



BIOclean

alternative fuels in shipping

Reduktion der Emissionen klimarelevanter Gase und Partikeln aus Diesel-Großmotoren für die Schifffahrt und für den stationären Einsatz durch den Einsatz regenerativer Treibstoffe

ABSCHLUSSBERICHT

Projekte 01LS05014 und 01LS05015

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Autoren: Andreas Petzold¹, Veronika Eyring¹, Peter Lauer²,
Fritz Fleischer², Jan Hasselbach¹, Michael Lichtenstern¹,
Carolin Klinger¹, Mattia Righi¹, Uwe Fritsche³,
Johannes Hendricks¹, Mauro Dall'Amico¹, Hans Schlager¹

¹ DLR Institut für Physik der Atmosphäre

² MAN Diesel SE

³ Öko-Institut e.V.

Projektkoordinator: Dr. Andreas Petzold
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling
Tel.: 08153/28 2592
Fax: 08153/28 1841
Email: andreas.petzold@dlr.de

Verbundpartner: MAN Diesel SE
Stadtbachstr. 1, 86224 Augsburg

Mitarbeit im Unterauftrag: Öko-Institut e.V.
Bereich Energie & Klimaschutz
Rheinstr. 95, 64295 Darmstadt

**Veröffentlichung
des Abschlußberichts:** 31. März 2010

Inhaltsverzeichnis

Project Summary	3
Zusammenfassung.....	5
1 Kurzdarstellung des Projekts.....	7
1.1 Aufgabenstellung und Projektziele	7
1.2 Voraussetzungen des Projekts.....	8
1.3 Projektplanung und Ablauf	8
1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektbeginn	10
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
2 Darstellung der Ergebnisse des Projekts	12
2.1 Treibstoffmatrix.....	12
2.1.1 Zu untersuchende Kraftstoffe	12
2.1.2 Nicht berücksichtigte Kraftstoffe:	14
2.2 Messungen an Prüfstand und Vollanlage.....	14
2.2.1 Messprogramm.....	14
2.2.2 Messparameter.....	18
2.2.3 Emissionseigenschaften von biogenen Treibstoffen	19
2.3 Modellsimulationen.....	27
2.3.1 Global installierten Leistung für Schiffsantriebe und Stationärmotoren	27
2.3.2 Emissionskataster für Nicht-CO ₂ Emissionen.....	35
2.3.3 Treibhausgas - Emissionen aus den Lebenswegen von Bioenergieträgern...	39
2.3.4 CO ₂ - Reduktionspotential	44
2.3.5 CO ₂ - Klimawirkung.....	49
2.3.6 Effekte von Nicht - CO ₂ Komponenten	62
2.4 Bewertung und Empfehlungen	73
2.4.1 Bewertungskriterien	73
2.4.2 CO ₂ – Effekte	76
2.4.3 Empfehlungen zur Nutzung biogener Treibstoffe	77
2.5 Zitierte Literatur	78
3 Verwertungsplan	82
4 Publikationen und Präsentationen aus dem Projekt.....	83
5 Danksagungen	83
6 Anhang - Treibhausgasemissionen biogener Energieträger	85
im Vergleich zu fossilem Diesel und Schweröl –	85
Endbericht der Studie des Öko-Instituts.....	85

Project Summary

Study Objectives and Structure

The use of biofuels for stationary power generation or propulsion in shipping gains increasing importance in the framework of CO₂ reductions and the use of energy from renewable sources. The knowledge on emission characteristics of various biofuels and resulting climate impacts however is very limited. BIOCLEAR considers the quantification of all key climate-active exhaust constituents as a very important task not only for fossil fuels but also for fuels from renewable sources. The evaluation of the climate impact of biofuels requires precise knowledge on the differences in emission characteristics between conventional and biofuels.

BIOCLEAR investigated the emission of CO₂, NO_x, hydrocarbon compounds, SO₂, H₂SO₄ and particulate matter in terms of particle number, particle size, and chemical composition from medium-speed four-stroke large diesel engines for different fuel types. The selected fuel matrix included heavy fuel oil (HFO) with a fuel sulphur content of 2.17 weight-% (wt-%) as the fossil high-sulphur reference fuel, marine gas oil (MGO) with a fuel sulphur content of < 0.1 wt-% as a fossil low-sulphur fuel, and palm oil, soy bean oil, sunflower oil and waste edible fat as fuels from biogenic sources.

The simultaneous consideration of climate-active trace species like NO_x, particulates and sulphur-containing particle precursors on one hand and of the most important climate-active exhaust constituent CO₂ on the other hand allowed for the investigation of trade-off effects of CO₂ emissions reduction and potentially increasing emissions of other climate-active trace constituents. Accompanying model studies using a CO₂ response model for the treatment of the CO₂ emissions, and a coupled climate chemistry model for the treatment of direct and indirect aerosol effects on climate investigated the climate response in case of replacing heavy fuel oil by biofuels. The greenhouse gas emissions associated with the production and use of the biofuels were included by means of a fuel lifecycle analysis which also considered land use changes associated with the growth of energy plants for the production of biofuels.

This set of joint test rig studies and model studies forms the basis for recommendations of reasonable applications of biofuels in terms of climate protection. As a whole, BIOCLEAR provides decision guidance and guidance on technological realisation for a world-wide use of fuels from renewable sources in the investigated applications of large diesel engines.

Emission Properties

The investigated set of biofuels demonstrated good combustion properties in the single-cylinder four-stroke test engine. No significant increase in engine degradation and corrosion was observed for biofuel use. Fuel characteristics and emissions properties of the investigated fuels are summarised as follows:

Energy content and specific CO₂ emissions:

Energy content per mass:	HFO	40.4 MJ kg ⁻¹
	MGO	43.0 MJ kg ⁻¹
	Biofuels (av.)	37.3 MJ kg ⁻¹
Specific CO ₂ emissions (75% load)	HFO	679 g CO ₂ kWh ⁻¹
	MGO	639 g CO ₂ kWh ⁻¹
	Biofuels (av.)	655 g CO ₂ kWh ⁻¹

Biofuels emission properties at 75% engine load relative to HFO:

NO _x	≅ HFO
Particulate matter (mass)	10 - 15% of HFO
Particle number	2 – 3 × HFO
Particle number non-volatile	30 – 60% of HFO
Black carbon	15 - 30% of HFO
Organic matter	≥ HFO

When using low sulphur fuels (MGO, biofuels) the emissions of particulate matter (PM) and especially sulphate and black carbon are significantly reduced compared to heavy fuel oil. This effect is of similar magnitude for the low sulphur fossil fuel MGO and for biofuels. Emissions of NO_x and CO are of similar magnitude as for HFO while the emissions of gas-phase hydrocarbons are also reduced for low-sulphur fuels.

Climate Effects

Climate effects were investigated for the hypothetical case that in 2008 all HFO is replaced by biofuels (mainly palm oil or soy bean oil), while MGO is still used in the international shipping fleet. Associated CO₂ emissions include the additional greenhouse gas emissions during the lifecycle of the biofuels. The resulting CO₂ emissions were evaluated as reduction or increase compared to the reference case of using HFO.

Depending on the production conditions of biofuels, CO₂ emissions are reduced or increased compared to HFO use. If palm oil or soy bean oil is produced on farmland with no associated land use change, a significant overall reduction in CO₂ emissions can be achieved. The maximum achievable reduction in CO₂ emissions in 2050 is 60% compared to the reference case of still using HFO. The respective radiative forcing can be reduced by 44% to a value of 62 mW m⁻². However, a certification of sustainable biofuel production is required. In contrast, producing palm oil on former tropical rainforest area or soy bean oil on former savannah area increases overall CO₂ emissions by a factor of two compared to HFO use.

Direct and indirect effects of emitted particulate matter are almost exclusively associated to the sulphate content of emitted PM. Therefore, the modification of aerosol climate effects is of similar magnitude for the low sulphur fossil fuel MGO as for the investigated biofuels. For all low sulphur fuels, the direct effect is reduced by a factor of 4 to -3 mW m⁻². The indirect effects are reduced by a factor of 3 to a value of -100 mW m⁻².

Recommendations

Waste products like waste edible fat show a positive greenhouse gas balance because no additional production of biomass is required. However, their overall availability is very limited so that this application appears useful only in local power production.

Soy bean oil and palm oil have a large potential for greenhouse gas reduction. The global production capacity is high. Producing these energy plants on farmland with no or limited potential land use change allows a significant reduction in greenhouse gas emissions. However, a certification of sustainable production is indispensable.

Palm oil achieves highest reductions in greenhouse gases if the conversion of tropical rainforest for growing palm trees is avoided. This overall greenhouse gas balance is still positive even if indirect land use changes are considered. Among all investigated biofuels palm oil shows the largest potential for greenhouse gas reduction.

Zusammenfassung

Ziele und Struktur des Projekts

Die Nutzung biogener Treibstoffe zur Erzeugung von Strom in stationären Kraftwerken oder in der Schifffahrt gewinnt im Hinblick auf eine Reduktion der CO₂ – Emissionen und auf die Verwendung von Energieträgern aus erneuerbaren Quellen zunehmend an Bedeutung. Das Verhalten mittelschnell laufender Diesel – Großmotoren bezüglich ihrer Emissionen von klimarelevanten Gasen und Partikeln sowie deren Auswirkungen auf das Klima sind bisher jedoch kaum erforscht. BIOCLEAR erachtet die Quantifizierung möglichst aller klimawirksamer Komponenten, auch bei der Verwendung biogener Kraftstoffe aus erneuerbaren Quellen, als wichtige Aufgabenstellung. Die Bewertung der Klimawirkung biogener Kraftstoffe erfordert eine genaue Analyse der unterschiedlichen Emissionscharakteristika konventioneller und regenerativer Kraftstoffe.

BIOCLEAR untersuchte die Emissionen von CO₂, NO_x, Kohlenwasserstoffen, SO₂, H₂SO₄ und von Partikeln im Bezug auf Anzahlkonzentration, Partikelgrößenverteilung und chemischer Zusammensetzung aus mittelschnell laufenden Diesel-Großmotoren für unterschiedliche Kraftstoffe. Die ausgewählten Kraftstoffe umfassten Schweröl (HFO) mit einem Schwefelgehalt von 2.17 Massen-% (wt-%) als konventionellen Referenzkraftstoff, Marine Gas Oil (MGO) als konventionellen schwefelarmen Kraftstoff sowie Palmöl, Sojabohnenöl, Sonnenblumenöl und Altfett als Kraftstoffe aus biogenen Quellen.

Durch die gleichzeitige Betrachtung von CO₂ und anderen klimawirksamen Komponenten wurde eine mögliche Erhöhung der Emissionen klimarelevanter Nicht-CO₂ - Komponenten bei gleichzeitiger Reduktion der CO₂ – Emissionen mit berücksichtigt. Begleitende Studien mit einem CO₂ – Response – Modell für die Behandlung der CO₂ – Emissionen und einem gekoppelten Klima-Chemie-Modell für die Behandlung der direkten und indirekten Aerosoleffekte untersuchten die Klimawirkung bei einer möglichen Ersetzung von fossilem Schweröl durch Treibstoffe aus biogenen Quellen. Die Treibhausgasemissionen während des Produktionszyklus der biogenen Treibstoffe wurden durch eine Lebenszyklusanalyse der Treibstoffe bestimmt, die zusätzliche CO₂ – Emissionen bei Landnutzungsänderungen mit betrachte.

Die Kombination aus Prüfstandsstudien und Modellstudien bilden die Basis für Empfehlungen zu einer unter Klimaschutzaspekten sinnvollen Anwendung biogener Kraftstoffe. Insgesamt erarbeitete BIOCLEAR Entscheidungshilfen zur weltweiten Nutzung biogener Kraftstoffe für die untersuchten Anwendungen in der stationären Stromproduktion und in der Schifffahrt.

Emissionseigenschaften

Die untersuchten biogenen Kraftstoffe zeigten insgesamt gute Verbrennungseigenschaften in den Diesel-Großmotoren. Es wurde keine signifikante Korrosion in den Motoren festgestellt. Das Emissionsverhalten der Motoren bei Nutzung biogener Treibstoffe kann wie folgt zusammengefasst werden:

Energiegehalt und spezifische CO₂ – Emissionen:

Energiegehalt pro Masse Treibstoff:	HFO	40.4 MJ kg ⁻¹
	MGO	43.0 MJ kg ⁻¹
	Biogene Treibstoffe (mittel)	37.3 MJ kg ⁻¹
Spezifische CO ₂ Emissionen bei 75% Last	HFO	679 g CO ₂ kWh ⁻¹
	MGO	639 g CO ₂ kWh ⁻¹
	Biogene Treibstoffe (mittel)	655 g CO ₂ kWh ⁻¹

Relative Emissionen biogener Treibstoffe bei einer Motorlast von 75% bezogen auf Schweröl

NO _x	≅ HFO - Referenzwert
Partikelmasse	10 - 15% des HFO - Referenzwerts
Partikelanzahl	2 – 3 × HFO - Referenzwert
Partikelanzahl nichtflüchtig	30 – 60% des HFO - Referenzwerts
Schwarzer Kohlenstoff	15 - 30% des HFO - Referenzwerts
Organisches Material	≥ HFO - Referenzwert

Bei der Verwendung schwefelarmer Kraftstoffe (MGO, biogene Kraftstoffe) werden die Emissionen partikelförmiger Komponenten wie Sulfat und schwarzer Kohlenstoff (Ruß) im Vergleich zu Schweröl signifikant reduziert. Die Reduktion liegt für fossile und biogene schwefelarme Kraftstoffe in dieselbe Größenordnung. Die Emissionen von NO_x und CO liegen für alle Kraftstoffe auf demselben Niveau wie für Schweröl, während die Emissionen gasförmiger Kohlenwasserstoffe bei schwefelarmen Kraftstoffen ebenfalls reduziert sind.

Klimawirkung

Die Klimawirkung wurde für den hypothetischen Fall untersucht, dass 2008 das gesamte Schweröl durch biogene Kraftstoffe (überwiegend Palmöl oder Sojabohnenöl) ersetzt wird, während MGO weiter in der Schifffahrt verwendet wird. Die betrachteten CO₂ – Emissionen beinhalten die Treibhausgasemissionen während des Lebenszyklus der biogenen Kraftstoffe. Die sich aus der Gesamtbetrachtung ergebenden CO₂ – Emissionen wurden mit dem Fall der weiteren Nutzung von Schweröl verglichen.

Je nach Produktionsart des biogenen Kraftstoffs können die CO₂ – Emissionen ansteigen oder reduziert werden. Wenn Palmöl oder Sojabohnenöl auf Ackerland bei nur geringfügiger Landnutzungsänderung produziert werden, kann eine signifikante Reduktion der CO₂ – Emissionen erreicht werden. Die maximal erreichbare Reduktion liegt bei 60% im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzfall einer weiteren Nutzung von Schweröl. Der damit verbundene Strahlungsantrieb kann um 44% auf 62 mW m⁻² reduziert werden. Dafür ist jedoch eine Zertifizierung nachhaltig produzierter biogener Kraftstoffe unbedingt erforderlich. Wird nämlich Palmöl oder Sojabohnenöl auf Flächen produziert, die zuvor mit tropischem Regenwald oder mit Savanne bedeckt waren, so verdoppeln sich die CO₂ – Emissionen gegenüber der Nutzung von Schweröl.

Direkte und indirekte Klimaeffekte des Aerosols sind überwiegend mit dem Sulfatgehalt der emittierten Partikel verbunden. Entsprechend sind die Reduktionen der direkten und indirekten Aerosoleffekte für alle untersuchten schwefelarmen Kraftstoffe vergleichbar. Der direkte Klimaantrieb wird um einen Faktor 4 auf -3 mW m⁻² reduziert, während die indirekten Klimaantriebe um einen Faktor 3 auf einen Wert von -100 mW m⁻² reduziert werden.

Empfehlungen

Abfallstoffe wie Altfett weisen eine günstige Treibhausgasbilanz auf, da zu ihrer Erzeugung keine zusätzliche Produktion von Biomasse erforderlich ist. Ihr Potential ist jedoch stark begrenzt, so dass hauptsächlich ein Einsatz in der regionalen Stromproduktion sinnvoll ist.

Sojaöl und Palmöl weisen ein hohes globales Produktionspotential auf. Werden Sojaöl und Palmöl auf Brachland oder Ackerfläche angebaut, für die keine oder geringe Verdrängungseffekte anzusetzen sind, so lassen sich signifikante Treibhausgasreduktionen erreichen. Hier ist jedoch ein Zertifikat für nachhaltigen Anbau unerlässlich.

Palmöl erreicht dann eine erhebliche Treibhausgasreduktion, wenn die Umwandlung von tropischen Regenwald – oder auch Moorböden – zum Anbau vermieden wird; dies gilt auch bei Einbeziehung indirekter Treibhausgas -Emissionen durch verdrängte Vornutzung. Palmöl erzielt die höchste Treibhausgasreduktion der betrachteten biogenen Öle.

6 Anhang - Treibhausgasemissionen biogener Energieträger im Vergleich zu fossilem Diesel und Schweröl – Endbericht der Studie des Öko-Instituts

Uwe R. Fritsche/Klaus Hennenberg/Lothar Rausch
Öko-Institut e.V., Büro Darmstadt

im Unterauftrag des
Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)

BMBF-Vorhaben BIOCLEAN

Treibhausgasemissionen biogener Energieträger im Vergleich zu fossilem Diesel und Schweröl - Endbericht

Bearbeitung:

Darmstadt, Oktober 2009

Uwe R. Fritsche/Klaus Hennenberg/Lothar Rausch
Öko-Institut e.V., Büro Darmstadt

im Unterauftrag des
Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt
(DLR) Oberpfaffenhofen

Öko-Institut e.V.

