

Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden

unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen

Expertise im Auftrag des WBGU

- ergänzte Endfassung -

Darmstadt, Juli 2008

erstellt von

Uwe R. Fritsche

Kirsten Wiegmann

Öko-Institut, Büro Darmstadt

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 50 02 40

79028 Freiburg. Deutschland

Hausadresse

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg. Deutschland

Tel. +49 (0) 761 - 4 52 95-0

Fax +49 (0) 761 - 4 52 95-88

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt. Deutschland

Tel. +49 (0) 6151 - 81 91-0

Fax +49 (0) 6151 - 81 91-33

Büro Berlin

Novalisstraße 10

10115 Berlin. Deutschland

Tel. +49 (0) 30 - 28 04 86-80

Fax +49 (0) 30 - 28 04 86-88

www.oeko.de

Inhalt

Tabellenverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	iv
 Einleitung	 1
 1 Zum Hintergrund dieser Expertise	 2
1.1 Die Rolle der Bioenergie im globalen Energiesystem	2
1.2 Globale Potenziale der Bioenergie	3
1.3 Der politisch-regulative Kontext: Rahmen für Chancen und Risiken?	4
1.4 Treibhausgase und Primärenergieverbrauch als Teilfragen	5
 2 Methodische Grundlagen der THG- und KEV-Bilanzierung	 6
2.1 Treibhausgasbilanzierung über Lebenswege	6
2.2 Allokationsfragen für Nebenprodukte	9
2.3 Direkte und indirekte Landnutzungsänderungen	9
2.4 THG aus indirekten Landnutzungsänderungen	11
2.4.1 Grundsätzliche Aspekte der indirekten Landnutzungsänderungen	11
2.4.2 Ökonometrische Ansätze mit Gleichgewichtsmodellen	12
2.4.3 Deterministische Ansätze zur indirekten Landnutzung	13
 3 Bilanzierung des kumulierten Energie-Verbrauchs (KEV)	 15
 4 Datengrundlagen zur Bilanzierung	 16
4.1 Generelle Daten zu Lebensweganalyse	16
4.2 Daten zu Bioenergieträgern	17
4.3 Daten zu Energiepflanzen	17
4.4 Treibhausbilanzen für den Anbau von Biomasse mit direkten LUC	18
4.5 Daten zur THG-Freisetzung beim Biomasse-Anbau aus indirekten Landnutzungsänderungen	20

5	Ergebnisse zur THG-Bilanzierung bei Bioenergiesystemen	22
5.1	THG-Emissionen konventioneller Referenz-Systeme	22
5.2	THG-Ergebnisse für die biogene Strombereitstellung	25
5.3	THG-Ergebnisse für die biogene Wärmebereitstellung	33
5.4	THG-Ergebnisse für die Nutzung biogener Kraftstoffe	36
5.4.1	Endenergiebezogene THG-Ergebnisse für biogene Kraftstoffe	37
5.4.2	Verkehrsleistungsbezogene THG-Ergebnisse für biogene Kraftstoffe	43
5.5	Ergebnisse der Triplet-Vergleiche zur Bioenergienutzung	51
5.6	Flächenbezogene THG-Emissionen	55
6	Ergebnisse zum KEV von Bioenergiesystemen	60
6.1	KEV-Werte nichterneuerbarer Referenz-Systeme	60
6.2	KEV-Werte der biogenen Stromerzeugung	60
6.3	KEV-Werte der biogenen Wärmebereitstellung	62
6.4	KEV-Werte der Nutzung biogener Kraftstoffe	63
6.5	KEV-Werte der Triplet-Vergleiche zur Bioenergienutzung	64
7	Zur Aussagegüte der Ergebnisse	65
	Literatur	66
	ANHANG: Sekundärenergiebezogene THG- und KEV-Werte	A-1

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Brutto-Bioenergieerträge einzelner Kulturen	18
Tabelle 2	Werte für THG aus direkter Landnutzungsänderung in der BioNachV	19
Tabelle 3	Flächenbezogene THG-Bilanzen durch direkte Landnutzungsänderungen beim Biomasse-Anbau	19
Tabelle 4	THG-Emissionen beim Biomasse-Anbau aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen	20
Tabelle 5	THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Stromerzeugung	22
Tabelle 6	THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Wärmebereitstellung	23
Tabelle 7	THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Kraftstoffnutzung	23
Tabelle 8	Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Kraftstoffnutzung	23
Tabelle 9	THG-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan	26
Tabelle 10	THG-Emissionen der Stromerzeugung aus festen und flüssigen Bioenergieträgern	30
Tabelle 11	THG-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Bioenergieträgern	33
Tabelle 12	Endenergiebezogene THG-Emissionen für Biodiesel sowie BioGH ₂ und biogenem Fahrstrom	37
Tabelle 13	Endenergiebezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG	39
Tabelle 14	Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Biodiesel, BioGH ₂ und biogenem Fahrstrom	43
Tabelle 15	Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG	48
Tabelle 16	THG-Emissionen für Triplets mit Erdgas/Benzin bzw. Öl/Diesel als Referenz sowie biogenen Alternativ-Triplets	52
Tabelle 17	Anbauflächenbezogene THG-Emissionen für biogenen Strom	55
Tabelle 18	Anbauflächenbezogene THG-Emissionen für biogene Wärme	57
Tabelle 19	Anbauflächenbezogene THG-Emissionen für biogene Kraftstoffnutzung	58
Tabelle 20	KEV-Werte der nichterneuerbaren Referenz-Systeme	60
Tabelle 21	KEV-Werte der biogenen Stromerzeugung	61
Tabelle 22	KEV-Werte der biogenen Wärmebereitstellung	62
Tabelle 23	KEV-Werte der biogenen Kraftstoffnutzung	63

Tabelle 24	KEV-Werte der Triplets mit Erdgas/Benzin bzw. Heizöl/Diesel als Referenz sowie den biogenen Alternativ-Triplets.....	64
------------	--	----

Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Rolle der Bioenergie in einem global nachhaltigen Energiesystem	2
Bild 2	Global nachhaltige Bioenergiepotenziale	3
Bild 3	Struktur von Energie- und Stoff-Prozessketten (Vorketten)	7
Bild 4	Umwelteffekte aus Vorketten und Nutzung von Energieträgern	8
Bild 5	GEMIS als Datenbasis für Stoffstromanalysen	16
Bild 6	THG-Emissionen einzelner Kulturen aus direkten und indirekten LUC	21
Bild 7	THG-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas (direkte Nutzung)	27
Bild 8	THG-Emissionen der Stromerzeugung aus Biomethan (Einspeisung).....	28
Bild 9	Kumulierte THG-Emissionen für Strom aus Biogas (direkte Nutzung)	29
Bild 10	Kumulierte THG-Emissionen für Strom aus Biomethan (Einspeisung).....	29
Bild 11	THG-Emissionen der Stromerzeugung aus festen und flüssigen Bioenergieträgern	31
Bild 12	Kumulierte THG-Emissionen der Stromerzeugung aus festen und flüssigen Bioenergieträgern.....	32
Bild 13	THG-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Biomasse	34
Bild 14	Kumulierte THG-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Biomasse.....	35
Bild 15	Endenergiebezogene THG-Emissionen für Biodiesel sowie BioGH ₂ und biogenem Strom	38
Bild 16	Kumulierte endenergiebezogene THG-Emissionen für Biodiesel sowie BioGH ₂ und biogenem Strom	39
Bild 17	Endenergiebezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG	41
Bild 18	Kumulierte endenergiebezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG.....	42
Bild 19	Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Biodiesel.....	44
Bild 20	Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für BioGH ₂ und biogenem Fahrstrom	45
Bild 21	Kumulierte verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Biodiesel.....	46

Bild 22	Kumulierte verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für BioGH ₂ und biogenem Fahrstrom	47
Bild 23	Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG.....	49
Bild 24	Kumulierte verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG.....	50
Bild 25	THG-Emissionen für Triplets mit Erdgas/Benzin bzw. Heizöl/Diesel als Referenz sowie biogenen Alternativ-Triplets.....	53

Einleitung

Der WBGU beauftragte das Öko-Institut mit einer Expertise zu Umweltauswirkungen verschiedener Biomassekonversionspfade, die das WBGU-Hauptgutachten 2008 „Nachhaltige Landnutzung und Bioenergie“ (Arbeitstitel), unterstützen soll, das Strategien einer nachhaltigen globalen Landnutzung unter dem Einfluss des Klimawandels thematisiert. Im Fokus des Hauptgutachtens stehen die energetische Nutzung von Biomasse als klimapolitische Option sowie Energiesicherheit.

In der nun vom Öko-Institut vorgelegten Expertise waren insbesondere ökologisch bedenkliche Landnutzungsänderungen (land-use change = LUC) wie z.B. Abholzung von Regenwald, Erschließung von Moorflächen usw. in die Analyse der Umweltauswirkungen einzubeziehen. Als Hauptindikatoren wurde auf die Emissionen an Treibhausgasen (THG) sowie den kumulierten Energieverbrauch (KEV)¹, differenziert nach erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Anteilen abgestellt².

In der vorliegenden Expertise wird über die Lebenswegbilanzierung hinaus daher ein besonderes Gewicht auf die THG-Emissionen von Bioenergiesystemen unter Einbeziehung von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen gelegt.

Parallel dazu betrachtet das IE/BFZ die Wirkungsgrade und Gestehungs- sowie THG-Vermeidungskosten, wobei für letztere die Ergebnisse der vorliegenden Expertise genutzt werden. Die hier vorgelegten Lebenswegbilanzen für THG und KEV beziehen sich auf die mit dem WBGU abgestimmten „settings“ und verwenden die Technologiedefinitionen der parallelen Expertise des IE/BFZ.

Der vorliegende Bericht gibt eine zusammenfassende Darstellung der Datengrundlage, Methodik und relevanter Ergebnisse. Eine detailliertere Analyse kann aufgrund der erstellten Datenbasis mit dem EDV-Tool GEMIS erfolgen, worauf zu verweisen ist³.

¹ Der KEV unterscheidet sich vom kumulierten Energie-Aufwand (KEA): er berücksichtigt nur die real in Lebenswegen „verbrauchte“ Primärenergie, nicht aber die potenziell nutzbaren Energieinhalte von Energieträgern, die stofflich genutzt werden (z.B. von Holz als Baustoff), vgl. dazu näher www.oeko.de/service/kea. Bezogen auf die hier betrachteten Lebenswege sind die Unterschiede zwischen KEA und KEV jedoch gering.

² Die verwendete Methodik und Datenbasis erlauben auch, weitere Umweltaspekte – z.B. Luftschadstoffe (SO₂, NO_x, Staub usw.) sowie anfallende Reststoffe und Abwasserbelastungen zu bilanzieren. Für eine Reihe von Prozessen in den Lebenswegen von Bioenergiesystemen liegen jedoch keine ausreichend abgesicherten Daten vor, wobei dies vor allem für Prozesse in Entwicklungsländern gilt. Daher wird hier von einer summarischen Darstellung der Ergebnisse abgesehen.

³ Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), siehe www.gemis.de. Für die vorliegende Expertise wurde die GEMIS Version 4.5 verwendet, deren Datenbasis speziell für den WBGU erweitert wurde. Das Modell und die Datenbasis werden dem WBGU zur Verfügung gestellt.

1 Zum Hintergrund dieser Expertise

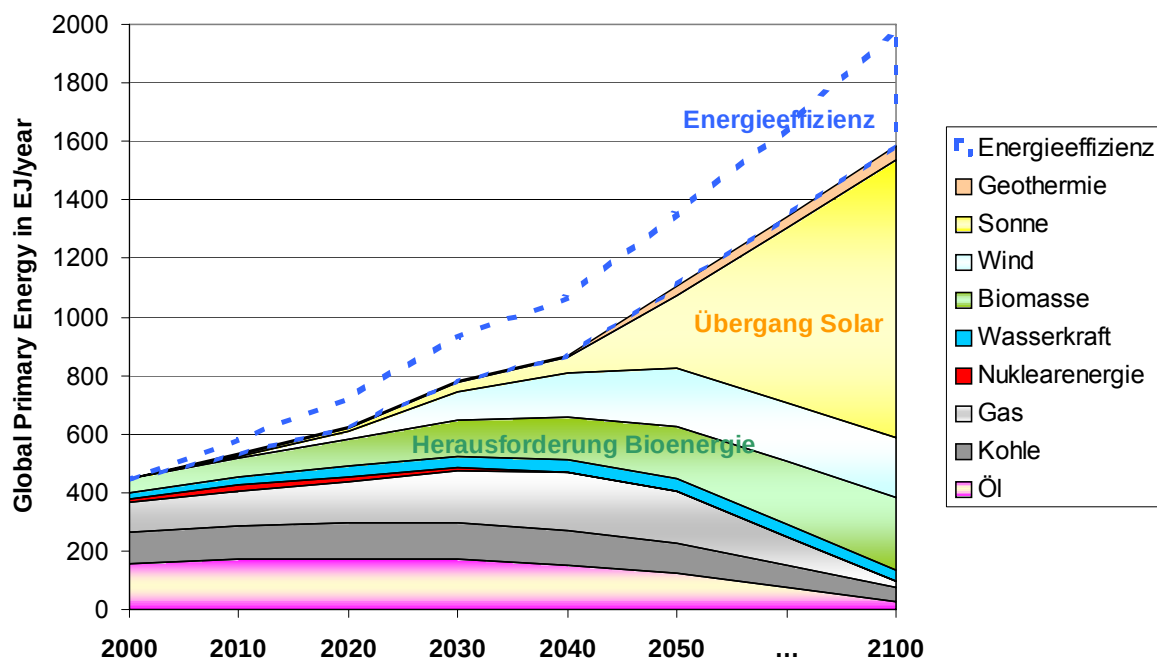
Bevor im Folgenden auf die Frage der THG-Emissionen und Primärenergiebilanzen von Bioenergieträgern eingegangen wird, ist eingedenk der Diskussionen um Nachhaltigkeit, Kosteneffizienz und nationale wie auch internationale Implikationen der Bioenergie- und insbesondere Biokraftstoff-Nutzung der komplexe Kontext zu beachten, da erst vor diesem Hintergrund qualifizierte Aussagen möglich und sinnvoll sind.

1.1 Die Rolle der Bioenergie im globalen Energiesystem

Die Bundesregierung und die EU setzen bei der Bereitstellung mit Strom, Wärme, Kraft- und Industrierohstoffen verstärkt auf Biomasse, entsprechende Fördermaßnahmen für Biokraftstoffe (Beimischungsquote), für Strom (EEG) sowie Wärme (Marktanreizprogramm, Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz) aus Biomasse sind erfolgreich.

Die Nachfrage nach Biomasse zur Energiebereitstellung in Deutschland und in der EU kann, bedingt durch ambitionierte Ausbauziele zur Biomassenutzung, bereits heute durch heimische Produktion nicht mehr allein gedeckt werden. Dementsprechend nimmt der globale Handel mit biogenen Rohstoffen und verarbeiteten Bioenergieträgern (z.B. Pellets, Rapsöl, Biodiesel) stetig zu. Parallel steigt das Interesse an der energetischen Nutzung von Biomasse auch in Industrieländern außerhalb der EU, und viele Entwicklungsländer beginnen mit der Formulierung eigener Bioenergie-Politiken, die sich stark auf den Export von Biokraftstoffen konzentrieren (GBEP 2007).

Bild 1 *Rolle der Bioenergie in einem global nachhaltigen Energiesystem*



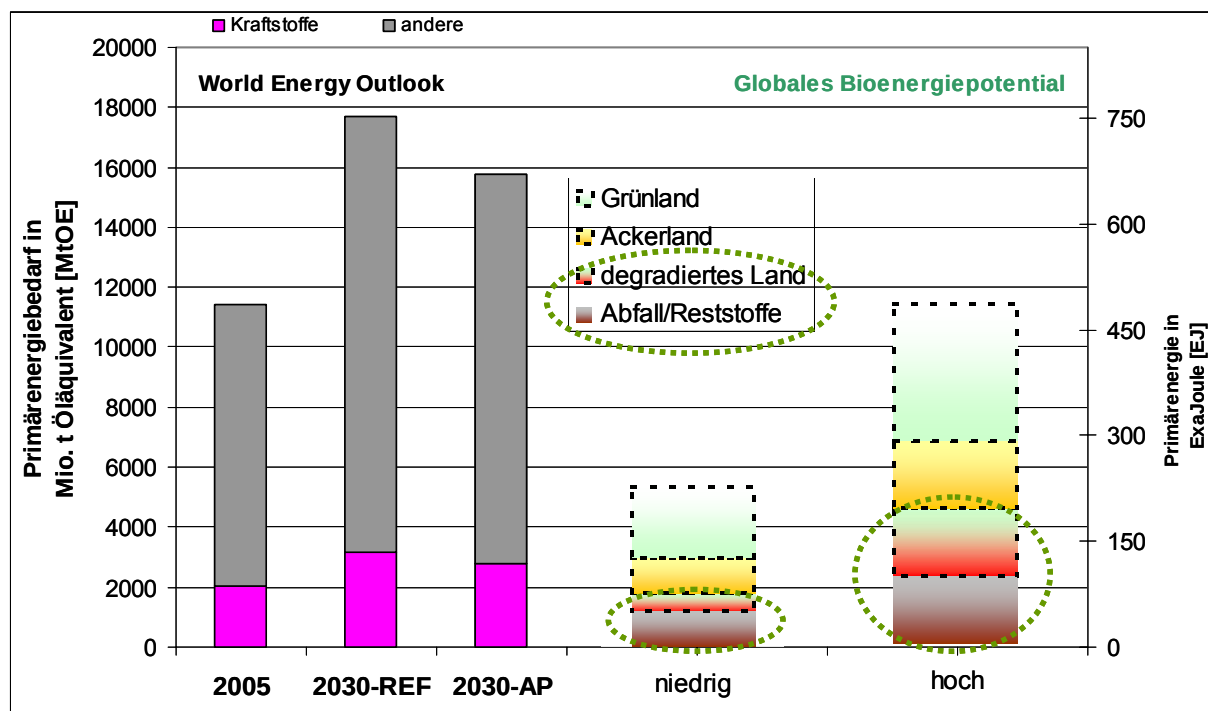
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von WBGU (2003)

Eine steigende Menge an Bioenergie wird – wie obiges Bild zeigt – bis Mitte dieses Jahrhunderts eine wesentliche Rolle im globalen Energiesystem spielen. Danach wird die Bedeutung zwar durch die stark ansteigende Solarenergienutzung **relativ** gesehen zurück gehen, aber in absoluten Mengen auch langfristig einen hohen Versorgungsanteil aufweisen.

1.2 Globale Potenziale der Bioenergie

Die langfristigen globalen Potenziale der Bioenergie sind auch bei Einbeziehung von harten Kriterien zur Nachhaltigkeit durchaus hoch, wie das folgende Bild zeigt.

Bild 2 Global nachhaltige Bioenergiepotenziale



Quelle: eigene Darstellung nach IEA (2007) und Best et al. (2008)

Die Nutzung dieser Potenziale wird zu einem erheblich höheren globalen Handel mit Bioenergieträgern führen, da die Kosteneffizienz der Biomassebereitstellung sowie die verfügbaren Flächen einerseits und die Nachfrage andererseits regional sehr unterschiedlich verteilt sind.

Steigenden Importe von z.B. preisgünstigen Pflanzenölen und Bioethanol einerseits sowie der verstärkte Anbau von Energiepflanzen in den Exportländern sowie für die heimische Nutzung können jedoch erhebliche - positive wie negative - Auswirkungen auf Umwelt, Klima, Artenvielfalt und soziale Systeme aufweisen.

Entwicklungen wie z.B. Abholzung des Regenwalds für Palmölplantagen, Verteuerung der Grundnahrungsmittel und produktionsbedingte Umweltverschmutzung in weniger entwickelten Ländern sind in der öffentlichen Diskussion, auch wenn die unmittelbare kausale Verknüpfung mit Bioenergie keinesfalls immer gegeben ist.

1.3 Der politisch-regulative Kontext: Rahmen für Chancen und Risiken?

Ohne einen politisch gesetzten Rahmen werden negative Entwicklungen durch Bioenergie zunehmen – und den Wandel zu einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Energie- und Rohstoffversorgung konterkarieren.

Aus Gründen des globalen Klima-, Biodiversitäts- und vorsorgenden Ressourcenschutzes setzten sich Deutschland und die EU für ein praktikables, international zu verankerndes Instrumentarium ein, das diese Zielkonflikte aufgreift und ihnen entgegenwirkt. Sie werden dabei auch durch die USA sowie einige Schwellen- und Entwicklungsländer sowie eine große Zahl internationaler Einrichtungen unterstützt.

Die Entwicklung von Nachhaltigkeitsstandards für Biomasse und entsprechender Nachweisverfahren (Biomasse-Zertifizierung) findet national (Umweltverbände, Industrie, Wissenschaft, Politik), in der EU und international (u. a. G8 Global Bioenergy Partnership – GBEP sowie FAO, UNEP und UNCTAD) große Beachtung:

- Mit dem am 1.1.2007 in Kraft getretenen Biokraftstoffquotengesetz wurde die Bundesregierung ermächtigt, Nachhaltigkeitsanforderungen für Biokraftstoffe, die auf die Quote angerechnet werden können, festzulegen. Diese sog. „Nachhaltigkeitsverordnung“ für Biokraftstoffe (BioNachVO) wurde als Regierungsentwurf am 5.12.2007 beschlossen und die EU-Notifizierung eingeleitet..
- Parallel wird derzeit die europaweite Einführung von Nachhaltigkeitsanforderungen für (heimische und importierte) Biokraftstoffe diskutiert, ein entsprechender Entwurf wurde im Januar 2008 vorgelegt und ist aktuell in Verhandlungen innerhalb des Europäischen Rat sowie im EU-Parlament.
- Die im Mai 2008 stattgefundene 9. Vertragsstaatenkonferenz (conference of the parties = COP) zur Konvention über Biologische Vielfalt (convention on biological diversity = CBD) verhandelte Frage von „guidelines“ zur Berücksichtigung von Biodiversitätsfragen in globalen und nationalen sowie freiwilligen Zertifizierungssystemen für nachhaltige Bioenergie. Im Beschluss ist die Zusammenstellung entsprechender Vorschläge für die CBD-COP10 im Jahr 2010 enthalten.
- Parallel nahm die Europäische Normungsorganisation CEN die Arbeit an einem Standard über Nachhaltigkeitskriterien für Bioenergie (TC 383) auf, und in der ISO wird über die Einrichtung einer entsprechenden internationalen Standardsetzungsgruppe diskutiert.
- Im Juni 2008 hat die FAO bei einer Konferenz die Anforderungen an nachhaltige Bioenergie vor allem aus der Sicht der Ernährungssicherheit thematisiert, und Mitte Juni 2008 begann eine Task Force der GBEP einen Arbeitsprozess zur globalen Harmonisierung von Nachhaltigkeitsstandards für Bioenergie.

Die Nachhaltigkeit der Biomasse – als Energieträger zur Strom- und Wärmebereitstellung, als Biokraftstoffe, als Rohstoff und als Nahrungs- und Futtermittel – ist eine der **zentralen Herausforderungen** für die nachhaltige Ressourcennutzung.

Es geht dabei nicht allein die Nutzung von Bioenergie oder Biokraftstoffen, sondern um das **gesamte** Biomasseaufkommen für **alle** Nutzungszwecke⁴. Zudem ist die Bedarfsentwicklung - insbesondere die **Effizienz** der Nutzung - mit zu berücksichtigen⁵.

Dementsprechend sind der internationale und globale Handel mit Biomasse sowie die Rückwirkungen auf Klima (Treibhausgase inkl. Landnutzungsänderungen) und Umwelt (Biodiversität, Bodenschutz) sowie Wirtschaft (Im- und Exporte, Technologieentwicklung) und Soziales (Beschäftigung, Einkommen, Zugang zu Energie, Ernährungssicherung) wichtige Teilfragen einer konsistenten, übergreifenden Politik, in der die europäischen und globalen Kontexte **als Chance** berücksichtigt werden müssen⁶.

1.4 Treibhausgase und Primärenergieverbrauch als Teilfragen

Die in der vorliegenden Expertise näher untersuchten Aspekte der THG- und KEV-Bilanzen von Bioenergiesystemen sind somit wichtige, aber für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Biomasse insgesamt nur Teil-Aspekte⁷.

Die o.g. weiteren Fragen werden zum Teil schon bearbeitet⁸, und die genannten politischen Prozesse zur Einführung von Nachhaltigkeitskriterien lassen hoffen, dass eine **Gesamtbeurteilung** von **Bioenergie** nur noch eine Frage weniger Jahre ist.

Jedoch ist der Forschungsstand zur Beurteilung der **Biomassenutzung** – also inklusiver ihrer Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel sowie für stoffliche Anwendungen – noch weit davon entfernt, den komplexen Fragen zu genügen und belastbare Gesamtaussagen zuzulassen.

Insoweit sind die hier vorgelegten Ergebnisse als Schritt hin zu einer Gesamtbeurteilung global nachhaltiger Strategien zur Nutzung von Biomasse zu verstehen und weitere Anstrengungen im Bereich der Forschung und der bi- und multilateralen Politikentwicklung erscheinen dringend geboten⁹.

⁴ Hier ist zu berücksichtigen, dass die derzeit erfolgende Standardisierung von THG-Bilanzierungen im Rahmen der GBEP und von CEN sowie die Aktivitäten zur Operationalisierung der Biodiversitätsschutzanforderungen (vgl. CBD 2008; ÖKO 2008) zwar jeweils „nur“ Bioenergie zum Thema haben, die methodischen Grundlagen und z.T. die Daten aber für andere Biomassenutzungen übertragbar sind.

⁵ Für eine dahingehende Analyse der Rolle von Biokraftstoffen siehe FES (2008) und Peterson/Hook/Zimmer/Fritsche (2008) sowie die Arbeiten im BMU-geförderten Vorhaben „renewbility: Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext der Erneuerbaren Energien bis 2030“ (www.renewbility.de).

⁶ Für eine dahingehende Diskussion siehe z.B. Best et al. (2008).

⁷ Dies gilt auch für die in der parallelen Expertise von IE/BFZ abgeleiteten Aussagen zur Nutzungseffizienz und Kosten der THG-Vermeidung.

⁸ vg. zum Beispiel ÖKO (2008) für Fragen der Biodiversität sowie FAO (2008) für Fragen der Ernährungssicherheit. Weitere Untersuchungen im multilateralen Kontext werden derzeit z.B. von UNEP und UNIDO vorbereitet.

⁹ UNEP hat mit dem „International Panel for Sustainable Resource Management“ einen ersten Schritt in diese Richtung gemacht. Laufende Vorarbeiten des Öko-Instituts zur Nachhaltigkeit biogener Ressourcennutzung erfolgen im BMBF-geförderten Vorhaben concISE.net (www.concisenet.de) und werden im Jahr 2009 publiziert.

2 Methodische Grundlagen der THG- und KEV-Bilanzierung

Die in der vorliegenden Expertise abgeleiteten Ergebnisse für THG-Emissionen und KEV-Werte von Bioenergiesystemen stützt sich methodisch auf eine Reihe von Ansätzen, die seit mehreren Jahrzehnten systematisch entwickelt wurden.

Für beide Indikatoren wird dabei die sog. **Lebensweganalyse** verwendet, die oft mit dem Begriff „Ökobilanzierung“ (life-cycle assessment = LCA) gleich gesetzt wird. Dies ist jedoch nicht zutreffend, da in der vorliegenden Arbeit **keine vollständige Ökobilanz** nach ISO 14000ff erstellt wurde.

Vielmehr interessierte **allein die Sachbilanz** (life-cycle inventory = LCI), womit einige weitere Elemente der Ökobilanzierung wie etwa die Frage der Bewertung der Ergebnisse außerhalb der Arbeit liegen¹⁰.

Bei den KEV-Werten handelt es sich um eine spezielle methodische Weiterentwicklung des KEA (vgl. Abschnitt 0).

2.1 Treibhausgasbilanzierung über Lebenswege

Die Lebensweganalyse untersucht, basierend auf dem „cradle-to-grave“-Gedanken der Ökobilanz, alle wesentlichen umweltrelevanten Aktivitäten von der Primärenergie- oder Rohstoffgewinnung über die verschiedenen Formen der Energie- und Stoffumwandlung und entsprechender Transporte hinweg bis zur Nutzung der Energieträger oder Stoffe beim Endverbraucher.

Dabei werden auch die Herstellung aller Prozesse sowie ggf. notwendige Entsorgungsaktivitäten, Hilfsenergie- und Hilfsstoffeinsätze mit einbezogen.

