

Innovationen in Ihrem Interesse.

# CO<sub>2</sub>-STUDIE

---

CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger  
Mobilität durch Biokraftstoffe:  
Eine Bestandsaufnahme

---

Abschlussbericht

Das Urheberrecht an diesem Bericht mit sämtlichen Beilagen verbleibt der FVV.

Die FVV übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Ohne schriftliche Genehmigung der FVV darf der Bericht weder kopiert noch vervielfältigt werden.

Forschungsvereinigung  
Verbrennungskraftmaschinen



Forschungsvereinigung  
Verbrennungskraftmaschinen e.V.  
Lyoner Straße 18 · 60528 Frankfurt  
Postfach 71 08 64 · 60498 Frankfurt  
Telefon: +49-69/66 03 16 81  
Telefax: +49-69/66 03 16 73  
E-Mail: [info@fvv-net.de](mailto:info@fvv-net.de)  
Internet: [www.fvv-net.de](http://www.fvv-net.de)

# CO<sub>2</sub>-Studie

Vorhaben Nr. 814

---

## CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme

---

### Abschlussbericht

#### Kurzfassung:

Weltweit gibt es eine Vielzahl an Studien, in denen die Umweltwirkungen von Biokraftstoffen untersucht und Abschätzungen zu den Kosten- und Mengenpotenzialen vorgenommen wurden – mit bisweilen beträchtlichen Unterschieden in den Ergebnissen und Schlussfolgerungen. Um darüber eine Übersicht zu erhalten, die die Stärken und Schwächen der Arbeiten identifiziert und den Forschungsbedarf ermittelt, hat die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) das Heidelberger IFEU-Institut mit der vorliegenden Studie beauftragt. Gefördert wurde das Vorhaben von der FVV, der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. In dieser Studie wurden alle internationalen, öffentlich zugänglichen Publikationen zu allen derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen wie z. B. Biodiesel und Bioethanol als auch zu potenziell zukünftigen Biokraftstoffen wie beispielsweise BTL analysiert und miteinander verglichen. Bezugspunkte der Vergleiche sind entweder die konventionellen Kraftstoffe oder die Biokraftstoffe untereinander. In den meisten Fällen wird der Lebensweg von der Erzeugung bis zur Nutzung im Fahrzeug betrachtet.

Die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen, der weiteren Umweltwirkungen sowie der Kostenabschätzungen von Biokraftstoffen weichen sehr voneinander ab. Dies ist eine Folge der meist unterschiedlichen Annahmen zum Anbau, zur Konversion oder zur Bewertung von Kuppelprodukten.

**Ökologische Auswirkungen:** Biokraftstoffe weisen gegenüber fossilen Kraftstoffen ökologische Vor- und Nachteile auf. Die Vorteile von Biokraftstoffen liegen in der Schonung fossiler Ressourcen und der Verminderung des Treibhauseffektes, was dadurch zum Ausdruck kommt, dass die Energie- und Treibhausgasbilanzen zugunsten der Biokraftstoffe ausfallen. Beim Vergleich der Biokraftstoffe untereinander kann ETBE bei flächenbezogener Betrachtung gegenüber den übrigen Biokraftstoffen Vorteile der Energie- und Treibhausgasbilanzen aufweisen. Bioethanol schneidet in Abhängigkeit der Rohstoffbasis besser bzw. schlechter ab als Biodiesel. Bei Annahme gleicher Systemgrenzen weist Biodiesel gegenüber Pflanzenöl Vorteile auf. Die Vorteile einiger Biokraftstoffe sind jedoch nicht in allen geographischen Räumen gegeben. So ist beispielsweise die Bioethanolproduktion aus Zuckerrohr auf tropische Klimabedingungen beschränkt. Biokraftstoffe aus Reststoffen – wie BTL – können erst unter Berücksichtigung des Alternativnutzens bewertet werden. Dieser wurde in den bisherigen Studien außer Acht gelassen. Nachteile der Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse liegen in der höheren Eutrophierung, Versauerung und Ozonabbau. Hierfür sind die bei der landwirtschaftlichen Produktion entstehenden Stickstoffverbindungen verantwortlich. Für Biokraftstoffe aus Reststoffen können für Versauerung und Eutrophierung keine richtungssicheren Aussagen getroffen werden.

Eine ökologisch begründete Entscheidung muss die einzelnen Vor- und Nachteile der Biokraftstoffe gewichten. Wenn der Schonung fossiler Ressourcen und der Verminderung des Treibhauseffektes höchste Priorität eingeräumt wird, fällt die Entscheidung zugunsten der Biokraftstoffe aus. Denn die Nachteile sind nicht so dramatisch, als dass sie die positive Gesamtbewertung konterkarierten. Auch in Zukunft werden sich die ökologischen Unterschiede zwischen Biokraftstoffen und fossilen Kraftstoffen nicht entscheidend verändern. Wahrscheinlich steigen die Vorteile der derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffe gegenüber den konventionellen Kraftstoffen in Zukunft an.