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
D-64295 Darmstadt
Tel.: (06151) 8191-0
Fax: (06151) 8191-33

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 6226
D-79038 Freiburg
Tel.: +49-(0)761-452950
Fax: +49-(0)761-475437

Büro Berlin
Novalisstraße 10
D-10115 Berlin
Tel.: +49-(0)30-280486-80
Fax: +49-(0)30-280486-88

www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ii
Tabellenverzeichnis	iii
1 Einleitung.....	1
2 Methodische Grundlagen der Bilanzierung	2
2.1 Lebensweganalysen als Methode	2
2.2 GEMIS als Werkzeug für Lebensweganalysen	4
3 Treibhausgasbilanzen ausgewählter biogener Energieträger	5
3.1 THG-Emissionen aus den Lebenswegen von Bioenergieträgern	5
3.2 Lebenswegbezogene THG-Emissionen von Bioenergie unter Einbeziehung von Landnutzungsänderungen	6
3.3 Ergebnisse der THG-Bilanzierung für biogene Energieträger	8
3.4 THG-Bilanzen für biogene Energieträger von 2010 bis 2030	11
3.5 Variation der THG-Emissionen aus indirekten LUC	17
3.6 Unsicherheitsanalyse für THG aus Düngung	19
4 Treibhausgasemissionen von fossilem Diesel und Schweröl	21
5 Mögliches Einsparpotential durch biogene Energieträger.....	26
5.1 THG-Bilanzen der Substitution fossiler durch biogene Energieträger im Jahr 2005	26
5.2 THG-Bilanzen der Substitution fossiler durch biogene Energieträger bis 2030	28
6 Belastbarkeit der Ergebnisse und Forschungsbedarf	30
6.1 Datenunsicherheiten in den biogenen THG-Bilanzen	30
6.1.1 THG aus Landbearbeitung	30
6.1.2 THG aus Landnutzungsänderungen	30
6.1.3 THG aus Stickstoffdüngung	31
6.2 Datenunsicherheiten in den fossilen THG-Bilanzen	31
7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	32
Literatur.....	34
Abkürzungsverzeichnis	38
Anhang: THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen	39
Grundsätzliche Aspekte der indirekten Landnutzungsänderungen	39
Ökonometrische Ansätze mit Gleichgewichtsmodellen	40
Deterministische Ansätze zur indirekten Landnutzung	41

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Vereinfachte Struktur von Energieprozessketten	2
Bild 2	Energieflüsse und Umwelteffekte in einer Prozesskette	3
Bild 3	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen	9
Bild 4	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2010) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen	12
Bild 5	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2020) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen	14
Bild 6	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2030) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen	16
Bild 7	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) bei Variation des iLUC factor für THG-Emissionen aus indirekten LUC	17
Bild 8	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen bei Variation der N-N ₂ O-Konversionsrate (ohne THG aus LUC).....	20
Bild 9	THG-Bilanzen der Vorketten von fossilem Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030.....	22
Bild 10	THG-Gesamtbilanzen für fossilen Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030.....	24
Bild 11	Direkte THG-Emissionen und Emissionen aus den Vorketten für fossilen Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030.....	25
Bild 12	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger (2005).....	27
Bild 13	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger bis zum Jahr 2030	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Analyseumfang der Bioenergieträger nach Art und Herkunft.....	5
Tabelle 2	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005)	8
Tabelle 3	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2010)	11
Tabelle 4	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2020) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen	13
Tabelle 5	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2030) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen	15
Tabelle 6	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) bei Variation des iLUC factor für THG-Emissionen aus indirekten LUC	17
Tabelle 7	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen bei Variation der N-Konversionsrate (ohne THG aus LUC)	19
Tabelle 8	THG-Bilanzen der Vorketten von fossilem Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030.....	21
Tabelle 9	THG-Gesamtbilanzen für fossilen Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030.....	23
Tabelle 10	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger (2005).....	26
Tabelle 11	THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger bis zum Jahr 2030	28
Tabelle 12	Regions- und kulturspezifische C-Inventare und daraus abgeleitete flächenbezogene CO ₂ -Emissionen durch LUC	42
Tabelle 13	Mengengerüst zur Ableitung des theoretischen globalen iLUC factor für das Referenzjahr 2005	43

1 Einleitung

Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) beauftragte das Öko-Institut (Institut für angewandte Ökologie e.V.) im Rahmen des laufenden BMBF-geförderten F&E-Vorhabens BIOCLEAN eine Kurzstudie zu Fragen der lebenswegbezogenen Emissionen von Treibhausgasen (THG) biogener Energieträger im Vergleich zu fossilem Diesel und Schweröl zu erstellen.

Der vorliegende Endbericht fasst die Ergebnisse der entsprechenden Arbeiten zusammen.

Ziel der Arbeiten war,

- eine aktuelle Übersicht zu den **THG-Emissionen** heutiger und künftiger **biogener Energieträger** auf Basis bestehender Studien zu geben,
- parallel die THG-Emissionen von **fossilem Diesel** und **Schweröl** darzustellen,
- und daraus abschließend das Potential zur **Reduktion von THG-Emissionen** durch die Nutzung biogener Energieträger zu ermitteln.

Dementsprechend gliedert sich der vorliegende Endbericht in mehrere Teile:

Im Abschnitt 2 werden die methodischen Grundlagen der THG-Bilanzierung dargestellt

Abschnitt 3 umfasst die THG-Emissionen der biogenen Energieträger, während im Abschnitt 4 die entsprechenden Ergebnisse für die fossilen Energieträger dargestellt werden.

Im Abschnitt 5 erfolgt auf dieser Basis eine kurze Zusammenfassung der möglichen THG-Reduktionspotentiale durch die Substitution fossiler durch biogene Energieträger.

Der Abschnitt 6 gibt eine knappe Darstellung der offenen Fragen und des dahingehenden Forschungsbedarfs.

Abschließend fasst Abschnitt 7 die wesentlichen Ergebnisse zusammen und gibt zentrale Schlussfolgerungen wieder.

Ergänzend wird der Bericht durch ein Literatur- und Abkürzungsverzeichnis und einen Anhang, in dem näher auf methodische Aspekte der potentiellen THG-Emissionen aus **indirekten** Landnutzungsänderungen eingegangen wird.

.

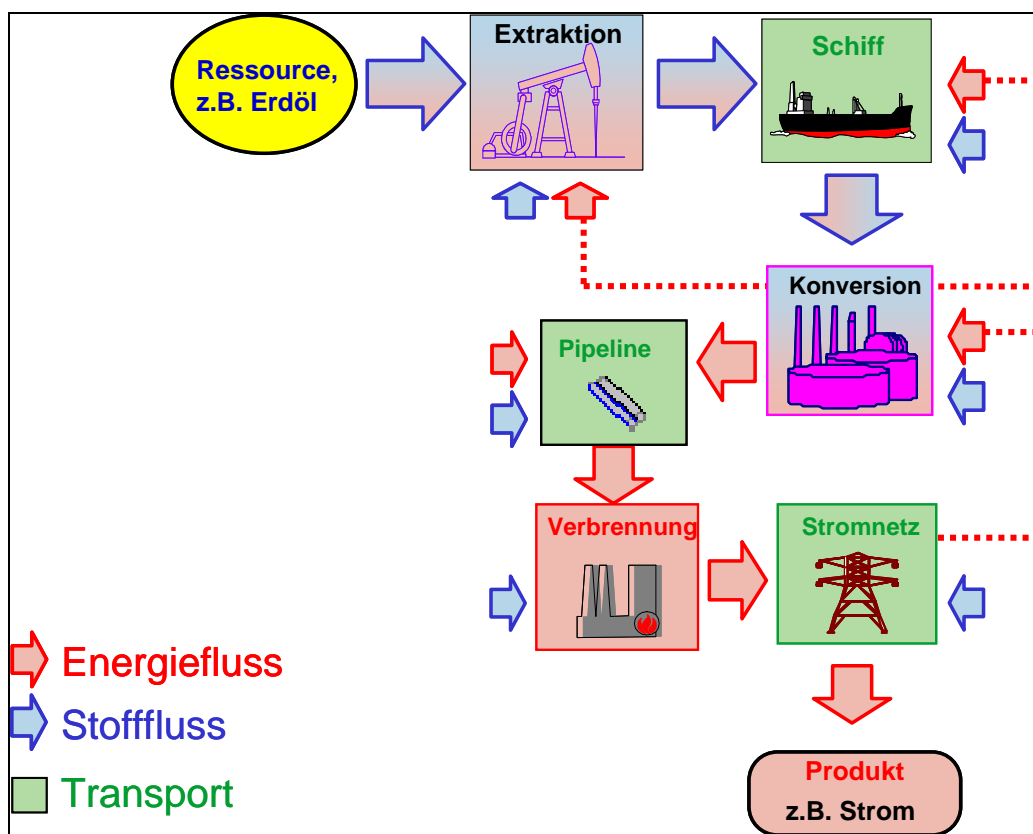
2 Methodische Grundlagen der Bilanzierung

2.1 Lebensweganalysen als Methode

Grundlage für die Bilanzierung von Treibhausgasen (THG) ist seit mehreren Jahrzehnten systematisch entwickelte **Lebensweganalyse**, die oft mit dem Begriff „Ökobilanzierung“ (life-cycle assessment = LCA) gleich gesetzt wird¹.

Wesentlich sind dabei die **Vorketten** für Energieträger, d.h. die der eigentlichen Energienutzung vorgelagerten Prozessketten. Sie beginnen bei der Gewinnung von Primärenergieträgern, gefolgt von deren Aufbereitung, Transporten sowie der weiteren Verarbeitung bis zur Sekundär- bzw. Endenergiestufe. Die folgende Abbildung zeigt ein vereinfachtes Schema dazu.

Bild 1 Vereinfachte Struktur von Energieprozessketten



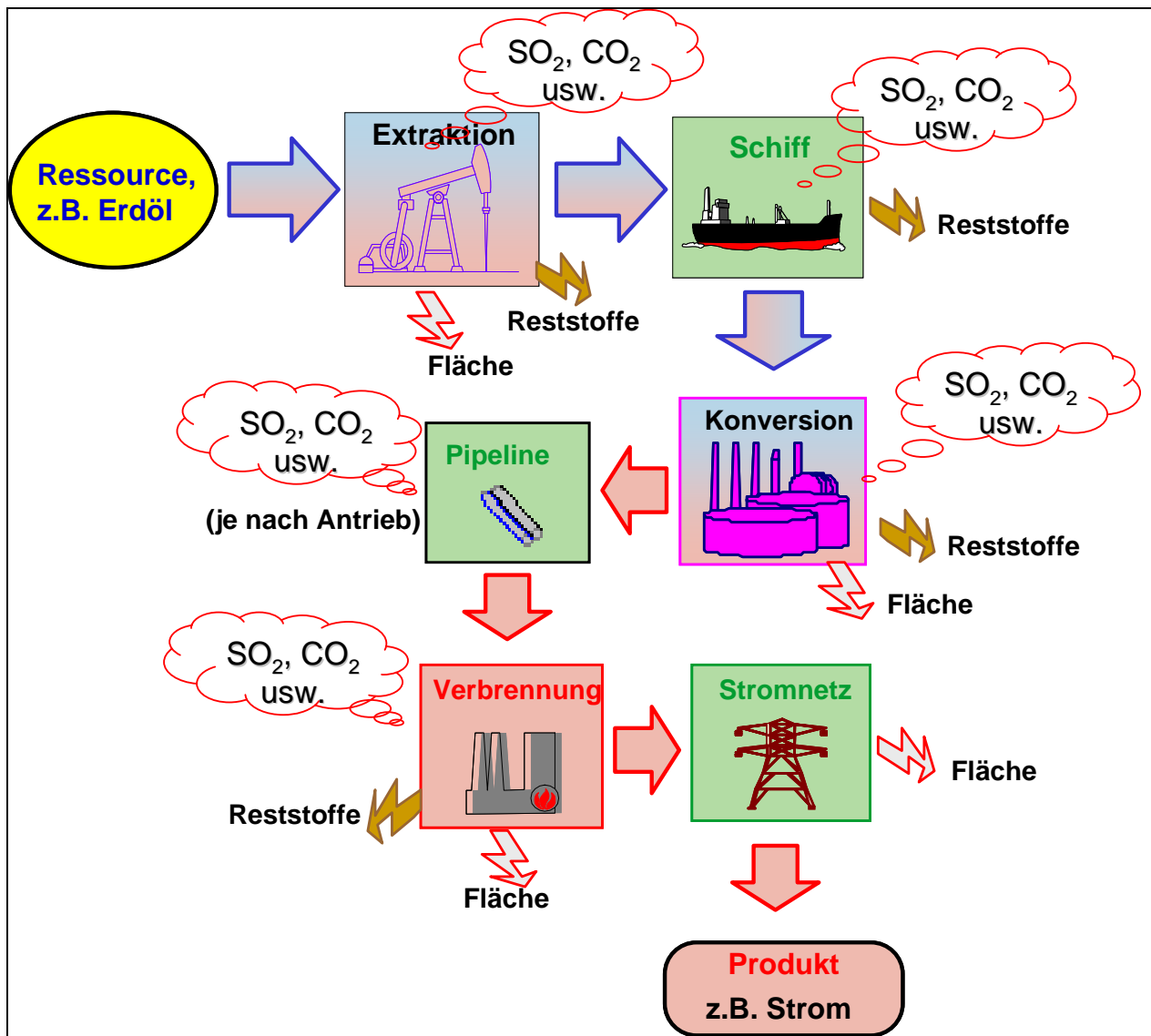
Quelle: Öko-Institut

¹ Dies ist jedoch nicht zutreffend, da Lebensweganalysen **keine** vollständige Ökobilanz nach ISO 14000ff darstellen. Vielmehr umfassen sie nur die **Sachbilanz** (life-cycle inventory = LCI), womit weitere Elemente der Ökobilanzierung (z.B. die Frage der Bewertung der Ergebnisse) außerhalb der Arbeit liegen. Die nach ISO14000ff notwendigen Schritte wie scoping, goal definition und peer review usw. sind für die vorliegende Fragestellung nicht relevant.

Im Bild ist zu erkennen, dass es Rückkopplungen (Schleifen) in den Lebenswegen gibt – so wird z.B. der Output der Raffinerie genutzt, um den Input (Rohöl) zu fördern und zu transportieren. Ebenso wird der Output des Kraftwerks (Strom) genutzt, um die Raffinerie zu betreiben (Hilfsenergie).

Bei all diesen Aktivitäten (sog. Prozesse) können Umwelteffekte entstehen: bei der Energie- und Stoffbereitstellung sowie den Transporten (siehe folgendes Bild).

Bild 2 Energieflüsse und Umwelteffekte in einer Prozesskette



Quelle: Öko-Institut

Die Prozesse müssen nicht nur betrieben werden, auch für ihre *Herstellung* sind Stoffe nötig, deren Bereitstellung Stoff- und Energieflüsse bedingen – diese im Prinzip unendliche Regression durch gekoppelte Energie- und Stoffströme wird üblicherweise durch rekursive Algorithmen oder invertierte Input-Output-Tabellen gelöst.

2.2 GEMIS als Werkzeug für Lebensweganalysen

Das Öko-Institut hat mit dem Computermodell GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) seit 1989 für diese Fragen eine Datenbank zur ganzheitlichen Bilanzierung von Umwelt- und Kostenaspekten im Energie-, Stoff- und Verkehrssektor entwickelt, die mittlerweile in der Version 4.6 vorliegt (vgl. www.gemis.de).

Alle Details können dem – kostenlos verfügbaren - Computermodell und seiner Datenbank entnommen werden, eine detaillierte Dokumentation für die Vorketten von Erdöl- und Erdgas sowie für Braun- und Steinkohle sowie der entsprechenden Daten für Bioenergie gibt die Literatur².

Mit dieser Datenbank und einem integrierten Berechnungstool kann GEMIS die Lebensweganalyse schnell und transparent durchführen und so die Umwelteffekte ganzheitlich bilanzieren³.

Die THG-Emissionen in GEMIS betreffen CO₂, CH₄ und N₂O sowie CO₂-Äquivalente, die nach verschiedenen THP-Faktoren berechnet werden können⁴.

Dabei sind alle Einzeldaten im Modell direkt verfügbar und die Ergebnisse von Lebenswegbilanzen lassen sich vollständig disaggregieren, d.h. alle Daten sind vollständig transparent.

Zudem bietet GEMIS auch Analysefunktionen, mit denen z.B. die regionalen oder sektoralen Beiträge in Prozessketten unterschieden werden können.

Aktuell umfasst die GEMIS-Datenbank über 12.000 Prozesse in mehr als 50 Ländern, einen Schwerpunkt bilden dabei mit über 5.000 Datensätzen die Energiewirtschaft (Strom, Wärme), darunter etwa 2000 verschiedene Prozesse für die Bereitstellung und Nutzung von Bioenergie, sowie die Stoffbereitstellung (z.B. Baustoffe, Chemikalien, Metalle, Nahrungsmittel) und Verkehrsprozesse (Personen- und Gütertransporte).

Die aktuelle GEMIS-Version benutzt als Basisjahr 2005 und bietet für ausgewählte Prozesse (insb. Energie und Verkehr) auch Daten zur künftigen Entwicklung (2010-2030).

² Siehe ÖKO (2003-2007) für eine Dokumentation der fossilen Vorkettendaten sowie ÖKO (2004) und ÖKO (2009a) sowie ÖKO/DLR (2009) für die Dokumentation der Bioenergieprozessketten. Die jeweils aktuellste Version der Datenbasis ist in GEMIS verfügbar und steht kostenlos unter www.gemis.de zur Verfügung.

³ Auszüge zu Daten und Ergebnissen aus GEMIS können auch ohne das Programm unter www.probas.umweltbundesamt.de abgerufen werden.

⁴ Die Treibhauspotentiale (THP; im Englischen: global warming potential = GWP) der einzelnen Treibhausgase können nach IPCC (1995) entsprechend des Kyoto-Protokolls oder nach neueren Daten des IPCC gewählt werden, um die aggregierten CO₂-Äquivalente zu berechnen. In der vorliegenden Studie wurden stets die Werte nach IPCC (2007) verwendet. Zur Erläuterung: z.B. beim Biomasse-Anbau wird N₂O **direkt** durch den Einsatz von N-Dünger emittiert (ermittelt nach IPCC Tier 1-Methode, vgl. IPCC 2006), jedoch wird **zusätzlich** N₂O bei der Herstellung des N-Düngers freigesetzt und auch CO₂ aufgrund des Energieeinsatzes für die N-Düngerherstellung. Alle diese Emissionen werden hier einbezogen.

3 Treibhausgasbilanzen ausgewählter biogener Energieträger

Entsprechend der Forschungsfragestellung war zu analysieren und darzustellen, mit welchen THG-Emissionen bei der Bereitstellung biogener Energieträger heute und in Zukunft – je nach Herstellungs- und Verarbeitungswegen - zu rechnen ist.