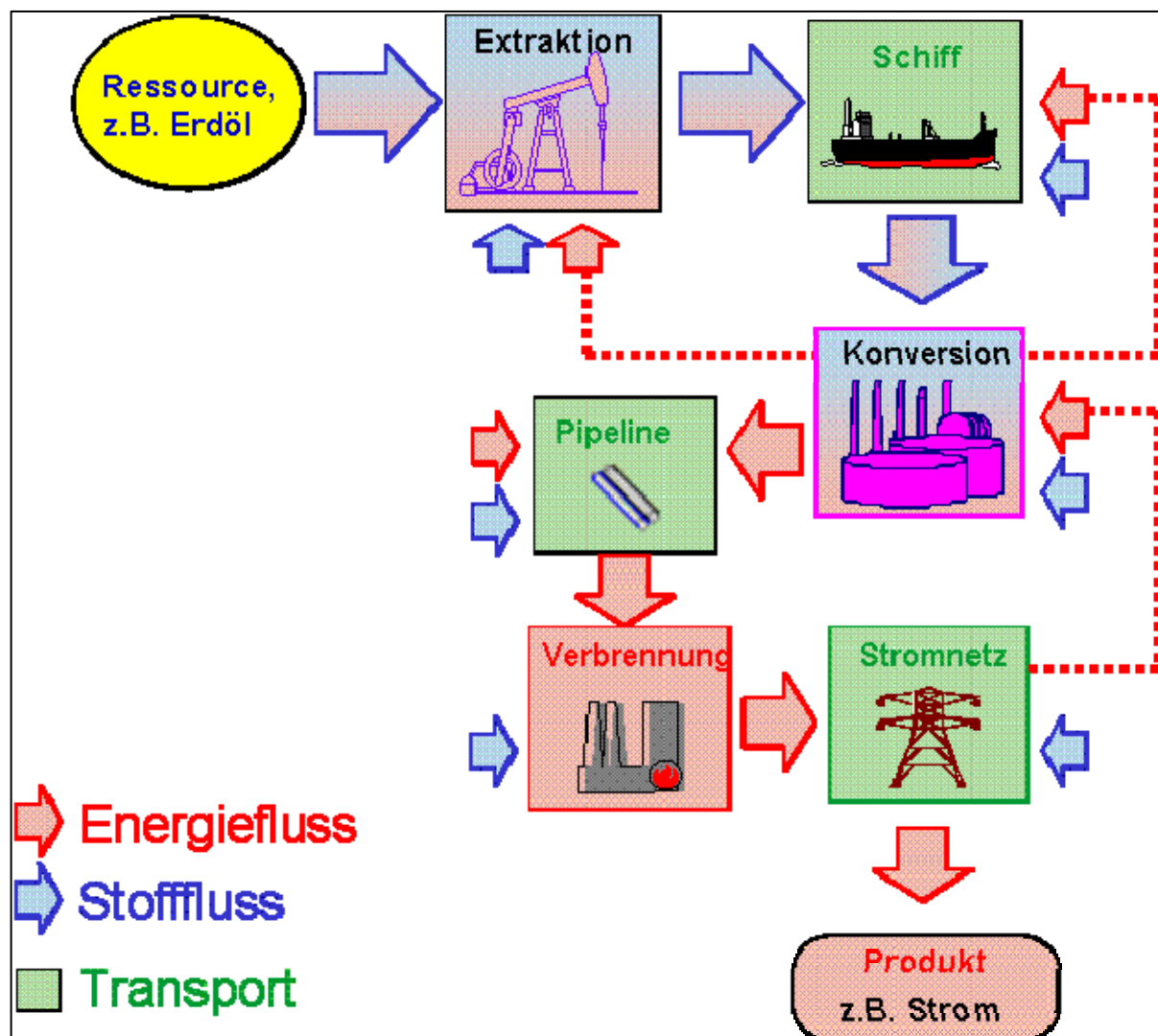
Für die vorliegende Arbeit wurden die Daten zur Bereitstellung von Energieträgern (Brennstoffe, Strom, Wärme) und Kraftstoffen (Benzin, Diesel, Erdgas, Biodiesel usw.) unter dem Begriff **Vorketten** zusammengefasst.

Die Vorketten betreffen die der eigentlichen Energienutzung **vorgelagerten** Aktivitäten von der Förderung, den Transporten sowie der weiteren Verarbeitung von Energieträgern bis zur Endenergiestufe frei Verbraucher.

Das folgende Bild zeigt die grundsätzliche Struktur solcher Vorketten.

¹⁰ Die nach ISO14000ff notwendigen Schritte wie scoping, goal definition und peer review sowie „assessment“ sind für die vorliegende Fragestellung weniger relevant. Die Systemgrenzen werden dargestellt und gegenüber herkömmlichen LCA durch die Einbeziehung der Landnutzungsänderungen erweitert. Die Methodik der Nebenproduktallokation richtet sich nach den aktuellen Vorgaben der deutschen Nachhaltigkeitsverordnung zum Bio-kraftstoffquoten-Gesetz sowie dem Erneuerbare-Energien-Richtlinienentwurf der EU-Kommission vom Januar 2008. Damit ist die Frage der Allokation nicht mehr einer Sensitivitätsanalyse zu unterziehen.

Bild 3 Struktur von Energie- und Stoff-Prozessketten (Vorketten)



Quelle: Öko-Institut

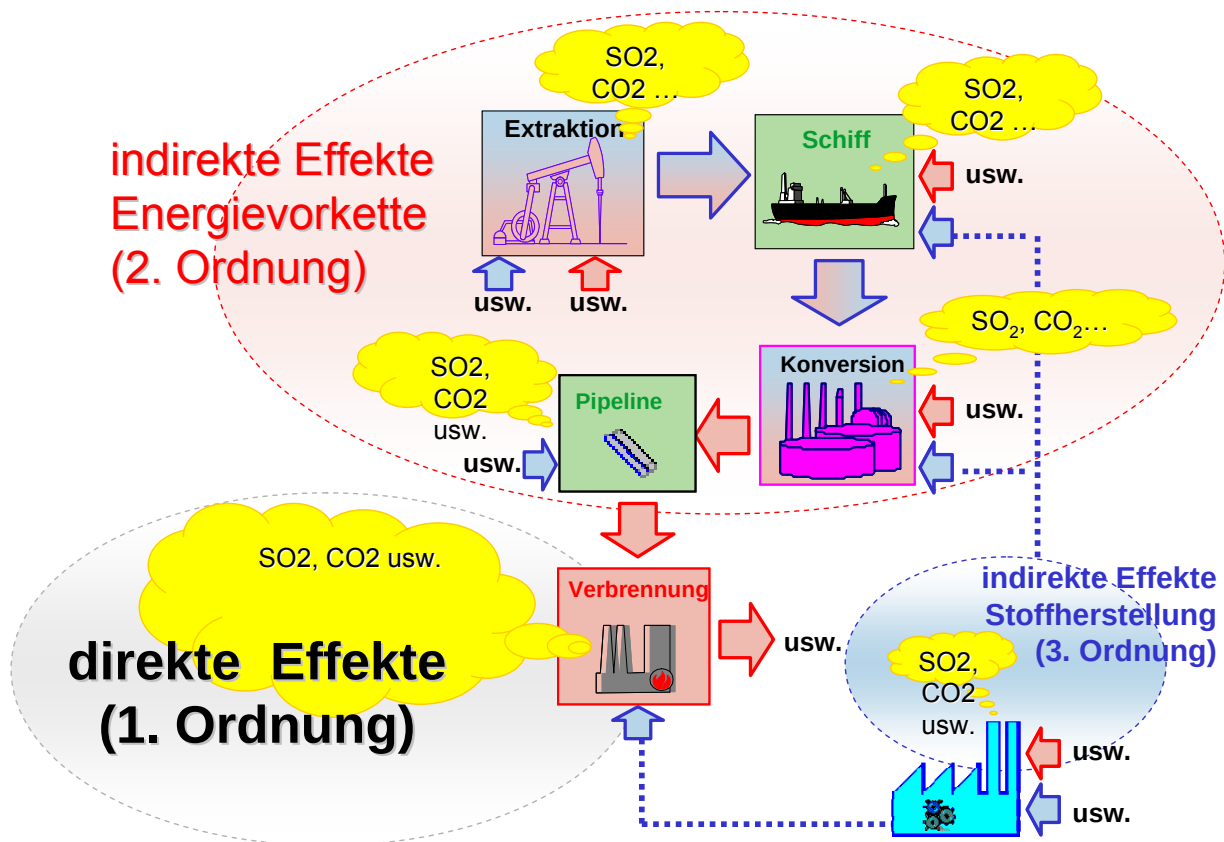
Je nach Technologie und Brennstoffcharakteristik können Emissionen und andere Umweltwirkungen in jedem Schritt („Prozess“) entlang des Energieflusses auftreten.

Zusätzlich zum direkten Energiefluss sind **Materialien** nötig, um die Energieanlagen zu errichten (z. B. Kraftwerke, Pipelines, Übertragungsleitungen).

Für diesen **Stoffeinsatz**, der parallel zum Energieeinsatz erfolgt, müssen ähnliche Vorstufen betrachtet werden.

Die Vorketten sind jedoch nur eine – zum Teil vergleichsweise geringe – Quelle von Umwelteffekten, da die eigentliche Nutzung der Energieträger und Kraftstoffe selbst in der Regel zu weiteren Umweltbelastungen führt (vgl. folgendes Bild).

Bild 4 Umwelteffekte aus Vorketten und Nutzung von Energieträgern



Quelle: Öko-Institut

Die Vorketten in der vorliegenden Expertise fassen neben den Effekten der 1. Ordnung („direkte“ Emissionen) auch die Effekte der 2. (aus Energievorketten) und 3. Ordnung (aus Materialvorleistungen) sowie zugehörige Gütertransporte zusammen.

Das Öko-Institut hat mit GEMIS (G**lobales E**missions-**M**odell **I**ntegrierter **S**ysteme) seit 1989 für diese Fragen ein Computermodell zur ganzheitlichen Bilanzierung im Energie-, Stoff- und Verkehrssektor entwickelt, das mittlerweile in Version 4.5 vorliegt (vgl. ÖKO 2008c). Diese öffentlich zugängliche Software enthält Informationen zu Prozessketten in mehr als 50 Ländern sowie für über 12.000 Prozesse aus Energiewirtschaft (Strom, Wärme), Stoffbereitstellung (z.B. Baustoffe, Chemikalien, Metalle, Nahrungsmittel) und Verkehr (Personen- und Gütertransporte).

Die THG-Emissionen in GEMIS betreffen CO_2 , CH_4 und N_2O sowie CO_2 -Äquivalente, die nach verschiedenen THP-Faktoren berechnet werden können¹¹.

¹¹ Die Treibhauspotenziale (THP; im Englischen: global warming potentials = GWP) der einzelnen Treibhausgase können nach IPCC (1995) entsprechend des Kyoto-Protokolls oder nach neueren Daten des IPCC gewählt werden, um die aggregierten CO_2 -Äquivalente zu berechnen. In der vorliegenden Expertise wurden stets die Werte nach IPCC (2007) verwendet.

2.2 Allokationsfragen für Nebenprodukte

Bei Lebensweganalysen, die allein auf **ein** bestimmtes Produkt abstellen – z.B. Strom aus Heizkraftwerken oder Biokraftstoffe aus Rapsöl – muss berücksichtigt werden, dass in den Vorketten oft relevante Mengen an „Neben“-Produkten entstehen. Dies kann im Falle der Stromerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung die parallel zum Strom bereitgestellte nutzbare Abwärme sein, oder im Fall des Biokraftstoffes aus Rapsöl der Extraktionsschrot aus der Ölmühle. Auch beim Anbau von Biomasse kann es „Koppelprodukte“ geben, z.B. Stroh bei der Gewinnung von Weizenkörnern.

Der Umgang mit diesen Neben- und Koppelprodukten in Öko- und Lebenswegbilanzen ist unter dem Begriff „Allokation“ ein seit Jahren umstrittenes Thema, das in der ISO 14000ff zwar durch eine Reihe von Regeln formalisiert wurde, jedoch jeder Ökobilanz freistellte, die jeweils zutreffende Allokationsregel zu verwenden und die daraus entstehende Ergebniswirksamkeit gegenüber anderen Allokationsregeln durch Sensitivitätsanalysen auszuweisen.

Dieser **analytisch** durchaus gerechtfertigte Ansatz wurde in den letzten Monaten im Zuge der **rechtlichen** Ausgestaltung von Nachhaltigkeitsanforderungen für Biokraftstoffe sowie durch Arbeiten für das Umweltbundesamt zur Allokationsfrage bei der Kraft-Wärme-Kopplung¹² fortentwickelt und durch **eine** Allokationsregel für **alle** Prozesse ersetzt. Die Nachhaltigkeitsverordnung zum Biokraftstoffquotengesetz und vergleichbare Vorschlägen der EU-Kommission legen als Allokationsmethode die **heizwertbezogene** Aufteilung der Umweltlasten zwischen Haupt- und Nebenprodukten fest (vgl. IFEU 2007)¹³.

Alle in der vorliegenden Expertise berechneten THG-Werte und entsprechenden Flächendaten – und auch die KEV-Ergebnisse (vgl. Abschnitt 0) – beruhen auf der heizwertbezogenen Allokation und sind daher **nicht** mit früheren Publikationen vergleichbar, die vor allem Gutschriftenmethoden verwenden.

2.3 Direkte und indirekte 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 Landnutzungs**änderungen** (land-use change = LUC).

LUC-Effekte können direkt oder indirekt mit der Bioenergie in Zusammenhang stehen:

¹² vgl. dazu näher ÖKO (2008b).

¹³ Dabei wurden auch „default“-Daten erstellt, die im Falle einer allgemeinen Betrachtung ohne Bezug auf bestimmte Anbauflächen verwendet werden können. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch nicht auf diese Default-Daten abgestellt, sondern in Abstimmung mit dem BGU bestimmte Situierungen („settings“) der Lebenswege angenommen.

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

Daher müssen die Lebensweganalysen um Bilanzen für LUC-bedingte THG-Emissionen des Biomasseanbaus ergänzt werden. Diese ergänzende Bilanz ändert die Ergebnisse der bisherigen LCA-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. Mais oder Weizen – ersetzt werden, womit eine **erhebliche zusätzliche** CO₂-Freisetzung einzurechnen ist.

Mit dem Beschluss zur Nachhaltigkeitsverordnung zum Biokraftstoffquotengesetz (und den vergleichbaren Vorschlägen der EU-Kommission) liegen nun auch methodische Grundlagen vor, um die direkten LUC-Effekte zu berechnen (vgl. IFEU 2007)¹⁴. Die entsprechenden Daten finden sich im Abschnitt 4.4.

Werden die einzelnen Settings (Technologiepfade) betrachtet, können diese, wie in der Vergangenheit, ohne die Einrechnung der Landnutzungsänderungen (Bezeichnung 0LUC) erfolgen. Da der WBGU jedoch explizit die Einbeziehung der Landnutzungsänderung wünscht, stellen diese Werte nur Vergleichsgrößen dar.

Als typische Systeme für LUC werden Veränderungen auf Acker- und Grünlandflächen („Wiese“) 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 Habitate charakterisiert werden – dies sind in der vorliegenden Expertise Zuckerrohranbau in Feuchtsavannen und Palmölplantagen auf tropischen Regenwaldflächen – müssen lediglich die direkten Landnutzungsänderungen berücksichtigt werden, in diesem Fall keine Verdrängung vorheriger landwirtschaftlicher Nutzung auf den betrachteten Flächen stattfindet.

¹⁴ Dabei wurden auch „default“-Daten erstellt, die im Falle einer allgemeinen Betrachtung ohne Bezug auf bestimmte Anbauflächen verwendet werden können. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch nicht auf diese Default-Daten abgestellt, sondern in Abstimmung mit dem WBGU ausgewählte Situierungen („settings“) der Lebenswege angenommen.

2.4 THG 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 durch den Fokus auf die Biokraftstoffherstellung nicht ausschließen, dass der Biomasseanbau eine ursächliche Verlagerung der bisherigen Nutzung 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 **Potenzial** 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.

Die Nutzung von Abfall- und Reststoffbiomassen sowie der Biomasseanbau auf bisher **ungenutzten** Flächen zeigen dagegen **keine** Verdrängungseffekte und bedingen daher auch **keine indirekten** CO₂-Emissionen.

Sie haben also **wichtige Vorteile**¹⁵ gegenüber herkömmlichem Biomasseanbau. 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-Emissionspotenzial nur durch Modellbetrachtungen ermittelt werden.

2.4.1 Grundsätzliche Aspekte der indirekten Landnutzungsänderungen

Bevor weiter unten auf die Möglichkeiten eingegangen wird, die THG-Emissionen aus indirekten LUC zu quantifizieren, soll im folgenden kurz auf einige grundlegende Aspekte hingewiesen werden, die aus Sicht der Verfasser für die Beurteilung der indirekten LUC-Fragen wesentlich sind:

¹⁵ Diese Biomasseoptionen stehen zudem nicht in Konkurrenz zum Nahrungs- oder Futtermittelanbau, haben also **keine** Effekte auf deren Mengen und Preise. Sie haben auch kein Risiko, durch verdrängte Landnutzung indirekte Schäden bei wertvollen Flächen, Biotopen usw. zu verursachen.

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.

Indirekte THG-Effekte werden **längerfristig gegen Null gehen**. 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 die indirekten THG-Emissionen gegenstandslos, da zusätzliche LUC-Effekte nicht mehr zu zusätzlichen THG-Freisetzen führen dürfen 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 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.

2.4.2 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 Un-

terschätzung 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 können¹⁶. Im Falle Europas sind solche Flächen durch die GAP-Stilllegungspolitik (EU-25) sowie durch gesellschaftlich-ökonomische Umbrüche (Ukraine, Weissrussland) entstanden¹⁷.
- 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.

2.4.3 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

¹⁶ Zur Definition der Begriffe vgl. Wiegmann/Hennenberg/Fritsche 2008.

¹⁷ 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.

2007; Fritsche/Hennenberg 2008). Die Datengrundlage für die auf dieser Grundlage erfolgende Berechnung der indirekten THG-Emissionen ist im Abschnitt 4.4 zu finden.

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 mit Sicherheit möglich. Daher kann das indirekte CO₂-Emissionspotenzial nur durch eine Modellbetrachtung ermittelt werden. Hierzu nehmen Fritsche/Hennenberg (2008) folgendes an:

Das **theoretische** THG-Emissionspotenzial 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, sind die Anteile der entsprechenden Flächen relevant. Diese lassen sich aus den im Referenzjahr – hier 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 „Hauptländer“ EU, USA, BR und ID an diesen Produkten und den jeweiligen Erträgen lässt sich die gewichtete globale „Flächenbelegung“ bestimmen, die durch verdrängte Nahrungs- und Futtermittel betroffen sein würde. Für die theoretisch in den o.g. Ländern bzw. der EU erfolgenden Landnutzungsänderungen wurde angenommen, dass in der EU und den USA Grünland (Weideland, Grasland), in Brasilien Savanne und in Indonesien tropischer Regenwald in landwirtschaftliche Produktionsfläche umgewandelt würde.

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

Da dieses **rein theoretische** Potenzial in der Realität nicht vollständig zum Tragen kommt, da „verdrängte“ Nahrungs- und Futtermittelproduktion nicht allein durch zusätzliche Flächennachfrage, sondern auch durch Steigerung der Erträge auf bestehenden Anbauflächen sowie durch (Re-)„Aktivierung“ derzeit nicht genutzter Flächen erfolgen kann, wurde das maximale Emissionspotenzial mit 75% des theoretischen abgeschätzt. Als „mittleres“ Niveau wurden 50% des theoretischen Werts angesetzt und als „minimal“ ein Wert von 25%. Aus diesen Angaben kann über die jeweiligen Flächenerträge des Bioenergieanbaus dann ein energiebezogener Emissionsfaktor für indirekte Landnutzungseffekte (iLUC factor) bestimmt werden.

3 Bilanzierung des kumulierten Energie-Verbrauchs (KEV)

Der KEV umfasst die Summe aller Primärenergien, die zur Herstellung und Nutzung eines Produkts oder einer Dienstleistung inklusiver aller Vorketten genutzt werden, jedoch **ohne** die **stofflich** genutzten Energieträger wie z.B. Holz für Bauzwecke oder Erdöl für Kunststoffe.

Diese stofflichen Aufwendungen werden im KEV nicht verbucht, sondern ihre Masse ist in einer Rohstoffbilanz extra zu erfassen. Ebenso werden Aufwendungen zur Entsorgung nicht in den KEV einbezogen.

Der KEV unterscheidet sich vom **kumulierten Energie-Aufwand (KEA)** nach der VDI-Richtlinie 4600 vor allem darin, dass nur die Energiemengen einbezogen sind, die **energetisch genutzt** („verbraucht“) wurden.

Der KEA rechnet dagegen auch die stofflich genutzten Energiemengen mit ein, da diese – ungeachtet ihrer energetischen oder stofflichen Nutzung – gefördert bzw. bereitgestellt („aufgewendet“) werden müssen, und durch ihren Heizwert die gesamten Primärenergieaufwendungen erhöhen.

Im KEA sind auch die Entsorgungsaufwände enthalten, wobei hier auch **Gutschriften** für z.B. Energierückgewinnung aus stofflich genutzten Energieträgern (Holz, Kunststoffe...) eingerechnet werden.

Die KEV-Bilanzierung ist ein integraler Bestandteil von GEMIS, so dass die Methodik ebenfalls mit dem Allokationsmethoden für die THG-Bilanz (siehe oben) erfolgt und damit eine konsistente Abbildung für beide Indikatoren erfolgt.

Die Datenbasis für die KEV-Bilanz beruht ebenfalls auf den gleichen Prozessketten wie die der THG-Bilanzierung.

Aufgrund der Fragestellung der hier vorliegenden Expertise, die sich auf energetische Bioenergienutzungen konzentriert und nur in den Vorketten stofflich genutzte Energieträger umfasst, sind die rechnerischen Unterschiede zwischen dem KEA und dem KEV vernachlässigbar.

Das verwendete Bilanzierungstool GEMIS kann jedoch beide Indikatoren berechnen, so dass bei Interesse auch die minimal abweichenden KEA-Resultate mit der vorliegenden Software und ihrer Datenbank ermittelt werden können.

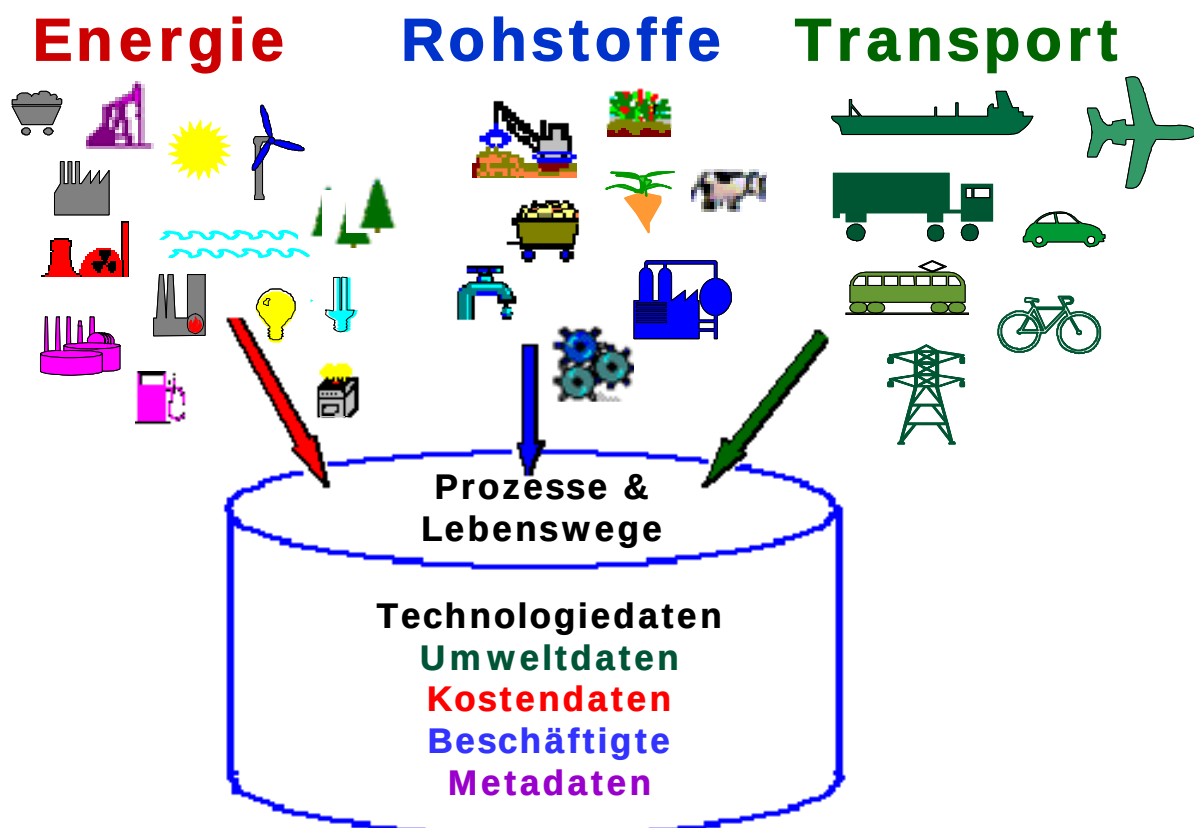
4 Datengrundlagen zur Bilanzierung

Neben den methodischen Fragen sind auch die Datengrundlagen wesentlich für die Ermittlung der Ergebnisse in der vorliegenden Expertise.

4.1 Generelle Daten zu Lebensweganalyse

Um eine Lebenszyklusanalyse praktisch durchführen zu können, muss eine große Datenmenge erhoben und verarbeitet werden, wobei auch die geographischen Variationen von Energieprozessen, Brennstoffqualitäten, Transportentfernungen usw. eine Rolle spielen. In GEMIS liegt eine entsprechende Datenbasis vor.

Bild 5 GEMIS als Datenbasis für Stoffstromanalysen



Quelle: Öko-Institut e.V.

Die Datenbasis von GEMIS 4.4 wurde, bezogen auf die „Hintergrund“-Daten für die fossilen und nuklearen Energieträger bereits ausführlich dokumentiert (vgl. ÖKO 2003 – 2007). Dabei wurden für alle aus dem Ausland bezogenen Energieträger repräsentative Liefermische (Anteil der Förderregionen) für das Jahr 2005 in Deutschland angesetzt, ebenso für die inländische Bereitstellung. Aus beiden wurde typische Bereitstellungsmixe für die inländische Verwendung der Energieträger im Jahr 2005 ermittelt.

Für das Jahr 2030 wurden entsprechende Fortschreibungen aus laufenden Arbeiten im BMU-geförderten Vorhaben renewbility angesetzt (vgl. www.renewbility.de).

4.2 Daten zu Bioenergieträgern

In GEMIS 4.5 wurden für die Konversionsprozesse zur Bereitstellung von Bioenergieträgern sowohl für das Jahr 2005 wie auch für 2003 die Daten zu Effizienzen und Inputs sowie Outputs aus der parallelen Expertise des IE/BFZ übernommen, wobei die Energieträgerdaten (Heizwerte) dieser Arbeit in wesentlichen auf GEMIS 4.4 beruhen.

4.3 Daten zu Energiepflanzen

Im Rahmen der vorliegenden Expertise wurden insgesamt Daten für neun Anbausysteme von Energiepflanzen in verschiedenen Ländern Datensätze erstellt, die bislang nicht im Datenumfang von GEMIS enthalten waren¹⁸.

Diese Bilanzen umfassen nicht nur die üblicherweise enthaltenen Angaben zum Einsatz von Maschinen und Betriebsmitteln (Dünger, Pflanzenschutz) sondern geben auch einen Überblick über den Einfluss der direkten und indirekten Landnutzungsänderungen. Diese Bilanzierung umfasst die drei wesentlichen Treibhausgase aus dem Anbau: CO₂ aus fossilen Energieaufwendungen für die maschinelle Bearbeitung und die Betriebsmittel) sowie Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) aus dem Düngemitelein-satz und Böden.

Diese Daten betreffen den Anbau folgender Feldfrüchte für die gemäßigten Breiten (bezogen auf Deutschland bzw. Lieferung frei Deutschland):

- Körnermais sowie Maisganzpflanzen (Silage)
- Kurzumtriebsplantage (Pappeln) - KUP
- Rapssaat
- Rutenhirse (switchgrass)
- Weizen

Für die Tropen und Subtropen werden außerdem noch

- Jatrophanuss (Indien) und
- Palmöl (Indonesien)
- Zuckerrohr (Brasilien) betrachtet.

Die angesetzten Brutto-Energieerträge beim Anbau von Biomasse (ohne weitere Verarbeitung = Brutto-Aufwuchs) zeigt die folgende Tabelle.

¹⁸ Dabei wurde teilweise auf die laufenden Arbeiten zum BMU-geförderten Vorhaben *renewability* zurückgegriffen, bei dem auch Importe von Bioenergieträgern näher untersucht werden (vgl. www.renewability.de). Weiterhin wurden Daten aus Untersuchungen zum Monitoring des EEG im Bereich Bioenergie sowie eine gemeinsame Studie von IE/BFZ und Öko-Institut zum Biomethanimport aus dem Jahr 2007 verwendet.

Tabelle 1 *Brutto-Bioenergieerträge einzelner Kulturen*

Kultur	Region	Brutto-Energieertrag in GJ/ha*a	
		2005	2030
Zuckerrohr	Tropen	650	700
Palmöl	Tropen	500	660
Palmöl (degradiertes Land)	Tropen	350	462
Maissilage	Temperierte Zone	211	250
Rutenhirse	Temperierte Zone	-	200
Körnermais	Temperierte Zone	159	-
Pappel (KUP)	Temperierte Zone	-	135
Jatropha (Acker)	Tropen	-	113
Weizen	Temperierte Zone	100	-
Gras-Silage	Temperierte Zone	100	-
Rapssaat	Temperierte Zone	84	-
Jatropha (marginale Land)	Tropen	-	54

Quelle: Öko-Institut; Daten beziehen sich auf den Biomassezuwachs **ohne** weitere Verarbeitung

Die flächenbezogenen Energieerträge sind als Bruttowerte zu verstehen, d.h. es keine Aufwendungen wie Diesel für Landmaschinen, Düngemittel und Pflanzenschutzmittel bzw. die Verarbeitungsverluste abgezogen. Die Tabelle macht deutlich, dass auch in den gemäßigten Klimazonen relativ leistungsstarke Kulturen, wie der Mais, Rutenhirse und schnellwachsende Hölzer (KUP) angebaut werden können.

