gollner et al. so verwendet, dass die Umsetzung des Begriffs „Leindotteranteil“ in einen mathematischen Term den Zähler des Bruchs in (64) und die des Begriffs „Weizenanteil“ den Nenner ergibt. Nach der hier präsentierten Modellierung gehören die Leindotter- und Weizensaat zu den Hilfsstoffen, die linear von dem Skalierungsparameter x abhängen. Es gilt:

$$(65) \quad x = \frac{\text{Leindottersaat bei Mischfrucht}}{\text{Leindottersaat bei Reinsaat}} = 1 - \frac{\text{Weizensaat bei Mischfrucht}}{\text{Weizensaat bei Reinsaat}}$$

¹⁹ Universität Rostock, Abschlussbericht zum Projekt „Nutzung von Leindotteröl in Mischungen mit anderen Pflanzenölen als Sonderkraftstoff“, FKZ 22009507

²⁰ Leindotter – Reichlich Öl bei Minimalaufwand, Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Bayern, http://www.tfz.bayern.de/sonstiges/16459/07brs049_leindotter_reichlich_oel_bei_minimalaufwand.pdf

²¹ Gollner, G., et al., Körnerleguminosen in Mischkulturen mit Leindotter (*Camelina sativa*) im Ökologischen Landbau unter pannonischen Standortbedingungen, Journal für Kulturpflanzen, 62 (11). S. 402–408, 2010, ISSN 0027-7479

Folglich ist x identisch mit „Leindotteranteil“ bei Gollner et al. Aus (64) und (65) folgt noch:

$$(66) \quad MV = \frac{x}{1-x}$$

Diese Funktion erfüllt aber genau die schon genannten Anforderungen an ein substitutives Mischungsverhältnis, wenn x im rechtsseitig offenen Intervall $[0;1[$ liegt, nur der Grenzwert $\lim_{x \rightarrow 1} MV(x)$ ist nicht definiert.

Bei der Interpolation der Erträge von Weizen und Leindotter im Mischfruchtanbau für Werte des Skalierungsparameters x zwischen 0 und 1 ist zu berücksichtigen, dass der Mischfruchtanbau Synergie-Effekte erzeugt, die Erträge also im Gegensatz zu den eingesetzten Hilfsstoffen nicht linear vom Skalierungsparameter x abhängen, sondern für Werte von x zwischen 0 und 1 etwas höher sind. Die Synergie-Effekte können auf verschiedene Weisen ausgedrückt werden. Einer davon ist die Angabe des Betrags, um den die Erträge größer sind als der Wert, der sich bei einer linearen Abhängigkeit von x ergibt. Der letztgenannte Wert wird auch Erwartungswert genannt, weil der sogenannte gesunde Menschenverstand²² üblicherweise erwartet, dass funktionale Zusammenhänge linear sind.

Eine andere Form der Darstellung der Synergie-Effekte beim Mischfruchtanbau ist die mittels relativer Flächenenerträge (Relative Yield Total, RYT). Diese sind wie folgt definiert:

$$(67) \quad RYT = \frac{\text{Ertrag der Mischfrucht 1}}{\text{Ertrag der Reinsaat 1}} + \frac{\text{Ertrag der Mischfrucht 2}}{\text{Ertrag der Reinsaat 2}}$$

Dabei werden die Erträge üblicherweise in kg Trockenmasse/ha/yr angegeben. Etablierte Durchschnittswerte für **RYT** sind noch nicht verfügbar, bekannt ist nur, dass sie in den meisten Jahren über 1 liegen und bis zu 1,4 erreichen können²³. Hier sei angenommen, dass ein **RYT** von 1,15 bei Leindotter-Weizen-Mischungen im langfristigen Mittel bei hinreichend vielen Standorten reproduziert werden kann. Dabei seien die Erträge in MJ/ha/yr statt in kg Trockenmasse/ha/yr angegeben. Da der damit errechnete Wert für RYT ein geringfügig anderer ist, bedarf dies der Kennzeichnung. Dazu wird die Größe **RYT_E** eingeführt. Sie ist auch nach Gl. (67) definiert, aber mit Energie- nicht mit Trockenmasseerträgen. Der Index E verweist darauf.

Für die Interpolation der Erträge wird eine stetige Funktion benötigt, die im Intervall $[0;1]$ ein Maximum aufweist. Die einfachste Funktion, die diese Bedingungen erfüllt ist ein Polynom zweiten Grades mit einem negativen Koeffizienten im quadratischen Term. Mangels genauerer Kenntnis der funktionalen Zusammenhänge der Synergie-Effekte wird noch eine weitere Vereinfachung vorgenommen und festgelegt, dass das Maximum genau in der Mitte des Intervalls liegen soll. Eine solche Funktion ist:

$$(68) \quad y = -4 \cdot (\alpha_{50} - 0,5) \cdot (x - 0,5)^2 + x + (\alpha_{50} - 0,5)$$

²² „Gesunder Menschenverstand: eigentlich nur eine Anhäufung von Vorurteilen, die man bis zum 18. Lebensjahr erworben hat.“ (Albert Einstein), <http://zitate.net/albert%20einstein:4.html>

²³ Paulsen H M (2007) Mischfruchtanbausysteme mit Ölpflanzen im ökologischen Landbau: 1. Ertragsstruktur des Mischfruchtanbaus von Leguminosen oder Sommerweizen mit Leindotter (*Camelina sativa* L. Crantz). Landbauforschung Völkenrode 57(1):107-117

Sie nimmt für $x = 0$ den Wert 0, für $x = 1$ den Wert 1 und für $x = 0,5$ den Wert α_{50} an. Die Differenz $\alpha_{50} - 0,5$ ist gleich der Abweichung der Funktion von der linearen Interpolation bei $x=0,5$.