Dabei wird folgende Matrix aus biogenen Energieträgern und ihrer regionalen Herkunft untersucht⁵:

Tabelle 1 Analyseumfang der Bioenergieträger nach Art und Herkunft

Bioenergieträger	Herkunftsland/Region	eingesetzter Rohstoff
AME	Deutschland	Altspeisefette und -öle
Rapsöl	Deutschland	Rapskörner
Sojaöl	Argentinien/Brasilien	Sojabohnen
Sonnenblumenöl ⁶	Spanien	Sonnenblumenkörner
Palmöl	Indonesien/Malaysien	Palmenfruchtstände

Quelle: eigene Darstellung

Für die in der Tabelle 1 aufgeführten Bioenergieträger wurden jeweils die THG-Emissionen des Referenzjahrs 2005 sowie der Jahre 2010, 2020 und 2030 ermittelt.

3.1 THG-Emissionen aus den Lebenswegen von Bioenergieträgern

Die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse entsprechen der beim Wachstum aus der Atmosphäre absorbierten CO₂-Menge, so dass Biomasse aus nachhaltigem Anbau CO₂-neutral ist, soweit keine Landnutzungsänderungen stattfinden.

Entlang der Lebenswege von angebauter Bioenergie werden jedoch bei Anbau, Verarbeitung und Transport von Biomasse auch THG wie CH₄ und N₂O emittiert. Weitere CO₂-Emissionen treten durch Einsatz fossiler Energien (Diesel) sowie aus Vorketten (Düngerherstellung) auf.

Daher ist die Einbeziehung aller relevanten THG - Quellen von Rohstoffproduktion, Verarbeitung und Transport der Biotreibstoffe bis hin zu möglichen Änderungen in der Landnutzung zu einer **ganzheitlichen Bewertung der Klimawirkung** biogener Treibstoffe erforderlich.

Die Datengrundlage für solche Lebensweganalysen wurde in Deutschland mit dem „Stoffstrom-Biomasse“-Projekt des Bundesumweltministeriums gelegt, dass von 2000

⁵ Von der Untersuchung der aus den reinen Pflanzenölen erzeugten Methylestern (z.B. RME) wurde abgesehen, da diese für die Nutzung in stationären Anlagen aus Kostengründen nicht in Frage kommen. Die entsprechenden Daten sind jedoch in GEMIS 4.5 verfügbar.

⁶ In diesem Bericht wurde von einer eigenen Darstellung der Ergebnisse für Sonnenblumenöl abgesehen, da die Resultate sich weitestgehend mit denen für Rapsöl decken. Die entsprechende Datenbasis ist aber in GEMIS enthalten und kann entsprechend nachvollzogen werden.

bis 2004 über 1500 Datensätze zu Bioenergieanbau und –nutzung für vier Zeithorizonte erstellt (ÖKO 2004).

Diese Datengrundlagen wurden im Rahmen des BMU-Vorhabens „Stoffstromanalyse zur Nachhaltigen Mobilität im Kontext der Erneuerbaren Energien bis 2030 – renewbility“ von 2006 bis 2009 vor allem im Bereich der biogenen Kraftstoffe weiterentwickelt (ÖKO/DLR 2009) und durch ein Projekt der Europäischen Umwelt-Agentur zur Ökobilanzierung erneuerbarer Energien ergänzt (ÖKO 2009b).

Darüber hinaus gibt es umfangreiche Studien aus dem Ausland, die sich mit biogenen Energieträgern vor allem im Bereich flüssiger Biokraftstoffe befassen⁷.

Mit der Verabschiedung der EU-Richtlinie zur Förderung der erneuerbaren Energien im Dezember 2008 (EU 2009) wurden die methodischen Grundlagen zur THG-Bilanzierung für flüssige Bioenergieträger methodisch normiert, womit ein deutlicher Fortschritt in Bezug auf die Bandbreite von Lebensweganalysen erreicht wurde⁸.

3.2 Lebenswegbezogene THG-Emissionen von Bioenergie unter Einbeziehung von Landnutzungsänderungen

Für die THG-Bilanz von Bioenergieträgern ist jedoch nicht allein der klassische Lebensweg wichtig, sondern – vor allem bei Systemen mit Biomasse**anbau** – auch die Frage der THG-Emissionen aus **Landnutzungsänderungen** (land use change = LUC).

Dies wurde in den letzten Jahren intensiv diskutiert⁹ mit dem Ergebnis, dass für Bioenergieträger aus dem Anbau von Biomasse die möglichen THG-Emissionen aus LUC einbezogen werden müssen, da sie einen großen Einfluss auf die Bilanzergebnisse haben.

LUC-Effekte der Bioenergie können dabei sowohl direkt oder indirekt auftreten:

- **Direkte** Landnutzungsänderungen (direct land use change = dLUC) entstehen, wenn eine Fläche **vor** dem Anbau von Energiepflanzen durch eine andere Nutzung geprägt oder ungenutzt war.
- **Indirekte** Landnutzungsänderungen (indirect land use change = iLUC) können dann entstehen, wenn auf einer Fläche Energiepflanzen angebaut werden, die zuvor durch die Kultivierung von Nutzpflanzen für Nahrung, Futter oder Fasern geprägt war. Da der Bedarf für diese Produkte in der Regel weiterhin besteht, wird deren Produktion **auf andere** Flächen verdrängt („displacement“). Der auf den an-

⁷ Siehe zum Überblick UNEP/IEA (2008) sowie ANL (2008), EUCAR/JRC/CONCAWE (2007), IFEU/WI (2007), JRC (2008), Panichelli/Gnansounou (2008), RS (2008), Scharlemann/Laurance (2008) und Zah et al. (2007).

⁸ Eine wesentliche Quelle für die unterschiedlichen Ergebnisse von THG-Bilanzen der Bioenergie ist die Behandlung von Neben- und Koppelprodukten (vgl. UNEP/IEA 2008; ÖKO 2009a). Mit der EU-Richtlinie wurde dies nun einheitlich auf die energetische Allokation festgelegt (vgl. EU 2009).

⁹ Siehe hierzu insbesondere Fargione et al. (2008), Fehrenbach/Fritsche/Giegrich (2008), Fritsche (2008), Fritsche/wiegmann (2008), GBEP (2009, Kløverpris/Wenzel/Nielsen (2008), Liska/ Perrin (2009), ÖKO (2009a), ÖKO/IFEU(2009), RFA (2008), Searchinger et al. (2008), Searchinger (2009) und WBGU (2008).

deren Flächen stattfindende direkte LUC kann nicht unmittelbar der Bioenergiegewinnung zugeordnet werden, wird aber dennoch von ihr (mit)verursacht.

Diese um LUC ergänzten THG-Bilanzen ändern die Ergebnisse bisherigen Studien je nachdem, welche LUC-Annahmen getroffen werden:

- Im positiven Fall kann durch den Anbau von Biomasse eine Erhöhung der im Boden gespeicherten C-Menge erfolgen, womit die THG-Bilanzen **reduziert** werden.
- Im negativen Fall kann durch den Biomasseanbau eine kohlenstoffreiche Vegetation durch einjährige Energiepflanzen – z.B. Raps – ersetzt werden, womit eine **erhebliche zusätzliche** CO₂-Freisetzung einzurechnen ist.

Werden die Bioenergiesysteme wie bisher ohne die Einrechnung der Landnutzungsänderungen betrachtet, tragen sie im Folgenden die Bezeichnung „oLUC“.

Als typische Systeme für LUC werden Veränderungen auf Acker- und Grünlandflächen („Gras“) sowohl für die direkten als auch die indirekten Effekte berücksichtigt, da es hier zu Verdrängungen vorheriger Nutzungen kommen kann.

Bei LUC, die durch die Zerstörung natürlicher Habitats charakterisiert werden – dies sind in der vorliegenden Arbeit bei Sojaöl Feuchtsavannen und bei Palmölplantagen tropische Regenwaldflächen - müssen lediglich die direkten Landnutzungsänderungen berücksichtigt werden, da in diesem Fall keine Verdrängung vorheriger landwirtschaftlicher Nutzung stattfindet.

Die Datenannahmen zu den THG-Emissionen aus LUC beruhen auf einer Expertise für den WBGU (Fritsche/Wiegmann 2008)¹⁰. Eine nähere Darstellung zur Diskussion der indirekten LUC-Effekte und der entsprechenden Daten gibt der **Anhang**.

Somit erfolgt eine Differenzierung der THG-Emissionen danach, durch jeweils welche der folgenden Aktivitäten sie entstehen:

- Lebenswege (Anbau, Transporte, Verarbeitung) inkl. Hilfsenergien und Hilfsstoffen und unter Einbeziehung von Neben- und Koppelprodukten
- direkte Landnutzungsänderungen beim Anbau
- indirekte Landnutzungsänderungen durch verdrängte Vornutzung¹¹.

Bei der Anrechnung von Koppel- und Nebenprodukten entlang der Lebenswege (z.B. Extraktionsschrot) wird entsprechend der Vorgaben der EU-Richtlinie zur Förderung der Erneuerbaren-Energien (EU 2009) die Methodik der **heizwertbezogenen Allokation** verwendet.

¹⁰ Da im WBGU-Gutachten jedoch die bei BIOCLEAN verwendeten Treibstoffe und fossiles Schweröl nicht behandelt wurden, erfolgte eine eigene Berechnung mit GEMIS, auf dem auch das WBGU-Gutachten fußt.

¹¹ In der entsprechenden Bilanzierung der THG-Emissionen aus indirekten LUC wurde generell der „mittlere“ iLUC factor angesetzt (vgl. Anhang). Zur Darstellung der Bandbreite durch Verwendung des minimalen und maximalen iLUC factors siehe Abschnitt 3.5.

Ergänzend wurden die Effekte einer höheren Konversionsrate von N-Freisetzungen aus der Stickstoffdünger zu Lachgas (N₂O) untersucht, da diese Kenngröße je nach biogenem Energieträger große Ergebniswirksamkeit zeigt (vgl. Abschnitt 3.6).

3.3 Ergebnisse der THG-Bilanzierung für biogene Energieträger

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der für BIOCLEAN relevanten Bioenergieträger im Basisjahr 2005.

Tabelle 2 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005)

Angaben in kg/GJ _{end}	CO ₂ -Äq.	CO ₂
AME	7,7	7,1
Rapsöl oLUC*	34,9	16,6
Rapsöl iLUC Acker	146,9	128,6
Rapsöl dLUC Gras	64,3	46,0
Rapsöl iLUC Gras	176,4	158,1
Sojaöl oLUC*	13,8	12,2
Sojaöl iLUC Acker	130,1	128,4
Sojaöl dLUC Gras	44,4	42,8
Sojaöl dLUC Savanne	182,2	180,5
Sojaöl iLUC Gras	160,6	159,0
Palmöl oLUC	62,3	27,0
Palmöl dLUC Acker	0,1	-35,2
Palmöl dLUC Gras	16,3	-19,0
Palmöl dLUC trop.Wald	237,0	201,7
Palmöl iLUC Acker	61,7	26,3
Palmöl iLUC Gras	77,8	42,5

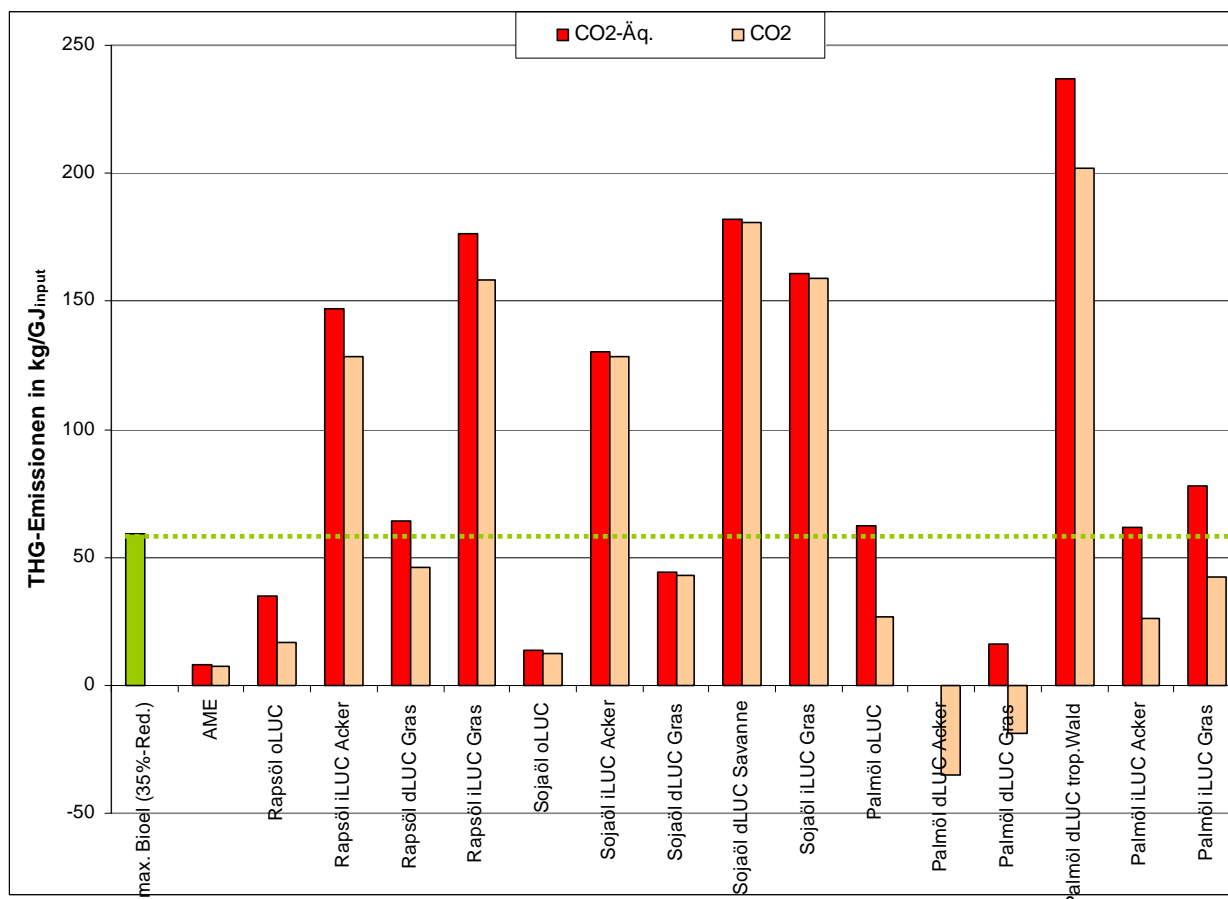
Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau
 * = bei einjährigen Kulturen auf Ackerflächen ist oLUC = dLUC (Acker)

Die Bereitstellung von Altfett-Methylester (AME) hat erwartungsgemäß die geringsten THG-Emissionen und ist auch nicht von LUC betroffen¹².

Für die „oLUC“-Fälle – also die reinen Lebenswegbilanzen **ohne** Einbeziehung von THG-Emissionen aus LUC - zeigen die Ergebnisse, dass die Bioenergieträger gegenüber den fossilen Konkurrenten (vgl. Abschnitt 4) in der Regel günstiger liegen¹³.

In der folgenden Abbildung ist zum Vergleich das nach EU (2009) geforderte 35%-Reduktionsniveau gegenüber fossilen Energieträgern einbezogen, dass nicht nur für biogene Flüssigkraftstoffe, sondern generell für biogene Flüssigenergeträger gilt – also auch beim Einsatz zur Strombereitstellung¹⁴.

Bild 3 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergeträger (Jahr 2005) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop. Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau

¹² Nach EU (2009) werden für biogene Abfälle und Reststoffe keine THG-Emissionen aus Vorketten einbezogen, daher sind auch keine Effekte aus Landnutzungsänderungen anzusetzen.

¹³ Dies gilt für den Fall, dass die N₂O-Emissionen nach IPCC (2006) bestimmt werden. Zu den Ergebnissen einer Variation der N₂O-Emissionen siehe Abschnitt 3.6.

¹⁴ Für biogene Flüssigenergeträger in Schiffen gilt die EU-Richtlinie dagegen bislang **nicht**.

Ohne Einbeziehung von THG-Emissionen aus LUC – d.h. für die oLUC-Fälle - erreichen bis auf Palmöl alle Bioenergieträger das geforderte 35%-Mindest-Reduktionsniveau nach der EU-Richtlinie¹⁵.

Wird jedoch die THG-Freisetzung durch **direkte** Landnutzungsänderungen (dLUC) einbezogen, erreichen Soja- und Palmöl bei Umwandlung von Feuchtsavanne oder tropischem Regenwald nicht mehr die erforderliche Mindest-Reduktion¹⁶.

Wird Sojaöl für den Fall der Nutzung ehemaligen Grünlands betrachtet, so kann die Mindest-Reduktion knapp erreicht werden. Werden sie dagegen durch Anbau auf Grünland („Gras“) bereitgestellt, liegen ihre THG-Emissionen deutlich darunter.

Bei Palmöl führt die Einbeziehung der THG-Emissionen aus direkten LUC sogar zu einer Senkung der THG-Emissionen, wenn der Anbau auf ehemaligen Acker- oder Grünland erfolgt. Grund dafür ist, dass die mehrjährigen Palmölplantagen die ober- und unterirdische Kohlenstoffbilanz gegenüber der vorherigen Nutzung verbessern, was die CO₂-Bilanz in den negativen Salden abbildet¹⁷.

Rapsöl erreicht dagegen bei der Einbeziehung von THG-Emissionen durch dLUC **in keinem Fall** die nötige THG-Reduktion.

Bei der zusätzlichen Berücksichtigung möglicher **indirekter** CO₂-Emissionen aus verdrängender Landnutzung (in obiger Tabelle und Grafik jeweils die „iLUC“-Fälle) verschlechtert sich THG-Bilanz weiter: **keiner** der Bioenergieträger erreicht dann mehr die nach der EU-Richtlinie nötige Mindest-THG-Reduktion von 35%, wobei Palmöl von Ackerflächen allerdings nur sehr knapp über der Reduktionsmarke liegt¹⁸.

¹⁵ Für die auch ohne THG-Emissionen aus LUC relevante Frage der N₂O-Emissionen siehe Abschnitt 3.6

¹⁶ Für Sojaöl gilt dies auch für den Fall des Anbaus von Soja auf Ackerflächen.

¹⁷ Die Bilanz von Palmöl in CO₂-Äquivalenten ist dagegen größer als Null, da hier die N₂O-Emissionen des Anbaus und die CH₄-Emissionen der Ölmühlen entsprechend ihrer relativen Treibhauspotentiale einbezogen sind.

¹⁸ Zu den Ergebnissen einer Variation der THG-Emissionen aus iLUC siehe Abschnitt 3.5, und für die auch ohne THG-Emissionen aus LUC relevante Frage der N₂O-Emissionen siehe Abschnitt 3.6.