Neben Zuckerrohr ist der Brutto-Ertrag von Palmöl vergleichsweise hoch, bei Jatropha am geringsten geringer, sie hat als Wildpflanze aber viel Züchtungspotenzial. Der Anbau auf marginalen - insbesondere degradierten - Flächen liefert aufgrund der schlechten Bodeneigenschaften die geringsten Erträge aller betrachteten Kulturen. Mit der Bodenverbesserung werden aber die Erträge künftig ansteigen.

4.4 Treibhausbilanzen für den Anbau von Biomasse mit direkten LUC

Im Gegensatz zu Energiebilanzen (KEV) haben bei den Treibhausgasbilanzen die Landnutzungsänderungen einen großen Einfluss auf das Ergebnis und müssen entsprechend berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund werden die Werte bereits einmal hier – losgelöst von den Biomassennutzungsoptionen – vorgestellt (siehe folgende Tabelle). Dabei wurden die Emissionen einer einmaligen Landnutzungsänderung für alle Kulturen auf die Ernte von 20 Jahren (entsprechend IPCC) umgerechnet.

Die Daten zur direkten Landnutzungsänderung (dLUC) wurden dabei entsprechend der Daten in der BioNachV angesetzt und beruhen auf den in der folgenden Tabelle gezeigten Grunddaten.

Tabelle 2 Werte für THG aus direkter Landnutzungsänderung in der BioNachV

		Weizen Europa	Mais Nordamerika	Zuckerrohr trop. Latein- amerika	Zuckerrübe Europa	Rapsöl Europa	Sojaöl trop. Latein- amerika	Palmöl Südostasien
Ausgangsnutzung		Grünland	Grünland	Savanne	Grünland	Grünland	Savanne	Regenwald
C-Speicher ges.	t C/ha	70	70	134,0	70	70	134,0	265
BioM. oberirdisch	t C/ha	6,3	6,3	66,0	6,3	6,3	66,0	165
BioM. unterirdisch	t C/ha			21,0			21,0	40
Bodenspeicher	t C/ha	63,0	63,0	47,0	63,0	63,0	47,0	60
Nutzung		Acker	Acker	Acker	Acker	Acker	Acker	Plantage
C-Speicher ges.	t C/ha	55	55	55	55	55	53	110
Biomasse über- und unterir-	t C/ha							
disch	t C/ha	5	5	7,5	5	5	5	50
Bodenspeicher	t C/ha	50	50	47,5	50	50	48	60
Änderung^{a)}	t C/ha	-15	-15	-79	-15	-15	-81	-155
Annuierung	A	20	20	20	20	20	20	20
	t							
	C/(ha*a)	0,75	0,75	3,95	0,75	0,75	4,05	7,75
Ergebnis (Emission)	t CO ₂ /(ha*a)	2,75	2,75	14,5	2,75	2,75	14,8	28,4
Spezif. Flächenbedarf								
nicht alloziert	ha/GJ	0,0174	0,0131	0,0121	0,0089	0,0200	0,0607	0,0079
alloziert	ha/GJ	0,0095	0,0072	0,0107	0,0057	0,0107	0,0168	0,0038
Emission bezogen auf Biofuel								
nicht alloziert	kg CO ₂ -	47,8	36,1	175,5	24,5	54,9	901,1	223,9
alloziert ^{b)}	Äq./GJ	26,2	19,8	154,7	15,6	32,8	282,4	106,6
a) negative Werte entsprechen einem Verlust an gespeicherten Kohlenstoff								
b) Berücksichtigung der Allokation nach unterem Heizwert über die Produktionskette bis zum Endprodukt (Ethanol, FSME)								

Quelle: IFEU (2007)

Bei den nicht in der BioNachV enthaltenen Anbausystemen im Jahr 2030 wurden die Daten des Jahres 2005 angenommen. Mit den Brutto-Erträgen und den o.g. THG-Werten wurden die THG-Emissionen aus LUC in der nachfolgenden Tabelle bestimmt.

Tabelle 3 Flächenbezogene THG-Bilanzen durch direkte Landnutzungsänderungen beim Biomasse-Anbau

Kultur	vorherige Nutzung	THG-Emissionen [kg CO ₂ /(ha*a)]
Weizen	Grünland	2.630
	Acker	0
Mais	Grünland	2.630
	Acker	0
Pappel (KUP)	Grünland	1.255
	Acker	-1.375
Zuckerrohr	Savanne	14.428
	degradiertes Land	-3.722
	Acker	-55
Raps	Grünland	2.630
	Acker	0
Ölpalme	trop. Regenwald	28.417
	degradiertes Land	-13.750
Jatropha	Acker	-458
	degradiertes Land	-4.125
Rutenhirse	Grünland	1.897
	Acker	-733

Quelle: Öko-Institut; ermittelt auf Grundlage von IPCC (2006); Farbcode: hellrot = C-Freisetzung, hellgrün = Kohlenstoffbindung, ohne Farbe = CO₂-neutral

Es fällt auf, dass die meisten betrachteten Anbausysteme mit Bestandsänderungen im Bodenkohlenstoff bzw. im pflanzlich gebundenen Kohlenstoff verbunden sind. Die größten Freisetzungen entstehen durch das Roden bzw. Umbrechen natürlicher Habitate in den Tropen (tropischer Regenwald und Savanne). Aber auch in den gemäßigten Breiten wird durch Grünlandumbruch zugunsten von Energiepflanzen Kohlenstoff in Form von CO₂ freigesetzt, selbst beim Anbau von schnellwachsenden Hölzern.

Bei einem Wechsel von einer Ackerkultur zur nächsten bleibt die Kohlenstoffbilanz in der Regel neutral. Nur bei KUP und Rutenhirse (und in geringem Umfang bei Zuckerrohr) ist gegenüber der sonst üblichen Fruchtfolge eine Einbindung von Kohlenstoff zu beobachten, was auf der Wurzelbildung beruht.

4.5 Daten zur THG-Freisetzung beim Biomasse-Anbau aus indirekten Landnutzungsänderungen

Die Datengrundlage für die Einbeziehung der THG-Emissionen durch indirekten LUC beruhen auf Fritsche/Henneberg (2008), die Grunddaten der direkten LUC-Effekte nach der BioNachV (IFEU 2007) verwenden. Als konservative Basis für die Betrachtung in der vorliegenden Studie wurde **50% des theoretisch möglichen** (global durchschnittlichen) iLUC-factor gewählt, um das längerfristige Risiko von CO₂-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen abzubilden. Ergänzend wurde auch das 25%-Niveau mit angegeben, das für kurzfristige Betrachtungen gilt.

Die folgende Tabelle zeigt die entsprechend berechneten Emissionen im Vergleich zur denen aus den direkten LUC und die Summe beider Effekte.

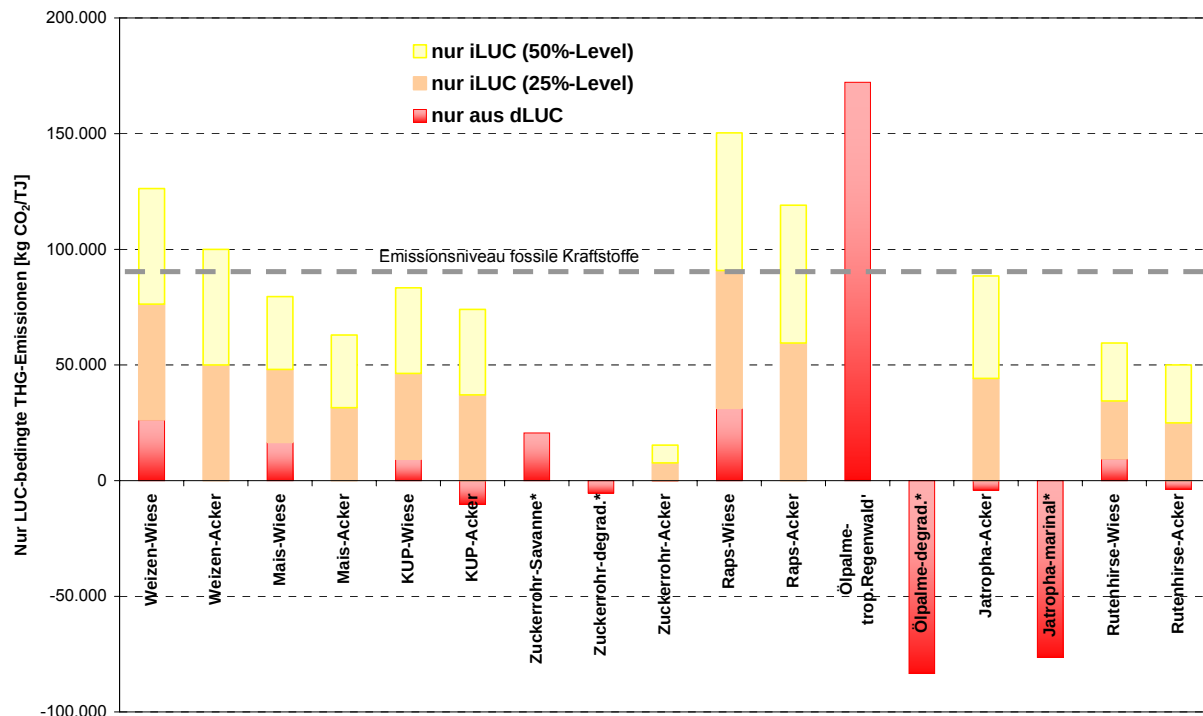
Tabelle 4 THG-Emissionen beim Biomasse-Anbau aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen

Kultur	vorherige Nutzung	nur dLUC	nur iLUC (25%)	nur iLUC (50%)	Summe LUC (25% iLUC)	Summe LUC (50% iLUC)
Weizen-Wiese	Grünland	26.299	50.000	100.000	76.299	126.299
Weizen-Acker	Acker	0	50.000	100.000	50.000	100.000
Mais-Wiese	Grünland	16.572	31.506	63.012	48.078	79.584
Mais-Acker	Acker	0	31.506	63.012	31.506	63.012
KUP-Wiese	Grünland	9.296	37.037	74.074	46.333	83.370
KUP-Acker	Acker	-10.185	37.037	74.074	26.852	63.889
Zuckerrohr-Savanne*	Savanne*	20.612	0	0	20.612	20.612
Zuckerrohr-degrad.*	degradiertes Land*	-5.317	0	0	-5.317	-5.317
Zuckerrohr-Acker	Acker	-85	7.692	15.385	7.608	15.300
Raps-Wiese	Grünland	31.309	59.524	119.048	90.832	150.356
Raps-Acker	Acker	0	59.524	119.048	59.524	119.048
Ölpalme-trop. Regenwald'	trop. Regenwald*	172.222	0	0	172.222	172.222
Ölpalme-degrad.*	degradiertes Land*	-83.333	0	0	-83.333	-83.333
Jatropha-Acker	Acker	-4.056	44.248	88.496	40.192	84.440
Jatropha-marginal*	maginales Land*	-76.389	0	0	-76.389	-76.389
Rutenhirse-Wiese	Grünland	9.483	25.000	50.000	34.483	59.483
Rutenhirse-Acker	Acker	-3.667	25.000	50.000	21.333	46.333

Quelle: eigene Berechnungen nach IFEU (2007), Fritsche/Henneberg (2008); *= keine iLUC-Effekte

Die entsprechenden Werte zeigt die folgende Abbildung nochmals in der Übersicht.

Bild 6 THG-Emissionen einzelner Kulturen aus direkten und indirekten LUC



Quelle: Öko-Institut; *= keine indirekten LUC, da keine Verdrängung von Vornutzung

Durch den iLUC-factor werden THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen allen Kulturen zugeschrieben, außer den Anbauformen auf degradiertem Land und bei Konversion von Savanne und tropischem Regenwald, da hier keine Verdrängung der Vornutzung stattfindet.

Für die Fälle der Konversion von Regenwald und Savannen ist angesichts der großen Kohlenstoffspeicherung dieser Lebensräume der Einfluss der direkten Landnutzungsänderung dominant. Für alle anderen Kulturen und Anbau-Settings dominiert der Einfluss der **indirekten** Landnutzungsänderung. Dies gilt auch für den Grünlandumbruch in den gemäßigten Breiten. Je geringer der flächenspezifische Energieertrag einer Kultur ist, desto höher wird der Einfluss der indirekten Landnutzung, denn dann ist der Flächenbedarf pro Energieeinheit besonders groß. Aus diesem Grund sind die Emissionen durch die indirekte Landnutzung unter den betrachteten Kulturen beim Rapsanbau und Jatropha-Anbau auf Ackerflächen am größten.

Es muss betont werden, dass die hier angesetzte Bandbreite des iLUC-factor vom niedrigen (25% bis mittlerem (50%) Niveau das „maximale“ 75%-Niveau („maximum level“) auslöst, das in Fritzsche/Henneberg (2008) als obere Grenze angegeben wird. Dies liegt daran, dass schon das mittlere Niveau zu vergleichsweise hohen indirekten THG-Emissionen bei fast alle biogenen Anbausystemen führt.

5 Ergebnisse zur THG-Bilanzierung bei Bioenergiesystemen

Mit der aktualisierten Datenbasis zum Anbau und den Konversionstechnologien aus der IE/DBFZ-Expertise wurden für die mit dem WBGU abgestimmten settings die THG-Bilanzen berechnet. Beziehen sich die Daten auf das Bezugsjahr 2030, ist dies mit „-30“ vermerkt, wurden Prozesse für das Jahr 2005 abgebildet, zeigt dies das Namenskürzel „-05“. Neben den herkömmlichen Lebenswegbilanzen wurden auch Emissionswerte für Landnutzungsänderungen ermittelt. In der Ergebnisdarstellung wird entsprechend zwischen folgenden Fällen unterschieden:

- **keine Landnutzungsänderung** (0LUC): Keine Landnutzungsänderung, nur Lebenszyklus-Emissionen
- **direkte Landnutzungsänderung** (dLUC): Lebenszyklus-Emissionen plus THG-Emissionen aus Landnutzungsänderungen auf der betrachteten Fläche
- inklusive **indirekter Landnutzungsänderungen** (iLUC): Lebenszyklus-Emissionen plus THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen auf der Fläche (soweit angenommen) plus THG-Emissionen aus weiteren Landnutzungsänderungen durch „verdrängte“ Vornutzung. Es ist jeweils das 25%- und das 50%-Niveau des iLUC-factor (nach Fritsche/Henneberg 2008) ausgewiesen.

5.1 THG-Emissionen konventioneller Referenz-Systeme

Mit GEMIS 4.5 wurden für den Vergleich mit den biogenen Strom- und Wärmesystemen sowie Biokraftstoffen auch solche berechnet, die auf nichterneuerbaren Energieträgern beruhen. Dabei wurden für die Bezugszeitpunkte 2005 und 2030 jeweils das nationale Erzeugungsmix sowie ein Importkohle-Kraftwerk mit Dampfturbine (ohne Wärmenutzung) und ein Erdgas-GuD-Kraftwerk (ebenfalls ohne Wärmenutzung) einbezogen.

Die folgenden Tabellen zeigen die entsprechenden Ergebnisse.

Tabelle 5 THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Stromerzeugung

Option [kg/TJ _{output}]	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Strom-Kraftwerks-05	180.117	173.518	220,9	6,3
Importkohle-KW-DT-05	301.377	283.981	645,0	12,4
Gas-GuD-05	117.989	110.973	299,2	2,4
Strom-Kraftwerks-30 (BMU)	120.696	115.028	131,1	9,3
Strom-Kraftwerks-30 (BMWi)	147.860	143.843	125,1	4,5
Importkohle-KW-DT-30	217.061	206.129	462,4	3,9
Gas-GuD-30	110.627	105.105	225,5	2,5

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; KW= Kraftwerk; DT= Dampfturbine; GuD= Gas- und Dampfturbine; BMU= Daten für 2030 aus Leitszenario (2007); BMWi= Daten für 2030 aus EWI/Prognos (2006); die Daten beinhalten Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

Bei der Wärme wurden Gas- bzw. Ölheizungen für die beiden Bezugsjahre als mögliche Referenzsysteme bilanziert.

Tabelle 6 THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Wärmebereitstellung

Option [kg/TJ _{output}]	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gas-Heizung-05	82.072	73.787	351,5	0,7
Gas-Heizung-30	77.284	70.282	295,3	0,7
Öl-Heizung-05	104.308	103.233	32,0	1,1
Öl-Heizung-30	103.245	102.429	20,2	1,2

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Daten mit Koppelprodukt-Allokation über Heizwert

Wie bei den Referenz-Stromsystemen sinken auch bei den Referenz-Wärmesystemen die THG-Emissionen leicht, wobei hier für Öl noch **nicht** die nennenswerte Nutzung **unkonventioneller** Ressourcen (ultratiefe Lager, Ölsände und -schiefer) angenommen wurde, sondern allein die absehbaren Effekte der Verschiebung von Lieferregionen, des vermehrten Einsatzes sekundärer Fördertechniken sowie der Emissionsreduktion für CH₄ (vermiedene Fackelverluste und Leckagen).

Entsprechendes gilt auch für die Referenz-Kraftstoffe, deren THG-Emissionen die folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 7 THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Kraftstoffnutzung

Option [kg/TJ _{input}]	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Diesel-05	87.905	85.692	22,6	5,7
Diesel-30	87.493	85.490	13,4	5,7
Otto-05	91.175	90.033	27,4	1,7
Otto-30	89.391	88.463	18,1	1,7
CNG-05	72.123	63.505	354,3	1,6
CNG-30	70.170	63.512	269,3	1,6

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Daten mit Koppelprodukt-Allokation über Heizwert

Da bei den Kraftstoffen nicht nur die endenergiebezogenen Emissionen bestimmt wurden (vgl. Kap. 5.4), sondern auch die **verkehrsleistungsbezogenen** Emissionen (je Fahrzeug-Kilometer, vgl. Kap. 5.4.2), zeigt die folgende Tabelle die entsprechenden Daten für die Referenz-Fahrzeuge.

Tabelle 8 Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen der Referenz-Systeme zur Kraftstoffnutzung

Option [g/Fzg-km]	CO ₂ -Äq.	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Diesel-05	201,2	198,2	0,05	0,01
Diesel-30	167,4	165,0	0,02	0,01
Otto-05	249,6	247,3	0,07	0,00
Otto-30	186,1	184,7	0,03	0,00
CNG-05	195,1	174,5	0,87	0,00

CNG-30	144,3	132,5	0,49	0,00
--------	-------	-------	------	------

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Daten mit Koppelprodukt-Allokation über Heizwert

5.2 THG-Ergebnisse für die biogene Strombereitstellung

Bei der Strombereitstellung aus biogenen Energieträgern wurde zwischen folgenden Fällen unterschieden:

- **direkte** Nutzung von Biogas aus verschiedenen Substraten zur Stromerzeugung in kleineren BHKW-Anlagen ($<0,5 \text{ MW}_{\text{el}}$), jeweils Gasmotoren und Festoxid-Brennstoffzellen
- Strom aus aufbereitetem und in Gasnetze **eingespeistem** Biomethan aus verschiedenen Substraten zur Nutzung in großen Gasmotor-BHKW-Anlagen (1 MW_{el})
- Strom aus in Gasnetze eingespeistem Biomethan aus verschiedenen Substraten zur Nutzung GuD-Heizkraftwerken ($40 \text{ MW}_{\text{el}}$); hierbei wurde auch Biomethan aus
- der Vergasung fester Biomasse einbezogen
- Strom aus fester Biomasse (Waldrestholz, Reststroh, KUP-Pappel) in Dampfturbinen-HKW (5 MW_{el}), Gasturbinen- bzw. Festoxid-Brennstoffzellen-HKW (50 bzw. 4 MW_{el} mit direkter Ankopplung an Vergasung) und zur Mitverbrennung in Kohle-Kraftwerken (10%-Anteil an $700\text{-MW}_{\text{el}}$ -Anlagen) sowie aus biogenen Ölen (Raps-, Jatropha- und Palmöl) in Dieselmotor-BHKW ($0,1 \text{ MW}_{\text{el}}$).

Der Zeitbezug der modellierten Prozesse ist für heutige Technologien das Jahr 2005 (Kürzel „-05“) und für noch in Entwicklung befindliche Technologien (Vergasung, Brennstoffzellen usw.) das Jahr 2030 (Kürzel „-30“).

Bei der Bereitstellung der jeweiligen Biomassen wurden entsprechend die beiden Bezugsjahre auch für die Vorketten verwendet, womit für den Zeithorizont 2030 Verbesserungen sowohl beim Anbau (Erträge, vgl. Tabelle 1) wie auch bei der Umwandlung (z.B. Biogasanlagen und Aufbereitung von Biogas).

Für die Anbaubiomasse wurde hinsichtlich der Landnutzungsänderungen zwischen dem Fall der Konversion von Ackerflächen („Acker“) und von Grünland („Wiese“) unterschieden und jeweils sowohl die direkten (dLUC) wie auch die potenziellen indirekten LUC-Emissionen für das 25%- und 50%-Niveau des iLUC-factor bestimmt.

Die entsprechenden Summenwerte sind ebenfalls ausgewiesen sowie die Einzelkomponenten

- 0LUC= ohne Landnutzungsänderungen
- dLUC= mit THG-Emissionen aus direkten Landnutzungsänderungen
- iLUC= mit THG-Emissionen aus indirekten Landnutzungsänderungen

Die Ergebniskomponente „ Σ iLUC25%“ zeigt beispielsweise die Summe der Lebensweg- (0LUC) plus der direkten LUC- plus der indirekten LUC-Emissionen, letztere für das 25%-Niveau des iLUC-factor.

Die folgenden Tabellen zeigen die jeweiligen Ergebnisse.

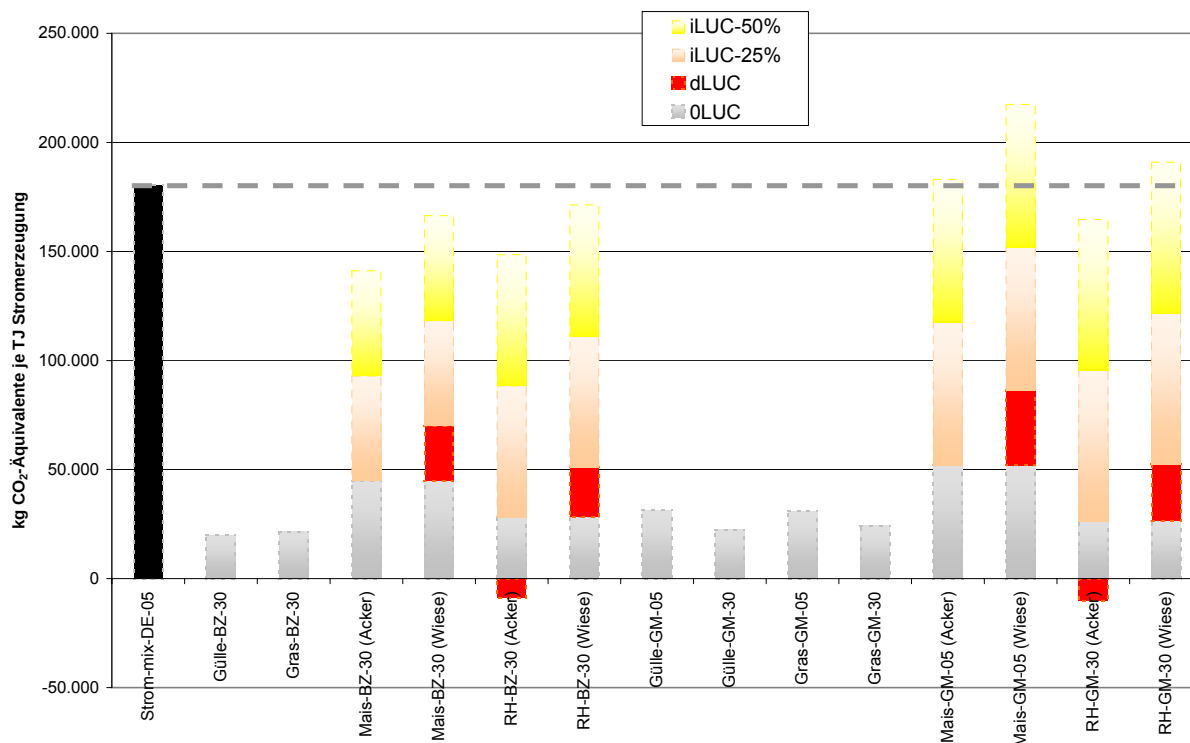
Tabelle 9 THG-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan

		inkl. iLUC				iLUC	
Option [kg/TJ _{output}]	Σ (dLUC)	Σ iLUC25%	Σ iLUC50%	0LUC	dLUC	25%	50%
direkte Biogasnutzung							
Gülle-BZ-30	19.828	19.828	19.828	19.828	0	0	0
Gras-BZ-30	21.484	21.484	21.484	21.484	0	0	0
Mais-BZ-30 (Acker)	44.838	92.953	141.068	44.838	0	48.115	96.231
Mais-BZ-30 (Wiese)	70.146	118.262	166.377	44.838	25.309	48.115	96.231
RH-BZ-30 (Acker)	19.455	79.599	139.743	28.277	-8.822	60.144	120.288
RH-BZ-30 (Wiese)	50.982	111.181	171.379	28.277	22.706	60.198	120.397
Gülle-GM-05	31.354	31.354	31.354	31.354	0	0	0
Gülle-GM-30	22.470	22.470	22.470	22.470	0	0	0
Gras-GM-05	30.812	30.812	30.812	30.812	0	0	0
Gras-GM-30	24.316	24.316	24.316	24.316	0	0	0
Mais-GM-05 (Acker)	52.044	117.513	182.982	52.044	0	65.469	130.937
Mais-GM-05 (Wiese)	86.479	151.949	217.419	52.044	34.435	65.470	130.940
RH-GM-30 (Acker)	16.291	85.427	154.562	26.432	-10.141	69.136	138.271
RH-GM-30 (Wiese)	52.532	121.730	190.928	26.432	26.100	69.198	138.396
Biomethan + Einspeisung							
Biomüll-GM-05	40.671	40.671	40.671	40.671	0	0	0
Gülle-GM-05	51.458	51.458	51.458	51.458	0	0	0
Gras-GM-05	50.962	50.962	50.962	50.962	0	0	0
Mais-GM 05 (Acker)	70.390	130.295	190.199	70.390	0	59.905	119.809
Mais-GM 05 (Wiese)	101.898	161.805	221.711	70.390	31.509	59.906	119.812
Mais-GM 30 (Acker)	46.499	95.596	144.694	46.499	0	49.097	98.195
Mais-GM 30 (Wiese)	72.324	121.422	170.519	46.499	25.825	49.097	98.195
RH-GM-30 (Acker)	20.598	81.970	143.341	29.600	-9.002	61.372	122.743
RH-GM-30 (Wiese)	52.769	114.196	175.623	29.600	23.169	61.427	122.854
Gülle-GuD-30	28.529	28.529	28.529	28.529	0	0	0
Gras-GuD-30	27.994	27.994	27.994	27.994	0	0	0
Mais-GuD-30 (Acker)	49.100	100.925	152.750	49.100	0	51.825	103.650
Mais-GuD-30 (Wiese)	76.360	128.185	180.010	49.100	27.260	51.825	103.650
RH-GuD-30 (Acker)	21.760	86.541	151.322	31.262	-9.502	64.781	129.562
RH-GuD-30 (Wiese)	55.718	120.558	185.397	31.262	24.456	64.840	129.679

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; 0LUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= nur direkte LUC; iLUC= indirekte LUC; BZ= Festoxid-Brennstoffzellen-BHKW; GM= Gasmotor-BHKW; GuD= Gas- und Dampfturbinen-HKW; RH= Rutenhirse; KUP= Kurzumtriebsanlage; GT= Gasturbinen-HKW; Daten für Biomethan enthalten Aufbereitung/Einspeisung in Gasnetze sowie Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

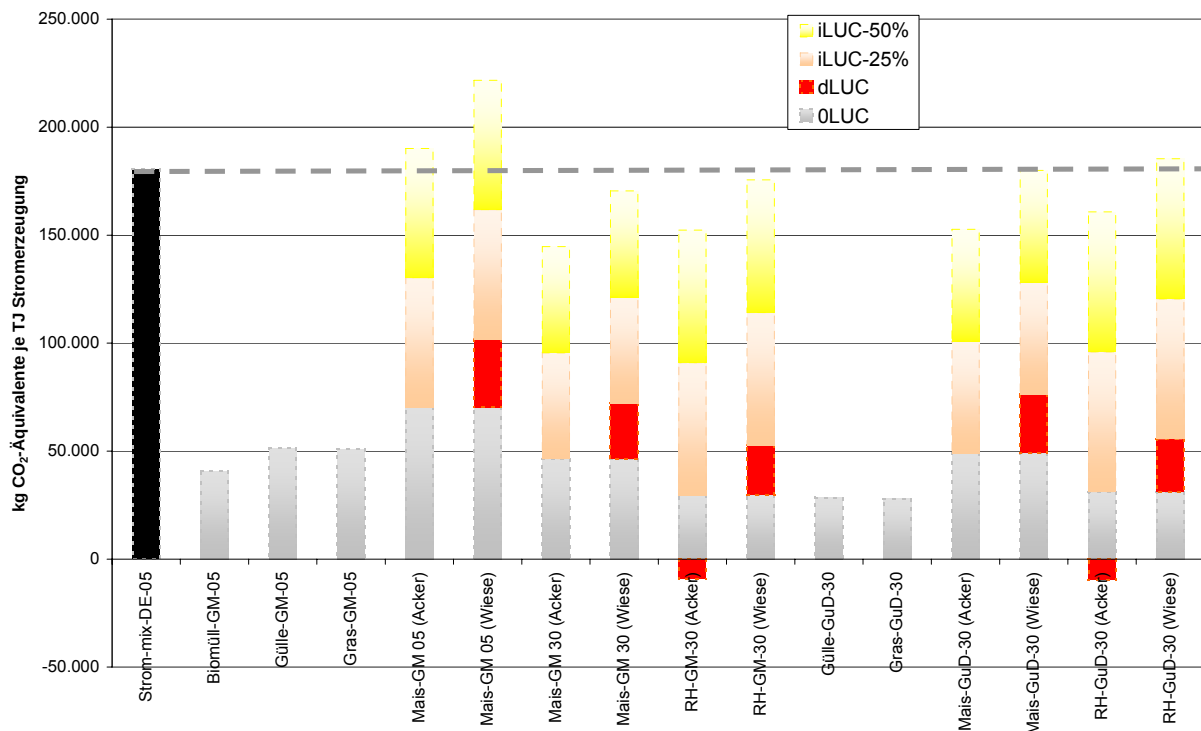
Die Verhältnisse der Emissionen zueinander sowie die Bedeutung der LUC-Effekte verdeutlichen die folgenden Grafiken.

