

LANDTECHNIK

AGRICULTURAL ENGINEERING

67. Jahrgang

1.2012



- Schwerpunkt
Methodenentwicklung und Versuchstechnik
- GIS- und Sensortechnologien zur
einzelpflanzenbezogenen Landwirtschaft
- Mechanische Reinigung von Spaltenboden

Contents in English on:

www.LANDTECHNIK-online.eu

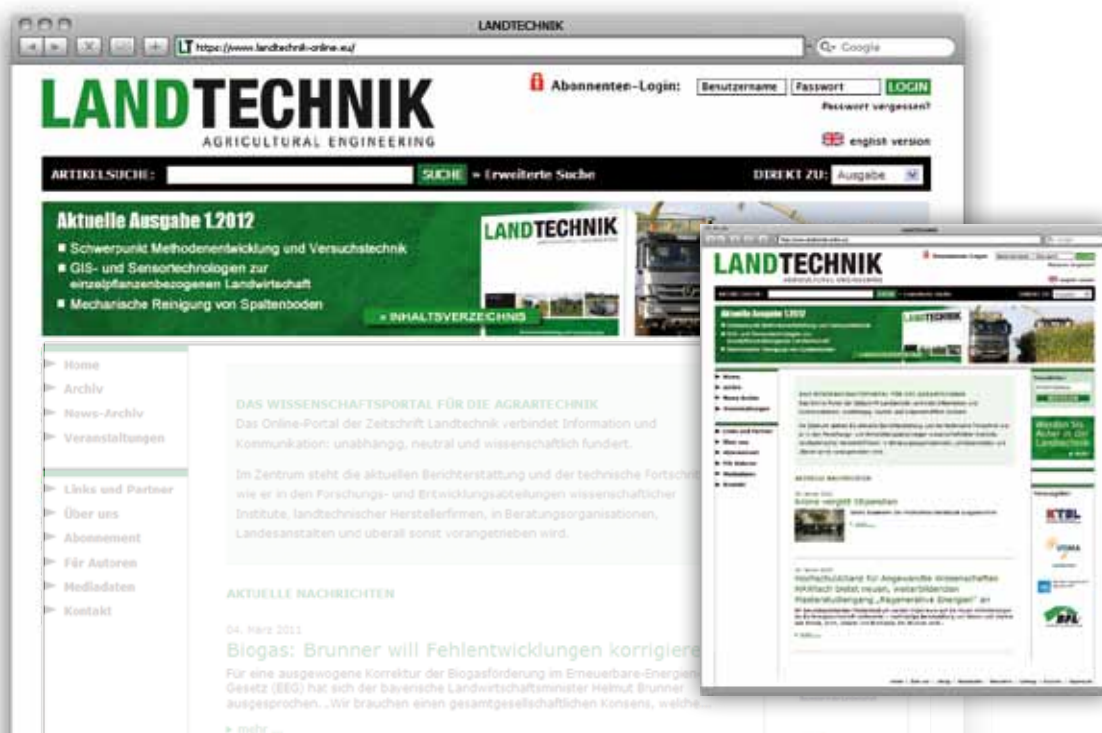
Das Wissenschaftsportal für die Agrartechnik

Der neue Weg: **www.LANDTECHNIK-online.eu**

Das Online-Portal verbindet Information und Kommunikation:
unabhängig, neutral und wissenschaftlich fundiert

2 gute Gründe, jetzt online zu gehen

- Laden Sie sämtliche Fachbeiträge ab dem Jahr 2000 in deutsch und/oder englisch herunter
- Bringen Sie sich auf den neuesten Stand agrarwissenschaftlicher Forschung



Michael Stöhr und Peter Pickel

Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen für landwirtschaftliche Maschinen

Der Einsatz von Biokraftstoffen in landwirtschaftlichen Maschinen ist eine Option, auf Klimaschutzanforderungen zu reagieren, mit denen Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen aktuell konfrontiert werden. Es wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die Berechnung der Treibhausgasemissionen (THGE) von Biokraftstoffen stringent, transparent und im Einklang mit der EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (KQR) für komplexe Herstellungspfade erlaubt. Damit wurde gezeigt, dass sowohl mit Rapsöl- als auch mit Leindotterölkraftstoff THGE um mehr als 60 % reduziert werden können. Schlüsselparameter wurden identifiziert und Regeln für ein Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen formuliert.