3.4 THG-Bilanzen für biogene Energieträger von 2010 bis 2030

Über die Analyse der THG-Emissionen im Basisjahr 2005 hinaus wurde analog zu Fritsche/Wiegmann (2008) auch eine Betrachtung der künftigen Entwicklungen für ausgewählte biogene Energieträger durchgeführt, die allerdings über die WBGU-Studie hinaus nicht nur das Jahr 2030, sondern auch Zwischenwerte für die Jahre 2010 und 2020 umfasst.

Hierbei wurden auf Basis von ÖKO (2004) und Nachfolgearbeiten die folgenden künftigen Verbesserungen einbezogen:

- Biomasseanbau - höhere Erträge durch Züchtung
- Konversion zu Bioenergieträgern - CH₄-Reduktion bei Ölmühlen
- Emissionsdynamik der „Hintergrund“-Daten¹⁹.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigen die folgenden Tabellen und Grafiken.

Tabelle 3 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2010)

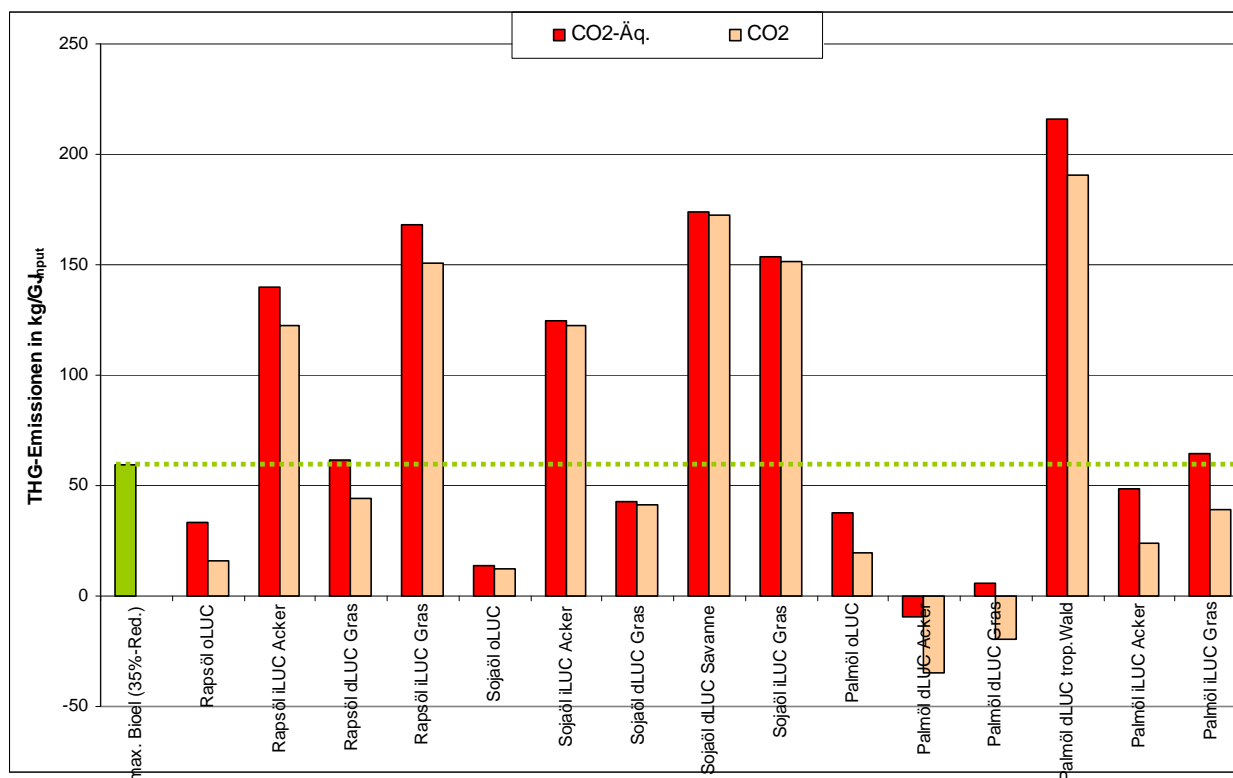
Angaben in kg/GJ _{end}	CO ₂ -Äq.	CO ₂
Rapsöl oLUC	33,3	15,9
Rapsöl iLUC Acker	139,9	122,5
Rapsöl dLUC Gras	61,3	43,9
Rapsöl iLUC Gras	167,9	150,6
Sojaöl oLUC	13,7	12,1
Sojaöl iLUC Acker	124,3	122,7
Sojaöl dLUC Gras	42,8	41,2
Sojaöl dLUC Savanne	173,9	172,3
Sojaöl iLUC Gras	153,4	151,8
Palmöl oLUC	37,8	19,9
Palmöl dLUC Acker	-9,8	-35,0
Palmöl dLUC Gras	5,6	-19,5
Palmöl dLUC trop.Wald	215,6	190,5
Palmöl iLUC Acker	48,8	23,6
Palmöl iLUC Gras	64,2	39,0

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau

¹⁹ Dies betrifft die Bereitstellung der in den biogenen Lebenswegen eingesetzten fossilen Energieträger und Rohstoffe sowie die Bereitstellung von Strom als Hilfsenergie z.B. für die Ölmühlen. Die Zeitdynamik der Hintergrundsysteme gilt auch für die ausländischen Vorketten.

Im Vergleich zum Basisjahr zeigt vor allem die Bereitstellung von Palmöl geringere THG-Emissionen, da ab 2010 mit einer neuen Palmölmühle gerechnet wurde, bei der die CH₄-Emissionen aus der Abwasserbehandlung durch eine Biogasanlage gesenkt werden.

Bild 4 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2010) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6 sowie EU-Anforderungen nach EU(2009); Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau

Gegenüber dem Jahr 2005 sind vor allem bei Palmöl im Jahr 2010 THG-Emissionsreduktionen zu erwarten, da bei der Ölgewinnung eine Methanerfassung und –nutzung als Biogas und die Rückführung der organischen Reststoffe als Dünger in die Plantage angesetzt wurde.

Bei den anderen biogenen Ölen treten ebenfalls leichte Reduktionen auf, die überwiegend durch leicht höhere Erträge und Effizienzgewinne bei der Aufbereitung beruhen.

Die Ergebnisse für das Jahr 2020 zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 4 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2020) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen

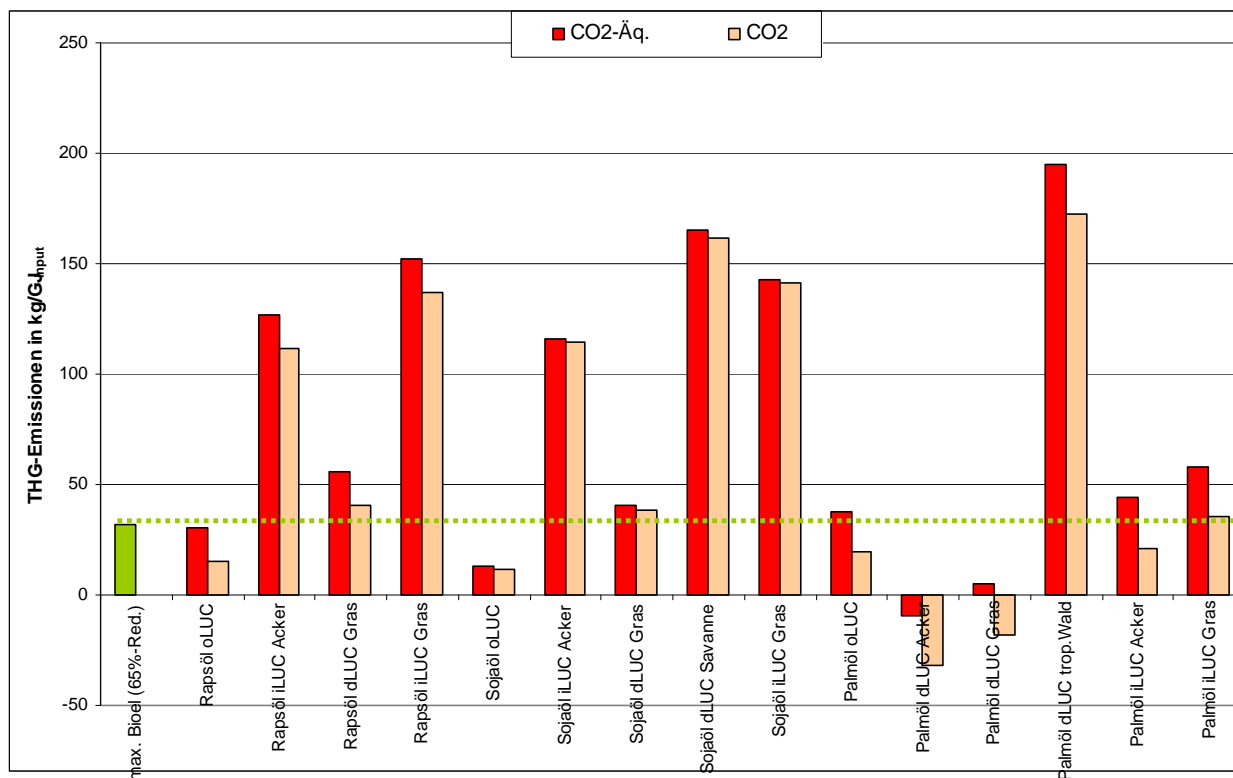
Angaben in kg/GJ _{end}	CO ₂ -Äq.	CO ₂
Rapsöl oLUC	30,5	14,9
Rapsöl iLUC Acker	127,0	111,4
Rapsöl dLUC Gras	55,9	40,3
Rapsöl iLUC Gras	152,4	136,8
Sojaöl oLUC	13,2	11,8
Sojaöl iLUC Acker	115,9	114,4
Sojaöl dLUC Gras	40,2	38,7
Sojaöl dLUC Savanne	165,2	161,7
Sojaöl iLUC Gras	142,9	141,4
Palmöl oLUC	37,8	19,8
Palmöl dLUC Acker	-9,1	-31,7
Palmöl dLUC Gras	4,9	-17,8
Palmöl dLUC trop.Wald	195,0	172,3
Palmöl iLUC Acker	43,9	21,3
Palmöl iLUC Gras	57,9	35,2

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau

Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse im Überblick, wobei die EU-Mindestanforderung an die THG-Reduktion durch biogene Flüssigenergieträger auf 65% gegenüber dem fossilen Vergleichswert ansteigt²⁰.

²⁰ Diese Regelung gilt für die hier betrachteten Neuanlagen ab dem Jahr 2017, vgl. EU (2009). Es wurde angenommen, dass die THG-Emissionen des fossilen Vergleichssystems gleich bleiben.

Bild 5 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2020) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6 sowie EU-Anforderungen nach EU(2009); Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau

Die zu erwartende Situation im Jahr 2030 zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 5 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2030) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen

Angaben in kg/GJ _{end}	CO ₂ -Äq.	CO ₂
Rapsöl oLUC	28,5	14,0
Rapsöl iLUC Acker	115,9	101,3
Rapsöl dLUC Gras	51,5	36,9
Rapsöl iLUC Gras	138,9	124,3
Sojaöl oLUC	12,9	11,6
Sojaöl iLUC Acker	109,9	108,6
Sojaöl dLUC Gras	38,4	37,1
Sojaöl dLUC Savanne	153,4	152,1
Sojaöl iLUC Gras	135,4	134,1
Palmöl oLUC	37,8	19,8
Palmöl dLUC Acker	-11,3	-29,2
Palmöl dLUC Gras	1,3	-16,6
Palmöl dLUC trop.Wald	160,4	142,4
Palmöl iLUC Acker	36,7	18,8
Palmöl iLUC Gras	49,3	31,4

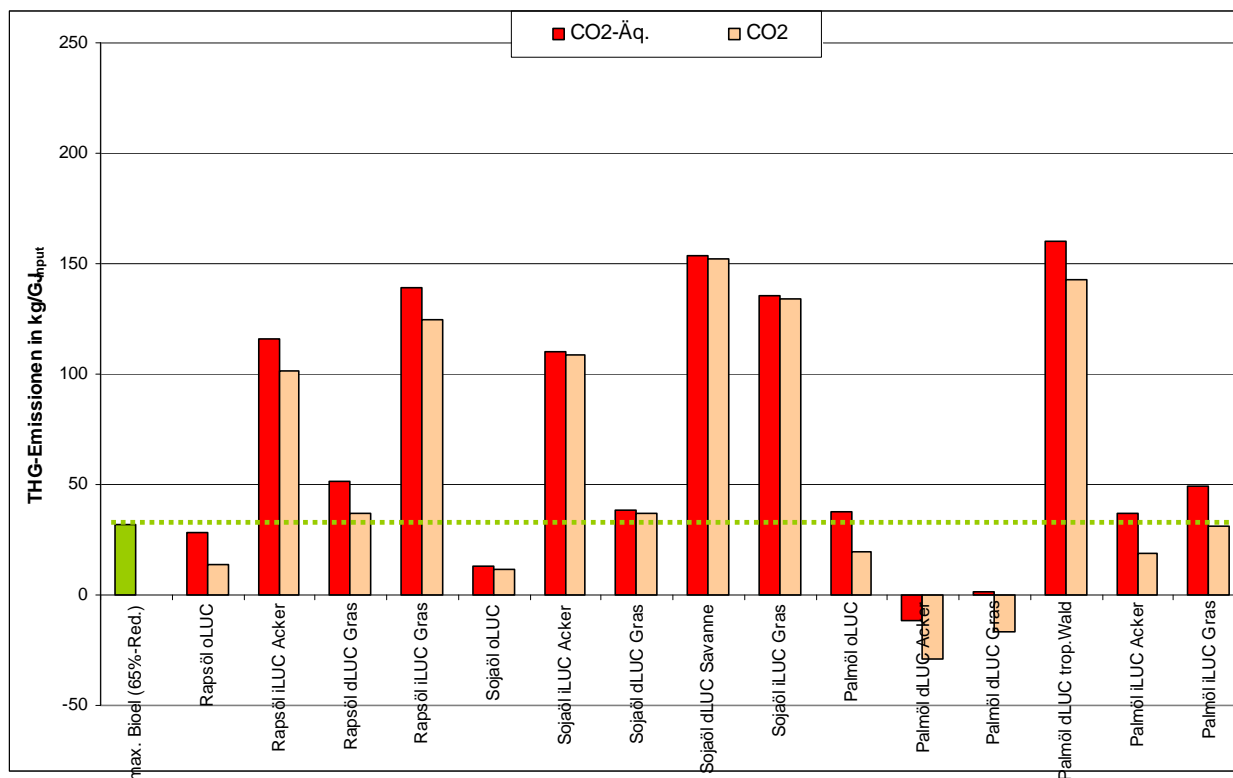
Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau

Gegenüber den Ergebnissen des Basisjahrs 2005 (vgl. Tabelle 2) können die THG-Emissionen durch die höheren Erträge des Anbaus insgesamt deutlich gesenkt werden, jedoch sind die Reduktionen vor allem bei Einbeziehung von LUC-Effekten vergleichsweise gering.

Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse im Überblick, wobei hier wie für das Jahr 2020 die EU-Mindestanforderung an die THG-Reduktion durch flüssige Bioenergieträger mit 65% angesetzt wurde²¹.

²¹ Diese Regelung gilt für die hier betrachteten Neuanlagen ab dem Jahr 2017, vgl. EU (2009). Es wurde nach 2020 nicht mit einem Anstieg dieser Reduktionsquote gerechnet und die THG-Emissionen des fossilen Vergleichssystems gleich angenommen.

Bild 6 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2030) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6 sowie EU-Anforderungen nach EU(2009); Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau

Gegenüber dem Basisjahr 2005 (vgl. Bild 3) ist die Reduktion des Emissionsniveaus deutlich sichtbar, vor allem bei Palmöl. Die in der EU-Richtlinie geforderte Mindest-THG-Reduktion wird jedoch bei Einbeziehung von LUC-Effekten nur von Palmöl knapp erreicht, wenn der Anbau nicht auf ehemaligen Tropenwaldflächen erfolgt.

Würde mit dem maximalen iLUC factor gerechnet (vgl. Abschnitt 3.5), so würde auch Palmöl nicht die erforderliche THG-Reduktion erreichen.

3.5 Variation der THG-Emissionen aus indirekten LUC

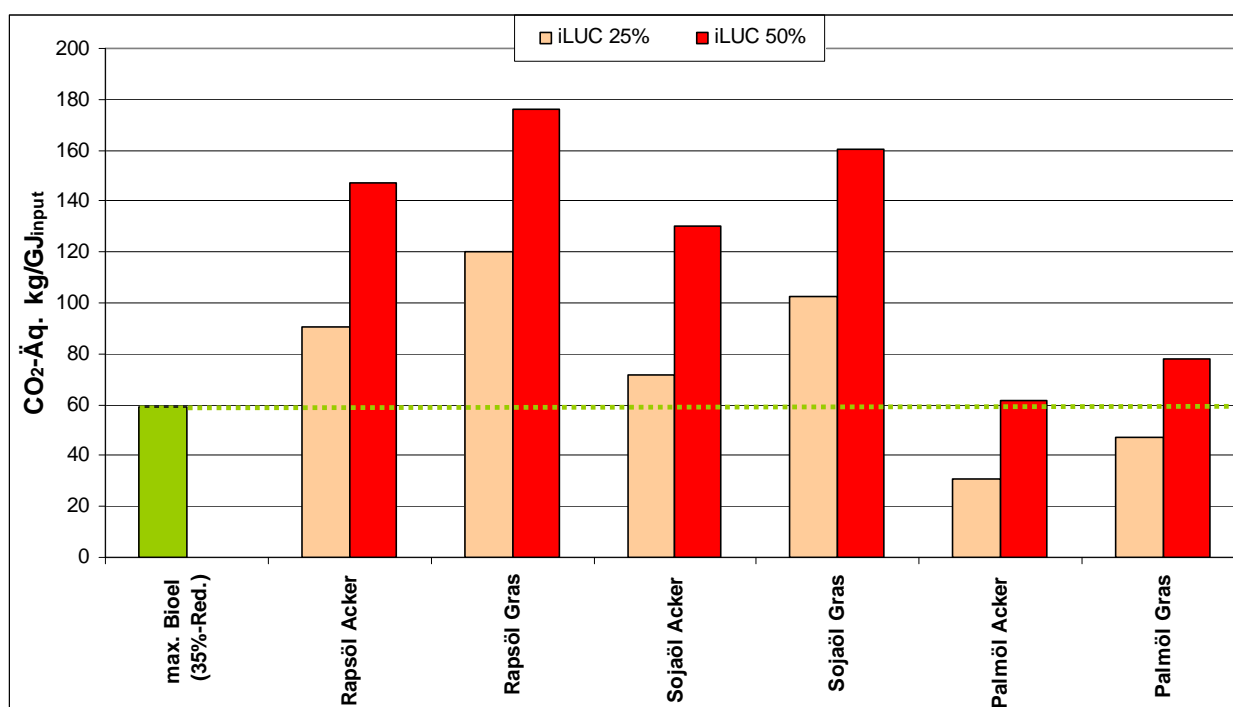
Die Berechnung der THG-Emissionen aus indirekten LUC erfolgte in den vorstehenden Abschnitten stets unter Verwendung des „mittleren“ iLUC factor (vgl. Anhang). Im Folgenden werden die Effekte gezeigt, die die Verwendung des „minimalen“ iLUC factor auf die THG-Bilanz hat und dies denen des „mittleren“ gegenübergestellt²².