Bild 7 THG-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas (direkte Nutzung)



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorstehende Tabelle

Bild 8 THG-Emissionen der Stromerzeugung aus Biomethan (Einspeisung)

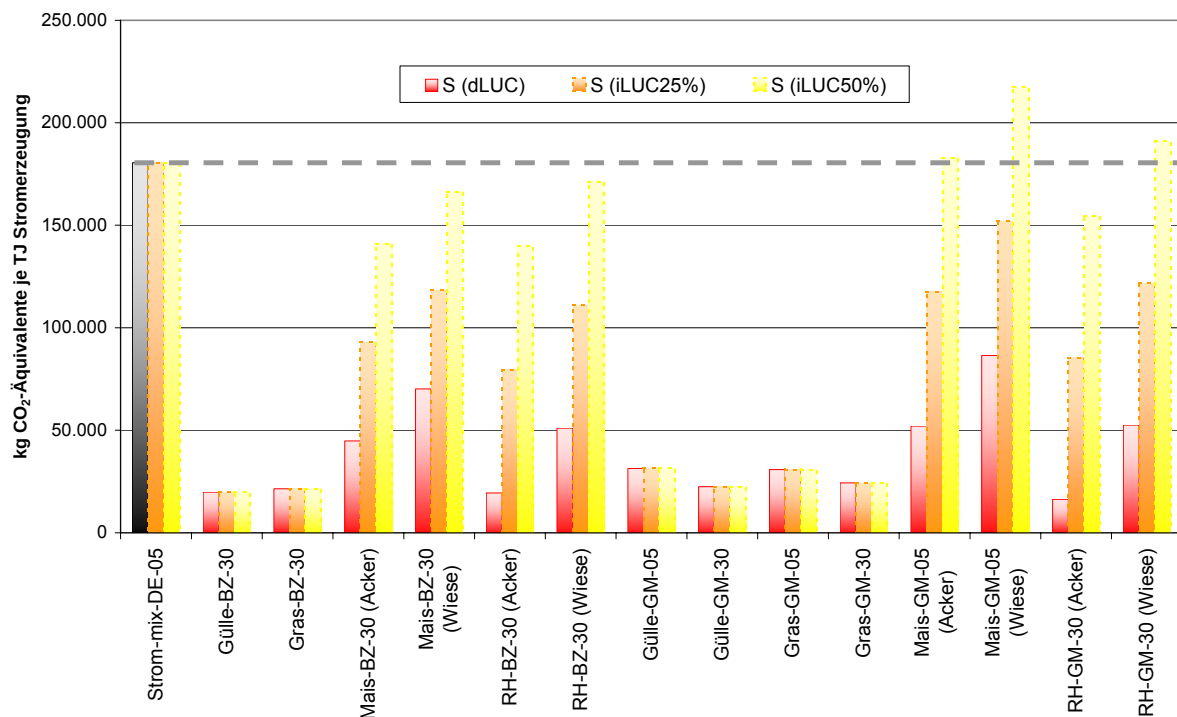


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorstehende Tabelle

Die obigen Abbildungen zeigen die disaggregierten Anteile der THG-Bilanz, durch die z.T. negativen Anteile bei den direkten LUC-Effekten sind die Balkenhöhen aber nicht direkt vergleichbar.

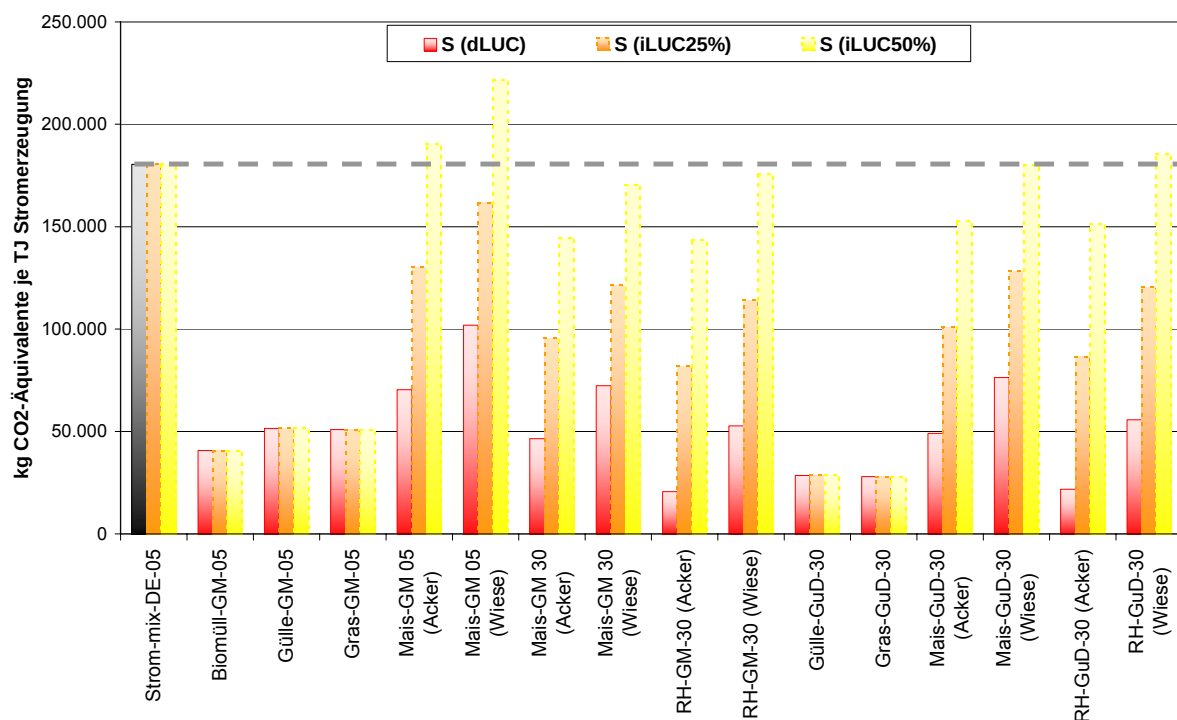
Daher zeigen die folgenden Grafiken die jeweils **kumulierten Summenwerte** für dLUC, iLUC-25% und iLUC50%.

Bild 9 Kumulierte THG-Emissionen für Strom aus Biogas (direkte Nutzung)



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorstehende Tabelle

Bild 10 Kumulierte THG-Emissionen für Strom aus Biomethan (Einspeisung)



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorstehende Tabelle

Bei Berücksichtigung **nur** der direkten LUC-Effekte erzielen **alle** Biogas- und Biome-
than-Systeme deutliche Einsparungen gegenüber der Referenz, und auch bei Einbe-
ziehung der indirekten Effekte auf dem 25%-iLUC-Niveau trifft dies noch zu.

Wird jedoch das 50%-iLUC-Niveau angenommen, erzielen nur Systeme mit Abfall-
und Reststoffen nennenswerte THG-Reduktionen, während selbst hocheffiziente BZ-
und GuD-Systeme für Mais und Rutenhirse von Ackerflächen nur noch leichte Einspa-
rungen gegenüber dem Emissionsniveau des Strommixes im Jahr 2005 erreichen.

Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Ergebnisse für Strom aus festen und
flüssigen Bioenergieträgern.

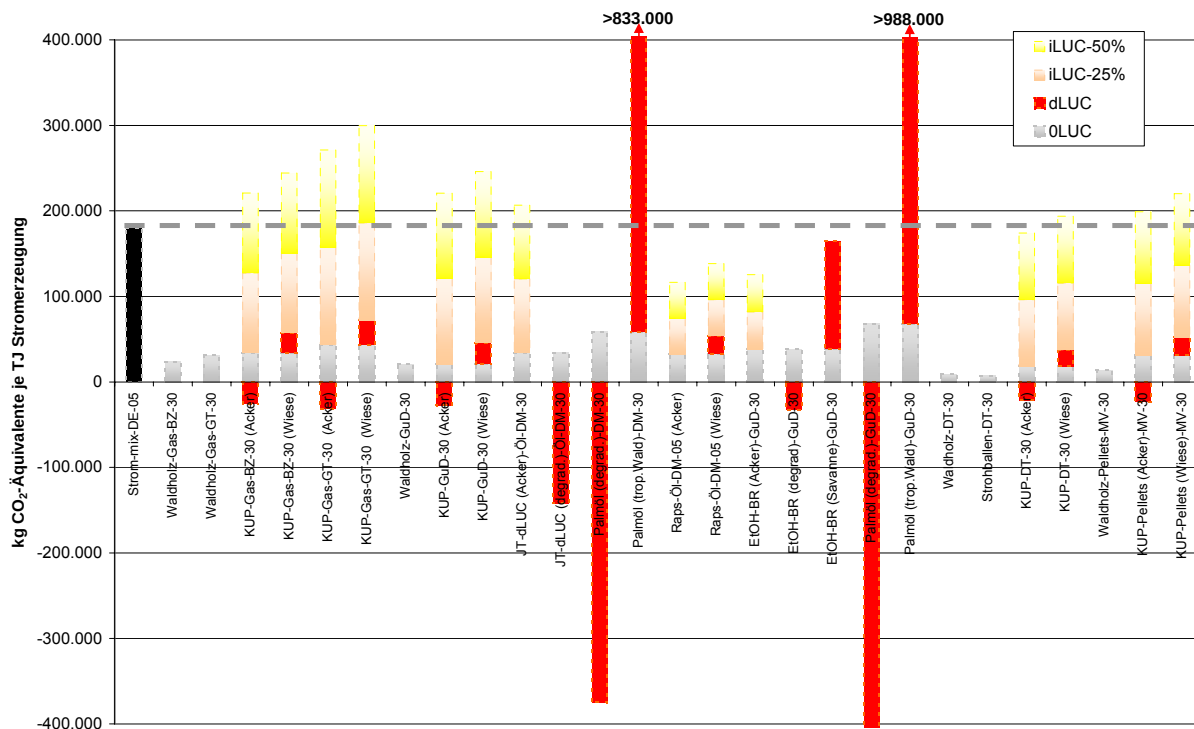
Tabelle 10 THG-Emissionen der Stromerzeugung aus festen und flüssigen Bio-
energieträgern

Option [kg/TJ _{output}]	Σ (dLUC)	inkl. iLUC		0LUC	dLUC	iLUC	
		Σ iLUC25%	Σ iLUC50%			25%	50%
Waldholz-Gas-BZ-30	23.757	23.757	23.757	23.757	0	0	0
Waldholz-Gas-GT-30	30.926	30.926	30.926	30.926	0	0	0
KUP-Gas-BZ-30 (Acker)	8.580	101.900	195.220	34.243	-25.663	93.320	186.640
KUP-Gas-BZ-30 (Wiese)	57.675	150.990	244.306	34.243	23.433	93.315	186.630
KUP-Gas-GT-30 (Acker)	12.432	126.149	239.867	43.703	-31.272	113.718	227.435
KUP-Gas-GT-30 (Wiese)	72.258	185.970	299.681	43.703	28.555	113.711	227.423
Waldholz-GuD-30	20.983	20.983	20.983	20.983	0	0	0
KUP-GuD-30 (Acker)	-6.496	93.428	193.353	20.983	-27.479	99.924	199.849
KUP-GuD-30 (Wiese)	46.074	145.993	245.912	20.983	25.091	99.919	199.838
JT-dLUC (Acker)-Öl-DM-30	34.276	120.530	206.783	34.276	0	86.253	172.507
JT-dLUC (degrad.)-Öl-DM-30	-107.731	-107.731	-107.731	34.276	-142.007	0	0
Palmöl (degrad.)-DM-30	-316.343	-316.343	-316.343	58.524	-374.867	0	0
Palmöl (trop.Wald)-DM-30	833.252	833.252	833.252	58.524	774.728	0	0
Raps-Öl-DM-05 (Acker)	32.111	74.221	116.331	32.111	0	42.110	84.220
Raps-Öl-DM-05 (Wiese)	54.254	96.367	138.480	32.111	22.143	42.113	84.226
EtOH-BR (Acker)-GuD-30	38.680	82.009	125.338	38.680	0	43.329	86.658
EtOH-BR (degrad.)-GuD-30	6.248	6.248	6.248	38.680	-32.432	0	0
EtOH-BR (Savanne)-GuD-30	164.406	164.406	164.406	38.680	125.726	0	0
Palmöl (degrad.)-GuD-30	-376.858	-376.858	-376.858	68.297	-445.155	0	0
Palmöl (trop.Wald)-GuD-30	988.286	988.286	988.286	68.297	919.989	0	0
Waldholz-DT-30	9.430	9.430	9.430	9.430	0	0	0
Strohballen-DT-30	7.155	7.155	7.155	7.155	0	0	0
KUP-DT-30 (Acker)	-3.309	74.703	152.714	18.144	-21.453	78.012	156.023
KUP-DT-30 (Wiese)	37.733	115.740	193.747	18.144	19.589	78.007	156.015
Waldholz-Pellets-MV-30	13.742	13.742	13.742	13.742	0	0	0
KUP-Pellets (Acker)-MV-30	8.024	91.999	175.975	31.150	-23.126	83.976	167.951
KUP-Pellets (Wiese)-MV-30	52.203	136.174	220.145	31.150	21.053	83.971	167.942

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; 0LUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= direkte
LUC; iLUC= indirekte LUC; JT= Jatropha (in Indien = IN); DM= Dieselmotor-BHKW; ID=
Indonesien; DT= Dampfturbinen-HKW; KUP= Kurzumtriebsplantage; MV= Mitverbrennung
in Kohle-Kraftwerk; Daten inkl. Koppelprodukt-Allokation über Heizwert (auch in Vorketten)

Die Verhältnisse der Emissionen zueinander sowie die Bedeutung der LUC-Effekte verdeutlicht die folgende Grafik.

Bild 11 *THG-Emissionen der Stromerzeugung aus festen und flüssigen Bioenergieträgern*

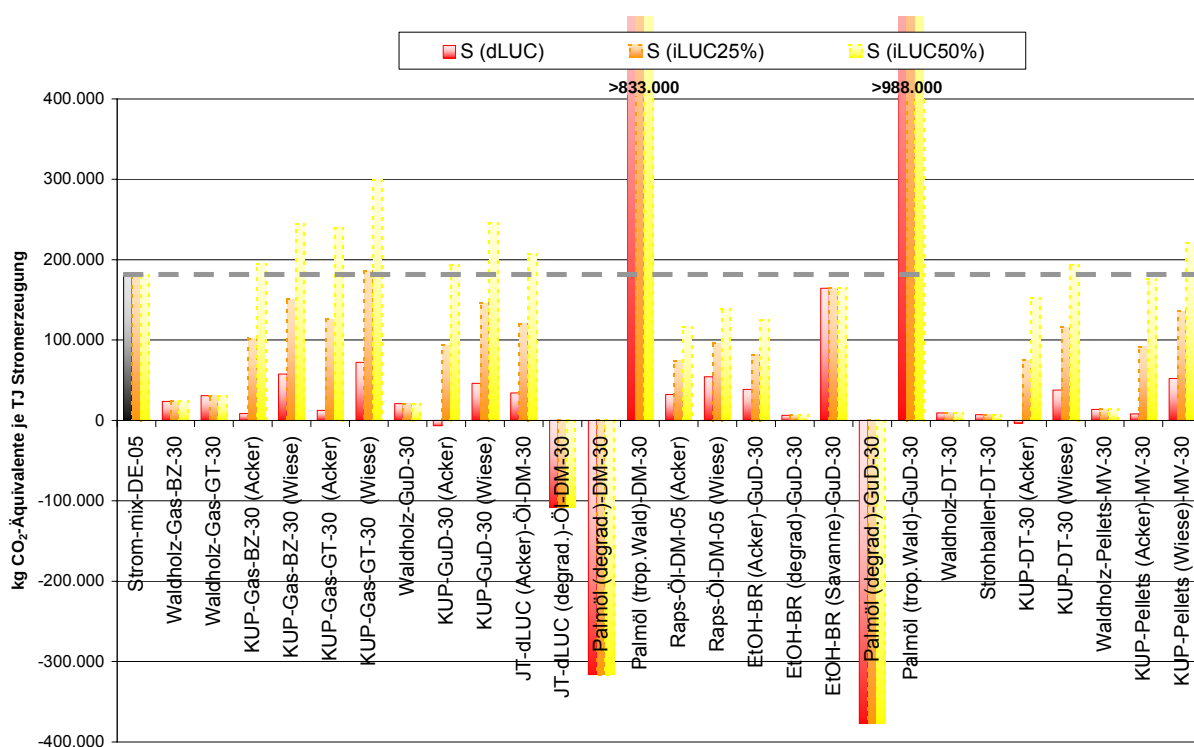


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Die obige Abbildung zeigt die disaggregierten Anteile der THG-Bilanz, durch die z.T. negativen Anteile bei den direkten LUC-Effekten sind die Balkenhöhen aber nicht direkt vergleichbar.

Daher zeigen die folgende Grafik die jeweils **kumulierten Summenwerte** für dLUC, iLUC-25% und iLUC50%.

Bild 12 Kumulierte THG-Emissionen der Stromerzeugung aus festen und flüssigen Bioenergieträgern



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorstehende Tabelle

Bei Berücksichtigung **nur** der direkten LUC-Effekte erzielen **alle** festen und flüssigen Bioenergieträger mit Ausnahme des Palmöls von tropischen Regenwaldflächen deutliche Einsparungen gegenüber der Referenz, mit drastischen Einspareffekten für die Anbausysteme auf degradierten Flächen. Dies gilt auch bei Einbeziehung der indirekten Effekte auf dem 25%-iLUC-Niveau – wie bei Biogas und Biomethan.

Wird das 50%-iLUC-Niveau angenommen, so können neben den Systemen mit Abfall- und Reststoffen und Anbau auf degradierten Flächen auch Rapsöl-BHKW, KUP-DT-HKW und KUP-Pellets zur Mitverbrennung (jeweils von Ackerflächen) noch geringe Reduktionen gegenüber dem Emissionsniveau des Strommixes im Jahr 2005 erreichen, bei Konversion von Grünland trifft dies nicht mehr zu.

Die Ergebnisse zeigen auch die besondere Bedeutung der LUC-Daten bei Jatropha und Palmöl: werden sie auf **degradierten** Flächen angebaut, haben sie die **günstigsten** THG-Bilanzen **aller** betrachteten Systeme. Umgekehrt haben sie bei Konversion von Acker (bei Jatropha) bzw. tropischem Regenwald (bei Palm) für die jeweiligen Anbauflächen die **schlechteste** THG-Bilanz.

5.3 THG-Ergebnisse für die biogene Wärmebereitstellung

Bei der Wärmebereitstellung aus biogenen Energieträgern wurde zwischen folgenden Fällen unterschieden:

- Nutzung von aus biogenen Abfall- und Reststoffen (Sägewerksnebenprodukte, Reststroh) hergestellten Pellets sowie solchen, die aus Kurzumtriebsholz und Rutenhirse hergestellt wurden, und Nutzung dieser Pellets in dezentralen Heizsystemen (15 kW_{th})
- Vergasung von Kurzumtriebsholz und Restholz in zirkulierender Wirbelschicht und anschließende direkte Nutzung des Produktgases in Festoxid-Brennstoffzellen- (4 MW_{el}) bzw. Gasturbinen-HKW (50 MW_{el})
- direkte Nutzung von KUP- und Restholz sowie Reststroh in DT-HKW (5 MW_{el})

Die folgenden Tabellen zeigen die jeweiligen Ergebnisse.

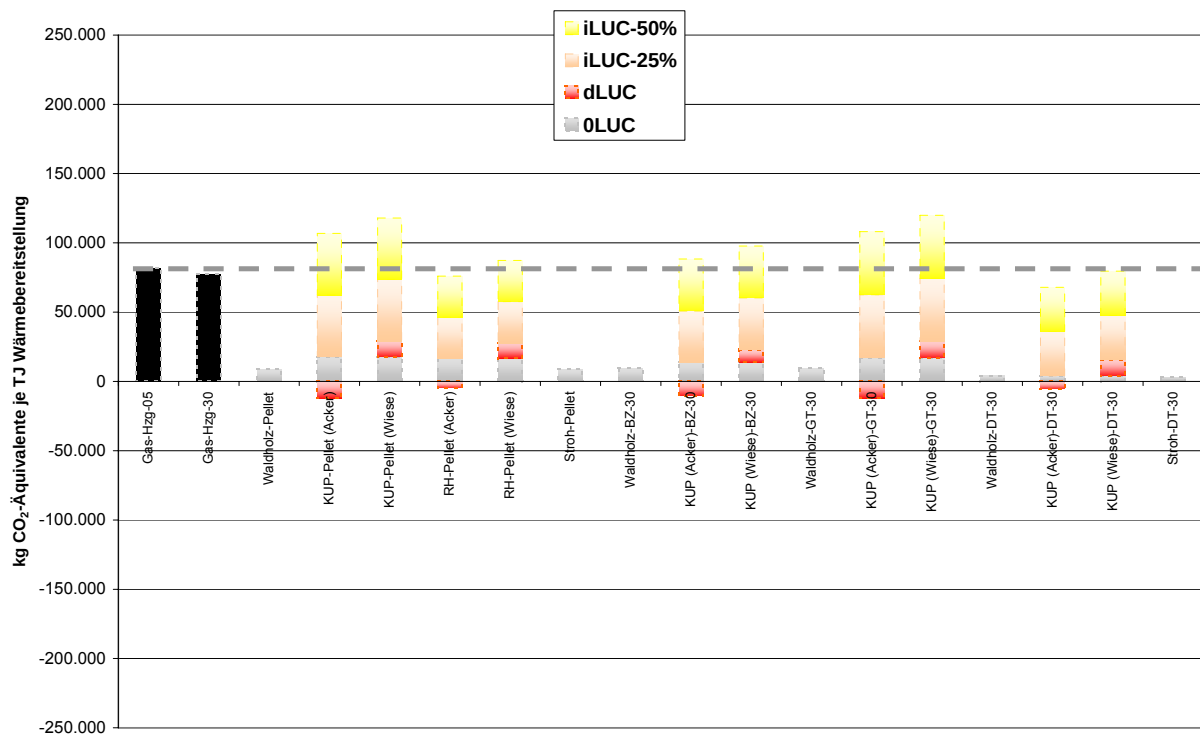
Tabelle 11 THG-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Bioenergieträgern

Option [kg/TJ _{output}]	Σ (dLUC)	inkl. iLUC		0LUC	dLUC	iLUC	
		Σ iLUC25%	Σ iLUC50%			25%	50%
Gas-Hzg-05	82.072	82.072	82.072	82.072	0	0	0
Gas-Hzg-30	77.284	77.284	77.284	77.284	0	0	0
Waldholz-Pellet	8.750	8.750	8.750	8.750	0	0	0
KUP-Pellet (Acker)	5.728	50.186	94.643	17.954	-12.226	44.458	88.915
KUP-Pellet (Wiese)	29.117	73.572	118.027	17.954	11.163	44.455	88.910
RH-Pellet (Acker)	12.298	42.007	71.716	16.654	-4.356	29.709	59.418
RH-Pellet (Wiese)	27.872	57.607	87.343	16.654	11.217	29.736	59.471
Stroh-Pellet	8.750	8.750	8.750	8.750	0	0	0
Waldholz-BZ-30	9.455	9.455	9.455	9.455	0	0	0
KUP (Acker)-BZ-30	3.432	40.760	78.088	13.697	-10.265	37.328	74.656
KUP (Wiese)-BZ-30	23.070	60.396	97.722	13.697	9.373	37.326	74.652
Waldholz-GT-30	9.455	9.455	9.455	9.455	0	0	0
KUP (Acker)-GT-30	4.973	50.460	95.947	17.201	-12.228	45.487	90.974
KUP (Wiese)-GT-30	28.903	74.388	119.872	17.201	11.702	45.485	90.969
Waldholz-DT-30	4.047	4.047	4.047	4.047	0	0	0
KUP (Acker)-DT-30	-1.170	30.807	62.783	4.047	-5.217	31.976	63.953
KUP (Wiese)-DT-30	15.655	47.628	79.602	4.047	11.607	31.974	63.947
Stroh-DT-30	3.144	3.144	3.144	3.144	0	0	0

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; 0LUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= direkte LUC; iLUC= indirekte LUC; KUP= Kurzumtriebsanlage; RH= Rutenhirse; BZ= Festoxid-Brennstoffzellen-BHKW; GT= Gasturbinen-HKW; DT= Dampfturbinen-HKW; Daten inkl. Koppelprodukt-Allokation über Heizwert (auch in Vorketten)

Die Verhältnisse der Emissionen zueinander sowie die Bedeutung der LUC-Effekte verdeutlicht die folgende Grafik.

Bild 13 THG-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Biomasse

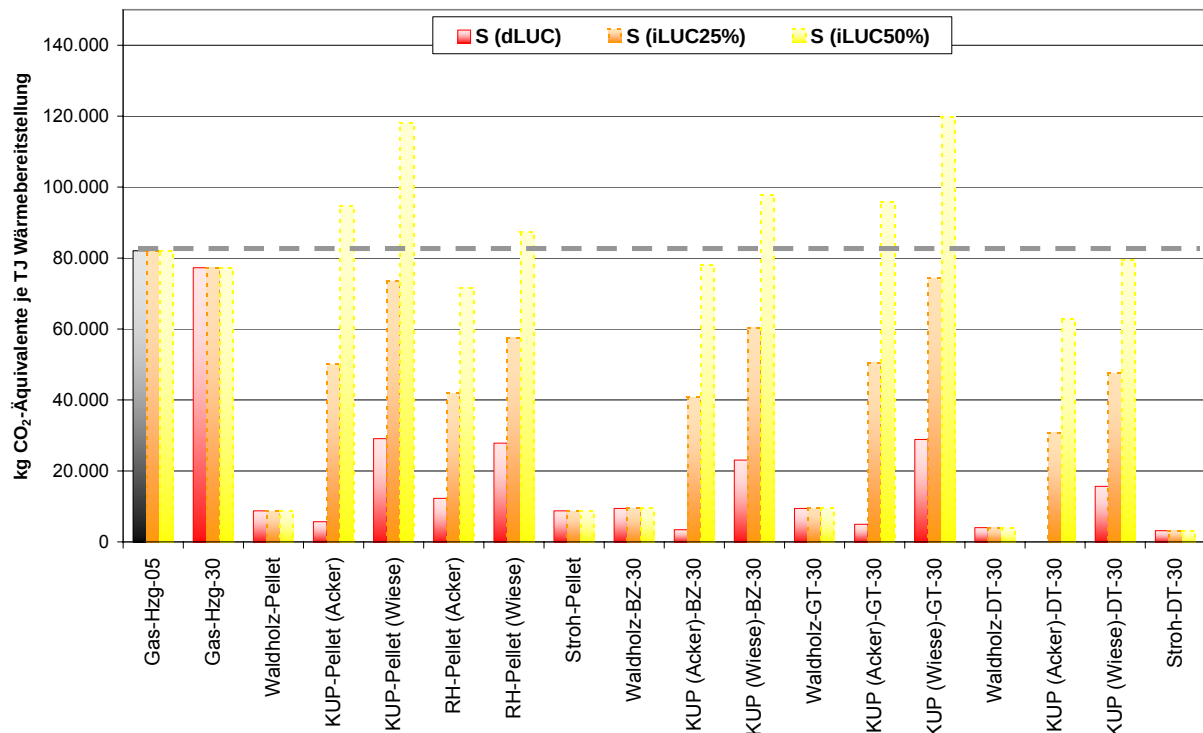


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Die obige Abbildung zeigt die disaggregierten Anteile der THG-Bilanz, durch die z.T. negativen Anteile bei den direkten LUC-Effekten sind die Balkenhöhen aber nicht direkt vergleichbar.

Daher zeigen die folgende Grafik die jeweils **kumulierten Summenwerte** für dLUC, iLUC-25% und iLUC50%.

Bild 14 Kumulierte THG-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Biomasse



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Bei Berücksichtigung **nur** der direkten LUC-Effekte erzielen **alle** Bioheizsysteme Einsparungen gegenüber der Referenz (Gasheizung). Dies gilt auch bei Einbeziehung der indirekten Effekte auf dem 25%-iLUC-Niveau – mit Ausnahme der KUP-Pellets-Heizung und GT-HKW, wenn die Anbauflächen vorher Grünland waren.