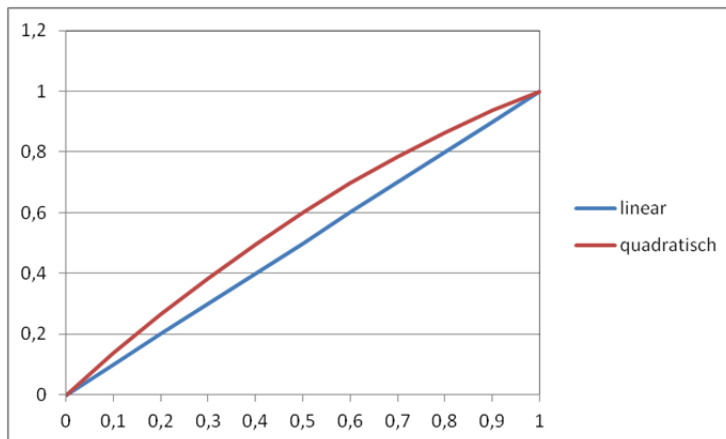


Abbildung 3: Quadratische und lineare Interpolationsfunktionen im Vergleich

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der quadratischen Interpolationsfunktion nach Gl. (68) für den Parameterwert $\alpha_{50} = 0,6$ im Vergleich zu einer linearen Interpolationsfunktion. Die Abweichung der quadratischen von der linearen Interpolationsfunktion ist bei 0,5, also bei 50% des Intervalls, maximal.

Weiter sei $\alpha_{50,CS}$ der Prozentsatz, den der Ertrag des Leindotters gemessen am Ertrag einer Reinkultur erreicht, wenn der Einsatz der Hilfsstoffe die Summe der halben Hilfsstoffmengen einer Leindotter- und einer Weizenreinkultur beträgt. Die Gleichung für den Ertrag des Leindotters, $y_{0;1}$, ist dann:

$$(69) \quad y_{0;1} = [-4 \cdot (\alpha_{50,CS} - 0,5) \cdot (x - 0,5)^2 + x + (\alpha_{50,CS} - 0,5)] \cdot 2000 \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{yr}} \cdot 26,4 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Analog ist $\alpha_{50,W}$ der entsprechende Prozentsatz für Weizen. Dessen Ertrag wird dann durch folgende Funktion beschrieben:

$$(70) \quad y_{0;2} = [-4 \cdot (\alpha_{50,W} - 0,5) \cdot (x - 0,5)^2 + x + (\alpha_{50,W} - 0,5)] \cdot 76587 \frac{\text{MJ}}{\text{ha} \cdot \text{yr}}$$

Die Differenzen $\alpha_{50,CS} - 0,5$ und $\alpha_{50,W} - 0,5$ entsprechen dem Mischungseffekt ME_1 bei Gollner et al.²⁴ Sie unterscheiden sich von ME_1 nur durch die konstanten Faktoren rechts der eckigen Klammern, welche die Erträge der jeweiligen Reinkulturen sind. Die folgende Gleichung stellt die Verbindung zu den relativen Flächenenerträgen her:

$$(71) \quad RYT_E = \alpha_{50,CS} + \alpha_{50,W}$$

²⁴ Gollner, G., et al., Körnerleguminosen in Mischkulturen mit Leindotter (*Camelina sativa*) im Ökologischen Landbau unter pannonischen Standortbedingungen, Journal für Kulturpflanzen, 62 (11). S. 402–408, 2010, ISSN 0027-7479

6.3 Berechnung der THGE für eine Leindotter-Weizen-Mischung

Tabelle 46 fasst die Parameter zusammen, die für die Modellierung der Leindotter-Weizen-Mischung gewählt wurden. Es wurde unterstellt, dass der Mischungseffekt den Ertrag des Leindotters etwas stärker anhebt, als den des Weizens.

Tabelle 46: Mischfrucht-Parameter

Mischfrucht-Parameter	Wert	Einheit
Leindotter-Korntrag (Trockenmasse; Reinkultur)	2.000	kg/ha/yr
Unterer Heizwert Leindottersaat (absolut trocken)	26,40	MJ/kg
Leindotter-Energieertrag (Reinkultur)	52.800	MJ/ha/yr
Weizen-Energieertrag (Reinkultur)	76.587	MJ/ha/yr
$\alpha_{50,CS}$	60%	-
$\alpha_{50,W}$	55%	-
RYT_E	1,15	-

Tabelle 47 zeigt die Erträge von Leindotter und Weizen sowie die jeweils angesetzten Hilfsstoffmengen für verschiedene Werte des Skalierungsparameters x . Dieser wird im Folgenden in Analogie zu Gollner et al. auch als „Leindotteranteil“ bezeichnet. Er ist nicht zu Verwechseln mit dem Leindotteranteil am Gesamtenergieertrag. Zur Verdeutlichung werden der Skalierungsparameter x und der Leindotteranteil am Gesamtenergieertrag separat gezeigt. Die beiden sind haben ähnliche Werte, laufen aber um bis zu 8,75% auseinander! Der angezeigte Leindotteranteil am Gesamtertrag ist identisch mit dem Allokationsfaktor $\alpha_{0,1}$ für die Leindottersaat in der Anbaustufe.

Tabelle 47: Erträge und Hilfsstoffmengen für verschiedene Anteile von Leindotter

Parameter	Skalierungsparameter (x):	0,01%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	Einheit
$y_{0,1}$	Leindotterertrag	7	7.181	13.939	20.275	26.189	31.680	36.749	41.395	45.619	49.421	52.800	MJ _{Leindottersaat, f} /ha/yr
$y_{0,2}$	Weizenertrag	76.581	70.307	63.720	56.828	49.628	42.123	34.311	26.193	17.768	9.037	0	MJ _{Weizen} / ha/yr
-	Leindotteranteil am Gesamtenergieertrag ($\alpha_{0,1}$):	0,01%	9,27%	17,95%	26,30%	34,54%	42,93%	51,72%	61,25%	71,97%	84,54%	100,00%	-
$l_{0,1}$	Diesel	3.716,50	3.641,15	3.565,80	3.490,45	3.415,10	3.339,75	3.264,40	3.189,05	3.113,70	3.038,35	2.963,00	MJ Diesel/ha/yr
$l_{0,2}$	N-Dünger (kg N)	109,30	106,37	103,44	100,51	97,58	94,65	91,72	88,79	85,86	82,93	80,00	kg N/ha/yr
$l_{0,3}$	CaO-Dünger (kg CaO)	0,00	1,90	3,80	5,70	7,60	9,50	11,40	13,30	15,20	17,10	19,00	kg CaO/ha/yr
$l_{0,4}$	K ₂ O-Dünger (kg K ₂ O)	16,36	19,67	22,98	26,29	29,60	32,91	36,22	39,53	42,84	46,15	49,46	kg K ₂ O/ha/yr
$l_{0,5}$	P ₂ O ₅ -Dünger (kg P ₂ O ₅)	21,64	22,84	24,04	25,25	26,45	27,65	28,86	30,06	31,27	32,47	33,67	kg P ₂ O ₅ /ha/yr
$l_{0,6}$	Pestizide	2,34	2,22	2,11	2,00	1,89	1,78	1,67	1,56	1,45	1,34	1,23	kg Pestizide/ha/yr
$l_{0,7}$	Weizensaat	120,00	108,00	96,00	84,00	72,00	60,00	48,00	36,00	24,00	12,00	0,00	kg Weizensaat/ha/yr
$l_{0,8}$	Leindottersaat	0,00	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00	3,60	4,20	4,80	5,40	6,00	kg Leindottersaat/ha/yr
$l_{0,9}$	N ₂ O Feldemissionen	1.808,30	1.937,76	2.067,21	2.196,67	2.326,12	2.455,58	2.585,03	2.714,49	2.843,95	2.973,40	3.102,86	g N ₂ O/ha/yr