Schlüsselwörter

Pflanzenölkraftstoff, Treibhausgasemissionen, Klimaschutz, Mischfruchtanbau

Keywords

Vegetable oil fuel, green house gas emissions, climate protection, mixed cultivation

Abstract

Stöhr, Michael and Pickel, Peter

Climate design of vegetable oil fuels for agricultural equipment

Landtechnik 67 (2012), no. 1, pp. 65–68, 1 figure, 1 table, 6 references

The use of biofuels in agricultural machinery is an option for complying with climate protection requirements that are presently discussed to be placed on manufacturers of mobile off-road machinery by the European Commission. A mathematical model has been developed that allows calculating greenhouse gas emissions (GHGE) of biofuels for complex production paths in a straightforward, transparent manner and in pattern with the EU's Fuel Quality Directive (FQD). Therewith it has been shown that both rape seed and camelina sativa oil fuels can save more than 60 % GHGE. Key parameters have been identified and rules for a climate design of vegetable oil fuels have been formulated.

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 beim Standard-Herstellungsprozess, der Eingang in die EU-Kraftstoffqualitätsrichtlinie (KQR) [1] gefunden hat, mit einer Einsparung von 57 % der Treibhausgasemissionen (THGE) gegenüber Dieselmotoren knapp die in der KQR ab 2018 geforderte Mindestreduktion von 60 %. Einen Ausweg bieten optimierte Anbau- und Herstellungsmethoden für Rapsöl, insbesondere aber von Phosphor, Alkali- und Erdalkalimetallen vollständig gereinigtes Öl aus in Mischfruchtanbauweise angebaute Leindotter (*Camelina sativa*). Dessen Einsatzfähigkeit in modernen Traktormotoren wurde kürzlich von John Deere im EU-Projekt 2ndVegOil nachgewiesen [2] und wird hier vorausgesetzt.

Mathematisches Modell für THGE

Zum Zweck der gezielten Optimierung der THGE von Pflanzenölkraftstoffen wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die Bestimmungen der KQR für komplexe Herstellungsprozesse in Berechnungsvorschriften umsetzt. Die für die durchgeführten Berechnungen relevanten Bestimmungen der KQR finden sich gleichlautend auch in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EER) [3]. Das entwickelte Modell ist äquivalent zum BioGrace GHG Tool in der öffentlichen Version 4 [4], 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.

Optimierung der Klimabilanz von Rapsölkraftstoff

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. Dann 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 das hergestellte Rapsöls selbst an Stelle von Diesel als Kraft- und Brennstoff für die weitere Herstellung von Rapsöl verwendet wird. In diesem Fall lassen sich die THGE des Rapsöls wie folgt beschreiben:

$$E_B = a + b \cdot I$$

Dabei bezeichnet E_B die THGE des Rapsöls, I die spezifischen THGE aus der Verwendung von Dieselkraftstoff, a den Teil von E_B, der nicht von der Verwendung des Teils des Dieselkraftstoffs bei der Rapsölherstellung stammt, welcher durch Rapsöl substituiert werden soll, und b einen Proportionalitätsfaktor. E_B und a werden in g CO_{2-äq}/MJ_{Öl im Tank} angegeben (Bezugsgröße der THGE ist der Energiegehalt des letztendlich in den Tank gefüll-

ten Biokraftstoffs), I in g CO_{2-äq}/MJ_{Diesel im Tank} und b ist physikalisch dimensionslos. I ist die im Folgenden als veränderlich betrachtete, von der Art des substituierenden Stoffes abhängige Größe und hat für rein fossilen Diesel den Wert von 87,64 g CO_{2-äq}/MJ_{Diesel im Tank} [4], b ist eine Zahl kleiner 1, wenn der Ersatz des Diesels durch Rapsöl sinnvoll ist, d.h. dadurch weniger THGE erzeugt werden. Diese Bedingung lässt sich dadurch ausdrücken, dass E_B kleiner als I ist. Daraus folgt dann, dass b kleiner 1 ist.

Wird nun bei der Herstellung des Rapsöls in einem fortlaufenden Prozess statt des Dieselkraftstoffs immer wieder ein Teil des erzeugten Rapsöls selbst eingesetzt, betragen die THGE des Rapsöls:

$$E_B = \lim_{n \rightarrow \infty} [a \cdot \sum_{i=0}^{n-1} b^i + I \cdot b^n] = \lim_{n \rightarrow \infty} [a \cdot \frac{1-b^n}{1-b} + I \cdot b^n] = \frac{a}{1-b}$$

Die Werte von a und b hängen davon ab, welcher Teil des Diesels durch Rapsöl substituiert wird, und welcher Teil der THGE damit dem konstanten Term a und welcher dem veränderlichen Term b·I zugeordnet wird. **Tabelle 1** zeigt die erzielbare THGE-Einsparung für verschiedene Substitutionsszenarien.

Die THGE-Einsparung wurde nach der Formel berechnet, welche durch die KQR vorgegeben ist:

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

Dabei wurde für die THGE des Dieselreferenzkraftstoffs, E_F, der Wert von 87,64 g CO_{2-äq}/MJ_{Diesel im Tank} verwendet. Die KQR benennt als Referenzwert 83,8 g CO_{2-äq}/MJ_{Diesel im Tank}, was nach Meinung der Autoren eine Inkonsistenz innerhalb der KQR darstellt und in Widerspruch zu den Quellen steht, auf die sich die KQR maßgeblich stützt [1; 4; 5].