Wird das 50%-iLUC-Niveau angenommen, so können außer den Systemen mit Abfall- und Reststoffnutzung **keine** der betrachteten biogenen Heizsysteme Reduktionen gegenüber dem Emissionsniveau von Gasheizungen erreichen – fast alle liegen dann höher, nur die Rutenhirse-Pellet-Systeme und das KUP-DT-HKW für Anbau auf Ackerflächen minimal darunter.

5.4 THG-Ergebnisse für die Nutzung biogener Kraftstoffe

Bei der Bilanzierung der THG-Emissionen bei der Nutzung biogener Kraftstoffe wurde zwischen folgenden Fällen für Pkw unterschieden¹⁹:

- Dieselmotor-Pkw für Pflanzenöle und Biodiesel (Methylester) sowie BtL aus verschiedenen Rohstoffen und Konversionsrouten inklusive Importen aus Indonesien und Indien (mit entsprechenden Transportvorleistungen)
- Ottomotor-Pkw für Ethanol aus verschiedenen Rohstoffen und Konversionsrouten inklusive Importen aus Brasilien (mit entsprechenden Transportvorleistungen)
- Ottomotor-Pkw für Biomethan aus verschiedenen Substraten jeweils inklusive Gasaufbereitung und Einspeisung in Gasnetze sowie Komprimierung zu BioCNG
- Brennstoffzellen-Pkw für biogenen GH_2 aus verschiedenen Substraten inklusive Gasaufbereitung und Komprimierung
- Elektromotor-Pkw für Strom aus Biomasse (inkl. Stromverteilung bis Pkw).

Die Vergleichbarkeit dieser Bilanzen mit denen für die biogene Strom- bzw. Wärmebereitstellung wird durch die unterschiedliche Systemgrenzen erschwert:

- Der direkte Vergleich über eine jeweils genutzte Einheit Endenergie an Strom, Wärme und Kraftstoff ist formal korrekt, ignoriert aber die Unterschiede im spezifischen Endenergiebedarf je „Verkehrsnutzen“ zwischen Pkw mit unterschiedlichen Antrieben.
- Daher wurden als zweite Vergleichsgröße auch die THG-Bilanzen je Einheit „Verkehrsnutzen“, ausgedrückt in Fahrzeug-Kilometer (Fzg-km), berechnet. Der Vorteil dieser Kenngröße ist, dass die Unterschiede zwischen den Pkw-Antriebskonzepten sichtbar werden, jedoch ein direkter Vergleich mit Strom bzw. Wärme nicht mehr möglich ist²⁰.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die THG-Bilanzen von Bioenergie im Verkehrssektor somit zweimal darstellt - einmal je TJ genutztem Kraftstoff (Kap. 5.4.1) und einmal je bereitgestelltem Fahrzeug-Kilometer (Kap. 5.4.2).

¹⁹ Bei allen Pkw wurden die Biokraftstoffe spezifisch mit 1 TJ Endenergie bilanziert, womit **keine Unterschiede** bei der Umwandlung in Antriebsenergie einbezogen wurden. Die Bilanzierung von Strom für Elektro-Pkw wurde die biogene Stromerzeugung (vgl. Abschnitt 5.2) zzgl. 5% Transmissions- und Umspannverluste berücksichtigt.

²⁰ Um die direkte Vergleichbarkeit für alle drei Nutzungsformen von Bioenergie herzustellen, wurde auch ein „Triplet“-Vergleich mit in diese Studie aufgenommen (siehe Kap. 5.5).

5.4.1 Endenergiebezogene THG-Ergebnisse für biogene Kraftstoffe

Die folgenden Tabellen und Grafiken zeigen die Ergebnisse je genutzter Einheit **Endenergie** - die Biokraftstoffe bzw. biogener Antriebsstrom werden dabei in den Fahrzeugen genutzt (i.d.R. verbrannt), um den Vergleich mit den fossilen Kraftstoffen zu erlauben.

Es sei nochmals betont, dass diese Ergebnisse nicht die Unterschiede im spezifischen Endenergiebedarf je „Verkehrsnutzen“ zwischen Pkw mit unterschiedlichen Antrieben reflektieren (siehe dazu Kap. 5.4.2).

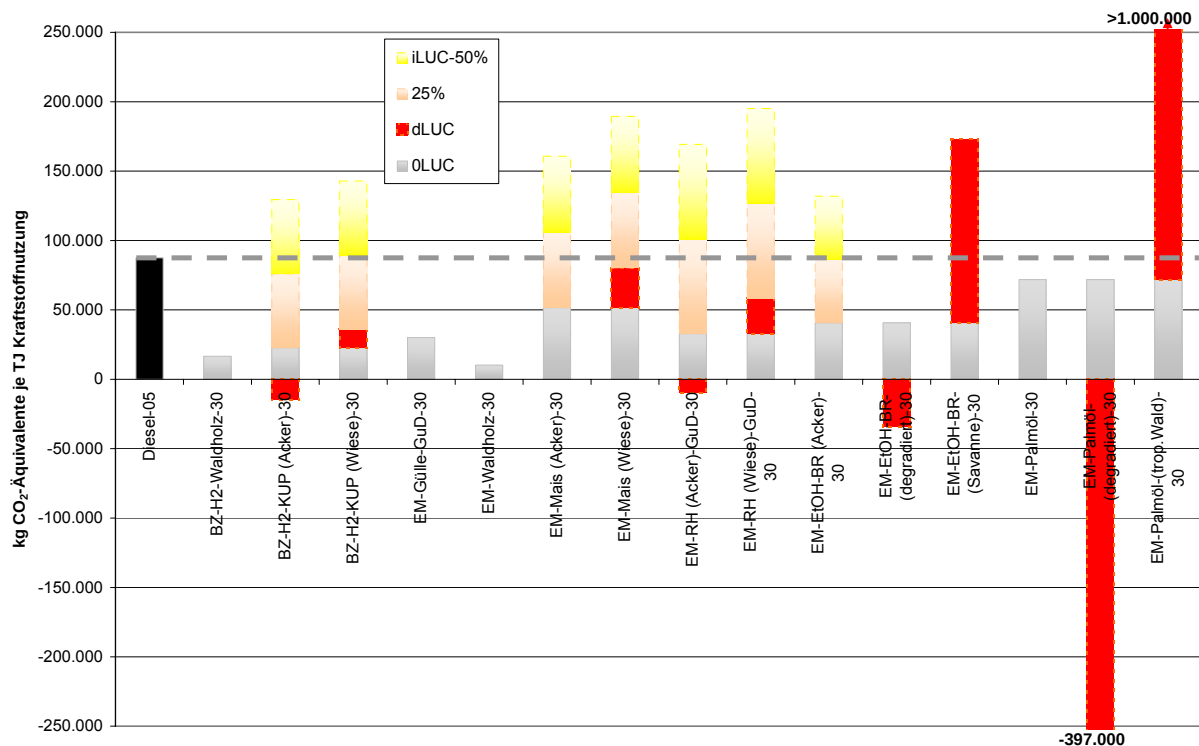
Tabelle 12 *Endenergiebezogene THG-Emissionen für Biodiesel sowie BioGH₂ und biogenem Fahrstrom*

	Σ (dLUC)	inkl. iLUC		0LUC	dLUC	iLUC	
		Σ iLUC25%	Σ iLUC50%			25%	50%
Diesel-05	87.493	87.493	87.493	87.493	0	0	0
AME-05	9.800	9.800	9.800	9.800	0	0	0
Rapsöl (Acker)-05	22.524	51.328	80.131	22.524	0	28.803	57.607
Rapsöl (Wiese)-05	37.670	66.475	95.280	22.524	15.146	28.805	57.610
RME (Acker)-05	27.770	55.541	83.313	27.770	0	27.772	55.543
RME (Wiese)-05	42.478	70.182	97.885	27.770	14.709	27.704	55.407
PME (degradiert)-30	-201.766	-201.766	-201.766	44.875	-246.641	0	0
PME (trop.Wald)-30	254.875	254.875	254.875	44.875	210.000	0	0
JME (Acker)-30	34.292	88.235	142.179	34.292	0	53.943	107.887
JME (marginal)-30	-63.968	-63.968	-63.968	34.292	-98.260	0	0
BtL-Stroh-30	6.525	6.525	6.525	6.525	0	0	0
BtL-Waldholz-30	8.596	8.596	8.596	8.596	0	0	0
BtL-KUP (Acker)-30	-2.297	64.652	131.601	16.114	-18.411	66.949	133.898
BtL-KUP (Wiese)-30	32.925	99.870	166.816	16.114	16.811	66.945	133.891
BZ-H2-Waldholz-30	16.625	16.625	16.625	16.625	0	0	0
BZ-H2-KUP (Acker)-30	7.921	61.365	114.810	22.618	-14.697	53.444	106.889
BZ-H2-KUP (Wiese)-30	36.142	89.531	142.921	22.618	13.524	53.390	106.779
EM-Gülle-GuD-30	30.037	30.037	30.037	30.037	0	0	0
EM-Waldholz-30	10.277	10.277	10.277	10.277	0	0	0
EM-Mais (Acker)-30	51.692	106.245	160.798	51.692	0	54.553	109.105
EM-Mais (Wiese)-30	80.387	134.940	189.492	51.692	28.695	54.553	109.105
EM-RH (Acker)-GuD-30	22.914	91.104	159.295	32.916	-10.002	68.191	136.382
EM-RH (Wiese)-GuD-30	58.659	126.911	195.164	32.916	25.743	68.252	136.504
EM-EtOH-BR (Acker)-30	40.716	86.325	131.935	40.716	0	45.609	91.219
EM-EtOH-BR-(degradiert)-30	6.577	6.577	6.577	40.716	-34.139	0	0
EM-EtOH-BR-(Savanne)-30	173.059	173.059	173.059	40.716	132.343	0	0
EM-Palmöl-30	71.891	71.891	71.891	71.891	0	0	0
EM-Palmöl-(degradiert)-30	-396.693	-396.693	-396.693	71.891	-468.584	0	0
EM-Palmöl-(trop.Wald)-30	1.040.301	1.040.301	1.040.301	71.891	968.410	0	0

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; 0LUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= direkte LUC; iLUC= indirekte LUC; AME= Altfett-Methylester; RME= Rapsölmethylester; PME= Palmölmethylester; JME= Jatrophaölmethylester; BtL= biomass-to-liquid; EM= Elektromobil; GuD= Gas- und Dampfturbinen-HKW; Daten inkl. Koppel-Allokation über Heizwert

Die Verhältnisse der Emissionen zueinander sowie die Bedeutung der LUC-Effekte verdeutlicht die folgende Grafik.

Bild 15 Endenergiebezogene THG-Emissionen für Biodiesel sowie BioGH₂ und biogenem Strom

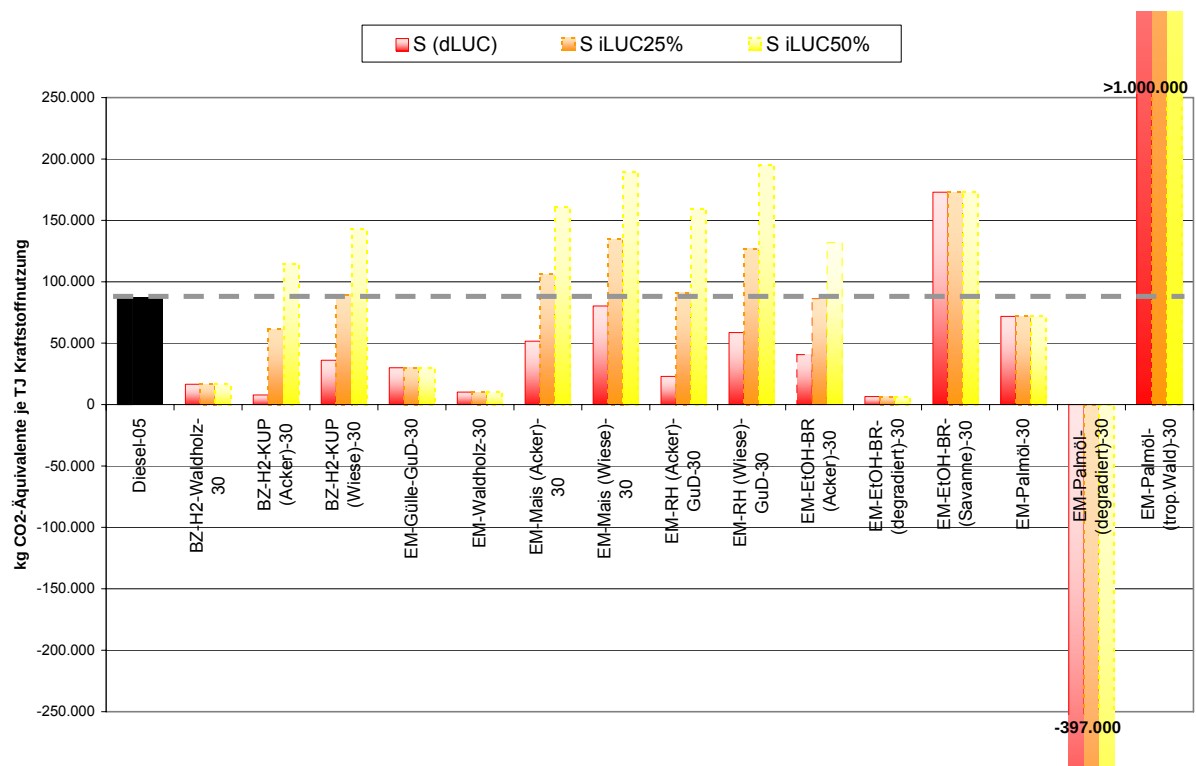


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Die obige Abbildung zeigt die disaggregierten Anteile der THG-Bilanz, durch die z.T. negativen Anteile bei den direkten LUC-Effekten sind die Balkenhöhen aber nicht direkt vergleichbar.

Daher zeigen die folgende Grafik die jeweils **kumulierten Summenwerte** für dLUC, iLUC-25% und iLUC50%.

Bild 16 Kumulierte endenergiebezogene THG-Emissionen für Biodiesel sowie BioGH₂ und biogenem Strom



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Wie bei den Stromsystemen mit biogenen Ölen tritt auch bei den Pkw mit bioöl-stämmigen Kraftstoffen die besondere Situation bei PME und JME auf, die je nach Annahme zur direkten LUC die höchsten oder geringsten THG-Emissionen aufweisen.

Interessant im Vergleich ist, dass BtL-Kraftstoffe geringere THG-Emissionen zeigen als Elektromotor-Pkw, deren Strom aus GuD-HKW für Biomethan aus Rutenhirse kommt.

Demgegenüber schneiden BZ-Fahrzeuge mit BioGH₂ aus KUP-Holz nochmals günstiger ab.

Die folgenden Bilanzen zeigen die Ergebnisse für Pkw mit Ottomotoren.

Tabelle 13 Endenergiebezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG

	Σ (dLUC)	inkl. iLUC		0LUC	dLUC	iLUC	
		Σ iLUC25%	Σ iLUC50%			25%	50%
Benzin-05	89.391	89.391	89.391	89.391	0	0	0
EtOH-ligno-Stroh-30	14.253	14.253	14.253	14.253	0	0	0
EtOH-BR (Acker)-05	26.184	59.217	92.250	26.549	-365	33.033	66.065

EtOH-BR (Acker)-30	22.148	47.244	72.340	22.425	-278	25.096	50.192
EtOH-BR (degrad.)-30	3.745	3.745	3.745	22.425	-18.681	0	0
EtOH-BR (Savanne)-30	94.844	94.844	94.844	22.425	72.418	0	0
EtOH-Mais (Acker)-05	40.648	48.584	56.521	40.648	0	7.937	15.874
EtOH-Mais (Wiese)-05	56.521	78.763	101.004	40.648	15.874	22.241	44.483
EtOH-Weizen (Acker)-05	46.163	97.280	148.397	46.163	0	51.117	102.234
EtOH-Weizen (Wiese)-05	73.051	124.167	175.283	46.163	26.887	51.116	102.233
CNG-05	70.170	70.170	70.170	70.170	0	0	0
BioCNG-Biomüll-05	34.308	34.308	34.308	34.308	0	0	0
BioCNG-Biomüll-30	16.082	16.082	16.082	16.082	0	0	0
BioCNG-Gülle-05	40.866	40.866	40.866	40.866	0	0	0
BioCNG-Gülle-30	23.119	23.119	23.119	23.119	0	0	0
BioCNG-Gras-Silage-05	40.565	40.565	40.565	40.565	0	0	0
BioCNG-Gras-Silage-30	22.810	22.810	22.810	22.810	0	0	0
BioCNG-Mais (Acker)-05	52.377	88.799	125.221	52.377	0	36.422	72.844
BioCNG-Mais (Wiese)-05	71.534	107.957	144.380	52.377	19.157	36.423	72.846
BioCNG-Mais (Acker)-30	34.968	64.819	94.670	34.968	0	29.851	59.702
BioCNG-Mais (Wiese)-30	50.669	80.520	110.372	34.968	15.702	29.851	59.702
BioCNG-Waldholz-30	12.318	12.318	12.318	12.318	0	0	0
BioCNG-RH (Acker)-30	19.220	56.534	93.848	24.693	-5.473	37.314	74.628
BioCNG-RH (Wiese)-30	38.780	76.127	113.475	24.693	14.087	37.348	74.695
BioCNG-KUP (Acker)-30	2.944	60.501	118.057	18.772	-15.828	57.556	115.113
BioCNG-KUP (Wiese)-30	33.224	90.778	148.331	18.772	14.452	57.553	115.107

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; 0LUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= direkte LUC; iLUC= indirekte LUC; BR= Brasilien; CNG= compressed natural gas; RH= Rutenhirse; KUP= Kurzumtriebsplantage; Daten inkl. Koppelprodukt-Allokation über Heizwert (auch in Vorketten)

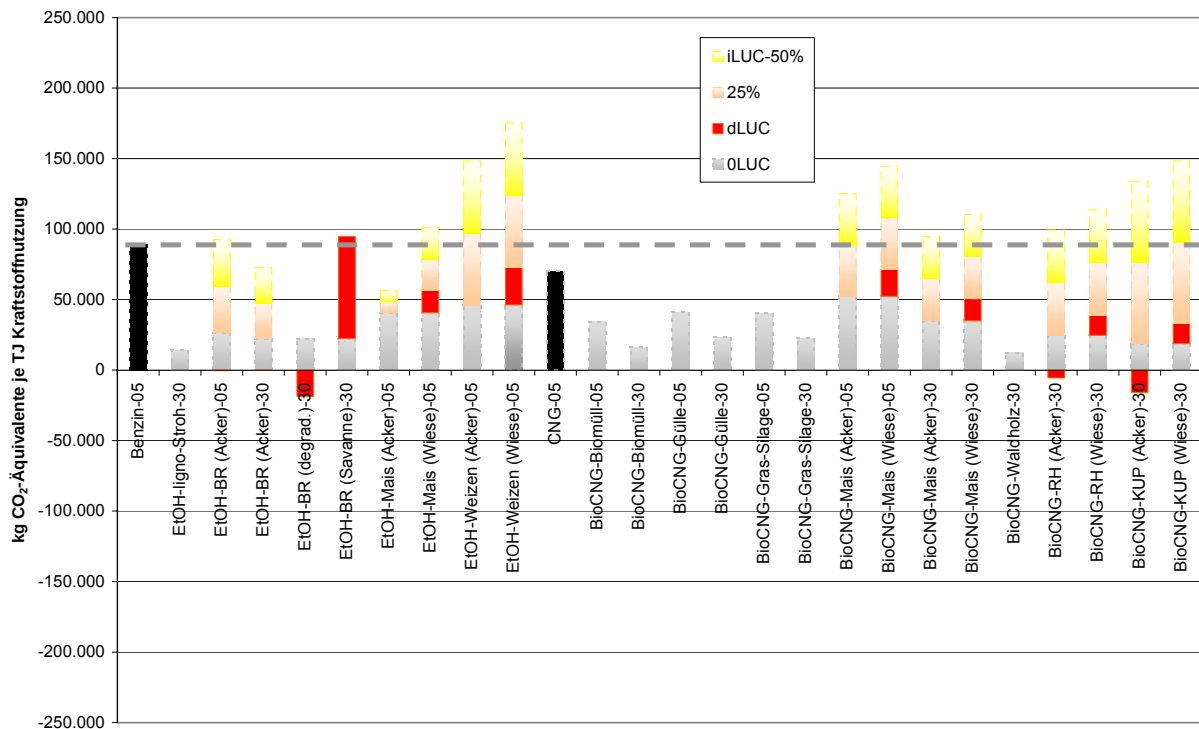
Die Verhältnisse der Emissionen zueinander sowie die Bedeutung der LUC-Effekte verdeutlicht die folgende Grafik.

EtOH aus brasilianischem Zuckerrohr und aus deutschem Mais erlauben demnach auch bei Anrechnung von Emissionen aus indirekter Landnutzung noch THG-Reduktionen gegenüber Benzin, wenn für den Anbau Ackerflächen genutzt werden.

Bei der Konversion von Savanne (BR) dominiert der Einfluss der direkten Landnutzungsänderung, die dagegen beim Anbau auf degradierten Flächen eine drastische THG-Reduktion erlauben würde.

EtOH aus Weizen und auch BioCNG aus Mais, Rutenhirse und KUP-Holz führen bei Einbezug von iLUC-Effekten zu keiner THG-Reduktion.

Bild 17 Endenergiebezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG

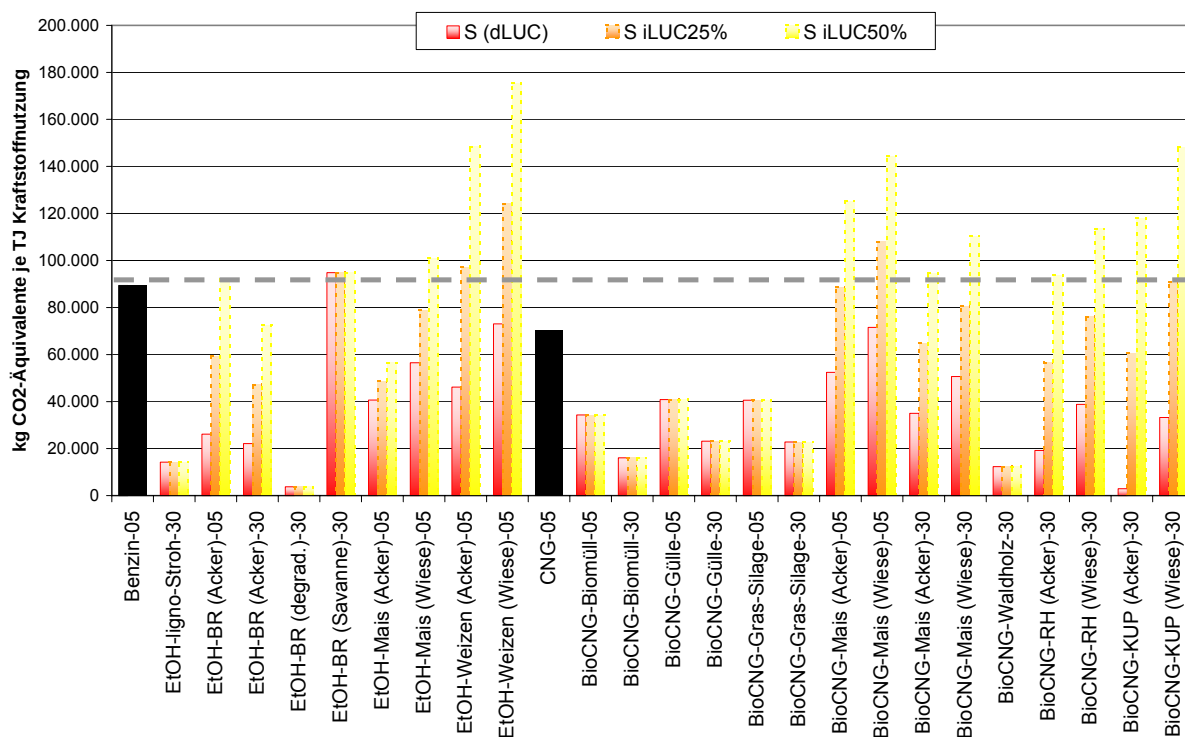


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Die obige Abbildung zeigt die disaggregierten Anteile der THG-Bilanz, durch die z.T. negativen Anteile bei den direkten LUC-Effekten sind die Balkenhöhen aber nicht direkt vergleichbar.

Daher zeigen die folgende Grafik die jeweils **kumulierten Summenwerte** für dLUC, iLUC-25% und iLUC50%.

Bild 18 Kumulierte endenergiebezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

5.4.2 Verkehrsleistungsbezogene THG-Ergebnisse für biogene Kraftstoffe

Als Ergänzung zur vorherigen endenergiebezogenen Darstellung geben die folgenden Tabellen und Grafiken die Ergebnisse je bereitgestelltem „Verkehrsnutzen“ wieder, d.h. je Fahrzeug-Kilometer. Hierbei sind neben den Unterschieden aus den Vorketten auch die Effekte zwischen Pkw mit unterschiedlichen Antrieben relevant.