Die Kennzahlenmatrix G_0 ist in Tabelle 48 gezeigt. Sie ist unabhängig vom Leindotteranteil. G_0 hat hier eine Spalte mehr als im Fall von Rapsöl, da neben der Ölsaatsaat auch die Weizensaat zu den Hilfsstoffen hinzugekommen ist. Es ließe sich darüber debattieren, ob dies sinnvoll ist, da die Weizensaat eindeutig ein Hilfsstoff ist, der nicht für die Erzeugung des Leindotteröls benötigt wird. Diese Diskussion sei hier zurückgestellt. Der Vektor y_0 ist in Tabelle 49 gezeigt. Die spezifischen THGE für verschiedene Leindotteranteile sind in Tabelle 50 gezeigt. Sie sind allesamt niedriger als für Rapsöl.

Tabelle 48: Komponenten der Kennzahlenmatrix G_0

G_0	$g_{0,j,1}$	$g_{0,j,2}$	$g_{0,j,3}$	$g_{0,j,4}$	$g_{0,j,5}$	$g_{0,j,6}$	$g_{0,j,7}$	$g_{0,j,8}$	$g_{0,j,9}$
$g_{0,1,k}$	87,6389	2.827,0049	119,1160	536,3109	964,8865	9.886,5020	151,0557	412,0811	0,0000
$g_{0,2,k}$	0,0000	9,6418	0,0183	0,0123	0,0515	1,6814	0,4003	1,0028	1,0000
$g_{0,3,k}$	0,0000	8,6788	0,2159	1,5709	1,3310	25,5271	0,28	0,9127	0,0000
Einheit	g THG ^{*)} / MJ Diesel	g THG ^{*)} / kg N	g THG ^{*)} / kg CaO	g THG ^{*)} / kg K ₂ O	g THG ^{*)} / kg P ₂ O ₅	g THG ^{*)} / kg Pestizide	g THG ^{*)} / kg Weizensaat	g THG ^{*)} / kg Leindottersaat	g THG ^{*)} / g N ₂ O

^{*)} THG = CO₂ für die Matrizenelemente der ersten Zeile, N₂O für die der zweiten und CH₄ für die der dritten

Tabelle 49: Spezifische THGE je Einheit Hilfsmittel

Y ₀	Faktor	Einheit
Y _{0,1}	87,64	g CO _{2-eq} /MJ Diesel
Y _{0,2}	5.917,23	g CO _{2-eq} /kg N
Y _{0,3}	129,97	g CO _{2-eq} /kg CaO
Y _{0,4}	579,25	g CO _{2-eq} /kg K ₂ O
Y _{0,5}	1.013,51	g CO _{2-eq} /kg P ₂ O ₅
Y _{0,6}	11.025,74	g CO _{2-eq} /kg Pestizide
Y _{0,7}	277,27	g CO _{2-eq} /kg Weizensaat
Y _{0,8}	733,73	g CO _{2-eq} /kg Leindottersaat
Y _{0,9}	298,00	g CO _{2-eq} /g N ₂ O

Tabelle 50: Spezifische THGE des Anbaus für verschiedene Leindotteranteile

Y ₀ -I ₀	Skalierung parameter (x):	0,01%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	Einheit
Y _{0,1} -I _{0,1}	Diesel	325.710	319.106	312.503	305.899	299.296	292.692	286.088	279.485	272.881	266.278	259.674	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,2} -I _{0,2}	N-Dünger (kg N)	646.779	629.439	612.099	594.759	577.419	560.079	542.739	525.399	508.059	490.719	473.379	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,3} -I _{0,3}	CaO-Dünger (kg CaO)	0	247	494	741	988	1.235	1.482	1.729	1.975	2.222	2.469	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,4} -I _{0,4}	K ₂ O-Dünger (kg K ₂ O)	9.475	11.392	13.310	15.227	17.144	19.061	20.979	22.896	24.813	26.730	28.648	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,5} -I _{0,5}	Dünger (kg P ₂ O ₅)	21.928	23.148	24.368	25.588	26.808	28.028	29.248	30.468	31.688	32.908	34.128	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,6} -I _{0,6}	Pestizide	25.745	24.527	23.308	22.090	20.872	19.653	18.435	17.217	15.998	14.780	13.562	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,7} -I _{0,7}	Weizensaat	33.273	29.945	26.618	23.291	19.964	16.636	13.309	9.982	6.655	3.327	0	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,8} -I _{0,8}	Leindotter- saat	0	440	880	1.321	1.761	2.201	2.641	3.082	3.522	3.962	4.402	g CO _{2-eq} /ha/yr
Y _{0,9} -I _{0,9}	N ₂ O Feld- emissionen	538.873	577.451	616.029	654.607	693.185	731.762	770.340	808.918	847.496	886.074	924.651	g CO _{2-eq} /ha/yr
ε _{0,tot}	-	1.601.784	1.615.697	1.629.610	1.643.523	1.657.436	1.671.349	1.685.262	1.699.174	1.713.087	1.727.000	1.740.913	g CO _{2-eq} /ha/yr
e _{0,tot}	-	372217,676	386,482	200,811	139,237	108,709	90,620	78,771	70,507	64,502	60,024	56,635	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl} _im_Tank
e _{0,1}	-	22,004	21,937	22,077	22,426	23,000	23,826	24,951	26,450	28,433	31,081	34,689	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl} _im_Tank