Tabelle 6 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) bei Variation des iLUC factor für THG-Emissionen aus indirekten LUC

Anbausystem und Vornutzung	Lebensweg inkl. dLUC und iLUC, in kg CO ₂ -Äq/GJ _{end}	
	iLUC 25% (minimal)	iLUC 50% (mittel)
Rapsöl Acker	90,7	146,9
Rapsöl Gras	120,2	176,4
Sojaöl Acker	71,9	130,1
Sojaöl Gras	102,5	160,6
Palmöl Acker	30,9	61,7
Palmöl Gras	47,1	77,8

Quelle: GEMIS 4.6; energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten

Bild 7 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) bei Variation des iLUC factor für THG-Emissionen aus indirekten LUC



Quelle: GEMIS 4.6; energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten

²² Auf die Verwendung des „maximalen“ iLUC factor (siehe Anhang) wurde hier verzichtet, da dann keiner der biogenen Flüssigenergieträger die in der EU-Richtlinie geforderte Mindest-THG-Reduktion von 35% erreicht.

Die Verwendung des minimalen iLUC factor anstelle des mittleren bewirkt zwar eine signifikante Reduktion der THG-Emissionen, dies führt jedoch nicht zu einer Änderung der Aussagen im Hinblick auf die nach der EU-Richtlinie geforderte Mindest-THG-Reduktionsquote, wie Bild 7 zeigt.

Die Mindest-Reduktion nach der EU-Richtlinie wird bei Verwendung des minimalen iLUC factor nun auch von Palmöl erreicht, das von Plantagen auf ehemaligen Ackerflächen stammt, während dieses Palmöl beim mittleren iLUC factor knapp darüber liegt.

Für alle anderen Bioenergiesysteme ändert die Variation des iLUC factor nichts in der Bedeutung der jeweiligen THG-Emission, auch wenn das Gesamtniveau deutlich geringer liegt.

3.6 Unsicherheitsanalyse für THG aus Düngung

Eine wichtige Quelle der Datenunsicherheit in den THG-Bilanzen biogener Energieträger sind die düngerbedingten N₂O-Emissionen, für die seit einiger Zeit deutlich höhere N-zu-N₂O-Konversionsraten als in den IPCC-default-Daten diskutiert werden (vgl. Crutzen et al. 2008).

Wird die **obere** Bandbreite der aus dieser Diskussion abgeleiteten düngerbedingten N₂O-Emissionen betrachtet, kann die THG-Bilanz von Raps- und Palmöl die der konventionellen Treibstoffe **auch ohne** Einbeziehung von Landnutzungsänderungen übersteigen (vgl. ÖKO 2009a).

Um diesen Effekt für die hier gewählten Bioenergieträger darzustellen, wurde eine entsprechende Sensitivitätsanalyse für die N₂O-Konversionsrate in die THG-Bilanzierung – hier ohne LUC-Effekte – einbezogen.

Gegenüber dem Referenzfalls, bei dem die Konversionsrate auf Basis der IPCC-default-Daten (vgl. IPCC 2007) angesetzt wurde, unterstellt der „hiN2O“ genannte Sensitivitätsfall eine Konversionsrate von 5% des Stickstoffs aus der Düngung zu N₂O.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 7 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen bei Variation der N-Konversionsrate (ohne THG aus LUC)

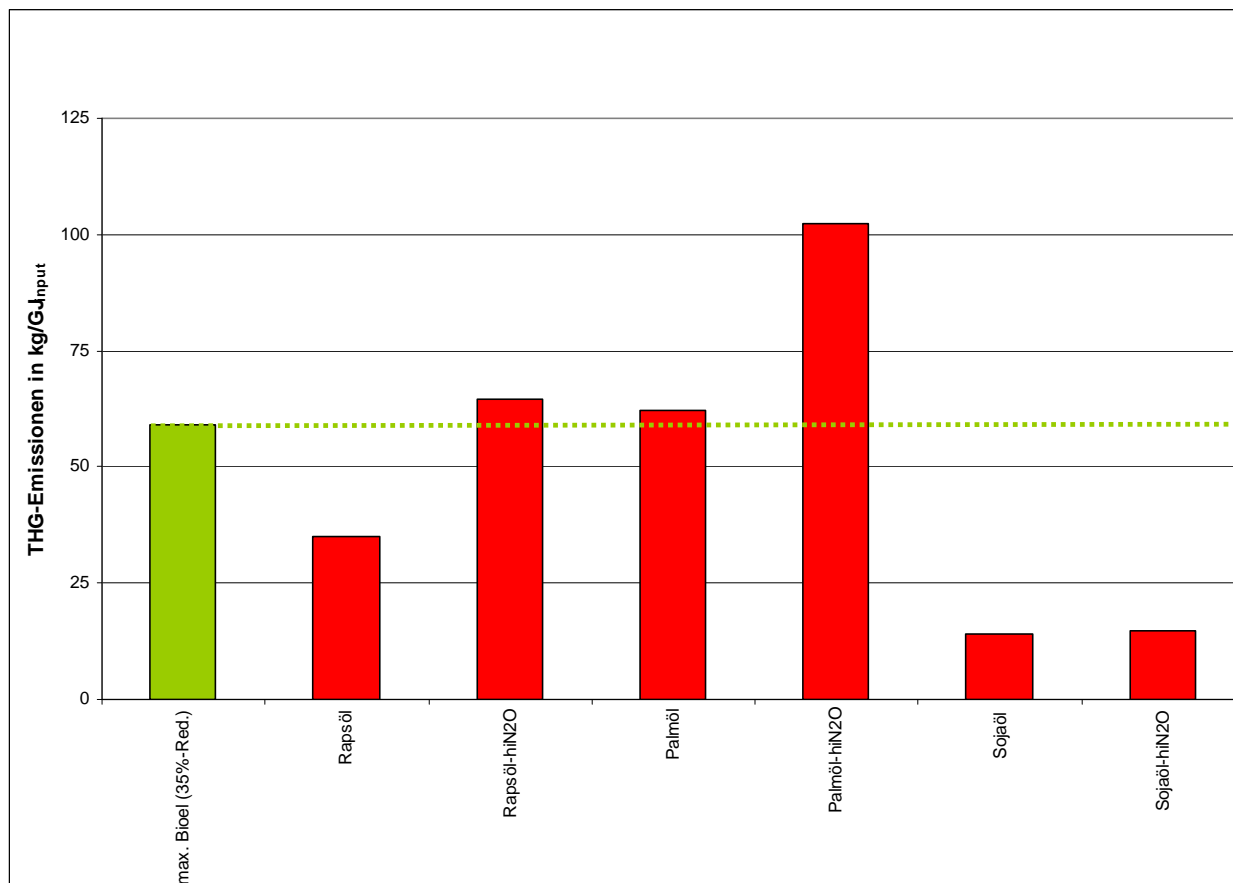
Lebenswegbezogene THG-Emissionen in kg/GJ _{end}	CO ₂ -Äq.	CO ₂
Rapsöl	34,7	16,4
Rapsöl-hiN2O	64,3	16,4
Palmöl	62,3	27,0
Palmöl-hiN2O	102,2	27,0
Sojaöl	13,8	12,2
Sojaöl-hiN2O	14,6	12,2

Quelle: Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Angaben **ohne** THG aus LUC; hiN2O= obere Grenze der N-N₂O-Konversionsrate von 5%

Deutlich sichtbar ist, dass diese Variation vor allem Raps- und Palmöl betrifft, während Sojaöl aufgrund der „internen“ N-Fixierung durch Leguminosen im Rahmen des Sojaanbaus kaum betroffen ist.

Die folgende Abbildung zeigt die Effekte nochmals im Überblick.

Bild 8 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger (Jahr 2005) im Vergleich zu den EU-Mindestanforderungen bei Variation der N-N₂O-Konversionsrate (ohne THG aus LUC)



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6 sowie EU-Anforderungen nach EU(2009); Angaben **ohne** THG aus LUC; hiN₂O= obere Grenze der N-N₂O-Konversionsrate von 5%

Auch ohne Einbeziehung von THG-Emissionen aus LUC würde die hohe Konversionsrate von N zu N₂O bei Raps- und Palmöl bereits zur Nichterreichung der THG-Mindestreduktionsforderung der EU-Richtlinie führen.

Wird die längerfristig ansteigende Mindest-Reduktionsquote der EU noch mit einbezogen (vgl. Abschnitt 3.4), so gilt dies umso mehr:

Schon bei N-zu-N₂O-Konversionsraten von 3% würde dann Palmöl und bei 4% auch Rapsöl nicht mehr die künftig erforderliche 65%-Reduktion erreichen, selbst wenn keine LUC-Effekte berücksichtigt würden.

Dementsprechend ist der Forschungsbedarf zu dieser Frage sehr groß und ergebnisrelevant (vgl. Abschnitt 6.1.3).

4 Treibhausgasemissionen von fossilem Diesel und Schweröl

Zum Vergleich der THG-Emissionen der biogenen Energieträger wurde auf Grundlage vorliegender Erkenntnisse analysiert, welche lebenswegbezogenen THG-Emissionen für die fossilen Energieträger Diesel und Schweröl anzusetzen sind, da diese potentiell durch die betrachteten Bioenergieträger sowohl im stationären Bereich wie auch ggf. in der Schifffahrt substituiert werden können.

Ergänzend wurde auch die Bereitstellung von Diesel und Schweröl aus kanadischen **Ölsänden** angenommen, da diese Quelle eine künftig mögliche Grenz-Ressource darstellt und daher in der längerfristigen globalen Entwicklung der Ölbereitstellung berücksichtigt werden sollte. Wie zuvor wurde dabei die GEMIS-Datenbasis genutzt.

Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden THG-Bilanzen für die fossilen Vorketten, d.h. **ohne** die eigentliche Nutzung der Energieträger.

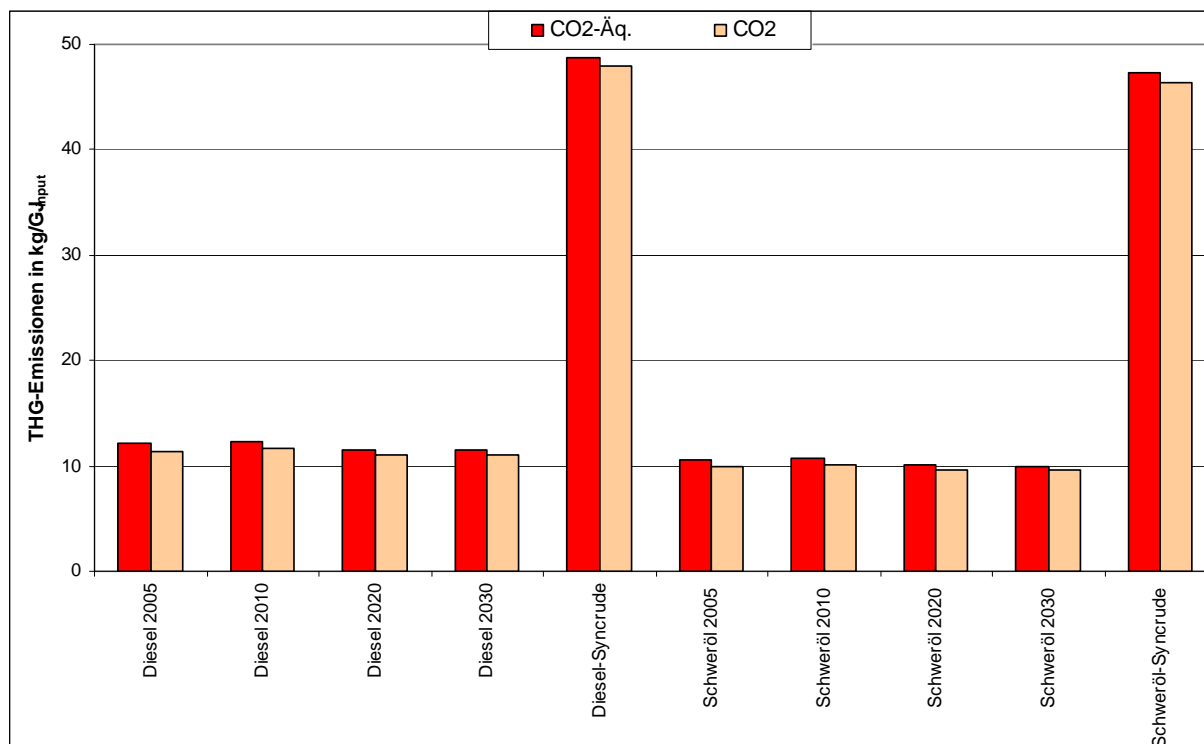
Tabelle 8 THG-Bilanzen der Vorketten von fossilem Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030

Angaben in kg/GJ _{end}	CO ₂ -Äq.	CO ₂
Diesel 2005	12,1	11,4
Diesel 2010	12,3	11,7
Diesel 2020	11,5	11,0
Diesel 2030	11,5	11,1
Diesel-Syncrude	48,8	47,9
Schweröl 2005	10,5	9,9
Schweröl 2010	10,7	10,2
Schweröl 2020	10,0	9,6
Schweröl 2030	10,0	9,5
Schweröl-Syncrude	47,3	46,4

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Bilanzgrenze nur für die Bereitstellung der Energieträger (ohne Nutzung); Syncrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Diese Daten zeigt die nachfolgende Grafik nochmals im Überblick.

Bild 9 THG-Bilanzen der Vorketten von fossilem Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Bilanzgrenze nur für die Bereitstellung der Energieträger (ohne Nutzung); Syncrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Die THG-Bilanzen der Bereitstellung von fossilem Diesel und Schweröl aus „konventionellem“ Rohöl unterscheiden sich kaum - es gibt fast keinen Unterschied zu CO₂ und CO₂-Äquivalenten und auch kaum eine zeitliche Dynamik²³.

Die künftige Nutzung von **Ölsänden** wird dagegen die Vorkettenemissionen für Diesel und Schweröl **deutlich ansteigen** lassen – ihr Emissionsniveau entspricht etwa dem **Vierfachen** der Werte für konventionelles Öl.

Diese Unterschiede sind bei der Bilanzierung der möglichen Einsparung von THG durch biogene Energieträger zu berücksichtigen (vgl. nächsten Abschnitt).

²³ Dies ist hauptsächlich ein Effekt der Kompensation gegenläufiger Effekte: Einerseits verschieben sich die Import-Mixe für Rohöl hin zu emissionsintensiveren Quellen (offshore, sekundäre und tertiäre Förderung), andererseits werden die spezifischen THG-Emissionen der Ölbereitung durch bessere Erfassung von Begleitgas, höheren Fackelanteilen und besserer Effizienz bei der Verarbeitung sowie geringeren Emissionen der Hilfsprozesse (insb. Stromerzeugung) gesenkt. Die Raffinerien können ihre spezifischen Emissionen trotz steigendem Verarbeitungsaufwand durch höhere Anteile von Kraft-Wärme-Kopplung und Nutzung CO₂-armer Brennstoffe ebenfalls tendenziell stabilisieren.

Für den THG-Emissionsvergleich mit biogenen Energieträgern muss weiterhin beachtet werden, dass die biogenen Systeme CO₂-neutral **in der Nutzung** sind.

Als Bilanzgrenze für den THG-Vergleich sind daher nicht allein die Vorketten relevant, sondern auch die jeweilige Nutzung der Energieträger.

Daher wurde ebenfalls die THG-Bilanz für die fossilen Energieträger unter Einbeziehung ihrer Nutzung in stationären Anlagen (große Dieselmotoren) berechnet, wobei hier zur Vereinfachung die Ergebnisse **endenergiebezogenen** dargestellt sind, d.h. die fossilen Energieträger werden als vollständig verbrannt angenommen²⁴.