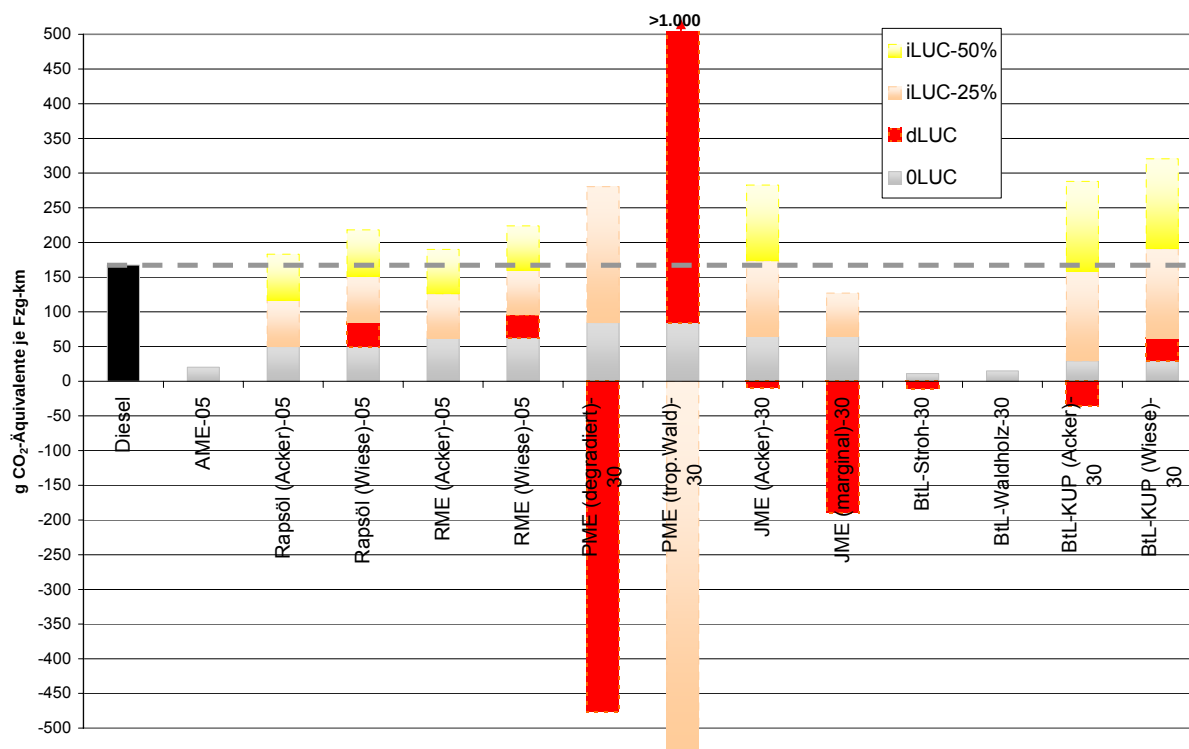
Tabelle 14 Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Biodiesel, BioGH₂ und biogenem Fahrstrom

Option [g/Fzg-km]	Σ (dLUC)	inkl. iLUC		oLUC	dLUC	iLUC	
		Σ iLUC25%	Σ iLUC50%			25%	50%
Diesel	167,4	167,4	167,4	167,4	0,0	0,0	0,0
AME-05	20,3	20,3	20,3	20,3	0,0	0,0	0,0
Rapsöl (Acker)-05	49,9	116,5	183,2	49,9	0,0	66,6	133,3
Rapsöl (Wiese)-05	85,0	151,6	218,2	49,9	35,0	66,6	133,3
RME (Acker)-05	62,2	126,2	190,1	62,2	0,0	64,0	127,9
RME (Wiese)-05	95,9	159,9	223,9	62,2	33,7	64,0	127,9
PME (degradiert)-30	-391,5	-195,7	-195,7	84,7	-476,2	195,7	0,0
PME (trop.Wald)-30	1.068,9	534,4	534,4	84,7	984,1	-534,4	0,0
JME (Acker)-30	54,5	163,7	272,8	64,5	-10,0	109,2	218,3
JME (marginal)-30	-125,2	-62,6	-62,6	64,5	-189,7	62,6	0,0
BtL-Stroh-30	0,0	0,0	0,0	11,1	-11,1	0,0	0,0
BtL-Waldholz-30	15,1	15,1	15,1	15,1	0,0	0,0	0,0
BtL-KUP (Acker)-30	-6,0	123,3	252,6	29,6	-35,5	129,3	258,5
BtL-KUP (Wiese)-30	62,0	191,3	320,5	29,6	32,5	129,3	258,5
BZ-H2-Waldholz-30	22,5	22,5	22,5	22,5	0,0	0,0	0,0
BZ-H2-KUP (Acker)-30	10,6	83,4	156,2	30,6	-20,0	72,8	145,6
BZ-H2-KUP (Wiese)-30	48,9	121,7	194,5	30,6	18,3	72,8	145,6
EM-Gülle-GuD-30	28,3	28,3	28,3	28,3	0,0	0,0	0,0
EM-Waldholz-GuD-30	9,7	9,7	9,7	9,7	0,0	0,0	0,0
EM-Mais (Acker)-GuD-30	48,7	100,2	151,7	48,7	0,0	51,5	103,1
EM-Mais (Wiese)-GuD-30	75,8	127,3	178,9	48,7	27,1	51,5	103,1
EM-RH (Acker)-GuD-30	21,5	85,9	150,4	30,9	-9,5	64,4	128,9
EM-RH (Wiese)-GuD-30	55,3	119,8	184,2	30,9	24,3	64,5	129,0
EM-EtOH-BR (Acker)-GuD-30	38,3	81,4	124,5	38,3	0,0	43,1	86,2
EM-EtOH-BR (degrad.)-GuD-30	6,1	22,2	38,3	38,3	-32,3	16,1	32,3
EM-EtOH-BR (Savanne)-GuD-30	163,4	163,4	163,4	38,3	125,0	0,0	0,0
EM-Palmöl-ID (degrad.)-GuD-30	-375,1	-375,1	-375,1	67,6	-442,7	0,0	0,0
EM-Palmöl-ID (trop.Wald)-GuD-30	982,6	982,6	982,6	67,6	915,0	0,0	0,0

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; oLUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= direkte LUC; iLUC= indirekte LUC; AME= Altfett-Methylester; RME= Rapsöl-Methylester; PME= Palmöl-Methylester; JME= Jatrophaöl-Methylester; BtL= biomass-to-liquid; EM= Elektromobil; GuD= Gas- und Dampfturbinen-HKW; Daten inkl. Koppelprodukt-Allokation über Heizwert

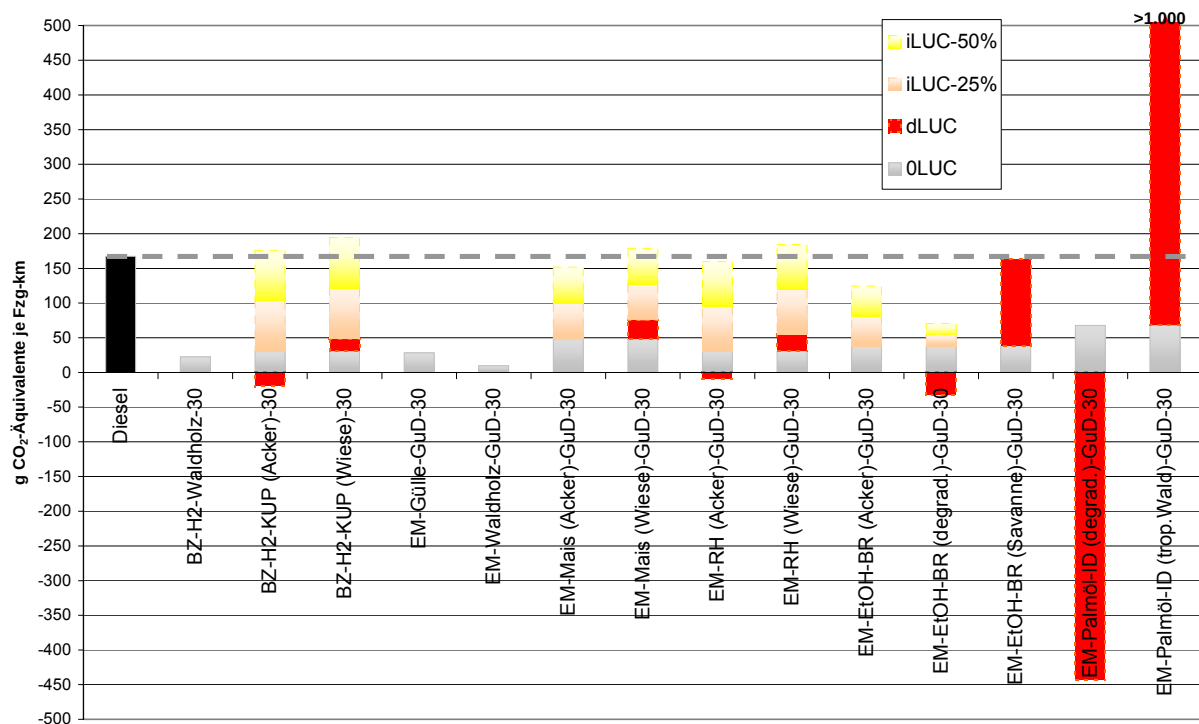
Die folgende Abbildung zeigt diese Resultate in grafischer Form.

Bild 19 Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Biodiesel



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Bild 20 Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für BioGH₂ und biogenem Fahrstrom

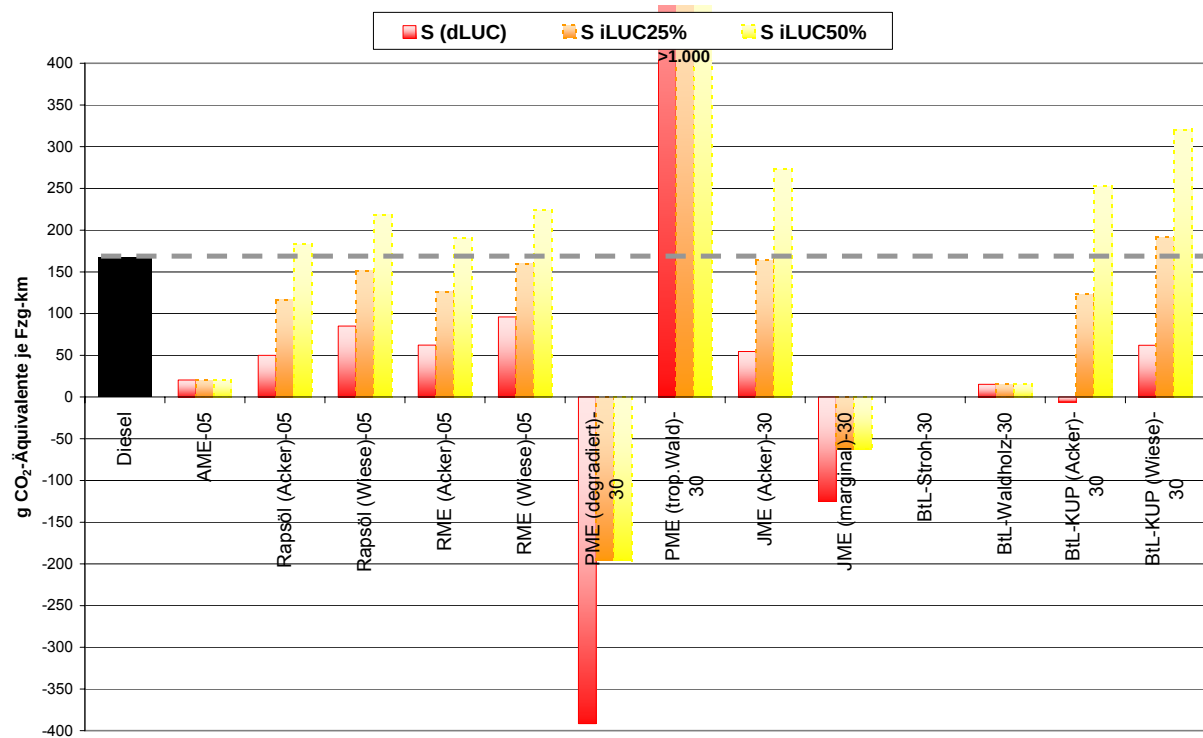


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Die obigen Abbildungen zeigen die disaggregierten Anteile der THG-Bilanz, durch die z.T. negativen Anteile bei den direkten LUC-Effekten sind die Balkenhöhen aber nicht direkt vergleichbar.

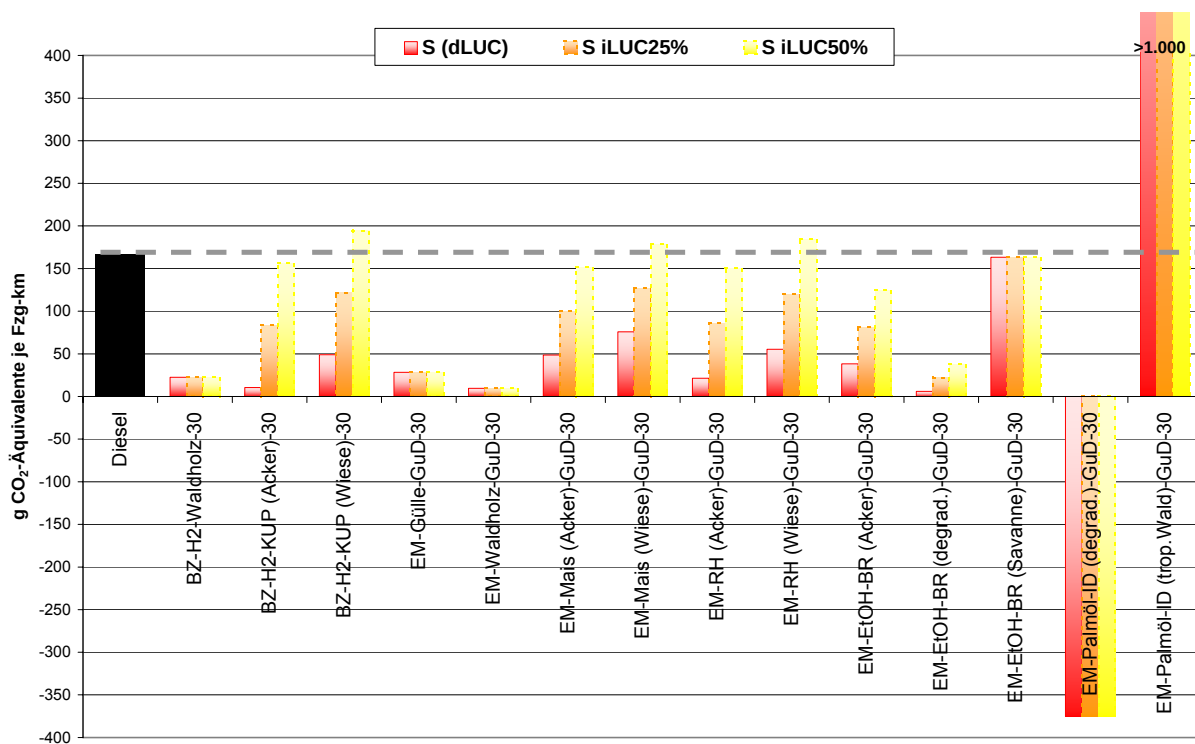
Daher zeigen die folgenden Grafiken die jeweils **kumulierten Summenwerte** für dLUC, iLUC-25% und iLUC50%.

Bild 21 Kumulierte verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Biodiesel



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Bild 22 Kumulierte verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für BioGH₂ und biogenem Fahrstrom



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

^

Die BZ-Fahrzeuge mit BioGH₂ sind etwas günstiger in der Emissionsbilanz als die Elektromobile (EM), und beide leicht günstiger als Pkw mit BtL.

Selbst die BZ- und EM-Fahrzeuge können jedoch bei Einrechnung der indirekten LUC-Effekte (50% iLUC-factor) keine Einsparung gegenüber Diesel erreichen - dies wäre nur bei iLUC-25% gegeben.

Bei angenommenem Grünlandumbruch („Wiese“) würden BZ- und EM-Fahrzeuge sowie solche mit RME noch einige THG-Reduktion gegenüber Diesel erlauben, Fahrzeuge mit BtL aus KUP bzw. Rapsöl oder auch JME würden dies nicht erreichen.

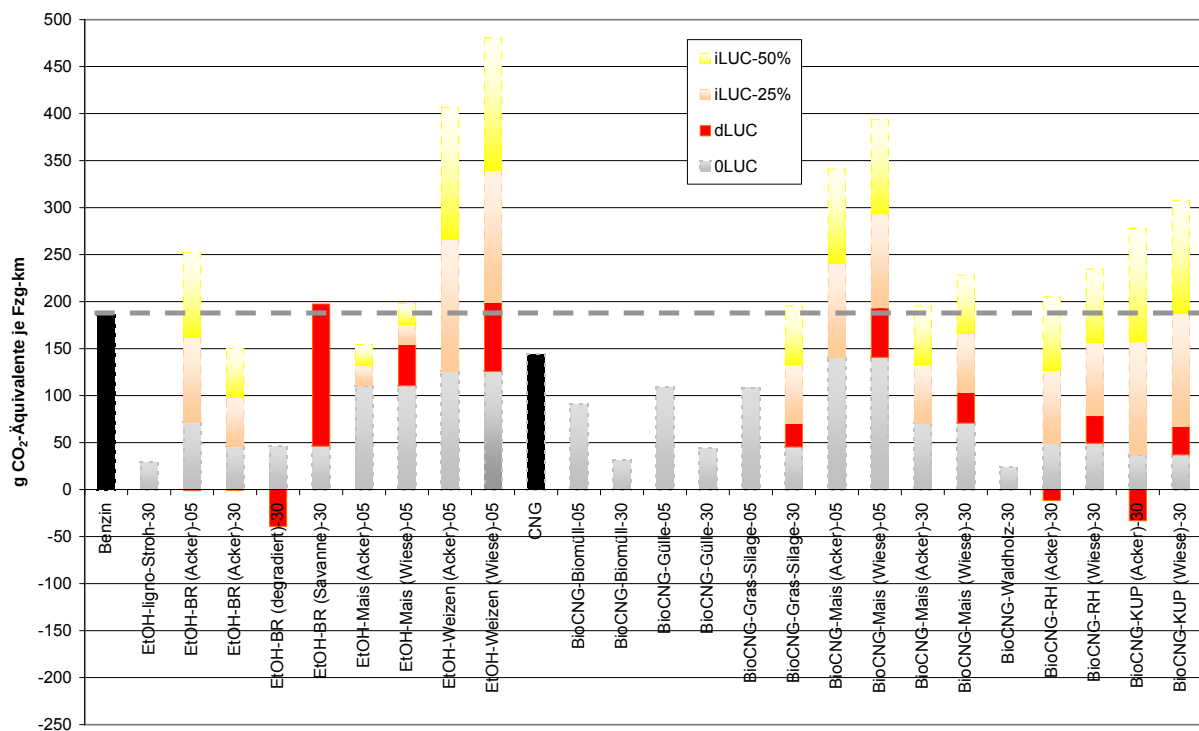
Tabelle 15 *Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Bioethanol und Bio-CNG*

Option [g/Fzg-km]	Σ (dLUC)	inkl. iLUC		0LUC	dLUC	iLUC	
		Σ iLUC25%	Σ iLUC50%			iLUC- 25%	iLUC- 50%
Benzin	186,1	186,1	186,1	186,1	0,0	0,0	0,0
EtOH-ligno-Stroh-30	29,1	29,1	29,1	29,1	0,0	0,0	0,0
EtOH-BR (Acker)-05	70,8	161,1	251,3	71,8	-1,0	90,3	180,5
EtOH-BR (Acker)-30	45,6	97,7	149,8	46,1	-0,6	52,1	104,3
EtOH-BR (degradiert)-30	7,1	7,1	7,1	46,1	-39,0	0,0	0,0
EtOH-BR (Savanne)-30	197,4	197,4	197,4	46,1	151,3	0,0	0,0
EtOH-Mais (Acker)-05	110,7	132,5	154,3	110,7	0,0	21,8	43,6
EtOH-Mais (Wiese)-05	154,3	176,1	197,9	110,7	43,6	21,8	43,6
EtOH-Weizen (Acker)-05	125,8	266,3	406,7	125,8	0,0	140,4	280,9
EtOH-Weizen (Wiese)-05	199,7	340,1	480,6	125,8	73,9	140,4	280,9
CNG	144,3	144,3	144,3	144,3	0,0	0,0	0,0
BioCNG-Biomüll-05	91,2	91,2	91,2	91,2	0,0	0,0	0,0
BioCNG-Biomüll-30	31,4	31,4	31,4	31,4	0,0	0,0	0,0
BioCNG-Gülle-05	109,2	109,2	109,2	109,2	0,0	0,0	0,0
BioCNG-Gülle-30	43,8	43,8	43,8	43,8	0,0	0,0	0,0
BioCNG-Gras-Silage-05	108,3	108,3	108,3	108,3	0,0	0,0	0,0
BioCNG-Gras-Silage-30	70,7	133,1	195,5	45,4	25,4	62,4	124,7
BioCNG-Mais (Acker)-05	140,7	240,8	340,9	140,7	0,0	100,1	200,1
BioCNG-Mais (Wiese)-05	193,4	293,5	393,5	140,7	52,6	100,1	200,1
BioCNG-Mais (Acker)-30	70,7	133,1	195,5	70,7	0,0	62,4	124,7
BioCNG-Mais (Wiese)-30	103,5	165,9	228,3	70,7	32,8	62,4	124,7
BioCNG-Waldholz-30	23,6	23,6	23,6	23,6	0,0	0,0	0,0
BioCNG-RH (Acker)-30	37,9	115,8	193,8	49,3	-11,4	77,9	155,9
BioCNG-RH (Wiese)-30	78,7	156,8	234,8	49,3	29,4	78,0	156,0
BioCNG-KUP (Acker)-30	4,0	124,2	244,4	37,0	-33,1	120,2	240,5
BioCNG-KUP (Wiese)-30	67,2	187,4	307,7	37,0	30,2	120,2	240,5

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; 0LUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= direkte LUC; iLUC= indirekte LUC; BR= Brasilien; CNG= compressed natural gas; RH= Rutenhirse; KUP= Kurzumtriebsplantage; Daten inkl. Koppelprodukt-Allokation über Heizwert (auch in Vorketten)

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse nochmals in grafischer Form.

Bild 23 Verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG

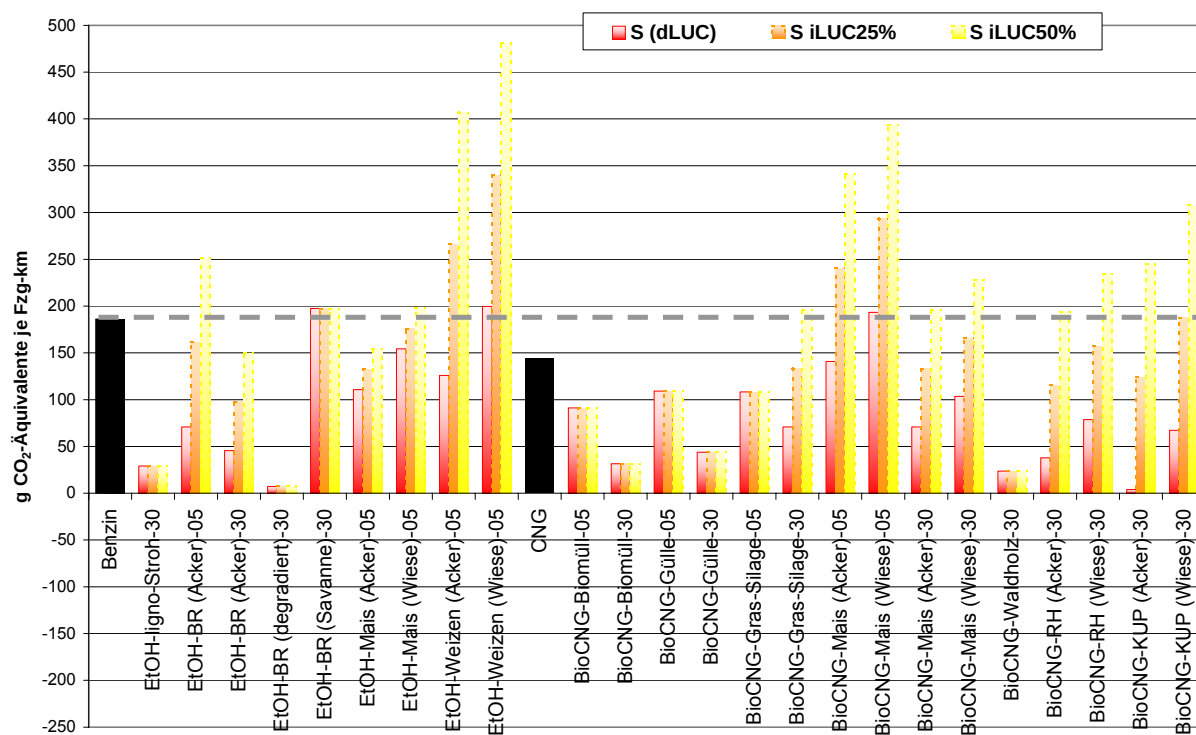


Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Die obige Abbildung zeigt die disaggregierten Anteile der THG-Bilanz, durch die z.T. negativen Anteile bei den direkten LUC-Effekten sind die Balkenhöhen aber nicht direkt vergleichbar.

Daher zeigt die folgende Grafik die jeweils **kumulierten Summenwerte** für dLUC, iLUC-25% und iLUC50%.

Bild 24 Kumulierte verkehrsleistungsbezogene THG-Emissionen für Bioethanol und BioCNG



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

5.5 Ergebnisse der Triplet-Vergleiche zur Bioenergienutzung

In Ergänzung zu den Einzelbetrachtungen für Strom, Wärme und Kraftstoffe (bzw. Mobilität) kann auch eine kombinierte Betrachtung erfolgen, die jeweils einen „Nutzenkorb“ für diese Energieträger ansetzt und dann einen Teil der kombinierten Nachfrage aus Bioenergie deckt.

Aus den vorhandenen Einzel-settings für Strom, Wärme und Kraftstoffe (bzw. Mobilität) ließen sich mehrere hundert Kombinationen erzeugen. Um das Prinzip zu demonstrieren, wurde eine Auswahl der möglichen interessanten settings getroffen.

Dabei wurden jeweils für die Kombination der drei Nachfragen („Triplets“) folgende gemeinsame Annahmen getroffen:

- Strombedarf: 4.000 kWh/a
- Wärmebedarf: 15.000 kWh/a
- Mobilitätsbedarf: 15.000 Personen-km

Diese Werte entsprechen grob der mittleren Bedarfe eines Durchschnittshaushalts in Deutschland im Jahr 2005 und wurden mit IE/DBFZ abgestimmt.

Bei den Referenzsystemen, die diese Nachfrage decken, wurden

- im „Gas“-Fall eine Erdgas-Heizung zur Wärmebereitstellung sowie je 50% Strom aus neuen Erdgas-GuD- und Importsteinkohle-DT-Kraftwerken angesetzt sowie ein mittlerer Pkw mit Ottomotor (Benzin) und
- im „Öl“-Fall eine Öl-Heizung zur Wärmebereitstellung sowie je 50% Strom aus neuen Erdgas-GuD- und Importsteinkohle-DT-Kraftwerken angesetzt sowie ein mittlerer Pkw mit Dieselmotor.

Je nach Triplet wird nun gezielt ein fossiler Nachfragesektor durch das entsprechende Bioenergiesystem ersetzt:

- „H_{zg}“ zeigt an, dass das fossile Heizsystem durch ein biogenes ersetzt wird
- „el“ zeigt an, dass die fossile Stromerzeugung durch biogene Systeme ersetzt werden, und
- „P_{kw}“ bedeutet, dass die Mobilitätsnachfrage anstelle eines fossilen durch ein biogenes System bereitgestellt wird.

Die folgende Tabelle zeigt die entsprechenden Resultate, differenziert für die jeweilig angenommene Landnutzungsänderung, wobei für die indirekten Effekte der 50%-iLUC-factor angesetzt wurde.

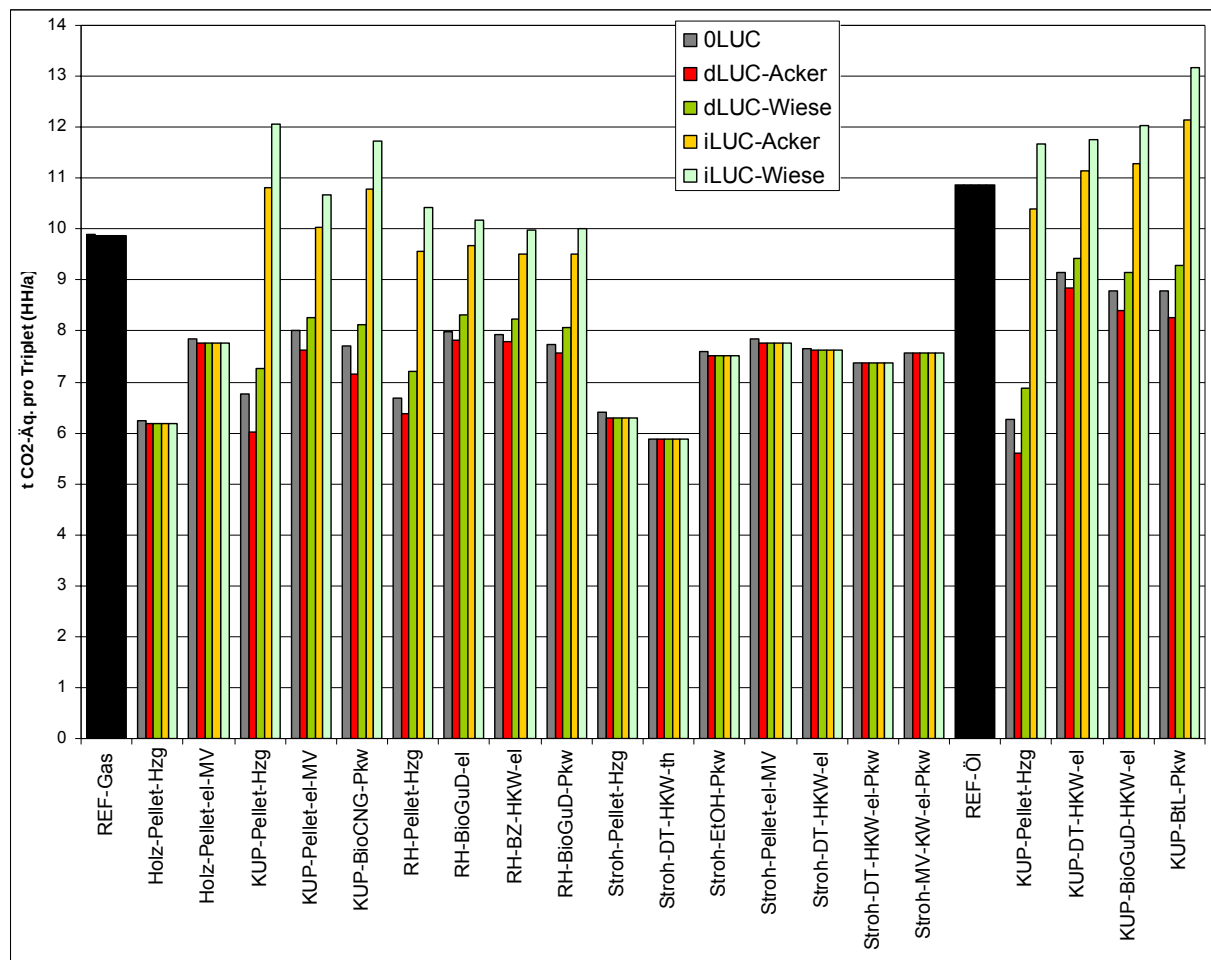
Tabelle 16 THG-Emissionen für Triplets mit Erdgas/Benzin bzw. Öl/Diesel als Referenz sowie biogenen Alternativ-Triplets

t CO ₂ -Äquivalente je Triplet	0LUC	dLUC-Acker	dLUC-Wiese	iLUC-Acker	iLUC-Wiese
REF-Gas	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
Holz-Pellet-Hzg	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
Holz-Pellet-el-MV	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
KUP-Holz-Triplets (Gas)					
KUP-Pellet-Hzg	6,8	6,0	7,3	10,8	12,1
KUP-Pellet-el-MV	8,0	7,6	8,3	10,0	10,7
KUP-BioCNG-Pkw	7,7	7,2	8,1	10,8	11,7
Rutenhirse-Triplets					
RH-Pellet-Hzg	6,7	6,4	7,2	9,6	10,4
RH-BioGuD-el	8,0	7,8	8,3	9,7	10,2
RH-BZ-HKW-el	7,9	7,8	8,2	9,5	10,0
RH-BioGuD-Pkw	7,7	7,6	8,1	9,5	10,0
Stroh-Pellet-Triplets					
Stroh-Pellet-Hzg	6,4	6,3	6,3	6,3	6,3
Stroh-DT-HKW-th	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Stroh-EtOH-Pkw	7,6	7,5	7,5	7,5	7,5
Stroh-Pellet-el-MV	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Stroh-DT-HKW-el	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
Stroh-DT-HKW-el-Pkw	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
Stroh-MV-KW-el-Pkw	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
REF-Öl	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9
KUP-Holz-Triplets (Öl)					
KUP-Pellet-Hzg	6,3	5,6	6,9	10,4	11,7
KUP-DT-HKW-el	9,1	8,8	9,4	11,1	11,7
KUP-BioGuD-HKW-el	8,8	8,4	9,2	11,3	12,0
KUP-BtL-Pkw	8,8	8,3	9,3	12,1	13,2

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; 0LUC= keine Landnutzungsänderungen; dLUC= direkte LUC; iLUC= direkte und indirekte LUC; KUP= Kurzumtriebsplantage; RH= Rutenhirse; MV= Mitverbrennung in Kohle-Kraftwerk; BZ = Festoxid-Brennstoffzellen-BHKW; BtL= biomass-to-liquid (Fischer-Tropsch-Diesel); GuD = Gas- und Dampfturbinen-HKW; Daten beinhalten Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

Die folgende Grafik zeigt diese Ergebnisse nochmals in der Übersicht.