Die THGE je Anbauflächenjahr, $\epsilon_{0,tot}$, variieren nur wenig und liegen insgesamt unter denen von Raps, da der Stickstoffdüngereinsatz geringer als bei Raps angesetzt wurde. Die auf den Energiegehalt des Leindotteröls im Tank bezogenen THGE, $e_{0,tot}$, divergieren bei kleinen Leindotteranteilen gegen Unendlich. Dies liegt daran, dass eine endliche Größe, die THGE je Anbauflächenjahr, durch eine immer kleiner werdende Größe, den Anteil des Leindotters am Gesamtenergieertrag, geteilt werden. Darum wird hier auch kein Wert für einen Leindotteranteil von 0%, sondern von 0,01% gezeigt.

Im Gegensatz zu einer Ölsaatenreinkultur erfolgt beim Mischfruchtanbau bereits eine Allokation der THGE beim Anbau. Wie von der KQR gefordert, wird Weizenstroh nicht als Nebenerzeugnis berücksichtigt. Damit ist der Allokationsfaktor für Leindottersaat gleich dem Energieanteil des Leindotters am Energiegehalt von Leindottersaat und Weizen. Die allokierten, auf den Energiegehalt des Leindotteröls im Tank bezogenen THGE, $e_{0,1}$, sind wieder eine schwach veränderliche endliche Größe. Sie liegen hier über den gesamten Bereich unter dem entsprechenden Wert für Rapsöl.

Addiert man zu den allokierten, auf das Öl im Tank bezogenen THGE des Anbaus, $e_{0,1}$, die THGE der folgenden Prozessstufen, erhält man die gesamten zu berücksichtigenden THGE, E_b . Diese und die resultierende Einsparung zeigt Tabelle 51. Dort ist eine weitere Größe aufgeführt, das Heizenergie-(Treibhausgas-)Emissions-Verhältnis (HEV) der Anbaustufe. Es ist wie folgt definiert:

$$(72) \quad \text{HEV} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} y_{0,i}}{\epsilon_{0,tot}}$$

Das HEV der Anbaustufe gibt an, wie groß der Gesamtenergieertrag aller allokatonsfähigen Erzeugnisse der Anbaustufe im Verhältnis zu den flächenbezogenen THGE der Anbaustufe ist. Die physikalische Einheit ist MJ/kg CO_{2-eq}. Die Einsparung als Funktion des Leindotteranteils ist zudem als oberste Kurve in Abbildung 4 gezeigt. Diese und die weiteren Kurven sowie die Rolle des HEV als Schlüssel-Parameter werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

Tabelle 51: Gesamte THGE und resultierende Einsparung für verschiedene Leindotteranteile (Skalierungsparameter X)

Skalierungsparameter (x)	0,01%	10,00%	20,00%	30,00%	40,00%	50,00%	60,00%	70,00%	80,00%	90,00%	100,00%	-
Leindotteranteil am Gesamtenergieertrag	0,01%	9,27%	17,95%	26,30%	34,54%	42,93%	51,72%	61,25%	71,97%	84,54%	100,00%	-
HEV	47,81	47,96	47,66	46,91	45,74	44,16	42,17	39,78	37,00	33,85	30,33	MJ/kg CO _{2-eq}
E _B	28,462	28,396	28,536	28,885	29,458	30,284	31,410	32,908	34,892	37,540	41,148	g CO _{2-eq} /MJ _{Öl im Tank}
Einsparung	67,52%	67,60%	67,44%	67,04%	66,39%	65,44%	64,16%	62,45%	60,19%	57,17%	53,05%	-