Tabelle 9 THG-Gesamtbilanzen für fossilen Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030

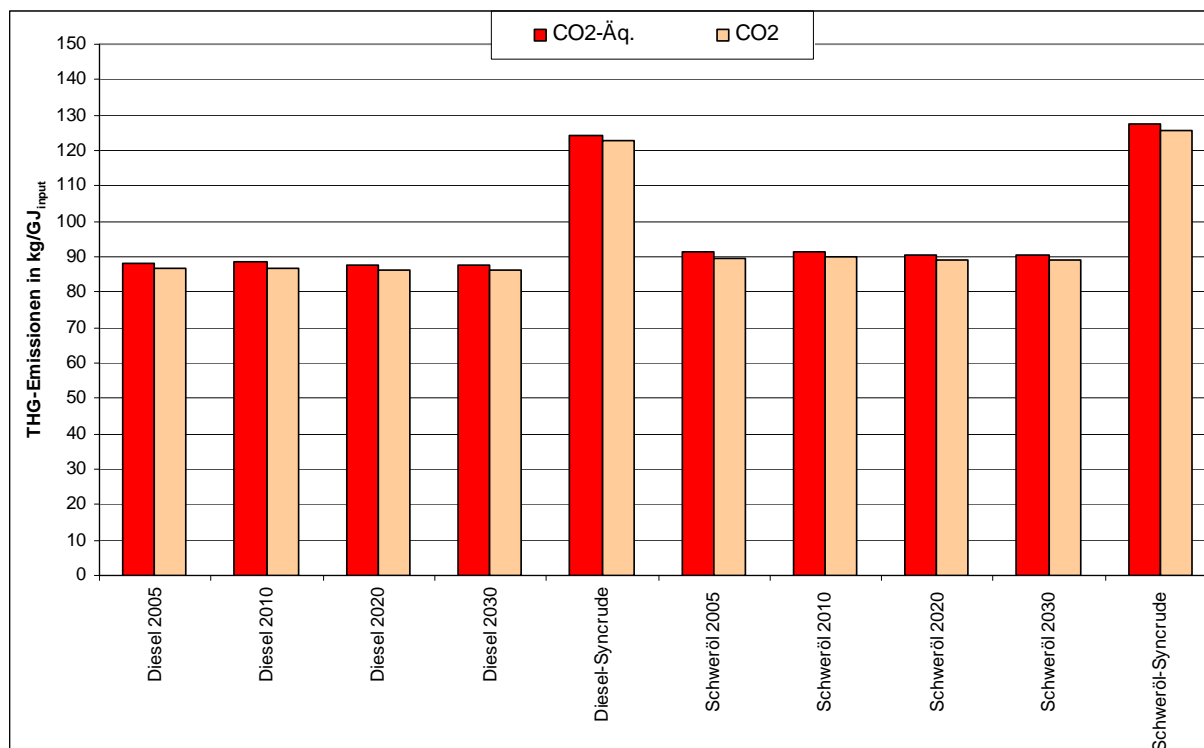
Angaben in kg/GJ _{end}	CO ₂ -Äq.	CO ₂
Diesel 2005	88,2	86,5
Diesel 2010	88,4	86,8
Diesel 2020	87,7	86,2
Diesel 2030	87,6	86,2
Diesel-Syncrude	124,4	122,6
Schweröl 2005	91,2	89,5
Schweröl 2010	91,4	89,8
Schweröl 2020	90,7	89,2
Schweröl 2030	90,6	89,2
Schweröl-Syncrude	127,4	125,6

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Bilanzgrenze umfasst die Nutzung der Energieträger; Syncrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Diese Ergebnisse zeigt die nachfolgende Grafik nochmals im Überblick.

²⁴ Diese Bilanzgrenze ist somit **unabhängig vom Nutzungsgrad** der jeweiligen Anlage. Alle Emissionen (auch die aus den Vorketten) sind auf den Energieträgereinsatz (d.h. Endenergie) bezogen.

Bild 10 THG-Gesamtbilanzen für fossilen Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030

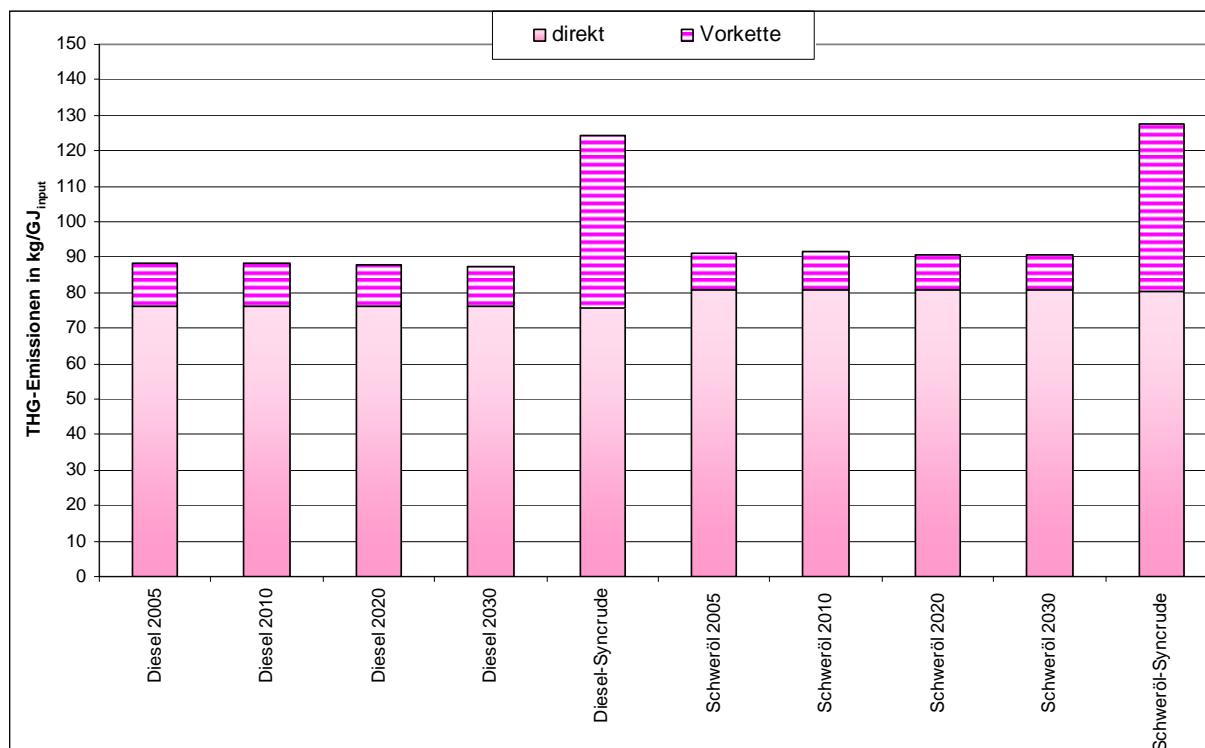


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Bilanzgrenze umfasst die Nutzung der Energieträger; Syncrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Wie schon bei den Vorketten zeigen auch die THG-Bilanzen von fossilem Diesel und Schweröl unter Einbezug ihrer Nutzung kaum Unterschiede, während die potentiell künftige Nutzung von Ölsänden dagegen auch die Gesamtemissionen von Diesel und Schweröl deutlich ansteigen ließe – aufgrund der ähnlich hohen direkten Emissionen liegt der Anstieg aber nur bei ca. 35%.

Die nachfolgende Grafik visualisiert nochmals die Gesamtemissionen der fossilen Energieträger nach direkten THG-Emissionen und denen aus der Brennstoffbereitstellung (Vorketten).

Bild 11 Direkte THG-Emissionen und Emissionen aus den Vorketten für fossilen Diesel und Schweröl in den Jahren 2005-2030



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Bilanzgrenze umfasst die Nutzung der Energieträger; Syncrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

5 Mögliches Einsparpotential durch biogene Energieträger

Aus den Ergebnissen der bisherigen THG-Bilanzierungen wurde das Vermeidungs- bzw. Reduktionspotential für THG durch flüssige Bioenergieträger ermittelt für den Fall, dass sie anstelle von fossilem Diesel bzw. Schweröl in stationären Dieselmotoren bzw. Schiffen eingesetzt werden.

5.1 THG-Bilanzen der Substitution fossiler durch biogene Energieträger im Jahr 2005

Die folgende Tabelle zeigt die Resultate dieser Substitution für das Basisjahr 2005, wobei hier die Fälle „THG-Emissionseinsparung“ durch hellgrüne Hinterlegung und die Fälle „THG-Emissionserhöhung“ durch rötliche Hinterlegung gekennzeichnet sind.

Tabelle 10 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger (2005)

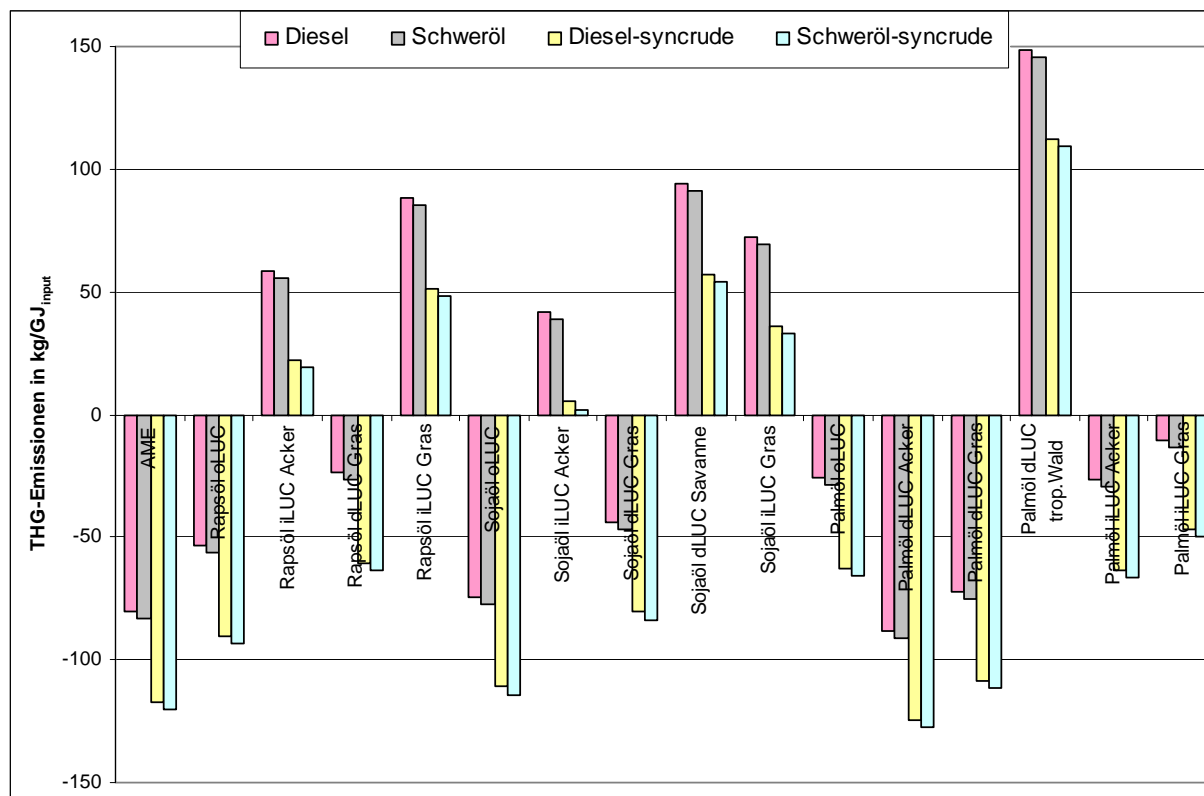
Angaben in kg CO ₂ -äq/GJ _{end}	Diesel	Schweröl	Diesel-synchrude	Schweröl-synchrude
AME	-80,5	-83,5	-117,2	-120,2
Rapsöl oLUC	-53,4	-56,3	-90,1	-93,1
Rapsöl iLUC Acker	58,7	55,7	22,0	19,0
Rapsöl dLUC Gras	-23,9	-26,9	-60,6	-63,6
Rapsöl iLUC Gras	88,2	85,2	51,4	48,5
Sojaöl oLUC	-74,4	-77,4	-111,1	-114,1
Sojaöl iLUC Acker	41,8	38,9	5,1	2,1
Sojaöl dLUC Gras	-43,8	-46,8	-80,6	-83,5
Sojaöl dLUC Savanne	94,0	91,0	57,2	54,3
Sojaöl iLUC Gras	72,4	69,4	35,7	32,7
Palmöl oLUC	-25,9	-28,9	-62,6	-65,6
Palmöl dLUC Acker	-88,1	-91,1	-124,8	-127,8
Palmöl dLUC Gras	-71,9	-74,9	-108,6	-111,6
Palmöl dLUC trop.Wald	148,8	145,8	112,1	109,1
Palmöl iLUC Acker	-26,6	-29,5	-63,3	-66,3
Palmöl iLUC Gras	-10,4	-13,4	-47,1	-50,1

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau; Synchrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Deutlich sichtbar ist, dass selbst bei der Substitution von fossilen Energieträgern aus Ölsänden (synchrude) **keine** Emissionsminderung für die meisten Bioenergieträger eintritt, wenn die indirekten THG-Effekte einbezogen sind (iLUC-Fälle).

Eine Ausnahme hiervon bildet nur Palmöl, das auch bei Berücksichtigung von iLUC-Emissionen noch Einsparungen erzielen kann. Dagegen würde Palmöl, das aus Anbau auf ehemaligen tropischen Regenwaldflächen stammt, zu den höchsten Mehrmissionen führen. Diese Ergebnisse zeigt die folgende Grafik im Überblick.

Bild 12 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger (2005)



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop. Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau; Synchrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Die EU-Richtlinie verlangt die Einbeziehung von THG-Emissionen aus **direkten** LUC, so dass Soja- und Palmöl, die von ehemaligen Feuchtsavannen- bzw. tropischen Regenwaldflächen stammen, künftig ausgeschlossen werden können.

Dagegen legt die EU-Richtlinie noch keine Werte für die THG-Emissionen aus iLUC fest, so dass diese Fälle von Relevanz sind. Wie Bild 12 zeigt, ist die Mehrzahl der Fälle, in denen die Substitution fossiler durch flüssige Bioenergieträger **keine** Emissionsminderung erzielt, durch THG-Emissionen **aus iLUC** bedingt.

Raps- und Sojaöl erzielen bei Berücksichtigung des iLUC factor keine Reduktion der THG-Emissionen gegenüber den fossilen Energieträgern, selbst wenn diese aus emissionsintensiven Ölsänden hergestellt wurden.

Der Ersatz fossiler Energieträger durch Palmöl zeigt dagegen auch bei Einbeziehung des iLUC factor noch eine deutliche THG-Reduktion – hier muss „nur“ die Konversion von tropischen Regenwäldern bzw. von Torfmooren ausgeschlossen werden.

Die Bilanz für flüssige Bioenergieträger aus Altfetten (AME) sieht dagegen unter allen Randbedingungen günstig aus: die THG-Einsparungen sind hoch und stabil gegenüber allen Variationen.

5.2 THG-Bilanzen der Substitution fossiler durch biogene Energieträger bis 2030

Die folgende Tabelle zeigt die Resultate der Substitution fossiler durch biogene Energieträger für das Jahr 2030 – wiederum sind die Fälle „THG-Emissionseinsparung“ durch hellgrüne Hinterlegung und die Fälle „THG-Emissionserhöhung“ durch rötliche Hinterlegung gekennzeichnet.

Tabelle 11 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger bis zum Jahr 2030

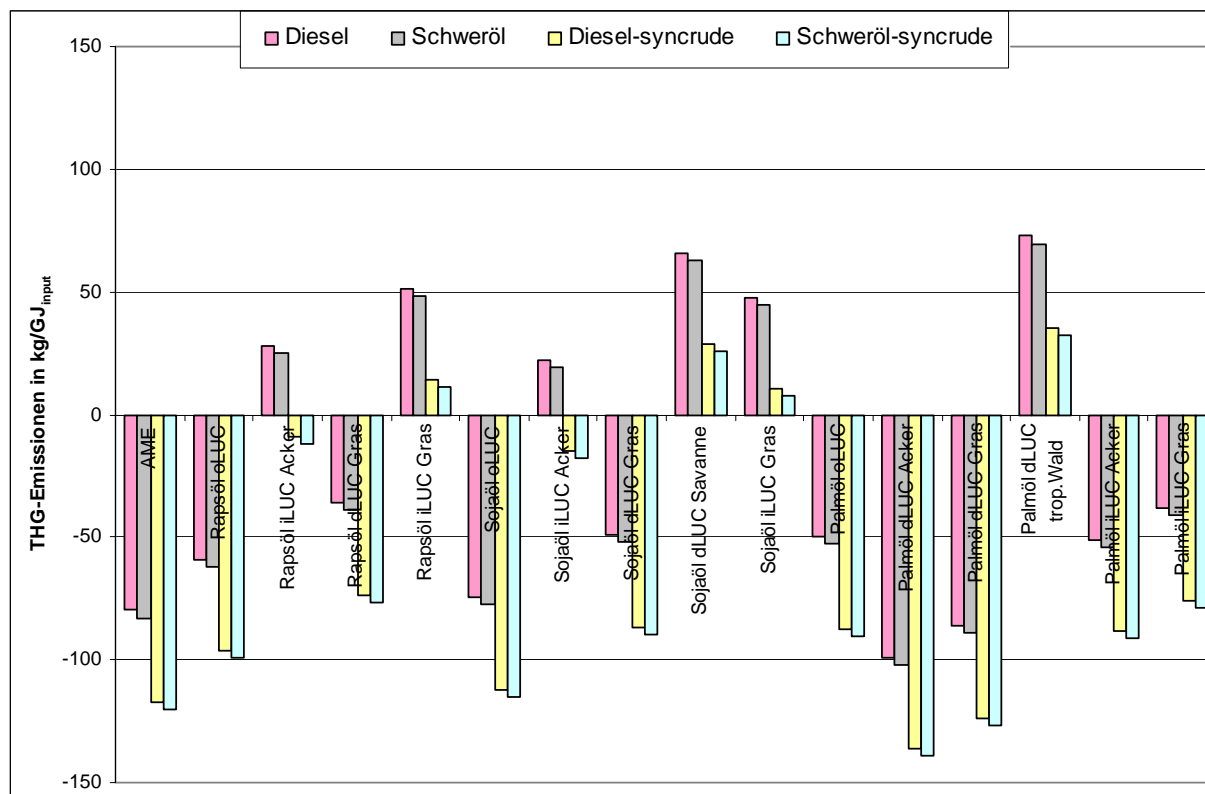
Angaben in kg CO ₂ -äq/GJ _{end}	Diesel	Schweröl	Diesel-synchrude	Schweröl-synchrude
AME	-79,8	-82,9	-117,2	-120,2
Rapsöl oLUC	-59,1	-62,1	-96,4	-99,4
Rapsöl iLUC Acker	28,3	25,3	-9,1	-12,0
Rapsöl dLUC Gras	-36,1	-39,1	-73,5	-76,4
Rapsöl iLUC Gras	51,3	48,2	13,9	11,0
Sojaöl oLUC	-74,6	-77,7	-112,0	-115,0
Sojaöl iLUC Acker	22,3	19,3	-15,0	-18,0
Sojaöl dLUC Gras	-49,1	-52,2	-86,5	-89,5
Sojaöl dLUC Savanne	65,8	62,8	28,4	25,5
Sojaöl iLUC Gras	47,8	44,8	10,5	7,5
Palmöl oLUC	-49,8	-52,9	-87,2	-90,2
Palmöl dLUC Acker	-98,9	-101,9	-136,2	-139,2
Palmöl dLUC Gras	-86,2	-89,3	-123,6	-126,6
Palmöl dLUC trop.Wald	72,8	69,7	35,4	32,4
Palmöl iLUC Acker	-50,9	-53,9	-88,2	-91,2
Palmöl iLUC Gras	-38,2	-41,3	-75,6	-78,6

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop.Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau; Synchrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Insgesamt verschiebt sich bis 2030 das Niveau der potentiellen THG-Einsparung bei der Substitution fossiler Brennstoffe durch flüssige Bioenergieträger nur leicht bei Raps- und Sojaöl, während für Palmöl spürbare Effekte zu verzeichnen sind: Die Einsparungen werden höher bzw. die Mehremissionen geringer.