Bild 25 THG-Emissionen für Triplets mit Erdgas/Benzin bzw. Heizöl/Diesel als Referenz sowie biogenen Alternativ-Triplets



Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabelle

Der Triplet-Vergleich für ausgewählte settings zeigt, dass bei der Wärme die KWK-Nutzung von biogenen Reststoffen die geringsten THG-Emissionen verursacht, gefolgt von der Nutzung in Heizanlagen - dies gilt allerdings **nur** für den Fall, dass **keine** Landnutzungsänderung angenommen wird („0LUC“): je stärker die LUC-Effekte einbezogen werden, umso wichtiger wird die Effizienz der Systeme. Die „KUP-Holz“-Triplets (REF Gas) zeigen dies - bei „0LUC“ ist die Wärmenutzung am günstigsten, gefolgt von Pkw-Nutzung und Strom als ungünstigstem Fall. Wird jedoch der „iLUC“-Fall für Konversion von Grünland angenommen, so **kehrt sich die Reihenfolge um**:

Nun ist das Strom-Triplet am günstigsten, gefolgt vom Pkw-Triplet und dem Wärme-Triplet als ungünstigste Option.

Für die REF-Öl-Triplets gilt dies ebenfalls, wobei hier das Pkw-Triplet im iLUC-„Wiese“-Fall am ungünstigsten liegt.

Die Mitverbrennung von **Strohpellets** in Kraftwerken liegt etwas ungünstiger als die direkte Nutzung des Stroh in Heizkraftwerken zur Stromerzeugung, leicht günstiger ist die Nutzung des Stroh als Rohstoff für „2. Generation“-Ethanol-Pkw.

Bei **Rutenhirse** zeigt der Triplet-Vergleich, dass wiederum der direkte Einsatz für Wärme die geringsten THG-Emissionen aufweist, während der Einsatz zur Stromerzeugung in hocheffizienten Brennstoffzellen- bzw. GuD-HKW etwa gleich wie die Nutzung zur GuD-HKW-Stromerzeugung für Elektro-Pkw liegt.

Diese Systeme erlauben auch beim 50%-Niveau für indirekte LUC-Effekte geringe Einsparungen gegenüber dem REF-Öl-Fall.

Für Holz aus **Kurzumtriebsplantagen** (KUP) liegt die Nutzung als Kraftstoff (BtL) etwa gleich wie die Nutzung zur Stromerzeugung in DT-HKW bzw. GuD-Anlagen (nach Vergasung). Noch geringer sind auch hier die THG-Emissionen für die KUP-Nutzung als Pellet in Heizanlagen.

Die hier gezeigten Triplet-Vergleiche stellen nur eine kleine Auswahl der möglichen Fälle dar, die jedoch folgende **Grundaussagen** erlauben:

Die Nutzung biogener Energieträger führt beim Ersatz von Heizsystemen zu den geringsten THG-Emissionen, soweit nur Reststoffe eingesetzt werden.

Bei Berücksichtigung der LUC-Effekte (für Anbausysteme) **verlieren** die Wärme-Triplets gegenüber denen für Pkw- und Strom-Nutzungen.

Die Erzeugung von Strom aus Biomasse in hocheffizienten HKW - z.T. durch Vergasung bzw. Vergärung/Gaseinspeisung - vermeidet etwas weniger THG und ist in den Ergebnissen vergleichbar zum direkten oder indirekten Einsatz zur Mobilitätsbereitstellung: sowohl „2. Generation“-Kraftstoffe (Ethanol, BtL) wie auch BioH₂ für Brennstoffzellen- und Biostrom für Elektromobile reduzieren etwa gleichviel THG wie die Stromerzeugung in HKW.

Dies gilt auch und gerade für die Einbeziehung von LUC-Effekten - hier sind die „Strom“-Triplets und die „Pkw“-Triplets etwa gleich in den Ergebnissen.

Eine weitergehende Betrachtung für zusätzliche Triplets sollte stets vergleichbare Stoffströme betreffen - z.B. Gülle für Wärme (über Gaseinspeisung), Strom (BHKW/GuD-HKW) und Mobilität (BioCNG, BioGH₂ oder Biostrom für Elektroantriebe).

Da in den vom WBGU ausgewählten settings nicht alle diese Optionen enthalten sind, kann keine Gesamtdarstellung von Triplets für alle wesentlichen Stoffströme erfolgen.

Dies sollte in künftigen Untersuchungen beachtet werden und dabei auch eine Variation der Definition von Triplets mit anderen Gewichten der Nachfragen einbezogen werden.

Grundsätzlich sind die Triplet-Vergleiche gegenüber getrennten Einzelbetrachtungen für Strom, Wärme und Mobilität die geeignetere Form, da sie „sektorübergreifende“ Vergleiche erlauben. Aber auch die Triplets sind zu stark vereinfacht, um daraus belastbare Gesamtaussagen zur „optimalen“ Biomassenutzung abzuleiten.

Erst wenn die logistischen und systembedingten Grenzen (z.B. für KWK-Wärme) sowie die Mengenverhältnisse bei den biogenen Potenzialen, die ja keineswegs gleich über die Stoffströme verteilt sind, beachtet werden, lassen sich belastbare Aussagen für ein Land oder eine Region ableiten.

Solche **szenariobezogenen** Analysen für das gesamte Energiesystem werden derzeit im Rahmen des BMU-geförderten Verbundvorhabens „renewability“ durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind im Herbst 2008 zu erwarten.

5.6 Flächenbezogene THG-Emissionen

Aus den Ergebnissen der GEMIS-Bilanzen kann auch das flächenbezogene THG-Emissionspotenzial der Anbaubioenergie-Systeme bestimmt werden, da in der modell-internen Datenbank die Informationen zum Flächenbedarf des Anbaus gespeichert sind.

Die folgenden Tabellen geben die **anbauflächenbezogenen** THG-Emissionen (in CO₂-Äquivalenten) der Systeme wieder.

Tabelle 17 Anbauflächenbezogene THG-Emissionen für biogenen Strom

Strom aus	flächenspezifische CO₂-Äq. t/ha
Biogas < 0,5 MW	
Mais-noLUC-direkt-BZ-30	4,6
Mais-dLUC (Wiese)-direkt-BZ-30	7,2
Mais-iLUC (Acker)-direkt-BZ-30	14,5
Mais-iLUC (Wiese)-direkt-BZ-30	17,2
RH-noLUC-direkt-BZ-30	2,3
RH-dLUC (Acker)-direkt-BZ-30	1,6
RH-dLUC (Wiese)-direkt-BZ-30	4,2
RH-iLUC (Acker)-direkt-BZ-30	11,5
RH-iLUC (Wiese)-direkt-BZ-30	14,2
Mais-noLUC-direkt-GM-05	4,0
Mais-noLUC-direkt-GM-30	4,2
Mais-dLUC (Wiese)-direkt-GM-05	6,6
Mais-iLUC (Acker)-direkt-GM-05	13,9
Mais-iLUC (Wiese)-direkt-GM-05	16,6
RH-noLUC-direkt-GM-30	1,9
RH-dLUC (Acker)-direkt-GM-30	1,2
RH-dLUC (Wiese)-direkt-GM-30	3,8
RH-iLUC (Acker)-direkt-GM-30	11,1
RH-iLUC (Wiese)-direkt-GM-30	13,8
Strom aus Biogas 1 MW, mit Einspeisung	
Mais-noLUC-feed-in-GM-05	5,9
Mais-dLUC (Wiese)-feed-in-GM-05	8,5
Mais-iLUC (Acker)-feed-in-GM-05	15,8
Mais-iLUC (Wiese)-feed-in-GM-05	18,5
Mais-noLUC-feed-in-GM-30	4,7
Mais-dLUC (Wiese)-feed-in-GM-30	7,3
Mais-iLUC (Acker)-feed-in-GM-30	14,6

Strom aus	flächenspezifische CO₂-Äq. t/ha
Mais-iLUC (Wiese)-feed-in-GM-30	17,2
RH-noLUC-feed-in-GM-30	2,4
RH-dLUC (Acker)-feed-in-GM-30	1,7
RH-dLUC (Wiese)-feed-in-GM-30	4,3
RH-iLUC (Acker)-feed-in-GM-30	11,6
RH-iLUC (Wiese)-feed-in-GM-30	14,2
Biogas-GuD-HKW mit Einspeisung	
Mais-noLUC-feed-in-GuD-30	4,7
Mais-dLUC (Wiese)-feed-in-GuD-30	7,3
Mais-iLUC (Acker)-feed-in-GuD-30	14,6
Mais-iLUC (Wiese)-feed-in-GuD-30	17,2
RH-noLUC-feed-in-GuD-30	2,4
RH-dLUC (Acker)-feed-in-GuD-30	1,7
RH-dLUC (Wiese)-feed-in-GuD-30	4,3
RH-iLUC (Acker)-feed-in-GuD-30	11,6
RH-iLUC (Wiese)-feed-in-GuD-30	14,2
KUP-noLUC-feed-in-GuD-30	
KUP-dLUC (Acker)-feed-in-GuD-30	-0,3
KUP-dLUC (Wiese)-feed-in-GuD-30	2,3
KUP-iLUC (Acker)-feed-in-GuD-30	9,7
KUP-iLUC (Wiese)-feed-in-GuD-30	12,3
KUP-iLUC (Wiese)-feed-in-GuD-30	12,3
Strom Holzgas-GT/BZ-HKW	
Holzgas-KUP-0LUC-BZ-HKW-30	1,8
Holzgas-KUP-0LUC-HKW-GT-30	1,9
Holzgas-KUP-dLUC (Acker)-BZ-HKW-30	0,5
Holzgas-KUP-dLUC (Acker)-HKW-GT-30	0,5
Holzgas-KUP-dLUC (Wiese)-BZ-HKW-30	3,1
Holzgas-KUP-dLUC (Wiese)-HKW-GT-30	3,2
Holzgas-KUP-iLUC (Acker)-BZ-HKW-30	10,4
Holzgas-KUP-iLUC (Acker)-HKW-GT-30	10,5
Holzgas-KUP-iLUC (Wiese)-BZ-HKW-30	13,0
Holzgas-KUP-iLUC (Wiese)-HKW-GT-30	13,1
Strom Bioöl + fester Biomasse	
JT-dLUC (Acker)-IN-Öl-DM-30	2,0
JT-iLUC (Acker)-IN-Öl-DM-30	5,7
JT-dLUC (degrad.)-IN-Öl-DM-30	-3,0
JT-dLUC (degrad.)-IN-Öl-DM-IN-30	-6,4
Palm-noLUC-ID-Öl-DM-30	8,5
Palm-dLUC (degrad.)-ID-Öl-DM-30	-32,3
Palm-dLUC (trop.Wald)-ID-Öl-DM-30	121,5
Raps-noLUC-Öl-DM-05	3,1
Raps-dLUC (Wiese)-Öl-DM-05	5,3
Raps-iLUC (Acker)-Öl-DM-05	11,3
Raps-iLUC (Wiese)-Öl-DM-05	13,5
KUP-noLUC-DT-30	1,2
KUP-dLUC (Acker)-DT-30	-0,2
KUP-dLUC (Wiese)-DT-30	2,4
KUP-iLUC (Acker)-DT-30	9,8

Strom aus	flächenspezifische CO₂-Äq. t/ha
KUP-iLUC (Wiese)-DT-30	12,4
Strom Bio-flüssig-GuD-HKW	
EtOH-BR-0LUC-30	4,4
EtOH-BR-dLUC (degradiert)-30	0,7
EtOH-BR-dLUC (Savanne)-30	18,9
EtOH-BR-iLUC (Acker)-30	14,4
Palmöl-ID-0LUC-30	8,4
Palmöl-ID-dLUC (degradiert)-30	-32,4
Palmöl-ID-dLUC (trop.Wald)-30	121,3
Strom Bio-Mitverbrennung Kohle-KW	
KUP-Pellets-noLUC-MV-30	1,8
KUP-Pellets-dLUC (Acker)-MV-30	0,5
KUP-Pellets-dLUC (Wiese)-MV-30	3,1
KUP-Pellets-iLUC (Acker)-MV-30	10,4
KUP-Pellets-iLUC (Wiese)-MV-30	13,0

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabellen

Tabelle 18 Anbauflächenbezogene THG-Emissionen für biogene Wärme

Wärme aus	flächenspezifische CO₂-Äq. t/ha
Holz-KUP-0LUC-Pellet-Heizung-15 kW-2030	2,0
Holz-KUP-dLUC (Acker)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	0,6
Holz-KUP-dLUC (Wiese)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	3,3
Holz-KUP-iLUC (Acker)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	10,6
Holz-KUP-iLUC (Wiese)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	13,2
Rutenhirse-0LUC-Pellet-Heizung-15 kW-2030	2,8
Rutenhirse-dLUC (Acker)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	2,1
Rutenhirse-dLUC (Wiese)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	4,7
Rutenhirse-iLUC (Acker)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	12,0
Rutenhirse-iLUC (Wiese)-Pellet-Heizung-15 kW-2030	14,6
Holzgas-KUP-0LUC-BZ-SO-HKW-DE-2030-th/en	1,8
Holzgas-KUP-dLUC (Acker)-BZ-SO-HKW-DE-2030-th/en	0,5
Holzgas-KUP-dLUC (Wiese)-BZ-SO-HKW-DE-2030-th/en	3,1
Holzgas-KUP-iLUC (Acker)-BZ-SO-HKW-DE-2030-th/en	10,4
Holzgas-KUP-iLUC (Wiese)-BZ-SO-HKW-DE-2030-th/en	13,0
Holzgas-KUP-0LUC-HKW-GT-DE-2030-th/en	1,9
Holzgas-KUP-dLUC (Acker)-HKW-GT-DE-2030-th/en	0,5
Holzgas-KUP-dLUC (Wiese)-HKW-GT-DE-2030-th/en	3,2
Holzgas-KUP-iLUC (Acker)-HKW-GT-DE-2030-th/en	10,5
Holzgas-KUP-iLUC (Wiese)-HKW-GT-DE-2030-th/en	13,1
Holz-HS-KUP-0LUC-HKW-DT-DE-2030-th/en	1,2
Holz-HS-KUP-dLUC (Acker)-HKW-DT-DE-2030-th/en	-0,2
Holz-HS-KUP-dLUC (Wiese)-HKW-DT-DE-2030-th/en	2,4
Holz-HS-KUP-iLUC (Acker)-HKW-DT-DE-2030-th/en	9,8
Holz-HS-KUP-iLUC (Wiese)-HKW-DT-DE-2030-th/en	12,4

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabellen

Tabelle 19 *Anbauflächenbezogene THG-Emissionen für biogene Kraftstoffnutzung*

Kraftstoff aus	flächenspezifische CO₂-Äq. t/ha
BtL-KUP-noLUC-30	1,2
BtL-KUP-dLUC (Acker)-30	-0,2
BtL-KUP-dLUC (Wiese)-30	2,5
BtL-KUP-iLUC (Acker)-30	9,8
BtL-KUP-iLUC (Wiese)-30	12,5
JME-ertragreich-noLUC-30	2,6
JME-ertragreich-dLUC (Acker)-30	2,2
JME-ertragreich-iLUC (Acker)-30	10,8
JME-marginal-dLUC-30	-2,5
PME-noLUC-30	7,0
PME-dLUC (degradiert)-30	-24,3
PME-dLUC (trop.Wald)-30	87,0
Rapsöl-noLUC-05	3,2
Rapsöl-dLUC (Wiese)-05	5,4
Rapsöl-iLUC (Acker)-05	11,4
Rapsöl-iLUC (Wiese)-05	13,5
RME-noLUC-05	3,2
RME-dLUC (Wiese)-05	4,9
RME-iLUC (Acker)-05	9,7
RME-iLUC (Wiese)-05	11,4
EtOH-BR-noLUC-05	4,0
EtOH-BR-noLUC-30	4,5
EtOH-BR-dLUC (Acker)-30	4,4
EtOH-BR-dLUC (degradiert)-30	0,7
EtOH-BR-dLUC (Savanne)-30	18,9
EtOH-BR-iLUC (Acker)-30	14,4
EtOH-Mais-noLUC-05	6,7
EtOH-Mais-dLUC (Wiese)-05	9,4
EtOH-Mais-iLUC (Acker)-05	16,7
EtOH-Mais-iLUC (Wiese)-05	19,4
EtOH-Weizen-noLUC-05	4,5
EtOH-Weizen-dLUC (Wiese)-05	7,2
EtOH-Weizen-iLUC (Acker)-05	14,5
EtOH-Weizen-iLUC (Wiese)-05	17,2
BioCNG-Mais-noLUC-30	1,5
BioCNG-Mais-dLUC (Wiese)-30	7,2
BioCNG-Mais-iLUC (Acker)-30	5,8
BioCNG-Mais-iLUC (Wiese)-30	8,4
BioCNG-Rutenhirse-noLUC-30	15,7
BioCNG-Rutenhirse-dLUC (Acker)-30	18,3
BioCNG-Rutenhirse-dLUC (Wiese)-30	3,3
BioCNG-Rutenhirse-iLUC (Acker)-30	2,6
BioCNG-Rutenhirse-iLUC (Wiese)-30	5,1
BioCNG-KUP-noLUC-30	12,5
BioCNG-KUP-dLUC (Acker)-30	15,1
BioCNG-KUP-dLUC (Wiese)-30	1,6

Kraftstoff aus	flächenspezifische CO ₂ -Äq. t/ha
BioCNG-KUP-iLUC (Acker)-30	0,3
BioCNG-KUP-iLUC (Wiese)-30	2,9
BZ-BioGH2-KUP-noLUC-30	2,1
BZ-BioGH2-KUP-dLUC (Acker)-30	0,7
BZ-BioGH2-KUP-iLUC (Acker)-30	10,7
BZ-BioGH2-KUP-dLUC (Wiese)-30	3,4
BZ-BioGH2-KUP-iLUC (Wiese)-30	13,3
EM-Biomethan-Mais-0LUC-30	4,7
EM-Biomethan-Mais-dLUC (Wiese)-30	7,3
EM-Biomethan-Mais-iLUC (Acker)-30	14,6
EM-Biomethan-Mais-iLUC (Wiese)-30	17,2
EM-RH-noLUC-30	2,4
EM-RH-dLUC (Acker)-30	1,7
EM-RH-dLUC (Wiese)-30	4,3
EM-RH-iLUC (Acker)-30	11,6
EM-RH-iLUC (Wiese)-30	14,2
EM-EtOH-BR-0LUC-30	4,4
EM-EtOH-BR-dLUC (degradiert)-30	0,7
EM-EtOH-BR-dLUC (Savanne)-30	18,9
EM-EtOH-BR-iLUC (Acker)-30	14,4
EM-Palmöl-0LUC-30	8,4
EM-Palmöl-dLUC (degradiert)-30	-32,4
EM-Palmöl-dLUC (trop.Wald)-30	121,3

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Abkürzungen siehe vorige Tabellen

6 Ergebnisse zum KEV von Bioenergiesystemen

6.1 KEV-Werte nichterneuerbarer Referenz-Systeme

Wie bei den THG wurden mit GEMIS 4.5 zuerst die KEV-Werte für die Referenz-Systeme als Vergleichsbasis für die biogenen Systeme berechnet. Die Resultate zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 20 KEV-Werte der nichterneuerbaren Referenz-Systeme

Strom und Wärme [$TJ_{\text{primär}}/TJ_{\text{output}}$]	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar
Strom-Kraftwerks-Park-05	2,89	2,57	0,32
Importkohle-KW-DT-05	3,02	3,00	0,01
Gas-GuD-KW-05	2,02	2,02	0,00
Strom-Kraftwerks-Park-30 (BMU)	2,04	1,27	0,77
Strom-Kraftwerks -30 (BMW)	2,11	1,58	0,53
Importkohle-KW-DT-30	2,18	2,17	0,01
Gas-GuD-KW-30	1,93	1,93	0,00
Gas-Heizung-05	1,35	1,35	0,01
Gas-Heizung-30	1,30	1,29	0,01
Öl-Heizung-05	1,39	1,38	0,01
Öl-Heizung-30	1,38	1,37	0,01
Kraftstoffnutzung [$TJ_{\text{primär}}/TJ_{\text{input}}$]	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar
Diesel-05	1,48	1,45	0,04
Diesel-30	1,45	1,40	0,05
Otto-05	1,65	1,60	0,05
Otto-30	1,60	1,54	0,07
CNG-05	1,62	1,56	0,05
CNG-30	1,58	1,50	0,08

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; KW= Kraftwerk; DT= Dampfturbine; GuD= Gas- und Dampfturbine; BMU= Daten für 2030 aus Leitszenario (2007); BMWi= Daten für 2030 aus EWI/Prognos (2006); CNG= compressed natural gas; Daten enthalten Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

6.2 KEV-Werte der biogenen Stromerzeugung

Danach wurden die KEV-Werte der untersuchten biogenen Stromerzeugung bilanziert, wobei hier keine Unterscheidung zwischen der angenommenen Landnutzungsänderungen erfolgt, da diese keinen Einfluss auf den KEV hat.

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 21 KEV-Werte der biogenen Stromerzeugung

Strom Biogas direkt, < 0,5 MW Option [$TJ_{\text{primär}}/TJ_{\text{output}}$]	kumulierter Energieverbrauch		
	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar
Gülle-direkt-GM-05	5,79	0,35	5,44
Gülle-direkt-GM-30	5,33	0,26	5,07
Gülle-direkt-BZ-30	4,78	0,24	4,55
Gras-direkt-GM-05	4,02	0,36	3,66
Gras-direkt-GM-30	3,96	0,28	3,68
Gras- direkt-BZ-30	3,55	0,25	3,30
Mais-direkt-GM-05	3,60	0,35	3,25
Mais-direkt-GM-30	3,30	0,26	3,04
Mais direkt-BZ-30	3,19	0,30	2,88
RH-direkt-GM-30	3,32	0,22	3,10
RH-direkt-BZ-30	2,99	0,26	2,74
Strom Biogas Einspeisung, > 0,5 MW			
Biomüll-feed-in-GM-05	3,49	0,45	3,04
Biomüll-feed-in-GM-30	3,11	0,15	2,96
Gülle-feed-in-GuD-30	5,48	0,33	5,15
Gülle-feed-in-GM-05	5,61	0,60	5,01
Gülle-feed-in-GM-30	5,19	0,31	4,88
Gras-feed-in-GuD-30	3,82	0,34	3,49
Gras-feed-in-GM-05	3,99	0,60	3,39
Gras-feed-in-GM-30	3,62	0,32	3,30
Mais-feed-in-GuD-30	3,44	0,33	3,10
Mais-feed-in-GM-05	3,61	0,60	3,01
Mais-feed-in-GM-30	3,26	0,32	2,94
RH-feed-in-GM-30	3,06	0,27	2,79
RH-feed-in-GuD-30	3,23	0,28	2,95
KUP-feed-in-GuD-30	3,61	0,20	3,40
Strom Bioöl (DM) + feste Biomasse (DT)			
JT IN-Öl-DM-30	2,47	0,38	2,09
JT-degrad-IN-Öl-DM-30	2,49	0,41	2,09
JT-degrad.-IN-Öl-DM-IN-30	2,45	0,36	2,09
Palm-ID-Öl-DM-30	6,08	0,52	5,56
Raps-Öl-DM-05	1,03	0,26	0,77
Waldrestholz-DT-30	2,41	0,06	2,35
Strohballen-DT-30	2,34	0,03	2,31
KUP- DT-30	2,78	0,13	2,65
EtOH-BR-GuD-HKW-30	6,89	0,31	6,58
Palmöl-ID-GuD-HKW-30	5,92	0,57	5,35

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; BZ= Festoxid-Brennstoffzellen-BHKW; GM= Gasmotor-BHKW; GuD= Gas- und Dampfturbinen-HKW; RH= Rutenhirse; KUP= Kurzumtriebsanlage; JT= Jatropha (in Indien = IN); DM= Dieselmotor-BHKW; ID= Indonesien; DT= Dampfturbinen-HKW; Daten für Biomethan enthalten Aufbereitung und Einspeisung in Gasnetze sowie Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

Bei den Ergebnissen ist zu beachten, dass durch die Allokation bei den KWK-Systemen ein Teil des KEV auf die Wärme „umgebucht“ wird, so dass hier nur die „netto“-Anteile für die Strombereitstellung ausgewiesen sind.

Dies gilt auch für die Koppelprodukte in den Vorketten – so liegt z.B. der erneuerbare KEV-Wert für Strom aus Rapsöl aufgrund der Allokation nur bei 0,77 TJ Primärenergie pro TJ Stromerzeugung.

6.3 KEV-Werte der biogenen Wärmebereitstellung

Die KEV-Werte für die biogenen Heizsysteme zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 22 KEV-Werte der biogenen Wärmebereitstellung

Option [TJ _{primär} /TJ _{output}]	kumulierter Energieverbrauch		
	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar
Restholz-Pellet-Heizung-30	1,32	0,10	1,22
KUP-Pellet-Heizung-30	1,51	0,18	1,33
RH-Pellet-Heizung-30	1,39	0,16	1,23
Stroh-Pellet-Heizung-30	1,32	0,10	1,22
Waldrestholz-BZ-HKW-30	1,15	0,10	1,05
KUP-BZ-HKW-30	1,18	0,13	1,05
Waldrestholz-GT-HKW-30	1,40	0,12	1,28
KUP-GT-HKW-30	1,44	0,16	1,28
Waldrestholz-DT-HKW-30	0,89	0,02	0,86
KUP-DT-HKW-30	0,92	0,05	0,87
Strohballen-DT-HKW-30	0,87	0,02	0,85

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; KUP= Kurzumtriebsplantage; RH= Rutenhirse; BZ= Festoxid-Brennstoffzelle; HKW= Heizkraftwerk; GT= Gasturbine; DT= Dampfturbine; Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

Deutlich sichtbar ist hier der Effekt der Allokation bei den biogenen KWK-Systemen: durch die „Umbuchung“ von Teilen ihres KEV auf die KWK-Stromerzeugung sind ihre wärmebezogenen erneuerbaren KEV-Werte kleiner als 1.