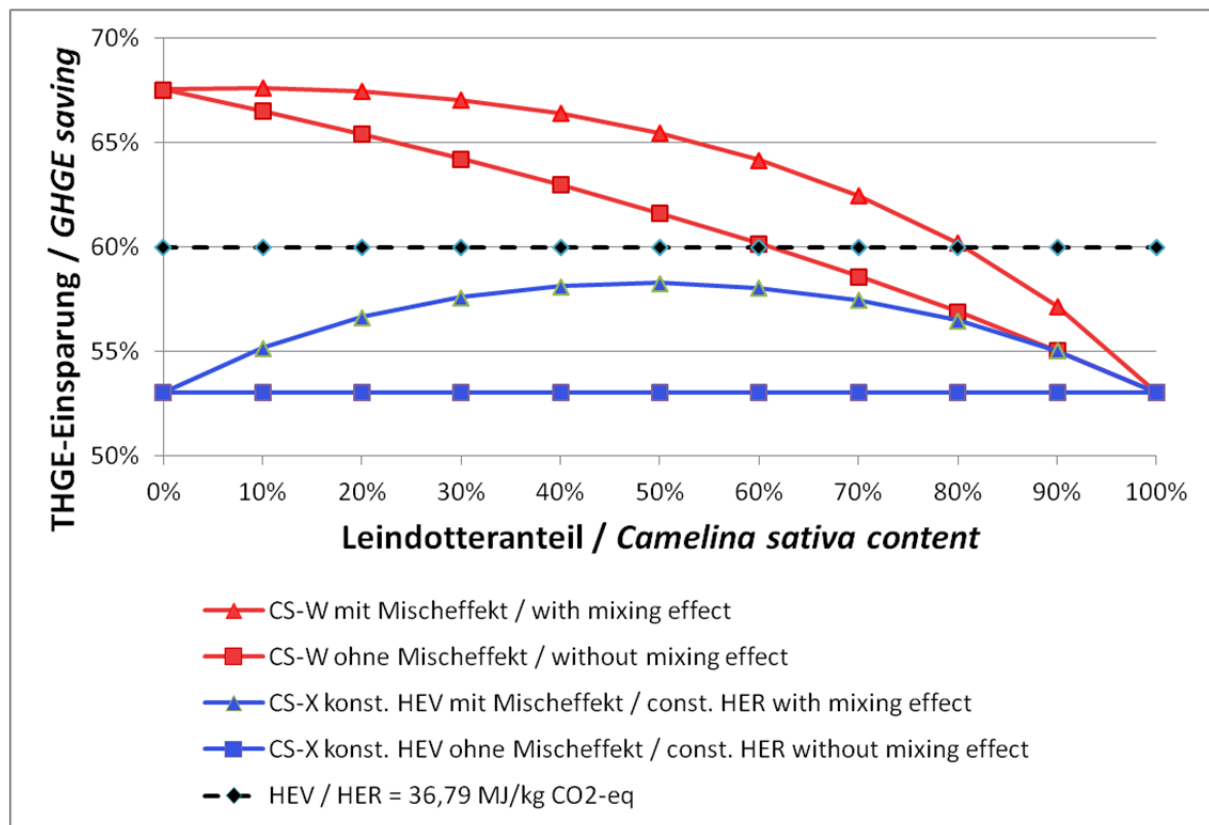


Abbildung 4: THGE-Einsparung als Funktion des Leindotteranteils (Camelina sativa, CS) in Mischungen mit Weizen (W) und einer fiktiven Körnerfrucht mit gleichem HEV wie Leindotter (X)

6.4 Schlüssel-Parameter zur Auswahl geeigneter Mischungen

Abbildung 4 zeigt eine Schar von 5 Kurven für die THGE-Minderung durch Leindotterölkraftstoff aus Mischfruchtanbau für 5 verschiedene Situationen:

1. Kombination von Leindotter (*Camelina sativa*, CS) und Weizen (W) und Berücksichtigung von Synergie-Effekten, die sich durch einen Mehrertrag an Leindotter von 20% ($\alpha_{50,CS}=0,6$ statt 0,5) und an Weizen von 10% ($\alpha_{50,W}=0,55$ statt 0,5) gegenüber den Erwartungswerten ausdrücken (oberste Kurve, mit Krümmung). Die Berechnung dieser Situation wurde oben ausführlich vorgestellt.
2. Kombination von Leindotter und Weizen wie bei 1., aber nun ohne Berücksichtigung von Synergie-Effekten, d.h. indem bei der Berechnung $\alpha_{50,CS}$ und $\alpha_{50,W}$ beide auf 0,5 gesetzt wurden (zweite Kurve von oben, ohne Krümmung).
3. Kombination von Leindotter und einer fiktiven Körnerfrucht (X), die bei einer Reinkultur das gleiche HEV aufweist wie Leindotter, und Berücksichtigung von Synergie-Effekten wie bei 1. (zweite Kurve von unten, mit Krümmung). Bei der fiktiven Körnerfrucht wurde angenommen, dass die THGE wie bei Weizen sind, der Ertrag einer Reinkultur aber nur 48.580 MJ/ha/yr beträgt. Dies führt zum gleichen HEV wie bei Leindotter (30,33 MJ/kg CO_{2-eq}).
4. Kombination von Leindotter und einer fiktiven Körnerfrucht wie bei 3., aber ohne Berücksichtigung von Synergie-Effekten (unterste Kurve, ohne Krümmung).
5. Kombination einer fiktiven Ölfrucht mit einer fiktiven Körnerfrucht, die beide in Reinkultur ein HEV von 36,79 MJ/kg CO_{2-eq} haben, also das HEV, bei dem die oberen beiden Kurven die Linie von 60% THGE-Minderung schneiden (mittlere horizontale Linie).

Die Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

1. Das HEV der Anbaustufe ist der entscheidende Schlüssel-Parameter, mit dessen Hilfe sich bestimmen lässt, ob eine Körnerfruchtmischung die Produktion von Pflanzenölkraftstoff erlaubt, welcher einen bestimmten THGE-Minderungswert überschreitet.
2. Das HEV der Mischung muss mindestens 36,79 MJ/kg CO_{2-eq} betragen, damit eine THGE-Minderung von 60% erreicht wird. Dies gilt, wenn die oben gemachten Annahmen, insbesondere ein Standard-Rapsölpfad bei den dem Anbau folgenden Prozessstufen, gemacht werden. Sind die THGE aus diesen Prozessstufen andere als beim Standard-Rapsölpfad, ist auch der Mindestwert für das HEV ein (geringfügig) anderer und muss neu berechnet werden.
3. Die Synergie-Effekte, welche beim Mischfruchtanbau beobachtet werden, haben einen merklichen Einfluss auf die erzielbare THGE-Minderung. Sie können diese um mehrere Prozentpunkte heben, im Fall der berechneten Leindotter-Weizen-Mischung um bis zu 3,8%.
4. Geeignete Schlüssel-Parameter zur Beschreibung der Synergie-Effekte sind die Koeffizienten $\alpha_{50,CS}$ und $\alpha_{50,W}$. Je höher sie sind, desto höher die THGE-Minderung. Dabei beeinflussen beide unabhängig voneinander deren Wert. Ein hohes $\alpha_{50,CS}$ bedeutet einen hohen Leindotterertrag in der Mischkultur bei gleichbleibenden flächenbezogenen THGE. Dies führt zu einer größeren Menge Leindotteröl, auf das die THGE umgelegt werden und zu niedrigeren Biokraftstoff-spezifischen THGE. Ein hohes $\alpha_{50,W}$ bedeutet einen hohen Weizenertrag in der Mischkultur. Dies führt zu einer stärkeren Zuordnung der THGE zum Weizen und so ebenfalls zu niedrigeren Biokraftstoff-spezifischen THGE.
5. Die berechneten THGE für Leindotterölkraftstoff aus einer Leindotter-Weizen-Mischkultur liegen für einen weiten Bereich von Mischungsverhältnissen über der Mindestgrenze von 60%.
6. Leindotterölkraftstoff aus einer Reinkultur verfehlt unter den in der Berechnung getroffenen Annahmen das Mindestreduktionsziel um mehrere Prozentpunkte. Dies liegt an dem angenommenen niedrigen Ertrag einer Leindotterreinkultur von nur 2.000 kg/ha/yr, welcher durch den ebenfalls niedrig angesetzten Bedarf an Stickstoffdünger von 80 kg N/ha nicht kompensiert wird. Die Marke von 60% THGE-Einsparung wird unter sonst gleichen Annahmen jedoch bereits bei einem Ertrag von 2.426 kg/ha/yr erreicht (separate Rechnung, die nicht durch die oben gezeigten Kurven wiedergegeben ist), also bei einem durchaus realistischen Ertragswert!