Teilt man diese Ansicht nicht und nimmt stattdessen für E_F den in der KQR angegebenen Wert von 83,8 g CO_{2-äq}/MJ_{Öl im Tank}, erhält man für die THGE-Einsparung ohne Dieselsubstitution

Tab. 1

THGE-Einsparung von mehr als 60 % dank Substitution von Diesel durch Rapsöl bei dessen Herstellung
 Table 1: GHGE saving exceeding 60 % thanks to substitution of diesel by rape seed oil in a continuous rape seed oil production process

Ersatz von Diesel durch Rapsöl bei... Substitution of diesel through rapeseed oil for...	a [g CO _{2-äq} /MJ] _{Öl im Tank} a [g CO _{2-äq} /MJ] _{Oil in tank}	b	E _B [g CO _{2-äq} /MJ] _{Öl im Tank} E _B [g CO _{2-äq} /MJ] _{Oil in tank}	THGE-Einsparung GHGE saving
Keinem Prozessschritt/No process step	36,051	0,000	36,051	58,86 %
Anbau/Cultivation	32,358	0,042	33,782	61,45 %
Anbau und Rapssaattransport Cultivation and rape seed transport	31,989	0,046	33,544	61,72 %
Anbau und Rapsöltransport Cultivation and rape seed oil transport	32,178	0,044	33,666	61,59 %
Anbau und Rapssaat- und -öltransport Cultivation and rape seed and rape seed oil transport	31,809	0,048	33,427	61,86 %
Anbau, Rapssaattrocknung und Rapssaat- und -öltransport Cultivation, rape seed drying, and rape seed and rape seed oil transport	31,793	0,049	33,416	61,87 %

durch Rapsöl (erste Zeile in **Tabelle 1**) statt 58,86 % den etwas geringeren Wert von 56,98 %, also die in der KQR aufgeführte und auch vom BioGrace GHG Tool berechnete Einsparung von gerundet 57 %. Für die THGE-Einsparung mit Dieselsubstitution erhält man dann Werte zwischen 59,69 und 60,12 %, erreicht also, gerundet auf die erste Stelle vor dem Komma, auch den Mindestwert von 60 %. Dieses Ergebnis ist mithin unabhängig von der Position, die man hinsichtlich der aufgezeigten Inkonsistenz in der KQR einnimmt.

THGE von Leindotterölkraftstoff aus Mischfruchtanbau

Im nächsten Schritt wurde das Modell für eine Berechnung der THGE von Leindotteröl aus Mischfruchtanbau mit Weizen angewandt. Mischfruchtanbau von Getreide mit Leindotter ermöglicht, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln signifikant zu verringern [5] und bereitet so einer umfassenden Ökologisierung der Landwirtschaft den Weg. Der Leindotteranteil stellt einen Biokraftstoff ohne großen zusätzlichen Flächenbedarf bereit - im Spannungsfeld von Nahrungs- und Energieproduktion ein gewichtiger Aspekt. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 1** gezeigt. Die Mindesteinsparung von 60 % der THGE wird für Leindotteröl aus Mischfruchtanbau mit Weizen (CS-W Kurven) für einen großen Bereich von Mischungsverhältnissen deutlich überschritten.

Der Schlüsselparameter 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 unseren Berechnungen ist dies der Minimalwert, den eine Ölfrucht haben muss, damit das Öl die Mindestminderung der THGE von 60 % erreicht; vorausgesetzt, die Ölfrucht wird in ähnlicher Weise weiterverarbeitet wie

Raps beim Standard-Rapsölproduktionsprozess (siehe schwarze horizontale Kurve für eine fiktive Mischung in **Abbildung 1**, 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.

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).

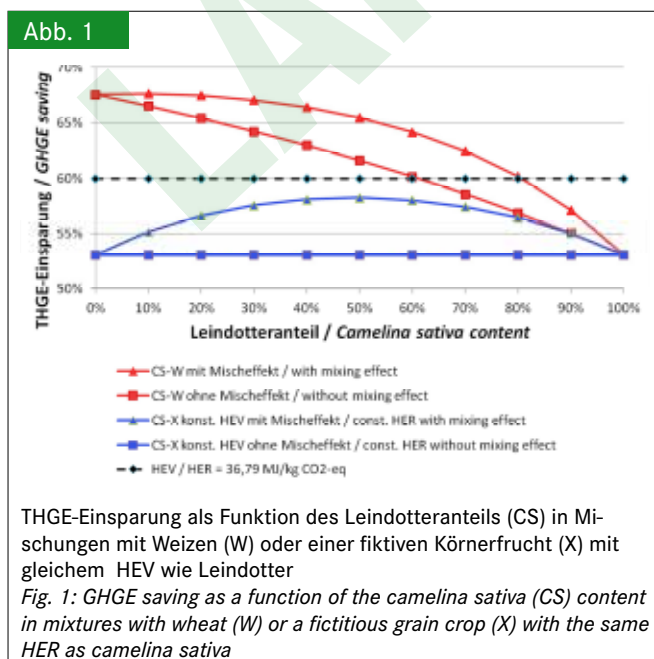
Versuche mit Mischfruchtanbau haben gezeigt, dass damit ein höherer Ertrag der Fruchtspartner erzielt werden kann als man bei einer linearen Interpolation der Reinkulturerträge erwarten würde [6; 7]. Darum wurden die Erträge nicht nur linear, sondern auch anhand von Literaturwerten mit einer quadratischen 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!