Diese Ergebnisse zeigt die folgende Grafik im Überblick.

Bild 13 THG-Bilanzen ausgewählter Bioenergieträger bei Substitution fossiler Energieträger bis zum Jahr 2030



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.6; Daten für energiebezogene Allokation von Neben- und Koppelprodukten; AME= Altfett-Methylester; oLUC= ohne THG aus Landnutzungsänderungen; dLUC = inkl. THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen; iLUC= inkl. THG-Emissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen; Acker= Nutzung von Ackerland; Gras= Nutzung von Grünland; Savanne= Konversion von Feuchtsavanne für Anbau; trop. Wald= Konversion von tropischem Regenwald für Anbau; Syncrude aus kanadischem Ölsand (Stand 2005)

Das „Muster“ der Ergebnisse bleibt im Vergleich zum Basisjahr (siehe Bild 12) in etwa gleich, jedoch ist das Niveau um ca. 50 kg/GJ_{end} nach unten verschoben, d.h. zu Gunsten der THG-Einsparung.

6 Belastbarkeit der Ergebnisse und Forschungsbedarf

Die Belastbarkeit der hier abgeleiteten Ergebnisse hängt von der Güte der Daten ab, die für die Bilanzierung der biogenen und fossilen Energieträger verwendet wurden.

Die Datengüte für diese beiden Gruppen unterscheidet sich wesentlich, sowohl in der Größenordnung der Unsicherheiten wie auch in den Gründen hierfür.

Unstrittig sind nennenswerte THG-Reduktionen gegenüber fossilen Energieträgern aktuell nur für biogene Öle aus Abfallstoffen (z.B. Altfett) sowie für Öle, die aus dem Anbau **mehrfähriger** Kulturen auf vorher **nicht** oder nicht mehr genutzten (degradierten) Flächen stammen.

6.1 Datenunsicherheiten in den biogenen THG-Bilanzen

Bei den THG-Bilanzen der biogenen Energieträger bestehen die größten Unsicherheiten in der Datenlage zum Anbau der Biomasse - sowohl bei den

- THG-Emissionen durch Landbearbeitung (insb. Systeme mit reduziertem Pflügen durch Direktsaat) und
- den CO₂-Emissionen aus Landnutzungsänderungen wie auch
- den düngerbedingten N₂O-Emissionen

ist noch ein **erheblicher** Forschungsbedarf zu konstatieren.

6.1.1 THG aus Landbearbeitung

Bei den THG-Emissionen der Anbausysteme gibt es bislang nur wenige Informationen über die Effekte bodennutzungsoptimierter Varianten („no-tillage“), wie sie z.B. in Lateinamerika stark verbreitet sind. Hier sind systematische Felddaten für verschiedene Teilräume und klimatische Bedingungen wichtig, um zu aussagefähigeren Werten für THG-Emissionen aus **importierten** Bioenergieträgern zu gelangen.

Die bisher verwendeten Daten sind konservativ gewählt, so dass von künftigen Erkenntnissen eine Senkung der dahingehenden THG-Emissionen zu erwarten ist.

6.1.2 THG aus Landnutzungsänderungen

Bei den LUC-bedingten Emissionen besteht die größte Unsicherheit in der Anrechnung potentieller THG-Emissionen aus indirekten LUC-Effekten, über deren Größenordnung zwar **generell Einigkeit** herrscht, jedoch die Umrechnung auf spezifische Bioenergieträger umstritten ist. Dem entsprechenden Forschungsbedarf wird aktuell in verschiedenen Studien der EU, britischen und US-amerikanischen Arbeiten sowie im Rahmen der GBEP nachgegangen.

Die bisher verwendeten Daten sind konservativ gewählt (vgl. auch Abschnitt 3.5), so dass künftige Erkenntnisse eher eine Senkung der indirekten THG-Emissionen erwarten lassen. Die aktuell noch laufenden Arbeiten zur Aktualisierung und Differenzierung des iLUC factor (vgl. ÖKO/IFEU 2009) werden bis Ende 2009 weitere Erkenntnisse dazu bringen.

6.1.3 THG aus Stickstoffdüngung

Schlussendlich sind die N₂O-Emissionen aus der Stickstoffdüngung eine erhebliche Unsicherheitsquelle, da hier die anzusetzende Konversionsrate von Stickstoff (N) zu Lachgas (N₂O) um bis zu einem Faktor 5 unterschiedlich gewertet wird mit entsprechenden Konsequenzen für die THG-Bilanzen von Anbau-Biomasse (vgl. Abschnitt 3.6).

Auch hier sind **systematische Datenerhebungen im Feld** nötig, insbesondere für den Anbau von Rohstoffen importierter Bioenergieträger, um diese große und ergebniswirksame Datenunsicherheit zu reduzieren.

Die bisher verwendeten Daten zur Bilanzierung aus IPCC (2007) sind nicht konservativ, stellen aber den internationalen Stand dar.

6.2 Datenunsicherheiten in den fossilen THG-Bilanzen

Bei den betrachteten fossilen Energieträgern bestehen vergleichsweise geringe Unsicherheiten, die vorwiegend in den Daten zu THG-Emissionen bei der Ölgewinnung (Begleitgasfassung und -nutzung, Anteile primäre/sekundäre Förderung und on/offshore) und den anzunehmenden Importmischen (OPEC, RU) liegen.

Die hieraus resultierenden Bandbreiten der künftigen THG-Emissionen sind durch gegenläufige Effekte insgesamt jedoch gering.

Es besteht jedoch eine durchaus ergebniswirksame Unsicherheit in der Einbeziehung von „unkonventionellem“ Rohöl in die künftige Versorgungsstruktur in Deutschland.

Das hierzu aufgenommene Beispiel von Diesel und Schweröl aus kanadischen Ölsänden (vgl. Abschnitt 4) belegt, dass die THG-Emissionen dieser Energieträger würden beiden Vorketten etwa vierfach höhere und bei der Nutzung um ca. 35% höhere Emissionen als bei konventionellem Rohöl bedeuten.

Bislang wird dieses unkonventionelle Rohöl **nicht** auf dem Weltmarkt gehandelt, sondern nur landesintern verwendet. Bei künftig steigendem Angebot von unkonventionellem Öl aus Kanada und ggf. Australien sowie parallel sinkender Förderleistung für konventionelles Rohöl (Stichwort „peak oil“) würde sich dies allerdings ändern, so dass mit Blick auf das Jahr 2030 durchaus einige Prozentpunkte an unkonventionellem Rohöl im deutschen Importmix auftreten könnten.

Die entsprechenden Effekte auf die THG-Bilanz des deutschen Ölmixes bzw. der daraus hergestellten Derivate Diesel und Schweröl würden sich zu diesem Zeithorizont im Bereich der allgemeinen Datenunsicherheit bewegen.

Wird jedoch eine Grenzbetrachtung durchgeführt, bei der die „nächste“ Tonne Rohöl im Fokus der Analyse steht, so wären die THG-Emissionen der fossilen Energieträger entsprechend deutlich höher.

Hier besteht somit noch ein gewisser Forschungsbedarf, der die Frage der künftigen Rolle von unkonventionellem Rohöl im deutschen Angebotsmix näher untersucht und die Effekte auf die THG-Bilanz bestimmt.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die THG-Bilanzen von flüssigen Bioenergieträgern unterscheiden sich deutlich je nachdem, ob Abfall- bzw. Reststoffe oder Anbau-Biomasse betrachtet werden:

- Bei ersteren ist die Bilanz **stets günstig**, jedoch ist deren Potential begrenzt – Biodiesel aus z.B. Altfetten oder Abfällen aus der Tierkörperbeseitigung kann gegenüber fossilen Flüssigenergieträgern gut 90% THG-Reduktion erzielen, die in Deutschland verfügbare Menge ist aber mit wenigen PJ gering. Erst die Erzeugung von Biodiesel aus Stroh sowie Waldrest- und Schwachholz mit Verfahren der sog. 2. Generation (Synthesegaserzeugung + Fischer-Tropsch-Synthese = BtL) würde bis zu 500 PJ verfügbar machen können, jedoch zu vergleichsweise hohen Preisen und – in nennenswerten Mengen - nicht vor dem Jahr 2020.
- Bei Anbaubiomasse hängt die THG-Bilanz sehr stark von der jeweiligen Flächennutzung und dem Anbausystem ab: Wird Ackerfläche verwendet, sind die direkten THG-Effekte der Landnutzungsänderung gering bzw. beim Anbau mehrjähriger Kulturen findet eine Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden statt. Dies kann aber **überkompensiert** werden durch die mit der Verdrängung der vorherigen Ackerernutzung verbundenen **indirekten** Effekte, die zu hohen THG-Emissionen durch Landnutzungsänderungen an anderer Stelle führen können.
Bei Nutzung von Grünland zum Anbau sind die direkten THG-Emissionen zwar höher als bei Acker, aber es muss nicht notwendig zur Verdrängung der Vornutzung und damit indirekten THG-Emissionen führen.
Erfolgt dagegen der Anbau auf Flächen, die vorher kohlenstoffreiche Vegetation (Savanne, Wald) trugen, so sind die **direkten** THG-Effekte extrem hoch und es kommt zu **keiner** Einsparung gegenüber fossilen Energieträgern selbst dann, wenn unkonventionelles Öl (syncrude) substituiert würde.

Dies unterstreicht die Notwendigkeit, biogene Flüssigenergieträger im Hinblick auf ihre THG-Bilanz **differenziert** zu betrachten:

Aktuell ist die THG-Einsparung gegenüber fossilen Flüssigenergieträgern nur dann gesichert, wenn Biodiesel aus Abfall- und Reststoffen verwendet wird oder biogene Öle, die aus Anbau **ohne** Landnutzungsänderungen stammen, d.h. für Raps-, Soja- und Palmöl auf schon heute genutzten Anbauflächen.

Wird Raps- und Sojaöl auf bisherigem Grünland angebaut, für das keine Verdrängungseffekte anzusetzen sind (z.B. Brache), wird eine THG-Reduktion erreicht, die aber im Fall von Rapsöl unter der in der EU geforderten 35%-Reduktion liegt.

Palmöl erreicht **dann** erhebliche THG-Reduktionen, wenn die Umwandlung von tropischen Regenwald – oder auch Moorböden – zum Anbau vermieden wird, und dies gilt **auch** bei Einbeziehung indirekter THG-Emissionen durch verdrängte Vornutzung. Palmöl erzielt die höchste THG-Reduktion der betrachteten biogenen Öle.

Mit Blick auf die Entwicklung bis 2030 bleiben diese Verhältnisse gleich, wobei insgesamt ein leicht höheres THG-Reduktionspotential entsteht.

Die RES-Richtlinie (EU 2009) legt erstmals ein für alle EU-Staaten **verbindliches** Verfahren zur Bestimmung der THG-Emissionen fest, mit dem die o.g. Werte abgeleitet wurden²⁵. Ihr Regelungsumfang gilt auch für flüssige Bioenergieträger, die für die Stromerzeugung eingesetzt werden und ist in vollem Umfang in die deutsche Nachhaltigkeitsverordnung zum EEG übernommen (BMU 2009)²⁶.

Damit wird ab 2010 die Zertifizierung biogener Flüssigenergieträgern **gesetzlich erforderlich**, soweit sie für die Anrechnung auf das 10%-Kraftstoffziel bis 2020 eingesetzt werden oder es um die Erlangung des NaWaRo-Bonus für Strom nach dem EEG geht. Die Zertifizierung umfasst dabei auch den Nachweis, dass die THG-Reduktionsanforderungen eingehalten werden.

Es ist somit davon auszugehen, dass Soja- und vor allem Palmölmengen aus heute schon etablierten Anbauflächen (d.h. ohne LUC-Emissionen) auf dem Markt verfügbar werden und entsprechende THG-Reduktionen erlauben.

Weiterhin arbeiten Länder wie Argentinien derzeit an besseren Daten zum dortigen Anbau, womit voraussichtlich weitere THG-arme biogene Flüssigenergieträger zur Verfügung stehen.

Rapsöl aus Deutschland bzw. der EU kommt als THG-armer biogener Flüssigenergieträger dann in Frage, wenn beim Anbau keine LUC-Effekte auftreten, wozu ein Nachweis im Zertifizierungssystem erforderlich ist. Die bis im Jahr 2007 erzeugten Rapsölmengen stammen zu erheblichen Teilen aus ehemaligen Stilllegungsflächen, so dass für diese Anbaugelände die Voraussetzungen gegeben scheinen – je nachdem, für welches Marktsegment die Hersteller der biogenen Öle sich entscheiden.

²⁵ Dies gilt für die lebenswegbezogenen THG-Emissionen sowie die aus **direkten** LUC-Effekten. Für den Umgang mit möglichen THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen ist für 2010 ein Vorschlag der EU-Kommission angekündigt. In den USA wurde im Bundesstaat Kalifornien bereits eine Regelung zu iLUC eingeführt, die quantitativ in etwa den hier verwendeten Daten entspricht. Auf Bundesebene wurde von der US-EPA im Sommer 2009 ein ähnlicher Vorschlag entwickelt, der aber noch in der Diskussion geändert werden kann.

²⁶ Davon ausgenommen sind biogene Flüssigenergieträger, die zum Antrieb von Schiffen, schienengebundenen Fahrzeugen und Flugzeugen dienen.

Literatur

- ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) 2008: Elaboration d'un référentiel méthodologique pour la réalisation d'Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération en France; Rapport final; Paris
- ANL (Argonne National Laboratory) 2008: Greenhouse gas, regulated emissions, and energy use in Transportation (GREET); Wang, M. et al.; Chicago
<http://www.transportation.anl.gov/software/GREET>
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Natur und Reaktorsicherheit) 2009: Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von flüssiger Biomasse zur Stromerzeugung (Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung - BioSt-NachV); Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 46 vom 29. Juli 2009, S. 2174
http://www.bgbl.de/Xaver/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&bk=Bundesanzeiger_BGBl&start=/*%5B@attr_id=%27bgbl109s2174.pdf%27%5D
- CSI (Cheminfo Services Inc.) et al. 2008a: Sensitivity Analysis of Biodiesel LCA Models to Determine Assumptions With the Greatest Influence on Outputs; Final Report; Ontario
- Crutzen, Paul et al. 2008: N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels; in: Atmospheric Chemistry and Physics vol. 8 (2008) no. 2, p. 389–395
<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/64/23/PDF/acp-8-389-2008.pdf>
- EU 2009: Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC; Official Journal of the EU, June 5, 2009 L 140 pages 16-62 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>
- EUCAR/JRC/CONCAWE 2007: Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context - Well-to-Wheels Report Version 2c; Ispra <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>
- Fargione, J. et al. 2008: Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt; in: Science vol. 319 (5867), p. 1235 – 1238
<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1152747>
- Fehrenbach, H./Fritsche, U./Giegrich, J. 2008: Greenhouse Gas Balances for Biomass: Issues for further discussion; Issue paper for the informal workshop, January 25, 2008 in Brussels
http://www.oeko.de/service/bio/dateien/en/ghg_balance_bioenergy.pdf
- Fritsche, Uwe R. 2008: Beyond the German BSO: Scope of Further Work on Land-use Related GHG; presented at the Brussels Workshop 'Sustainability requirements for biofuels - German Perspectives', January 25, 2008
http://www.oeko.de/service/bio/dateien/en/presbeyond_bso_fritsche.pdf

- Fritsche, Uwe R./Wiegmann, Kirsten 2008: Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen; Expertise des Öko-Instituts zum WBGU-Gutachten 2008; Berlin
http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex04.pdf
- GBEP (Global Bioenergy Partnership) 2009: Summary of the GBEP Workshop on Indirect Land Use Change: Status of and Perspectives on Science-Based Policies; held on May 15, 2009 in New York
http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2009_events/Workshop_ILUC_NY_15May_2009/GBEP_iLUC_workshop_-_Summary.pdf
- IFEU (Institute for Energy and Environmental Research)/WI (Wuppertal-Institut) 2007: Rain Forest for Biodiesel? Ecological effects of using palm oil as a source of energy; on behalf of WWF Germany in cooperation with WWF Switzerland and WWF Netherlands
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use; prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds); published by Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.htm>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Vol. 4: Agriculture, Forestry, and Other Land Use; published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan on behalf of the IPCC <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007: Climate Change – The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge
- JRC (EU Joint Research Centre) 2008: Biofuels in the European Context: Facts and Uncertainties. Technical report of the EU Joint Research Centres
www.jrc.ec.europa.eu
- Kløverpris, J./Wenzel, H./Nielsen, P. 2008: Life cycle inventory modelling of land use induced by crop consumption; in: International Journal of Life Cycle Assessment 13:13-21
- Liska, Adam J./Perrin, Richard K. 2009: Indirect Land Use Emissions in the Life Cycle of Biofuels: Regulations vs. Science; Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska, Lincoln, NE 68588
- O'Hare, Michael 2008: The land-use change issue and its implications for policy: what are the remaining uncertainties?; presented at the EEA Expert meeting LCA GHG methodologies for bioenergy: Beyond biofuels; Copenhagen, 10 June 2008

- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) 2003: Energiebilanzen und Treibhausgas-Emissionen für fossile Brennstoffketten und Stromerzeugungsprozesse in Deutschland für die Jahre 2000 und 2020 - Bericht für den Rat für Nachhaltige Entwicklung; Darmstadt
www.nachhaltigkeitsrat.de/service/download/pdf/Energiebilanzen_fossil_und_Strom_08-03.pdf
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) et al. 2004: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse; in Kooperation mit FhL-UMSICHT (Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen), IE (Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig), IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg), IZES (Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Saarbrücken), TU Braunschweig (Institut für Geoökologie/Abt. Umweltsystemanalyse), TU München (Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues); Endbericht zum Verbundforschungsvorhaben, gefördert vom BMU, Darmstadt usw. www.oeko.de/service/bio
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) 2006: Stand und Entwicklung von Treibhausgasemissionen in den Vorketten für Erdöl und Erdgas“; U. Fritsche/L. Rausch/K. Schmidt; Kurzstudie im Auftrag des Instituts für wirtschaftliche Ölheizung e.V. (IWO); Darmstadt
www.oeko.de/service/gemis/files/present/2006vorketten_iwo.pdf
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) 2007: Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten; Kurzstudie im Auftrag des Bundesverbands der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. (BGW); Darmstadt
http://www.oeko.de/service/gemis/files/doku/gemis44thg_emissionen_fossil.pdf
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) 2008: Kumulierter Primärenergie-Aufwand (KEA) biogener Öle; Kurzstudie im Auftrag des IWO e.V., Darmstadt http://www.oeko.de/service/bio/dateien/kea_biogene_oele_iwo_2008.pdf
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) 2009a: Review of Bioenergy Life-Cycles: Results of Sensitivity Analysis; prepared for UNEP-DTIE; Darmstadt <http://www.unep.fr/energy/bioenergy/documents/>
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) 2009b: Life Cycle Analysis of GHG and Air Pollutant Emissions from Renewable and Conventional Electricity, Heating, and Transport Fuel Options in the EU until 2030; updated Report for the European Environment Agency (EEA); Darmstadt
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie) 2009c: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) – Version 4.6; Darmstadt/Berlin www.gemis.de
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie)/DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) 2009: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen Mobilität im Kontext der Erneuerbaren Energien bis 2030; Broschüre und Endbericht zum Verbundforschungsprojekt gefördert vom BMU; Berlin/Darmstadt
www.renewbility.de