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Korrekturbedarf bei der KQR

Das hier vorgestellte mathematische Modell zur Berechnung von THGE von Biokraftstoffen setzt die in der KQR, Annex IV.C skizzierte Methode in ein Rechenverfahren um. Die damit erzielten Ergebnisse sind, bei gleichen Kennwerten und Eingangsgrößen für den Standard-Rapsölkraftstoffpfad exakt identisch zu denen, die mit dem BioGrace GHG Tool vs4-public erzielt werden. Damit sind beide Rechenverfahren äquivalent und bestätigen sich gegenseitig. Der Vorteil des hier vorgestellten Verfahrens liegt in der gegenüber dem BioGrace GHG Tool größeren Transparenz und größeren formalen Allgemeinheit, welche gestatten, auch komplizierte, verzweigte Herstellungspfade für Biokraftstoffe, insbesondere solche mit vielerlei Allokationen übersichtlich und nachvollziehbar zu berechnen.

Die Autoren sehen keinen Korrekturbedarf beim BioGrace GHG Tool vs4-public selbst, wohl aber bei einem Kennwert, den die KQR dem BioGrace GHG Tool vorgibt: dem Kennwert für die THGE von Dieselreferenzkraftstoff. Der in der KQR angegebene Referenzwert von 83,8 g CO_{2-eq}/MJ liegt unter dem Wert von 87,64 g CO_{2-eq}/MJ, den die JEC Well-to-Wheel Studie angibt, welche maßgeblich der KQR zugrunde liegt. Der Wert von 87,64 g CO_{2-eq}/MJ taucht im BioGrace GHG Tool nur dann auf, wenn es darum geht, die THGE des Biotreibstoffs zu berechnen, die aus der Verwendung von Diesel bei der Herstellung des Biokraftstoffs resultieren, nicht aber bei der Verwendung des Diesels als Referenzkraftstoff. Andernfalls könnte das BioGrace GHG Tool nicht die in der KQR, Annex IV.A angegebenen THGE-Werte für Standard-Biokraftstoffpfade reproduzieren. Hier liegt ein Widerspruch vor, den es aufzulösen gilt.

7.2 Klima-Optimierungspotenzial für Pflanzenölkraftstoff aus Rapssaat

Es wurde gezeigt, dass Rapsölkraftstoff das Mindestminderungsziel von 60% der THGE im Vergleich zu Dieselreferenzkraftstoff einhalten kann, wenn nur der Rapsölkraftstoff anstatt Diesel in den landwirtschaftlichen Maschinen verwendet wird, die beim Rapsanbau zum Einsatz kommen. Dies gilt sowohl bei Verwendung des Referenzwertes von 87,64 g CO_{2-eq}/MJ für die THGE von Dieselkraftstoff, als auch bei Verwendung von 83,8 g CO_{2-eq}/MJ.

Wird das hergestellte Rapsöl noch bei weiteren Prozessschritten in der eigenen Herstellung als Energieträger eingesetzt, lässt sich die THGE-Minderung im Bereich einiger Prozent weiter verbessern.

Die größten Beiträge zu den THGE von Rapsölkraftstoff liefern Feldemissionen von N₂O und die Herstellung des Stickstoffdüngers. Hier können nennenswerte Verbesserungen erzielt werden, indem Stickstoffdünger verwendet wird, der entweder bei seiner Herstellung weniger THGE verursacht oder weniger N₂O-Feldemissionen auslöst. Dies könnte stabilisierter mineralischer Dünger oder Wirtschaftsdünger sein. Die genauen Auswirkungen verschiedener Dünger auf die THGE-Bilanz sind allerdings noch genauer zu untersuchen.

7.3 Klimadesign-Richtlinien für Pflanzenölkraftstoffe aus Mischfruchtanbau

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich folgende Richtlinien für die Herstellung von Pflanzenölkraftstoffen aus Mischfruchtanbau ableiten, welche hinsichtlich der anrechenbaren THGE optimiert sind:

1. Einer der beiden Mischungspartner sollte ein HEV von mehr als 36,79 MJ/kg CO₂-eq haben, wenn die Ölausbeute bei der Pressung gemessen am unteren Heizwert und die THGE der dem Anbau folgenden Prozesskette genauso hoch sind, wie beim Standard-Rapsölproduktionsprozess. Ansonsten gilt ein neu zu berechnender, leicht abweichender Mindestwert.
2. Es sollte zunächst eine Ölfrucht mit einem möglichst hohen HEV gewählt werden.
3. Zumindest wenn die Ölfrucht den erforderlichen Mindestwert des HEV nicht erreicht, sollte sie mit einer Körnerfrucht kombiniert werden, deren HEV den Mindestwert überschreitet.
4. Wenn 3. greift, sollte das Verhältnis beider Früchte so gewählt werden, dass für die Mischung der Mindestwert des HEV überschritten wird. Je geringer das HEV der Ölfrucht ist und je weniger die beigesellte Frucht den Mindestwert für das HEV überschreitet, desto höher muss der Anteil der beigesellten Frucht sein.
5. Überschreitet die Mischung für einen breiten Bereich von Mischungsverhältnissen den Mindestwert des HEV, sollte die Mischung so gewählt werden, dass die Synergie-Effekte maximal werden. Es können dann neben der Optimierung der Klimabilanz auch noch weitere Optimierungsziele verfolgt werden.
6. Das hergestellte Pflanzenöl sollte so weit wie möglich selbst wieder als Heiz- und Kraftstoff bei seiner eigenen Produktion eingesetzt werden, zuallererst als Kraftstoff in den landwirtschaftlichen Maschinen, die beim Anbau zum Einsatz kommen, dann in einem BHKW, das Strom und Wärme für die Ölsaattrocknung und -pressung produziert. Als Drittes kommt sein Einsatz als Heiz- und Kraftstoff in der näheren Region in Frage, etwa bei benachbarten landwirtschaftlichen Betrieben.