Die Methode des Mischfruchtanbaus von Öl- mit Körnerfrüchten bietet folglich eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Reduktion der dem Pflanzenölkraftstoff zuzuordnenden THGE mittels eines gezielten Klimadesigns. Der entscheidende Parameter ist das HEV, gefolgt von den Parametern, die den Mehrertrag dank des Mischeffekts beschreiben. Anhand dieser Parameter können geeignete Mischungen von Ölpflanzen mit anderen Früchten ausgewählt werden.

Regeln für ein Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen

Aus den erzielten Ergebnissen lassen sich Regeln für ein Klimadesign von Pflanzenölkraftstoffen ableiten. Im Folgenden werden diese für die Herstellung von Pflanzenölkraftstoffen aus Mischfruchtanbau formuliert:

1. Einer der beiden Mischungspartner sollte ein HEV von mehr als 36,79 MJ/kg CO_{2-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. Wenn die Ölfrucht den erforderlichen Mindestwert des HEV nicht erreicht, sollte sie mit einer Körnerfrucht kombiniert werden, deren HEV den Mindestwert überschreitet.
4. Wenn Punkt 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.

Weiterer Forschungsbedarf und Anpassung des gesetzlichen Rahmens

Weiterer 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 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 Dieselkraftstoff 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.

Schlussfolgerung

Es wurde der Nachweis erbracht, dass reine Pflanzenölkraftstoffe in Dieselmotoren 60 % und mehr der THGE einsparen können. Dies gelang durch eine umfassende mathematische

Modellierung und Berechnungen von THGE zu Pflanzenölproduktionspfaden in Übereinstimmung mit der KQR 2009/30/EG. Damit bieten reine Pflanzenölkraftstoffe eine Option, auf Klimaschutzanforderungen zu reagieren, welche derzeit von der Europäischen Kommission an die Hersteller mobiler Arbeitsmaschinen herangetragen werden.

Ein besonders interessanter Kandidat unter den in Feldversuchen erfolgreich in modernen Traktoren eingesetzten Biokraftstoffen ist Leindotteröl aus Mischfruchtanbau. Leindotteröl erlaubt nicht nur, mittels eines gezielten Klimadesigns THGE-Einsparungen von nahezu 70 % gegenüber Diesel zu erzielen, sondern bereitet auch einer umfassenden Ökologisierung der Landwirtschaft den Weg und stellt einen Biokraftstoff ohne großen zusätzlichen Flächenbedarf bereit – im Spannungsfeld von Nahrungs- und Energieproduktion ein gewichtiger Aspekt.

Literatur

- [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, www.2ndvegoil.eu
- [3] BioGrace GHG Tool vs4-public, www.biograce.net
- [4] 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] 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), S. 107-117
- [6] Göllner, G.; Gabler, C.; Grausgruber-Gröger, S.; Friedel, J. K.; Grausgruber, H.; Freyer, B. (2010): Körnerleguminosen in Mischkulturen mit Leindotter (*Camelina sativa*) im Ökologischen Landbau unter pannonischen Standortbedingungen. *Journal für Kulturpflanzen* 62 (11), S. 402-408

Autoren

Dr. Michael Stöhr, Physiker, arbeitet seit 2000 als Director for International and Energy Projects bei der B. A. U. M. Consult GmbH, München. 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 war von 2000-2010 Professor für Landtechnik an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberge und arbeitete seit 2007 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. Er koordinierte das EU-Forschungsprojekt 2ndVegOil.

Danksagung und Hinweise

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

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

Eine ausführliche Darstellung des mathematischen Modells und der durchgeführten Berechnungen erschien im Dezember 2011 als Monographie in der Reihe „Agrartechnische Schriften aus Halle“ und kann vom Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Hr. Axel Bachner, axel.bachner@landw.uni-halle.de, bezogen werden. Eine englische Fassung der Monographie ist in Vorbereitung.