6.4 KEV-Werte der Nutzung biogener Kraftstoffe

Auch für die Nutzung biogener Kraftstoffe wurde der KEV bilanziert, wobei auch hier keine Unterscheidung zwischen den angenommenen Landnutzungsänderungen erfolgt. Die entsprechenden Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 23 KEV-Werte der biogenen Kraftstoffnutzung

Option [$TJ_{\text{primär}}/TJ_{\text{input}}$]	kumulierter Energieverbrauch		
	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar
BtL-Stroh-30	1,82	0,05	1,77
BtL-Waldholz-30	1,88	0,07	1,81
BtL-KUP-30	1,94	0,12	1,81
JME-ertragreich-30	1,61	0,37	1,24
JME-marginal-30	1,62	0,38	1,24
PME-30	3,37	0,44	2,92
PME (trop.Wald)-30	4,22	0,56	3,67
Rapsöl-05	0,65	0,17	0,49
RME-05	0,71	0,29	0,42
AME-05	1,15	0,17	0,98
EtOH-ligno-Stroh-30	2,00	0,13	1,87
EtOH-BR-05	4,84	0,21	4,63
EtOH-BR-30	3,97	0,18	3,79
EtOH-Mais-05	1,47	0,50	0,97
EtOH-Weizen-05	1,54	0,50	1,04
BioCNG-Biomüll-05	1,90	0,32	1,58
BioCNG-Biomüll-30	1,67	0,11	1,55
BioCNG-Gülle-05	1,99	0,41	1,58
BioCNG-Gülle-30	1,76	0,21	1,55
BioCNG-Gras-Silage-05	1,99	0,41	1,58
BioCNG-Gras-Silage-30	1,76	0,21	1,55
BioCNG-Mais-05	1,98	0,41	1,58
BioCNG-Mais-30	1,76	0,21	1,55
BioCNG-Waldholz-30	1,86	0,10	1,76
BioCNG-RH-30	1,92	0,20	1,72
BioCNG-KUP-30	2,13	0,15	1,98
BZ-BioGH2-Waldholz-30	1,70	0,18	1,52
BZ-BioGH2- KUP-30	1,75	0,22	1,52
EM-Gülle-GuD-30	3,12	0,32	2,80
EM-RH-GuD-30	3,07	0,27	2,80
EM-EtOH-BR-30	7,25	0,33	6,93
EM-Palmöl-30	6,23	0,60	5,63

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; BtL= biomass-to-liquid (Fischer-Tropsch-Diesel); KUP= Kurzumtriebsplantage; JME= Jatrophaölmethylester; PME= Palmölmethylester; RME= Rapsölmethylester; AME= Altfettmethylester; BR= Brasilien; CNG= compressed natural gas; RH= Rutenhirse; KUP= Kurzumtriebsplantage; GH2= gasförmiger Wasserstoff; BZ= Brennstoffzelle; EM= Elektromobil; GuD= Gas- und Dampfturbinen-HKW; Daten beinhalten Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

6.5 KEV-Werte der Triplet-Vergleiche zur Bioenergienutzung

Schließlich wurde der KEV auch für die „Triplet“-Vergleiche bilanziert, wobei wie zuvor keine Unterscheidung zwischen den angenommenen Landnutzungsänderungen erfolgt. Die entsprechenden Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 24 KEV-Werte der Triplets mit Erdgas/Benzin bzw. Heizöl/Diesel als Referenz sowie den biogenen Alternativ-Triplets

TJ_{primär}/Triplet	kumulierter Energieverbrauch		
	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar
REF-Gas	0,14	0,14	0,00
Holz-Pellet-Hzg	0,14	0,08	0,07
Holz-Pellet-el-MV	0,15	0,12	0,03
KUP-Pellet-Hzg	0,16	0,08	0,07
KUP-Pellet-el-MV	0,15	0,12	0,04
KUP-BioCNG-Pkw	0,16	0,11	0,05
RH-Pellet-Hzg	0,15	0,08	0,07
RH-BioGuD-el	0,16	0,12	0,04
RH-BZ-HKW-el	0,15	0,12	0,04
RH-BioGuD-Pkw	0,15	0,11	0,04
Stroh-Pellet-Hzg	0,15	0,08	0,07
Stroh-DT-HKW-th	0,12	0,07	0,05
Stroh-EtOH-Pkw	0,17	0,11	0,06
Stroh-Pellet-el-MV	0,15	0,12	0,03
Stroh-DT-HKW-el	0,15	0,11	0,03
REF-Öl	0,14	0,14	0,00
KUP-Pellet-Hzg	0,15	0,08	0,07
KUP-DT-HKW-el	0,15	0,11	0,03
KUP-BioGuD-HKW-el	0,15	0,11	0,04
KUP-BtL-Pkw	0,16	0,11	0,05

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Daten beinhalten Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)

7 Zur Aussagegüte der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Ergebnisse der THG-Bilanzierung sind mit Unsicherheiten in drei wesentlichen Bereichen behaftet:

- Die **energiebedingten** CO₂-Äquivalente sind als vergleichsweise „sicher“ bilanzierbar anzusehen, die Unsicherheiten werden durch die Repräsentanz der angenommenen Settings für die realen Situationen geprägt. Bei den „Vorschau“-Werten für das Jahr 2030 sind naturgemäß Unsicherheiten bezogen auf die erreichbaren Erträge, die angenommenen Daten für die Konversionstechnologien und die „Hintergrunddaten“ (regionale Strommixe, Transportsysteme) gegeben, die aber weitestgehend alle Systeme gleichsinnig betreffen.
- Die **LUC-bedingten** THG-Emissionen wurden auf Basis der Modellannahmen zur Landnutzungsänderung abgeschätzt. Hierbei sind die dLUC-Werte als relativ belastbar anzunehmen, während die iLUC-Werte um mindestens +/- 50% schwanken können²¹.
- Die **N₂O-bedingten** CO₂-Äquivalente unterliegen sowohl den generellen Datenunsicherheiten bei der Verwendung von Dünger wie auch insbesondere der Konversion von N zu N₂O. Die entsprechende Bandbreite ist mit bis zu 25% bei düngereintensiven Bioenergiesystemen relativ hoch.
- Es wurden definitionsgemäß keine Variationen der betrachteten Settings in Bezug auf **verbesserte Anbaumethoden** (z.B. zero tillage, Düngung über Abwasser o.ä.) betrachtet, womit eine konservative Sichtweise verfolgt wurde.

Eine Vertiefung der hier durchgeführten Analysen unter Einbeziehung weiterer Erkenntnisse zu N₂O-Emissionen sowie LUC-bedingten THG-Emissionen ist aus wissenschaftlicher Sicht wünschenswert, würde die Unsicherheit der Aussagen jedoch kaum reduzieren, da hierdurch im wesentlichen eine breitere Darstellung der möglichen Ergebnisfälle erreicht würde, nicht aber eine Einengung der Bandbreite.

Bei den KEV-Ergebnissen sind allein die o.g. energiebedingten Unsicherheiten relevant, so dass hier von einer nur geringen Unsicherheit auszugehen ist.

²¹ Dies ist die in Fritsche/Hennenberg (2008) genannte Bandbreite des „iLUC factor“ von 25% bis 75% des theoretischen Gesamtwertes. Die hier verwendeten 25-50% decken 75% dieser Bandbreite ab.

Literatur

- Best, Gustavo et al. 2008: A Sustainable Biofuels Consensus; outcome of a meeting hosted by the Rockefeller Foundation Bellagio Study and Conference Center; Lago di Como, Italy http://www.bioenergywebshore.org/205.html?no_cache=1
- CBD (Secretariat of the Convention on Biological Diversity) 2008: The potential impacts of biofuels on biodiversity - matters arising from SBSTTA recommendation XII/7; Note by the Executive Secretary; UNEP/CBD/COP/9/26 (draft)
- 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
- CSI (Cheminfo Services Inc.) et al. 2008b: Sensitivity Analysis of Bioethanol LCA Models to Determine Assumptions With the Greatest Influence on Outputs; Final Report; Ontario
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2008: Bioenergy and Food Security (BEFS) Project; Rome www.fao.org/NR/ben/BEFS
- Fargione, J. et al. 2008: Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt; in: Science vol. 319 (5867), p. 1235-1238 www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1152747
- FES (Friedrich-Ebert-Stiftung) 2008: Klimaschutz und Straßenverkehr - Effizienzsteigerung und Biokraftstoffe und deren Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen; Zimmer, Wiebke/Fritsche, Uwe; Kurzstudie für die FES; Expertisen und Dokumentationen zur Wirtschafts- und Sozialpolitik; Bonn <http://library.fes.de/pdf-files/wiso/05384.pdf>
- Firbank, Les 2008: Assessing the ecological impacts of bioenergy projects; in: Bio-Energy Research Jan. 26, 2008 <http://www.springerlink.com/content/%20r5668x542208h473/fulltext.pdf>
- 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 2007: GHG Accounting for Biofuels: Considering CO₂ from Leakage; Extended and updated version, Darmstadt (Germany), May 21, 2007; working paper prepared for BMU by Oeko-Institut; Darmstadt
- Fritsche, Uwe R./Hennenberg, Klaus 2008: The "iLUC Factor" as a Means to Hedge Risks of GHG Emissions from Indirect Land-Use Change Associated with Bioenergy Feedstock Provision; working paper prepared for BMU by Oeko-Institut; Darmstadt (forthcoming)
- GBEP (Global Bio-Energy Partnership) 2007: A Review of the Current State of Bioenergy Development in G8 + 5 countries; GBEP Secretariat; Rome http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2007_events/wecrome2007/MASTER_GBEP_Report_final_16.11.2007_01.pdf
- 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) 2007: Climate Change – The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge
- Macedo, Isaias C./Seabrab, Joaquim E.A./Silva, Joao E.A.R. 2008: Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020; in: Biomass and Bioenergy
<http://doi:10.1016/j.biombioe.2007.12.006>
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.) 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 e.V.) 2006: Stand und Entwicklung von Treibhausgasemissionen in den Vorketten für Erdöl und Erdgas; U. Fritsche/L. Rausch/K. Schmidt; Endbericht i.A. des IWO e.V., Darmstadt
www.oeko.de/service/gemis/files/present/2006vorketten_iwo.pdf
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.) 2007a: Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten; Kurzbericht i.A. des BGW; Darmstadt
http://www.oeko.de/service/gemis/files/doku/gemis44thg_emissionen_fossil.pdf
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.) 2008a: Bioenergy and Biodiversity: Potential for Sustainable Use of Degraded Lands; Fritsche, Uwe/Hennenberg, Klaus/Wiegmann, Kirsten; Briefing Paper for the Information Event at CBD-COP9 on May 27, 2008; Darmstadt
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.) 2008b: Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme; Fritsche, Uwe/Rausch, Lothar; Endbericht zum F&E-Vorhaben FKZ 360 16 008 i.A. des Umweltbundesamts; Darmstadt
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.) 2008c Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.5 Internet-release auf www.gemis.de
- 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
- Petersen, Rudolf/Hook, Walter/Zimmer, Wiebke/Fritsche, Uwe 2008: Future Challenges of Transport and Environment; Symposium Paper prepared for the Interna-

tional Symposium "Future Challenges of Transport and Environment", June 24 and 25, 2008, Berlin, sponsored by the International Council on Clean Transportation (ICCT), William and Flora Hewlett Foundation and Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH)

RS (The Royal Society) 2008: Sustainable Biofuels: Prospects and Challenges. RS Policy document 01/08; London
<http://royalsociety.org/displaypagedoc.asp?id=28632>

Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, T., Hayes, D., and Yu, T. (2008) Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land Use Change; in: Science (published online 7 February 2008)
www.sciencexpress.org;10.1126/science.1151861

UN-Energy 2007: Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Makers; United Nations; New York <http://esa.un.org/un-energy/pdf/susdev.Biofuels.FAO.pdf>

WBGU (German Advisory Council on Global Change) 2003: World in Transition - Towards Sustainable Energy Systems; Berlin
http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_engl.pdf

ANHANG: Sekundärenergiebezogene THG- und KEV-Werte

Die folgende Tabelle gibt die THG-Emissionen sowie die KEV-Werte und Flächenbedarfe für die Bereitstellung von biogenen Sekundärenergieträgern wieder, d.h. als Schnittstelle wurde die Anlieferung frei Nutzungssystem, aber **ohne** die Nutzung der biogenen Energieträger, gewählt.

	THG-Emissionen in kg/TJ				KEV in TJ _{primär} /TJ _{end}			Fläche in m²/TJ
	CO ₂ -Äquivalent	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar	
Biogas-direkt-05								
Biomüll-05	9.967	6.657	140,9	0,2	1,60	0,09	1,50	126
Gras-Silage-05	16.611	13.083	146,1	0,6	1,73	0,18	1,55	153.981
Gülle-05	16.912	13.487	142,8	0,5	1,73	0,18	1,55	129
Mais-0LUC-05	28.423	12.430	150,1	42,4	1,73	0,18	1,55	72.983
Mais-dLUC (Grünland)-05	47.580	31.587	150,1	42,4	1,73	0,18	1,55	72.983
Mais-iLUC (Acker)-05	101.266	85.273	150,1	42,4	1,73	0,18	1,55	72.983
Mais-iLUC (Grünland)-05	120.425	104.432	150,1	42,4	1,73	0,18	1,55	72.983
Biogas-direkt-30								
Gras-Silage-30	13.001	11.093	75,8	0,6	1,70	0,14	1,56	154.134
Gülle-30	11.972	10.913	39,6	0,5	1,58	0,13	1,45	281
Mais-0LUC-30	23.314	10.076	46,5	41,1	1,58	0,13	1,45	57.434
Mais-dLUC (Grünland)-30	38.343	25.105	46,5	41,1	1,58	0,13	1,45	57.434
Mais-iLUC (Acker)-30	80.457	67.219	46,5	41,1	1,58	0,13	1,45	57.434
Mais-iLUC (Grünland)-30	95.486	82.248	46,5	41,1	1,58	0,13	1,45	57.434
RH-0LUC-30	14.178	8.511	44,1	15,7	1,67	0,11	1,56	77.212
RH-dLUC (Acker)-30	8.536	2.869	44,1	15,7	1,67	0,11	1,56	77.212
RH-dLUC (Grünland)-30	28.698	23.031	44,1	15,7	1,67	0,11	1,56	77.212
RH-iLUC (Acker)-30	85.459	79.792	44,1	15,7	1,67	0,11	1,56	77.212
RH-iLUC (Grünland)-30	105.690	100.023	44,1	15,7	1,67	0,11	1,56	77.212
Biomethan-05								
Biomüll-05	24.227	17.394	289,0	0,6	1,82	0,25	1,57	131
Gras-Silage-05	30.484	23.447	293,8	0,9	1,91	0,34	1,57	153.989

	THG-Emissionen in kg/TJ				KEV in TJ _{primär} /TJ _{end}			Fläche in m²/TJ
	CO ₂ -Äquivalent	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar	
Gülle-05	30.786	23.851	290,5	0,9	1,90	0,34	1,57	135
Mais-0LUC-05	42.296	22.795	297,8	42,7	1,90	0,33	1,57	72.990
Mais-dLUC (Grünland)-05	61.454	41.952	297,8	42,7	1,90	0,33	1,57	72.990
Mais-iLUC (Acker)-05	115.141	95.639	297,8	42,7	1,90	0,33	1,57	72.990
Mais-iLUC (Grünland)-05	134.299	114.798	297,8	42,7	1,90	0,33	1,57	72.990
Biomethan-30								
Biomüll-30	8.891	7.470	55,1	0,5	1,62	0,08	1,53	433
Gras-Silage-30	15.620	14.007	60,0	0,8	1,71	0,18	1,53	149.699
Gülle-30	15.927	14.387	57,3	0,7	1,71	0,18	1,53	437
KUP-0LUC-30	11.568	8.085	12,9	10,8	1,67	0,11	1,56	115.254
KUP-dLUC (Acker)-30	-4.260	-7.743	12,9	10,8	1,67	0,11	1,56	115.254
KUP-dLUC (Grünland)-30	26.020	22.537	12,9	10,8	1,67	0,11	1,56	115.254
KUP-iLUC (Acker)-30	110.853	107.370	12,9	10,8	1,67	0,11	1,56	115.254
KUP-iLUC (Grünland)-30	141.127	137.644	12,9	10,8	1,67	0,11	1,56	115.254
Mais-0LUC-30	27.776	13.512	64,5	43,2	1,71	0,18	1,53	60.150
Mais-dLUC (Grünland)-30	43.478	29.214	64,5	43,2	1,71	0,18	1,53	60.150
Mais-iLUC (Acker)-30	87.479	73.215	64,5	43,2	1,71	0,18	1,53	60.150
Mais-iLUC (Grünland)-30	103.180	88.916	64,5	43,2	1,71	0,18	1,53	60.150
RH-0LUC-30	17.502	11.501	61,5	15,5	1,68	0,15	1,53	75.072
RH-dLUC (Acker)-30	12.029	6.028	61,5	15,5	1,68	0,15	1,53	75.072
RH-dLUC (Grünland)-30	31.589	25.588	61,5	15,5	1,68	0,15	1,53	75.072
RH-iLUC (Acker)-30	86.657	80.656	61,5	15,5	1,68	0,15	1,53	75.072
RH-iLUC (Grünland)-30	106.284	100.283	61,5	15,5	1,68	0,15	1,53	75.072
Waldholz-30	5.114	4.868	9,0	0,1	1,62	0,06	1,56	135
feste Biomasse								
Holz-HS-KUP-0LUC-frei-KW-30	7.122	4.897	7,2	7,0	1,08	0,07	1,01	74.830
Holz-HS-KUP-dLUC (Acker)-frei-KW-30	-3.166	-5.391	7,2	7,0	1,08	0,07	1,01	74.830
Holz-HS-KUP-dLUC (Grünland)-frei-KW-30	16.516	14.291	7,2	7,0	1,08	0,07	1,01	74.830
Holz-HS-KUP-iLUC (Acker)-frei-KW-30	71.656	69.431	7,2	7,0	1,08	0,07	1,01	74.830
Holz-HS-KUP-iLUC (Grünland)-frei-KW-30	91.334	89.109	7,2	7,0	1,08	0,07	1,01	74.830
Holzpellets-Holzwirtschaft-frei-KW-30	5.756	5.631	3,6	0,1	1,09	0,07	1,02	98

WBGU-Expertise „Treibhausgas- und Primärenergiebilanzen von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen“; Endbericht Juli 2008

	THG-Emissionen in kg/TJ				KEV in TJ _{primär} /TJ _{end}			Fläche in m²/TJ
	CO ₂ -Äquivalent	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar	
Holzpellets-KUP-0LUC-frei-KW-30	13.960	11.532	12,7	7,2	1,26	0,14	1,11	75.736
Holzpellets-KUP-dLUC (Acker)-frei-KW-30	3.569	1.140	12,7	7,2	1,26	0,14	1,11	75.736
Holzpellets-KUP-dLUC (Grünland)-frei-KW-30	23.449	21.021	12,7	7,2	1,26	0,14	1,11	75.736
Holzpellets-KUP-iLUC (Acker)-frei-KW-30	79.147	76.718	12,7	7,2	1,26	0,14	1,11	75.736
Holzpellets-KUP-iLUC (Grünland)-frei-KW-30	99.023	96.594	12,7	7,2	1,26	0,14	1,11	75.736
Strohballen-frei-KW-30	1.349	1.335	0,2	0,0	1,02	0,02	1,00	0
Strohpellets-frei-HH/KV-30	8.278	8.093	5,3	0,2	1,12	0,10	1,03	135
Strohpellets-frei-KW-30	8.116	7.935	5,2	0,2	1,12	0,09	1,03	135
BioCNG 05								
BioCNG-Biomüll-DE-2005	32.499	22.225	436,3	0,8	1,90	0,32	1,58	233
BioCNG-Gras-Silage-DE-2005	38.756	28.278	441,0	1,1	1,99	0,41	1,58	154.091
BioCNG-Gülle-DE-2005	39.057	28.682	437,8	1,0	1,99	0,41	1,58	236
BioCNG-Mais-0LUC-DE-2005	50.568	27.625	445,0	42,9	1,98	0,41	1,58	73.091
BioCNG-Mais-dLUC (Wiese)-DE-2005	69.725	46.783	445,0	42,9	1,98	0,41	1,58	73.091
BioCNG-Mais-iLUC (Acker)-DE-2005	123.412	100.469	445,0	42,9	1,98	0,41	1,58	73.091
BioCNG-Mais-iLUC (Wiese)-DE-2005	142.571	119.628	445,0	42,9	1,98	0,41	1,58	73.091
BioCNG 30								
BioCNG-Biomüll-30	14.704	11.031	151,5	0,6	1,67	0,12	1,55	523
BioCNG-Gras-Silage-30	21.433	17.568	156,5	0,9	1,76	0,22	1,55	149.789
BioCNG-Gülle-30	21.740	17.948	153,8	0,9	1,76	0,21	1,55	527
BioCNG-KUP-0LUC-30	17.381	11.645	109,4	10,9	1,72	0,15	1,57	115.344
BioCNG-KUP-dLUC (Acker)-30	1.553	-4.182	109,4	10,9	1,72	0,15	1,57	115.344
BioCNG-KUP-dLUC (Grünland)-30	31.834	26.098	109,4	10,9	1,72	0,15	1,57	115.344
BioCNG-KUP-iLUC (Acker)-30	116.666	110.931	109,4	10,9	1,72	0,15	1,57	115.344
BioCNG-KUP-iLUC (Grünland)-30	146.940	141.205	109,4	10,9	1,72	0,15	1,57	115.344
BioCNG-Mais-0LUC-30	33.589	17.073	161,0	43,3	1,76	0,21	1,55	60.240
BioCNG-Mais-dLUC (Grünland)-30	49.291	32.775	161,0	43,3	1,76	0,21	1,55	60.240
BioCNG-Mais-iLUC (Acker)-30	93.292	76.776	161,0	43,3	1,76	0,21	1,55	60.240
BioCNG-Mais-iLUC (Grünland)-30	108.993	92.477	161,0	43,3	1,76	0,21	1,55	60.240
BioCNG-RH-0LUC-30	23.315	15.062	157,9	15,6	1,73	0,19	1,55	75.162
BioCNG-RH-dLUC (Acker)-30	17.842	9.589	157,9	15,6	1,73	0,19	1,55	75.162

	THG-Emissionen in kg/TJ				KEV in TJ _{primär} /TJ _{end}			Fläche in m²/TJ
	CO ₂ -Äquivalent	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar	
BioCNG-RH-dLUC (Grünland)-30	37.402	29.149	157,9	15,6	1,73	0,19	1,55	75.162
BioCNG-RH-iLUC (Acker)-30	92.470	84.217	157,9	15,6	1,73	0,19	1,55	75.162
BioCNG-RH-iLUC (Grünland)-30	112.097	103.844	157,9	15,6	1,73	0,19	1,55	75.162
BioCNG-Waldholz-30	10.927	8.429	105,5	0,2	1,67	0,10	1,57	225
flüssige Bioenergie-05								
AME-Alt fett-DE-2005	7.022	6.182	34,2	0,2	1,14	0,16	0,98	24
Bio-EtOH ZR-0LUC-BR-05	26.073	16.608	129,0	22,0	4,84	0,21	4,63	66.097
Bio-EtOH ZR-dLUC (Acker)-BR-05	25.708	16.243	129,0	22,0	4,84	0,21	4,63	66.097
Bio-EtOH ZR-iLUC (Acker)-BR-05	91.774	82.308	129,0	22,0	4,84	0,21	4,63	66.097
Bio-EtOH-Mais-0LUC-05	40.171	29.682	62,1	30,6	1,47	0,50	0,97	60.371
Bio-EtOH-Mais-dLUC (Grünland)-05	56.045	45.556	62,1	30,6	1,47	0,50	0,97	60.371
Bio-EtOH-Mais-iLUC (Acker)-05	100.528	90.039	62,1	30,6	1,47	0,50	0,97	60.371
Bio-EtOH-Mais-iLUC (Grünland)-05	116.401	105.912	62,1	30,6	1,47	0,50	0,97	60.371
Bio-EtOH-Weizen-0LUC-05	45.687	30.664	60,0	46,1	1,54	0,50	1,04	102.051
Bio-EtOH-Weizen-dLUC (Grünland)-05	72.574	57.552	60,0	46,1	1,54	0,50	1,04	102.051
Bio-EtOH-Weizen-iLUC (Acker)-05	147.921	132.898	60,0	46,1	1,54	0,50	1,04	102.051
Bio-EtOH-Weizen-iLUC (Grünland)-05	174.807	159.785	60,0	46,1	1,54	0,50	1,04	102.051
Raps-Öl-0LUC-05	20.905	11.322	16,6	31,1	0,65	0,17	0,49	70.129
Raps-Öl-dLUC (Grünland)-05	36.051	26.468	16,6	31,1	0,65	0,17	0,49	70.129
Raps-Öl-iLUC (Acker)-05	78.511	68.929	16,6	31,1	0,65	0,17	0,49	70.129
Raps-Öl-iLUC (Grünland)-05	93.661	84.079	16,6	31,1	0,65	0,17	0,49	70.129
RME-0LUC-05	26.291	16.163	46,9	30,6	0,71	0,29	0,42	86.001
RME-dLUC (Grünland)-05	40.860	30.732	46,9	30,6	0,71	0,29	0,42	86.001
RME-iLUC (Acker)-05	81.694	71.566	46,9	30,6	0,71	0,29	0,42	86.001
RME-iLUC (Grünland)-05	96.266	86.138	46,9	30,6	0,71	0,29	0,42	86.001
flüssige Bioenergie-30								
Bio-EtOH ZR-0LUC-BR-30	21.952	14.201	105,7	18,0	3,97	0,18	3,79	50.219
Bio-EtOH ZR-dLUC (Acker)-BR-30	21.675	13.924	105,7	18,0	3,97	0,18	3,79	50.219
Bio-EtOH ZR-dLUC (degradiert)-BR-30	3.272	-4.479	105,7	18,0	3,97	0,18	3,79	50.219
Bio-EtOH ZR-dLUC (Savanne)-BR-30	94.370	86.619	105,7	18,0	3,97	0,18	3,79	50.219
Bio-EtOH ZR-iLUC (Acker)-BR-30	71.867	64.116	105,7	18,0	3,97	0,18	3,79	50.219

WBGU-Expertise „Treibhausgas- und Primärenergiebilanzen von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen“; Endbericht Juli 2008

	THG-Emissionen in kg/TJ				KEV in TJ _{primär} /TJ _{end}			Fläche in m²/TJ
	CO ₂ -Äquivalent	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar	
Bio-EtOH-ligno-Stroh-30	15.623	15.044	10,3	1,2	2,00	0,15	1,85	85
BtL-KUP-0LUC-30	14.485	8.909	21,2	17,2	1,94	0,12	1,81	133.912
BtL-KUP-dLUC (Acker)-30	-3.925	-9.502	21,2	17,2	1,94	0,12	1,81	133.912
BtL-KUP-dLUC (Grünland)-30	31.296	25.720	21,2	17,2	1,94	0,12	1,81	133.912
BtL-KUP-iLUC (Acker)-30	129.973	124.396	21,2	17,2	1,94	0,12	1,81	133.912
BtL-KUP-iLUC (Grünland)-30	165.187	159.611	21,2	17,2	1,94	0,12	1,81	133.912
BtL-Stroh-30	4.906	3.403	8,3	4,4	1,82	0,05	1,77	1
BtL-Waldholz-30	6.967	5.156	16,7	4,8	1,88	0,07	1,81	7
Jatropha-ertragreich-0LUC-Öl-30	27.776	18.746	7,1	30,0	1,58	0,25	1,34	117.905
Jatropha-ertragreich-dLUC (Acker)-Öl-30	22.659	13.629	7,1	30,0	1,59	0,25	1,34	117.905
Jatropha-ertragreich-iLUC (Acker)-Öl-30	140.654	131.624	7,1	30,0	1,59	0,25	1,34	117.905
Jatropha-marginal-dLUC-Öl-30	-74.474	-81.743	7,3	24,0	1,60	0,27	1,34	247.033
JME-ertragreich-0LUC-30	32.790	23.344	36,7	29,1	1,61	0,37	1,24	131.456
JME-ertragreich-dLUC (Acker)-30	27.608	18.162	36,7	29,1	1,61	0,37	1,24	131.456
JME-ertragreich-iLUC (Acker)-30	140.677	131.231	36,7	29,1	1,61	0,37	1,24	131.456
JME-marginal-dLUC-30	-65.470	-73.229	36,8	23,4	1,62	0,38	1,24	255.194
PME-0LUC-30	43.374	25.288	76,8	55,1	3,37	0,45	2,92	63.681
PME-dLUC (degradiert)-30	-203.268	-221.353	76,8	55,1	3,37	0,45	2,92	82.900
PME-dLUC (trop.Wald)-30	553.100	535.015	76,8	55,1	3,37	0,45	2,92	63.681
RME-0LUC-30	26.158	16.257	44,4	30,0	0,72	0,29	0,43	85.999
RME-dLUC (Grünland)-30	40.727	30.826	44,4	30,0	0,72	0,29	0,43	85.999
RME-iLUC (Acker)-30	81.570	71.669	44,4	30,0	0,72	0,29	0,43	85.999
RME-iLUC (Grünland)-30	96.143	86.242	44,4	30,0	0,72	0,29	0,43	85.999
Strom für Elektromobile								
Biomethan-Gülle-30	30.037	26.491	107,0	3,7	3,12	0,32	2,80	801
Biomethan-KUP-0LUC-30	22.072	14.974	25,9	22,0	3,05	0,20	2,85	210.626
Biomethan-KUP-dLUC (Acker)-30	-6.853	-13.951	25,9	22,0	3,05	0,20	2,85	210.626
Biomethan-KUP-dLUC (Grünland)-30	48.484	41.385	25,9	22,0	3,05	0,20	2,85	210.626
Biomethan-KUP-iLUC (Acker)-30	203.514	196.416	25,9	22,0	3,05	0,20	2,85	210.626
Biomethan-KUP-iLUC (Grünland)-30	258.839	251.741	25,9	22,0	3,05	0,20	2,85	210.626
Biomethan-Mais-0LUC-30	51.692	24.893	120,1	81,2	3,13	0,32	2,80	109.925

	THG-Emissionen in kg/TJ				KEV in TJ _{primär} /TJ _{end}			Fläche in m²/TJ
	CO ₂ -Äquivalent	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Summe	nichterneuerbar	erneuerbar	
Biomethan-Mais-dLUC (Grünland)-30	80.387	53.588	120,1	81,2	3,13	0,32	2,80	109.925
Biomethan-Mais-iLUC (Acker)-30	160.798	133.998	120,1	81,2	3,13	0,32	2,80	109.925
Biomethan-Mais-iLUC (Grünland)-30	189.492	162.693	120,1	81,2	3,13	0,32	2,80	109.925
Biomethan-RH-OLUC-30	32.916	21.218	114,6	30,6	3,07	0,27	2,80	137.194
Biomethan-RH-dLUC (Acker)-30	22.914	11.216	114,6	30,6	3,07	0,27	2,80	137.194
Biomethan-RH-dLUC (Grünland)-30	58.659	46.961	114,6	30,6	3,07	0,27	2,80	137.194
Biomethan-RH-iLUC (Acker)-30	159.295	147.597	114,6	30,6	3,07	0,27	2,80	137.194
Biomethan-RH-iLUC (Grünland)-30	195.164	183.466	114,6	30,6	3,07	0,27	2,80	137.194
Biomethan-Waldholz-30	10.277	9.095	18,7	2,5	2,96	0,11	2,85	249
EtOH-BR-OLUC-30	40.716	25.814	195,7	35,1	7,25	0,33	6,93	91.775
EtOH-BR-dLUC (degradiert)-30	6.577	-8.325	195,7	35,1	7,25	0,33	6,93	91.775
EtOH-BR-dLUC (Savanne)-30	173.059	158.157	195,7	35,1	7,25	0,33	6,93	91.775
EtOH-BR-iLUC (Acker)-30	131.935	117.033	195,7	35,1	7,25	0,33	6,93	91.775
Palmöl-OLUC-30	71.891	38.286	91,4	106,4	6,23	0,60	5,63	85.758
Palmöl-dLUC (degradiert)-30	-396.693	-430.298	91,4	106,4	6,23	0,60	5,63	122.272
Palmöl-dLUC (trop.Wald)-30	1.040.301	1.006.696	91,4	106,4	6,23	0,60	5,63	85.758

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.5; Daten beinhalten Allokation von Koppelprodukten über deren Heizwert (auch in Vorketten)