- ÖKO (Öko-Institut)/IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung) 2009: Nachhaltige Bioenergie: Stand und Ausblick; Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse des Forschungsvorhabens "Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel"; i.A. des Umweltbundesamts; Darmstadt/Heidelberg
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3740.pdf>
- Panichelli, L./Gnansounou, E. 2008: Life Cycle Assessment of Soybean-Based Biodiesel in Argentina for Export; in: International Journal of Life Cycle Assessment; published online Dec. 16, 2008
<http://dx.doi.org/10.1065/10.1007/s11367-008-0050-8>
- RFA (Renewable Fuels Agency) 2008: The Gallagher Review of the indirect effects of biofuels production; St Leonards-on-Sea
http://www.dft.gov.uk/rfa/db/documents/Report_of_the_Gallagher_review.pdf
http://www.dft.gov.uk/rfa/db/documents/Gallagher_review_addendum.pdf
- RS (Royal Society) 2008: Sustainable Biofuels: Prospects and Challenges; The Royal Society Policy Document 01/08; London
<http://royalsociety.org/displaypagedoc.asp?id=28632>
- RSB (Roundtable on Sustainable Biofuels) 2009: <http://cgse.epfl.ch/page65660-en.html>
- Scharlemann, J.P.W./Laurance, W.F. 2008: How green are biofuels?; in: Science vol. 319, p. 43-44
- Searchinger, Timothy 2009: Evaluating Biofuels - The Consequences of Using Land to Make Fuel; Brussels Forum Paper Series of the German Marshall Fund of the United States, Washington DC
http://www.gmfus.org/template/download.cfm?document=/doc/Biofuels_final.pdf
- Searchinger, Timothy et al. 2008: Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change; in: Science vol. 319, p.1238-1240 www.sciencexpress.org;10.1126/science.1151861
- UNEP (United Nations Environment Programme)/IEA (International Energy Agency) 2008: Review of LCA Studies for GHG Emissions of Biofuels; Paris
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen) 2008: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung; Jahresgutachten 2008; Berlin
http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_vorab.pdf
- Zah, Rainer et al. 2007: Life-cycle Assessment of Energy Products: Environmental Impact Assessment of Biofuels - Executive Summary; EMPA, St. Gallen
<http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009552.pdf&name=000000280006>

Abkürzungsverzeichnis

BR	Brasilien
DE	Deutschland
DG-ENV	Directorate General for Environment (of the EU Commission)
DG-TREN	Directorate General for Transport and Energy (of the EU Commission)
dLUC	direct land use change
DOE	Department of Energy (USA)
EEA	European Environment Agency
EPA	Environmental Protection Agency (USA)
EU	Europäische Union
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FCCC	Framework Convention on Climate Change
G8	Group of Eight (Economically Leading Countries)
GBEP	Global Bioenergy Partnership
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GWP	global warming potential
ID	Indonesien
IEA	International Energy Agency
iLUC	indirect land use change
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JRC	Joint Research Center (of the EU)
LUC	land use change
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt
UK	Vereinigtes Königreich
UNEP	United Nations Environment Programme
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
WWF	World-Wide Fund for Nature

Anhang: THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen

Über die direkten THG-Emissionen auf den Lebenswegen und der Landnutzungsänderung ist die Frage der THG-Emissionen aus indirekten LUC umstritten. Generell lässt sich **nicht** ausschließen, dass Biomasseanbau eine ursächliche Verlagerung von bisherigen Nutzungen auf **andere** Flächen bedingt, bei denen ein Umbruch von Böden mit hohem Kohlenstoffvorrat erfolgen kann.

Diese **indirekten** Landnutzungsänderungen entstehen dann, wenn auf Flächen zum Biomasseanbau **vorher** eine andere Nutzung – etwa zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion – stattfand, die durch den Biomasseanbau verdrängt wird.

Da grundsätzlich davon auszugehen ist, dass weiterhin der Bedarf an den vorher produzierten Nahrungs- oder Futtermitteln besteht, so wird **deren** Produktion nun auf **andere** Flächen verlagert.

Diese Flächen können einen hohen Kohlenstoffvorrat aufweisen (z.B. Wälder, Moore), der durch die Nahrungs- oder Futtermittelproduktion reduziert wird. Das daraus resultierende Potential an CO₂-Emissionen wird indirekt durch den Biomasseanbau verursacht und ist diesem daher anzurechnen. Die Höhe der möglichen CO₂-Emissionen ist dabei je nach „verdrängter“ Landnutzung erheblich.

Würden die indirekten CO₂-Emissionen in der Bilanz vernachlässigt, käme dies einer **Benachteiligung** der Abfall- und Reststoffbiomassen und solchen von ungenutzten Flächen gleich.

Die CO₂-Bilanz der Verdrängung von Landnutzungen entspricht im Prinzip genau der zur direkten Landnutzungsänderung. Jedoch stellt sich die Frage, **welche** Flächen durch den Verdrängungseffekt betroffen sind.

Da Verdrängungseffekte über den globalen Handel (Verringerung von Exporten) auch außerhalb einer Region oder eines Landes auftreten können, ist eine Zuordnung zur Biomasseproduktion auf bestimmten Flächen nicht mit Sicherheit möglich.

Daher kann das indirekte CO₂-Emissionspotential nur durch Modellbetrachtungen ermittelt werden.

Grundsätzliche Aspekte der indirekten Landnutzungsänderungen

Bevor weiter unten auf die Möglichkeiten eingegangen wird, die THG-Emissionen aus indirekten LUC zu quantifizieren, ist auf einige grundlegende Aspekte hinzuweisen, die zur Beurteilung der indirekten LUC-Fragen wesentlich sind:

Indirekte Effekte sind das Resultat **(zu) enger Systemgrenzen**. Durch die Begrenzung der (Lebenszyklus-)Analyse auf nur **ein** Produkt der Landnutzung – Biomasse als Rohstoff für Bioenergieträger – werden andere Nutzungsformen und Produkte aus dem Betrachtungsraum ausgegrenzt.

Dies erleichtert zwar den Umgang mit den direkten Effekten des einen Produkts, alle Wechselwirkungen mit den „ausgegrenzten“ anderen Produkten sind dann aber notwendig – weil definitionsgemäß – indirekter Natur.

Würde der Betrachtungsrahmen auf alle Produkte und Formen der Landnutzung und auf alle dahingehend relevanten Flächen erweitert, gäbe es definitionsgemäß keine indirekten Effekte mehr, sondern nur noch direkte LUC.

Indirekte Effekte entstehen **auch bei Nahrungs- und Futtermitteln** und **stofflicher Biomassenutzung**. Werden partielle Analysen der THG-Wirksamkeit wachsender Produktion anderer Agrar- und Forstprodukte – also nicht Bioenergie – durchgeführt, so sind deren indirekte Effekte die „Verdrängung“ möglicher Bioenergienutzung und damit implizit THG-Emissionen aus „nicht vermiedenen“ fossilen Energieträgern.

Dies zeigt, dass die Wahl (zu) enger Systemgrenzen ein grundsätzlich fragwürdiges Vorgehen für die Untersuchung der THG-Effekte von Landnutzungsänderungen darstellt.

Durch die künftig zum Erreichen der Klimaschutzziele notwendige Einbeziehung der THG-Emissionen aus LULUC sowie der entsprechenden Senken für **alle** wesentlichen Länder und alle Sektoren wird es globale Obergrenzen für die THG-Emissionen insgesamt geben („caps“). Damit werden indirekte THG-Emissionen gegenstandslos, da LUC-Effekte nicht mehr zu zusätzlichen THG-Freisetzung führen bzw. diese durch andere Emissionsreduktionen oder weitere Senken kompensiert werden müssen.

Die o.g. Grundsatzaspekte führen aus Sicht der Verfasser dazu, dass die iLUC-Effekte **nicht überbewertet** werden dürfen, sondern als „Übergangsphänomen“ zu betrachten sind.

Solange jedoch keine globale, sektorübergreifende Analyse der Landnutzungsänderungen (bzw. entsprechende Politikentwicklung) erfolgt und solange kein globales Klimaschutzregime mit sektorübergreifenden caps in Kraft ist, werden Überlegungen zu indirekten Effekten notwendig sein. Ihre analytische Erfassung kann jedoch nicht der Notwendigkeit abhelfen, den o.g. Grundsätzen folgend die System- **und** Emissionsgrenzen global zu fassen.

Ökonometrische Ansätze mit Gleichgewichtsmodellen

Mit den Arbeiten von Searchinger et al. (2008) wurde ein ökonometrisches **Gleichgewichtsmodell** verwendet, das die Frage des indirekt „induzierten“ Flächenbedarfs durch Verdrängungseffekte des Biomasseanbaus und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen durch Simulation des Welthandels einzugrenzen versucht.

Die hierdurch ausgelöste Diskussion zielt im Wesentlichen auf Details der Modellierung sowie der zugrunde liegenden Datenbasis, stellt aber den grundsätzlichen Ansatz nicht in Frage.

Jüngste Analysen zeigen, dass auch bei einer probabilistischen Betrachtung der Datenbasis die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist, dass der Ansatz die möglichen indirekten THG-Effekte überschätzt – vielmehr zeigt die mit der Monte-Carlo-Methode ermittelte Wahrscheinlichkeitsverteilung, dass die Chance für eine Unterschätzung bei über 90% liegt (O’Hare 2008).

Somit kann der Ansatz als durchaus konservativ angesehen werden.

Dessen ungeachtet gibt es wesentliche Kritikpunkte an der Methode:

- Die Frage, zu welchen Anteilen das Weltagrarsystem bzw. die modellierte inkrementelle regionale Produktion durch **Steigerungen der Effizienz** auf zusätzliche Nachfrage reagiert, ist keineswegs klar beantwortbar. In vielen Entwicklungsländern liegen die Hektarerträge deutlich unter denen in Industrieländern, und die durch zusätzliche Nachfrage induzierten Preiseffekte könnten zu einer signifikanten Steigerung der Grenzproduktivität führen. Damit wären **zumindest Teile** der zusätzlichen Nachfrage ohne zusätzliche Landnutzung darstellbar.
- Die üblichen ökonometrischen Modelle kennen nur die Option, zusätzliche Landflächen durch Konversion natürlicher Habitats „bereitzustellen“. In vielen Regionen der Welt – vor allem in Afrika – gibt es jedoch eine (umstrittene) Menge derzeit ungenutzten, aber grundsätzlich für Nahrungs- und Futtermittelanbau nutzbarer Flächen („idle“ bzw. „abandoned“), die ggf. zur Deckung des inkrementellen Bedarfs dienen können²⁷. Im Falle Europas sind solche Flächen durch die GAP-Stilllegungspolitik (EU-25) sowie durch gesellschaftlich-ökonomische Umbrüche (Ukraine, Weißrussland) entstanden²⁸.
- Die ökonometrischen Gleichgewichtsmodelle sind grundsätzlich „blind“ für Marktverzerrungen (z.B. Zölle) und reale Transaktionskosten und bilden einen idealen, ungestörten Welthandel ab. Auch die für die Frage der Preise und Faktorkosten nutzen die Modelle umstrittene Ansätze und Schätzgrößen.

Aus diesen grundlegenden Problemen kann abgeleitet werden, dass mit diesen Modellen keine im empirischen oder legalen Sinne belastbaren Aussagen bestimmt werden können.

Deterministische Ansätze zur indirekten Landnutzung

Im Gegensatz zu den ökonometrisch arbeitenden Gleichgewichtsmodellen versuchen deterministische Ansätze, auf Basis expliziter Annahmen zur Landnutzungsänderung eine Abschätzung der jeweils möglichen indirekten Effekte zu leisten.

Der vom Öko-Institut entwickelte Ansatz eines „iLUC factors“ zur Abbildung des theoretischen Risikos von indirekten THG-Emissionen ist mittlerweile in der Literatur dargestellt, worauf hier verwiesen wird (Fehrenbach/Fritsche/Giegrich 2008; Fritsche 2007; ÖKO/IFEU 2009).

Da Verdrängungseffekte über den globalen Handel (Verringerung von Exporten bzw. Notwendigkeit von Importen) **auch außerhalb** einer Region oder eines Landes auftreten können, ist eine Zuordnung zur Biomasseproduktion auf bestimmten Flächen nicht

²⁷ Zur Definition der Begriffe vgl. Wiegmann/Hennenberg/Fritsche 2008.

²⁸ In der EU-25 wurde die Nutzung von Stilllegungsflächen für den Energiepflanzenanbau sogar gezielt durch eine flächenbezogene Prämie gefördert. Durch die aktuelle Entwicklung der Nahrungs- und Futtermittelpreise wurde jedoch sowohl die Stilllegungsflächenpolitik wie auch die Subvention für Energiepflanzenanbau ausgesetzt. Dennoch gilt für die überwiegende Menge der **bisher** in der EU-25 bereitgestellten Energiepflanzen, dass ihre Produktion **ohne** Verdrängungseffekte erfolgte.

mit Sicherheit möglich. Daher kann das indirekte CO₂-Emissionspotential nur durch eine Modellbetrachtung ermittelt werden. Hierzu wird folgendes angenommen:

Das **theoretische** THG-Emissionspotential durch indirekte Landnutzungsänderung wird durch die C-Menge charakterisiert, die je Fläche sowohl im Boden wie auch in der oberirdischen Vegetation gespeichert ist.

Da je nach Klimazone und Boden diese Menge variiert (vgl. folgende Tabelle), sind die Anteile der entsprechenden Flächen relevant.

Die CO₂-Bilanz der Verdrängung von Landnutzungen entspricht im Prinzip genau der zum direkten LUC, jedoch stellt sich die Frage, **welche** Flächen betroffen sind. Die folgende Tabelle zeigt regionale Typen von Landnutzungsänderungen und deren potentielle C-Emissionen aus direkter LUC.

Tabelle 12 Regions- und kulturspezifische C-Inventare und daraus abgeleitete flächenbezogene CO₂-Emissionen durch LUC

Region, Kultur vs. Landtyp	Annahmen zu C aus dLUC			
	t C/ha, oberirdisch	C Boden +unterirdisch	Gesamt C [t/ha]	t CO ₂ /ha
EU, Raps/Weizen vs. Grünland	6,3	63	69	254
USA, Mais vs. Grünland	6,3	63	69	254
BR, Zuckerrohr vs. Savanne	66	68	134	491
ID, Palmöl vs. Regenwald	165	100	265	972

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von IPCC (2006)

Die betroffenen Flächenanteile lassen sich aus den im Referenzjahr 2005 global gehandelten Agrarprodukten berechnen, die theoretisch durch den Biomasseanbau „verdrängt“ werden können. Hierbei handelt es sich vereinfacht um Mais, Weizen, Raps, Soja und Palmöl.

Aus den Handelsanteilen der Hauptregionen EU, USA, Brasilien und Indonesien an diesen Produkten und den jeweiligen Erträgen lässt sich die gewichtete globale „Flächenbelegung“ bestimmen, die durch verdrängte Nahrungs- und Futtermittel betroffen ist.

Für die theoretisch in den o.g. Ländern bzw. der EU erfolgenden Landnutzungsänderungen wurde entsprechend der vorstehenden Tabelle angenommen, dass in der EU und den USA Grünland (Weide- oder Grasland), in Brasilien Savanne und in Indonesien tropischer Regenwald in landwirtschaftliche Produktionsfläche umgewandelt würde und damit die die theoretischen CO₂-Emissionen auf LUC bestimmt (vgl. folgende Tabelle).

Tabelle 13 Mengengerüst zur Ableitung des theoretischen globalen iLUC factor für das Referenzjahr 2005

Region, Kultur vs. Landtyp	Anbauflächen im "Weltmix"	
	vereinfachte Anteile	flächengewichtete anteilige THG-Emission bei LUC in t CO ₂ /ha
EU, Raps/Weizen vs. Grünland	20%	51
USA, Mais vs. Grünland	25%	64
Brasilien, Zuckerrohr vs. Savanne	50%	246
Indonesien, Palmöl vs. Regenwald	5%	49
	gewichtete Summe	400
	jährlich [t CO₂/ha*a]	20

Quelle: eigene Berechnungen

Mit den ober- und unterirdischen Kohlenstoffbilanzen für diese Regionen ergibt sich somit ein „global gewichtetes“ theoretisches Emissionspotential von 400 t CO₂/ha berechnet. Bei einer Umlegung auf 20 Jahre ergibt dies ein theoretisches flächenbezogenes CO₂-Emissionspotential von 20 t CO₂/ha.

Dieses **rein theoretische** Potential kommt in der Realität nicht vollständig zum Tragen, da „verdrängte“ Nahrungs- und Futtermittelproduktion nicht allein durch zusätzliche Flächennachfrage, sondern auch durch Steigerung der Erträge auf bestehenden Anbauflächen sowie durch (Re-)„Aktivierung“ nicht genutzter Flächen erfolgen kann. Das maximale indirekte THG-Emissionspotential wurde daher mit 75% des theoretischen Potentials abgeschätzt.

Als konservatives „Minimum“ sollten daher 25% des theoretischen iLUC factor verwendet werden, als mittelfristiger Wert 50% und als „maximal“ 75% des theoretischen iLUC factor.

Aus diesen Angaben kann über die jeweiligen Flächenerträge des Bioenergieanbaus dann ein **energiebezogener** Emissionsfaktor für indirekte Landnutzungseffekte (iLUC factor) bestimmt werden.