Stöhr, Michael and Pickel, Peter

Climate design of vegetable oil fuels for agricultural equipment

The use of biofuels in agricultural machinery is an option for complying with climate protection requirements that are presently discussed to be placed on manufacturers of mobile off-road machinery by the European Commission. A mathematical model has been developed that allows calculating greenhouse gas emissions (GHGE) of biofuels for complex production paths in a straightforward, transparent manner and in pattern with the EU's Fuel Quality Directive (FQD). Therewith it has been shown that both rape seed and camelina sativa oil fuels can save more than 60 % GHGE. Key parameters have been identified and rules for a climate design of vegetable oil fuels have been formulated.

Keywords

Vegetable oil fuel, green house gas emissions, climate protection, mixed cultivation

Abstract

Landtechnik 67 (2012), no. 1, pp. 65–68, 1 figure, 1 table, 6 references

■ The use of bio-fuels in agricultural equipment is an option for responding to climate protection requirements which are presently discussed to be placed on manufacturers of mobile off-road machinery by the European Commission. Vegetable oils are interesting candidates among bio-fuels because the production can be done on the farm itself from the field into the tank. Rape seed oil however, which is predominantly used in Germany just falls short of the minimum GHGE saving of 60% that will be compulsory from 2018 on. If produced in the standard production pathway that is underlying the EU Fuel Quality Directive (FQR) [1] it allows only for greenhouse gas emission (GHGE) savings of 57% compared to diesel fuel. A solution are optimized cultivation and production methods for rape seed oil, but notably false flax (camelina sativa) oil that is produced in mixed cultivation and from which phosphorous, alkali metals and alkaline earth metals have been completely removed. The proof of suitability of such cleaned camelina sativa oil as fuel for advanced tractor engines has recently been provided within the EU project "2ndVegOil" [2]. This result is presupposed in the following.

Mathematical model

For the purpose of a targeted optimization of the GHGE of vegetable oil fuels, a mathematical model has been formulated that translates the provisions of the FQD [1] into calculation rules for complex production processes. The provisions which are

relevant for the calculations done with this model can also be found with identical wording in the Renewable Energies Directive (RED) [3]. The developed model is equivalent to the public version 4 of the BioGrace GHG Tool [4]. In contrast to the latter, it is designed to assess clearly structured and notated process chains with any number of steps and by-products at each step. This allows calculating GHGE of the production of pure vegetable oils in mixed cultivation, and notably the influence of changes of the input parameters on the results, in a stringent and transparent manner. At the same time, the model is open to take into account further process steps and potential further co-products. This opens the possibility for a targeted climate design of pure vegetable oil fuels.

Optimization of the GHG emissions of pure rape seed oil

This model has first been tested and verified on the example of the standard production process for pure rape seed oil which has entered in the FQD and the BioGrace GHG Tool. Then the potential for optimization of the production of rape seed oil was explored. At this point the agricultural cultivation method is decisive. 82% of the GHGE of pure rape seed oil are produced during the cultivation and only 18% in the subsequent processing steps. The biggest contributions are N₂O field emissions, nitrogen fertilizer production, and fuel for agricultural equipment which produce, respectively, 36%, 32% and 10% of the total GHGE of rape seed oil.

However the minimum GHGE saving of 60% can be achieved simply if the produced rape seed oil is itself used as fuel in the rape seed oil production process instead of diesel. In this case the GHGE of the produced rape seed oil can be described by the following formula:

$$E_B = a + b \cdot I$$

Here, E_B denotes the GHGE of the rape seed oil, I the specific GHGE that result from the use of diesel fuel in the production of rape seed oil, a the part of E_B that is not due to the part of diesel that is going to be substituted by rape seed oil, and b a proportionality coefficient. E_B and a are indicated in $g\ CO_{2-eq}/MJ_{oil\ in\ the\ tank}$ (the GHGE are based on the energy content of the biofuel that finally arrives in the tank), I in $gCO_{2-eq}/MJ_{diesel\ in\ the\ tank}$, and b has no physical dimension. I is in the following considered to be the variable quantity that depends on the kind of substituting fuel. For purely fossil diesel it takes the value of $87.64\ gCO_{2-eq}/MJ_{diesel\ in\ the\ tank}$ [4]. b is a number smaller than 1, if replacing diesel by rape seed oil makes sense, i.e. if this lowers the GHGE. This condition is equivalent to E_B being smaller than I . Then it follows that b is smaller than 1.

If the produced rape seed oil is used again and again to substitute diesel in a continuous production process of rape seed oil, the GHGE of the latter amount to:

$$E_B = \lim_{n \rightarrow \infty} [a \cdot \sum_{i=0}^{n-1} b^i + I \cdot b^n] = \lim_{n \rightarrow \infty} [a \cdot \frac{1-b^n}{1-b} + I \cdot b^n] = \frac{a}{1-b}$$

The values of a and b depend on that part of diesel that is substituted by rape seed oil, and thus on the allocation of the GHGE to the constant term a and the variable term $b \cdot I$. **Table 1** shows the GHGE saving that can be achieved for different substitution scenarios.