7.4 Weitere Berechnungen und Forschungsbedarf

Die hier vorgestellten Berechnungen lassen sich an einigen Stellen noch genauer durchführen, wozu im Rahmen dieser Arbeit keine Zeit verblieb. Einer exakteren Berechnung bedürfen vor allem die THGE der einzelnen Prozessschritten, insbesondere der Ölreinigung, für Pflanzenölkraftstoffe der 2. Generation aus regionaler Produktion, wie sie im 2ndVegOil-Projekt entwickelt und eingesetzt wurden.

Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der funktionalen Zusammenhänge von N₂O-Feldemissionen, Stickstoffdüngung, Bodenbeschaffenheit und Klima/ Wetter.

Es ist bei dieser Arbeit auch offensichtlich geworden, dass THGE-Berechnungen mit europäischen Mittelwerten, wie sie von der KQR zugrunde gelegt werden, zu sehr großen Differenzen zu tatsächlichen THGE unter realen Anbau- und Herstellungsbedingungen führen. Hier besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Möglichkeiten, eine genauere Berechnung mittels regionaler Differenzierung mit einem sinnvollen Aufwand durchzuführen.

7.5 Notwendige Fortentwicklung des gesetzlichen Rahmens

Die oben aufgezeigte Inkonsistenz bei der Verwendung des THGE-Referenzwerts für Dieselmotorkraftstoff bedarf einer Bereinigung bei der nächsten Überarbeitung der KQR.

Die Autoren plädieren ferner dafür bei der Berücksichtigung von Kohlenstoffbestandsänderungen infolge indirekter Landnutzungsänderungen eine Unerheblichkeitsgrenze für Biokraftstoffe aus landwirtschaftlicher Produktion zu ziehen, sofern diese im landwirtschaftlichen Betrieb selbst oder in der näheren Region verwendet werden. So könnte es als unerheblich gelten, wenn maximal 10% der Ackerfläche eines Landes oder einer Region für die Produktion von Biokraftstoffen zur Eigenbedarfsdeckung der Landwirtschaft und landwirtschaftsnaher Verbraucher verwendet werden.

Um die regional sehr unterschiedlichen realen THGE präziser zu erfassen, bietet sich eine Zusammenarbeit mit Regionalmarken an, die Produkte einer Region kennzeichnen. Für Biokraftstoffe, für deren THGE-Berechnung regional typische Kennwerte verwendet wurden, könnte dies damit legitimiert werden, dass diese Biokraftstoffe nach dem Zertifizierungssystem einer Regionalmarke zertifiziert werden.

8. Literaturverzeichnis

100-Traktoren-Programm. (kein Datum). Von <http://www.fnr-server.de/cms35/index.php?id=1140> abgerufen

Bayern, T. u. (kein Datum). *Leindotter - Reichlich Öl bei Minimalaufwand*. Von http://www.tfz.bayern.de/sonstiges/16459/07brs049_leindotter_reichlich_oel_bei_minimalaufwand.pdf abgerufen

Biograce - Harmonised Calculation of Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe. (2011). Retrieved February 28, 2011, from <http://www.biograce.net/>

Bundesverband Pflanzenöle: Mischfruchtanbau. (kein Datum). Von <http://www.bv-pflanzenoele.de/pdf/Mischfruchtanbau.pdf> abgerufen

Edwards, R., Larivé, J.-F., Mahieu, V., Rouveirolles, P., & al. (March 2007). *Biofuels Versus Diesel and Gasoline in the JEC-WTW report version 2c*. JRC Ispra: JRC Scientific and Technical Reports.

Gollner, G. e. (2010). Körnerleguminosen in Mischkulturen mit Leindotter (*Camelina sativa*) im Ökologischen Landbau unter pannonischen Standortbedingungen. *Journal für Kulturpflanzen* 62(10), S. 402-408.

JEC, J. R.-E.-C. (2011). *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context" Version 3c*.

Kohler, M., Knechtges, H. J., Thuneke, K., Remmele, E., Wichmann, V., Dönges, P., et al. (2009). *Pflanzenöl als Kraftstoff in landwirtschaftlichen Maschinen*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

Kramerbräuhof. (kein Datum). Von <http://www.kramerbraeuhof.de> abgerufen

M, P. H. (kein Datum). Mischfruchtanbausysteme mit Ölpflanzen im ökologischen Landbau: 1. Ertragsstruktur des Mischfruchtanbaus von Leguminosen oder Sommerweizen mit Leindotter (*Camelina sativa* L. Crantz). *Landbauforschung Völkenrode* 57(1), S. 107-117.

Pelkmans, L., Van Poppel, M., & Govaerts, L. (December 2006). *Report on WP3, PREMIA Assessment Framework, PREMIA TREN/04/FP6EN/S07.31083/503081, 2006*. VITO, Belgium.

Remmele, E. (2009). *Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009.

Richtlinie 2009/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009.

Rostock, U. *Abschlussbericht zum Projekt "Nutzung von Leindotteröl in Mischungen mit anderen Pflanzenölen als Sonderkraftstoff"*, FKZ 22009507.

Rütz, G., & Dieringer, S. (December 2009). *2ndVegOil Deliverable 2.3 vs2: Report 3A*. John Deere Werke Mannheim.

Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie (VWP). (kein Datum). Von <http://www.vwp-europe.com> abgerufen

Zitate, Albert Einstein. (kein Datum). Von <http://zitate.net/albert%20einstein:4.html> abgerufen

9. Die Autoren



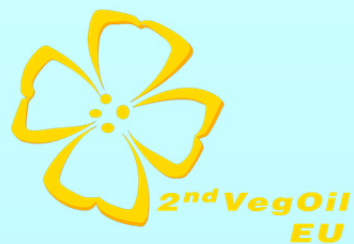
Dr. Michael Stöhr, geb. 1964, studierte Physik in Bonn, Toulouse und Grenoble und promovierte am Europäischen Hochmagnetfeldlabor in Grenoble mit einer Arbeit in der experimentellen Halbleiterphysik über Silizium. Von 1992-2000 arbeitete er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter der WIP, München, im Bereich erneuerbare Energien, seit 2000 als Director for International and Energy Projects bei der B.A.U.M. Consult GmbH, München. Zu seinen Aufgaben gehören die fachliche und administrative Leitung von EU-Forschungsprojekten, Lehr- und strategische Beratungstätigkeit zu erneuerbaren Energien, und die Entwicklung regionaler Energiekonzepte.