The GHGE saving has been calculated according to the formula which is fixed by the FQD:

$$SAVING = (E_F - E_B) / E_F$$

For the GHGE of the diesel reference fuel, E_F , the value of $87.64\ gCO_{2-eq}/MJ_{diesel\ in\ the\ tank}$ was used. The FQD stipulates a fossil fuel comparator of $83.8\ gCO_{2-eq}/MJ_{diesel\ in\ the\ tank}$, what is in contradiction to the sources on which the FQD is essentially based [1; 4; 5] and therefore represents an inconsistency within the FQD in the authors' opinion.

If one does not share this opinion and takes for E_F the value of $83.8\ gCO_{2-eq}/MJ_{diesel\ in\ the\ tank}$ that is indicated in the FQD, one obtains the slightly lower value of 56.98% instead of 58.86% for the GHGE saving without diesel substitution by rape seed oil (first line in Table 1). Rounded off to 57% that equals the value which is indicated in the FQD and which is calculated by the BioGrace GHG Tool. For the GHGE saving after diesel substitution one then obtains values between 59.69% and 60.12%. i.e. one meets, rounded off to the first digit before the comma, also the threshold of 60%. This result is therefore independent of the position which one takes with regard to the indicated inconsistency within the FQD.

GHGE of camelina sativa oil fuel from mixed cultivation

In the next step the model was applied for a calculation of the GHGE of camelina sativa oil that is produced in mixed cultivation with wheat. Mixed cultivation of cereals with camelina sativa allows reducing significantly the use of plant protection chemicals [5] and thus paves the way for a comprehensive ecologisation of agriculture. The camelina sativa part provides a bio-fuel without requiring large additional amounts of acreage – in the conflict between food and energy production a weighty aspect. The results are shown in **Figure 1**. The minimum GHGE saving of 60 % is clearly exceeded for a wide range of mixing ratios (see CS-W curves).

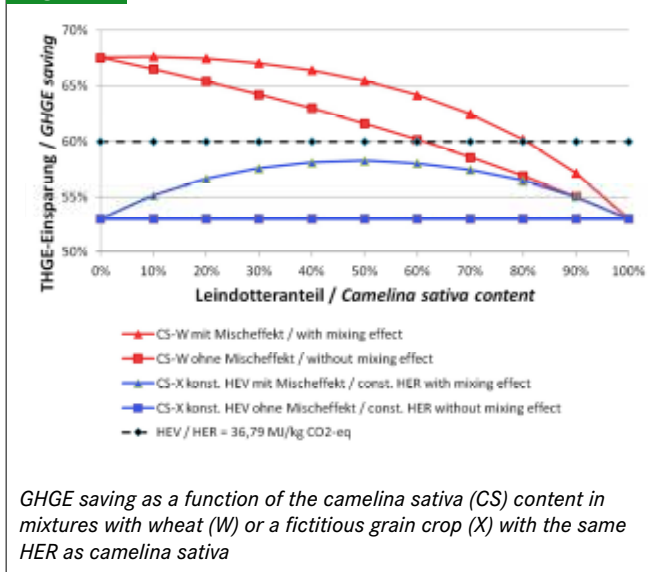
The key parameter is the lower heating value to GHGE ratio of the cultivation phase (HER), i.e. the ratio of the lower heating value of the produced crop to the GHGE related to the cultivation. Wheat has a better HER than $36.79\ MJ/g\ CO_{2-eq}$, which was found to be the minimum value for a crop mixture achieving a GHGE saving of 60 % if the oil crop is processed in a manner equivalent to the standard rape seed oil production process (see black horizontal curve for fictitious mixture where both components have a HER of $36.79\ MJ/g\ CO_{2-eq}$). The minimum HER is different if deviations from the standard produc-

Table 1

GHGE saving exceeding 60 % thanks to substitution of diesel by rape seed oil in a continuous rape seed oil production process

Ersatz von Diesel durch Rapsöl bei... Substitution of diesel through rapeseed oil for...	a [$g\ CO_{2-eq}/MJ_{\text{Öl_im_Tank}}$] a [$g\ CO_{2-eq}/MJ_{\text{Oil_in_tank}}$]	b	E_B [$g\ CO_{2-eq}/MJ_{\text{Öl_im_Tank}}$] E_B [$g\ CO_{2-eq}/MJ_{\text{Oil_in_tank}}$]	THGE-Einsparung GHGE saving
Keinem Prozessschritt/No process step	36,051	0,000	36,051	58,86 %
Anbau/Cultivation	32,358	0,042	33,782	61,45 %
Anbau und Rapssaattransport Cultivation and rape seed transport	31,989	0,046	33,544	61,72 %
Anbau und Rapsöltransport Cultivation and rape seed oil transport	32,178	0,044	33,666	61,59 %
Anbau und Rapssaat- und -öltransport Cultivation and rape seed and rape seed oil transport	31,809	0,048	33,427	61,86 %
Anbau, Rapssaattrocknung und Rapssaat- und -öltransport Cultivation, rape seed drying, and rape seed and rape seed oil transport	31,793	0,049	33,416	61,87 %

Fig. 1



tion process occur (e. g. different oil yield during pressing), but the difference is small in most cases.

Hence for a wide range of mixtures, the high HER of wheat compensates the low HER of camelina sativa. If the latter was combined with a crop X that has the same HER as camelina sativa, the GHGE saving would remain below 60 % for all mixtures (see CS-X curves).

Mixed cropping has shown to produce higher yields for the crop fractions than it would be expected from linear interpolation of the monoculture yields [5; 6]. For this reason, the yields have been interpolated not only linearly, but also by a square function that fits with literature values. The bent curves in **Figure 1** compared to the straight ones show the effect of this square function interpolation, i. e. the effect of the higher yields obtained by mixed cropping compared to monocultures. There is a gain of a few percent of GHGE saving!

Hence, mixed cropping is an effective option for optimizing the GHGE saving. The decisive parameters are the HER and those which describe the mixing effect. With these parameters suitable mixtures of oil crops with accompanying crops can be selected.

Rules for a climate design of vegetable oil fuels

From the achieved results rules for a climate design of vegetable oil fuels can be derived. In the following these are formulated for the production of vegetable oil fuels from mixed cultivation:

1. One of the associated crops should have a higher HER than $36.79 \text{ MJ/kg CO}_{2\text{-eq}}$ if the oil press yield in terms of energy content and the GHGE of the subsequent process chain have the same values as for the standard rape seed oil production process that is underlying the FQD. Otherwise a slightly different threshold applies for the HER that then has to be calculated anew.

2. At first an oil crop should be chosen whose HER is as high as possible.
3. If the oil crop does not reach the threshold for the HER, it should be associated with a grain crop whose HER is above the threshold.
4. If point 3 applies the mixture of both crops should be adjusted such that their HER is above the threshold. The smaller the HER of the oil crop, and the less the HER of the associated crop exceeds the threshold, the bigger the part of the associated crop must be in the mixture.
5. If the HER of the mixture exceeds the threshold for a broad range of mixing ratios, the mixture should be chosen such that the synergy effects are maximised. Besides optimising the climate balance, other targets can be addressed.
6. The produced pure vegetable oil should be used as much as possible as heating and/or engine fuel in its own production, first and foremost as fuel in agricultural machines for the cultivation of the oil crop, and secondly in CHP which produce heat and power for oil seed drying and pressing. Thirdly its use as heating and/or engine fuel within the closer region should be considered, for instance in neighbouring agricultural enterprises.

Further need for research and adaptation of the legal framework

Further need for research exists notably with regard to the functional relationships of N_2O field emissions, nitrogen fertilisation, soil conditions and climate/weather. This work has also shown that GHGE calculations with European average values, as those underlying the FQD, can lead to big differences to actual GHGE under real cultivation and production conditions. Here, further research is needed about the possibilities to conduct more precise regionally differentiated calculations with a reasonable effort.

In the course of this work, we noticed an inconsistency in the use of the GHGE reference value for diesel fuel within the FQD and its implementation. This calls for an adjustment of the FQD in the course of the next revision. The authors advocate further for a marginality limit in the consideration of carbon stock changes caused by indirect land use changes for bio-fuels which are produced by an agricultural enterprise for own use or consumption within the closer region. For further specifying this criterion, a limit could be set at 10 % of the agricultural area of a country or region that is used for the production of bio-fuels covering the own demand of agriculture and nearby consumers.

For assessing with greater reliability differences in GHGE that are due to regional characteristics, the cooperation is recommended with regional marketing initiatives which certify the regional origin of products. The use of typical regional values for the GHGE calculations for bio-fuels could be legitimised by a certification of such bio-fuels by accredited certification systems of regional marketing initiatives.

Conclusions

It has been shown that pure vegetable oil fuels can save 60% and more of the GHGE in diesel engines. This was done with a comprehensive mathematical modelling and calculations of the GHGE for vegetable oil production paths in compliance with the FQD 2009/30/EC. Hence pure vegetable oil fuels are an option to respond to climate protection requirements which are presently discussed to be placed on manufacturers of mobile off-road machinery by the European Commission.

A particularly interesting candidate among the bio-fuels that have been successfully demonstrated in the field in modern tractors is camelina sativa oil from mixed cultivation. Camelina sativa oil does not only allow achieving GHGE savings close to 70% by means of a targeted climate design, but also provides the path towards a comprehensive ecologisation of agriculture. It provides a bio-fuel without requiring large additional acreage – a weighty aspect in the conflict between food and energy production.

be ordered from the Institute for Agriculture and Nutrition Science at the Martin Luther University Halle-Wittenberg. An English version of the monograph is going to be prepared.