Seit 2002 arbeitet M. Stöhr in verschiedenen EU-Projekten an der Weiterentwicklung von Konzepten zur Nutzung von reinen Pflanzenölen als Motorenkraftstoff mit. Im Projekt 2ndVegOil unterstützte er John Deere als externer Berater bei der Koordination des Projektes und war u.a. für die Durchführung des Project Assessment verantwortlich.

Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Berlin, wo er anschließend zum Thema Fahrdynamiksimulation von Landmaschinen promovierte. Nach zwei Industrietätigkeiten in den Branchen Bahnsignaltechnik und Baumaschinen wurde Peter Pickel im Jahr 2000 zum Professor für Landtechnik, Umwelt- und Kommunaltechnik an die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg berufen, wo er von 2003 bis 2006 Dekan der Landwirtschaftlichen Fakultät war. Seit 2007 arbeitete er als Manager Tractor Applications bei den John Deere Werken Mannheim. Seit 2010 ist er stellvertretender Direktor des John Deere European Technology Innovation Center in Kaiserslautern. Schwerpunkt seiner Forschungs- und Entwicklungstätigkeit sind dezentrale, integrierte nachhaltige Energieerzeugungs- und -versorgungskonzepte im ländlichen Raum einschließlich der Entwicklung von Elektrifizierungskonzepten für mobile Arbeitsmaschinen. Ferner arbeitet Prof. Pickel auf dem Gebiet der Automatisierungs- und Kommunikationstechnik für Landmaschinen. Im Bereich nachhaltiger Energieversorgung für Landmaschinen koordinierte er das EU-Forschungsprojekt 2ndVegOil.

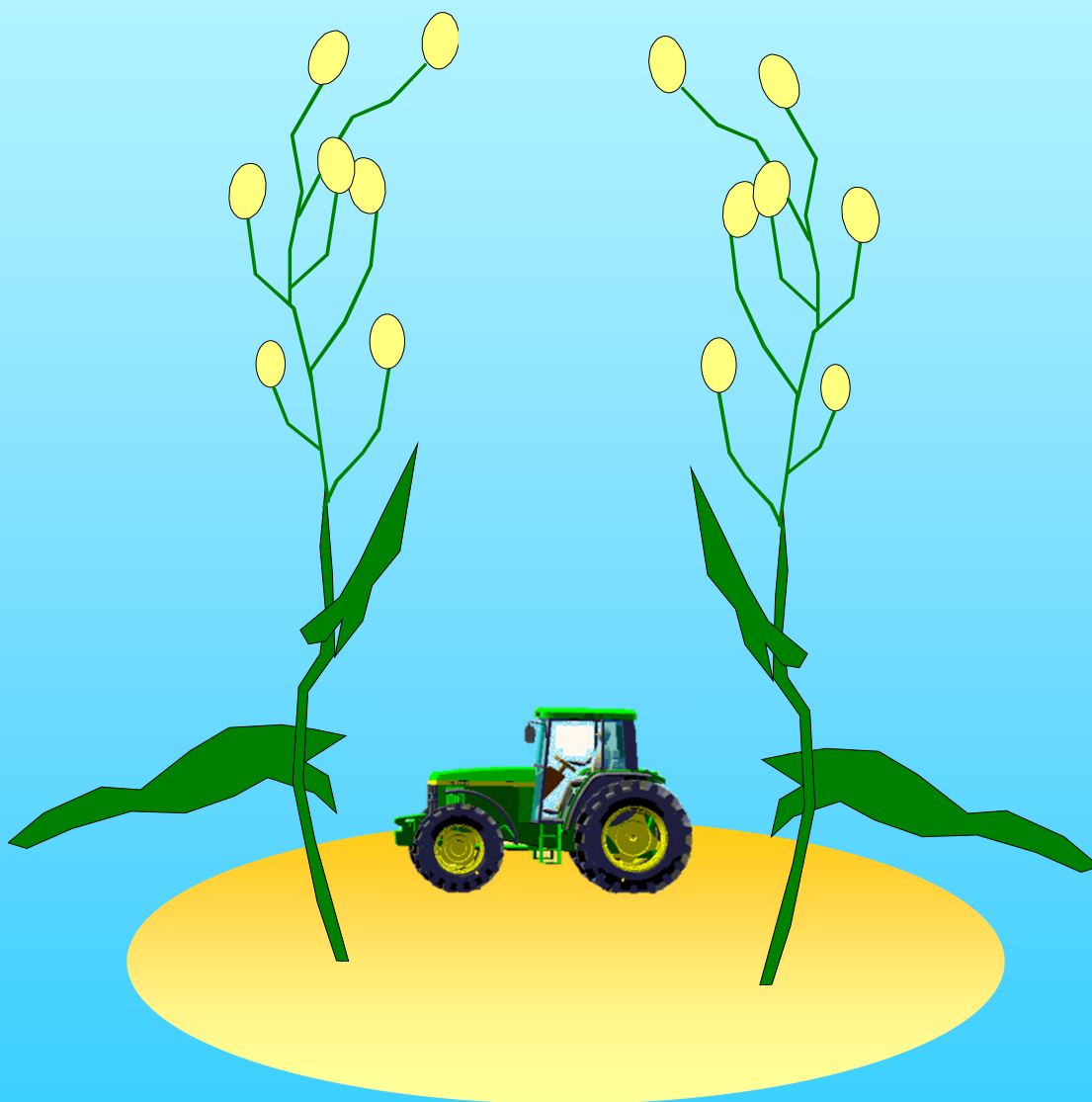


GREEN POWER Feeds Your Engine



Diese Publikation wurde im Zusammenhang mit dem Projekt 2ndVegOil erstellt. Das Projekt 2ndVegOil wird von der Europäischen Kommission im 7. Forschungsrahmenprogramm unter der Fördernummer N° TREN/FP7EN/219004/"2ndVegOil" finanziell unterstützt.

Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Diese gibt nicht unbedingt die Meinung der Europäischen Kommission wieder. Die Europäische Kommission ist nicht verantwortlich für die Nutzung der darin enthaltenen Informationen.



LEWERENZ Medien+Druck GmbH
Gewerbestraße 2 - OT Büro
06869 Coswig (Anhalt)

ISBN 978-3-86829-428-6