Literature

- [1] Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009
- [2] www.2ndvegoil.eu
- [3] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009
- [4] BioGrace GHG Tool vs4-public, www.biograce.net
- [5] 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 and 19
- [6] 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
- [7] 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

Authors

Dr. Michael Stöhr, Physicist, is Director for International and Energy Projects at B.A.U.M. Consult GmbH in Munich. Within the 2ndVegOil project he supported John Deere as external consultant in the coordination of the project. Among others he was responsible for the implementation of the project assessment.

Prof. Dr.-Ing. Peter Pickel was professor for agricultural technology at the Martin Luther University of Halle-Wittenberge. Since 2007 he worked as Manager Tractor Applications at John Deere Werke Mannheim. Since 2010 he is Deputy Director of the John Deere European Technology Innovation Center in Kaiserslautern. He has been coordinating the EU research project 2ndVegOil.

Acknowledgements and notes

This publication has been produced in connection with the EU research project 2ndVegOil. 2ndVegOil has received financial support from the European Commission within the FP7 Seventh Framework Programme under the grant agreement N° TREN/FP7EN/219004/"2ndVegOil".

The sole responsibility for the content of this publication lies with the authors. It does not necessarily reflect the opinion of the European Communities. The European Commission is not responsible for any use that may be made of the information contained therein.

A comprehensive presentation of the mathematical model and the performed calculations has been published in December 2011 as a monograph in the series „Agrartechnische Schriften aus Halle“ and can

LANDTECHNIK

ISSN 0023-8082

Impressum

Herausgeber

Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt

VDMA Fachverband Landtechnik, Frankfurt/Main

Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Düsseldorf

Bauförderung Landwirtschaft e.V. (BFL), Hannover

Geschäftsführender Herausgeber

Dr. Heinrich de Baey-Ernsten (KTBL)
Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt

67. Jahrgang

Redaktionsleitung

Dr. Isabel Kriegseis (KTBL)
Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt
Telefon 06151 7001-127, Fax 06151 7001-123
E-Mail: landtechnik@ktbl.de

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. H. Bernhardt, Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger, Prof. Dr. habil. G. Breitschuh,
Prof. Dr. habil. W. Büscher, Dr. M. Demmel, Prof. Dr. R. Doluschitz, Dr.-Ing. D. Ehlert,
PD Dr. E. Gallmann, Prof. Dr.-Ing. M. Geimer, Dr. H. Georg, Dr. M. Geyer,
Prof. Dr. J. Hahn, Prof. Dr. O. Hensel, PD Dr. E. F. Hessel, Prof. Dr. habil. B. Hör-
ning, Prof. Dr.-Ing. B. Johanning, Prof. Dr. T. Jungbluth, Prof. Dr.-Ing. T. Lang,
Prof. Dr.-Ing. T. Meinel, Prof. Dr.-Ing. H.-J. Meyer, Prof. Dr. J. Müller, Dr. S. Nesper,
Prof. Dr. L. Popp, Prof. Dr. T. Rath, Prof. Dr. Y. Reckleben, PD Dr. habil. M. Schick,
Prof. Dr.-Ing. P. Schulze Lammers, Prof. Dr. H.-P. Schwarz, Prof. Dr. habil. J. Spilke,
Prof. Dr. Ir. H. Van den Weghe, Dr. G. Wendl, Prof. Dr. K. Wild

© Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des KTBL unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Für unverlangt eingesandte Manuskripte kann keine Gewähr übernommen werden.

Briefanschrift

Kuratorium für Technik und Bauwesen
in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt
Telefon 0 6151 7001-0, Fax 0 6151 7001-123
E-Mail: ktbl@ktbl.de, www.ktbl.de

Bankverbindung

Volksbank Darmstadt
BLZ 508 900 00
Kto 6432603

Hauptgeschäftsführer

Dr. Heinrich de Baey-Ernsten

Vertrieb und Anzeigenverwaltung

Claudia Molnar
Telefon 0 6151 7001-119, Fax 0 6151 7001-123
E-Mail: abonnement@ktbl.de

Anzeigenpreise/Anzeigenschluss

Gültig sind zur Zeit die Media Daten 2012 unter www.landtechnik-online.eu

Erscheinungsweise

Zweimonatlich, jeweils zum Monatsende

Bezugspreise

Inland jährl. 162,60 € einschließlich Zustellgebühren und MwSt.
Ausland jährl. 165,00 € einschließlich Versand
Normalpost, Luftpost gegen Mehrkostenberechnung

Gesamtherstellung

Druckerei Lokay, Reinheim



Schnell und einfach

Kalkulationsdaten
online abrufen
und berechnen



www.ktbl.de

**Jetzt kostenlos für
Schulen und Universitäten!**