**Kosten:** Die Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen sind grundsätzlich höher als die von konventionellen Kraftstoffen. Unter volkswirtschaftlichen Aspekten, die hier nicht thematisiert wurden, mag sich der Vergleich umkehren. Der Vergleich der direkten Kosten wird von vielen ökonomischen und gesellschaftlichen Randbedingungen bestimmt. So hängen die Bereitstellungskosten der fossilen Kraftstoffe

vom Weltrohölpreis und dessen Schwankungen ab. Diejenigen der Biokraftstoffe variieren je nach landesspezifischen Subventionspraktiken in der Landwirtschaft und den länderspezifisch unterschiedlichen Personal- und Transportkosten. Die dadurch entstehenden Bandbreiten und Unsicherheiten sind so groß, dass auf der Basis der vorliegenden Literatur kein tiefgehendes, belastbares Ranking unter den Biokraftstoffen vorgenommen werden kann. Auch zukünftige Kostenerörterungen sind eher spekulativ.

Unter bestimmten Bedingungen können Biokraftstoffe bereits heute in der Erzeugung kostengünstiger sein als fossile Kraftstoffe, so bei der Produktion von Biodiesel aus Altspeisefetten.

**Mengenpotenzial:** Das Potenzial zur Erzeugung von Biokraftstoffen ist begrenzt. Zwar könnte die weltweit jährlich zuwachsende Biomasse theoretisch den gesamten Kraftstoffbedarf abdecken, doch stehen dem Restriktionen durch Flächenkonkurrenzen (Nahrungsmittelproduktion, Naturschutz, nachhaltige Landbewirtschaftung) und Nutzungskonkurrenzen (Biomasse für stoffliche Nutzung, Bioenergieträger zur Strom- und Wärmegewinnung) entgegen. So schrumpft das nutzbare Potenzial in Deutschland alleine durch Flächenkonkurrenzen auf wenige Prozent des Kraftstoffmarkts. Belastbare Quantifizierungen für die EU oder Welt stehen noch aus. Die Nutzung von Biomasse aus Reststoffen weist diese Einschränkungen nicht auf.

Eine weitere für das Mengenpotenzial entscheidende Größe ist die Verfügbarkeit und die Effizienz von neuen Produktionstechnologien, zum Beispiel für BTL, Ethanol aus Lignocellulose oder für Bio-Wasserstoff. Wann welche Technologien zur Verfügung stehen, kann nach dem derzeitigen Wissensstand nicht sicher vorhergesagt werden.

**Forschungsbedarf:** Insgesamt besteht ein erheblicher Forschungsbedarf zu Biokraftstoffen. Zu mehreren Biokraftstoffen wie Biodiesel aus Palmöl und Jatropha liegen keine Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen vor. Für DME, Methanol und BTL existieren Studien nur zu einem einzigen Konversionspfad. Noch größer ist die Lücke bei den Ökobilanzen. Beispielsweise fehlen sie zu einer Vielzahl an Konversionsrouten wie z. B. im Bereich der BTL. Im Detail fehlen viele wichtige Einzeluntersuchungen, so für Bioethanole oder zu den motorseitigen Emissionen der Biokraftstoffe in modernsten Motorkonzepten.

Ebenso, wie die direkten Kosten unter verschiedenen Aspekten vertieft untersucht werden sollten, sollten auch Potenzialabschätzungen unter besonderer Berücksichtigung von Flächen- und Nutzungskonkurrenzen für Bezugsräume wie etwa EU oder Welt durchgeführt werden.

**Zusammengefasst** und vereinfacht ausgedrückt haben Biokraftstoffe gegenüber fossilen Kraftstoffen ökologische Vorteile im Ressourcen- und Klimaschutz, die bei hoher Gewichtung dieser Kriterien die Nachteile in den Kriterien Versauerung, Eutrophierung und Ozonabbau überwiegen. Biokraftstoffe werden in der Regel teurer produziert – volkswirtschaftliche oder soziale Effekte sind hier nicht berücksichtigt. Wegen der Flächen- und Nutzungskonkurrenz können Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse nur einen vermutlich eher kleinen Teil der fossilen Kraftstoffe ersetzen. Die Bereitstellung innovativer Biokraftstoffe wie BTL bedürfen neuer Technologien.

---

Berichtsumfang:	228 Seiten, 86 Abbildungen, 20 Tabellen
Beginn der Arbeiten:	01. Mai 2003
Ende der Arbeiten:	30. April 2004
Zuschussgeber:	FVV e.V. / UFOP e.V. / FAT e.V.
Forschungsstelle:	ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH Leitung: Dr. U. Höpfner
Bearbeiter und Verfasser:	Dr. M. Quirin Dipl.-Phys. Ing. S. O. Gärtner Dr. M. Pehnt Dr. G. A. Reinhardt
Obmann des Arbeitskreises:	Prof. D. Gruden, Porsche AG, Weissach
Vorsitzender des FVV Beirates:	Dr. C. Teetz, MTU Friedrichshafen
Weitere Berichte zum Forschungsvorhaben:	R 523 (2004)

## Danksagung

Unser Dank gilt der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e.V., die die Forschungsaufgabe gestellt hat, sowie der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP) e.V. und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) e.V., die diese Studie zusammen mit der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen finanziell gefördert haben. Herrn Bösel von der FVV danken wir für die zuverlässige und reibungslose technische Abwicklung des Projekts.

Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Gruden begleitet. Herrn Prof. Dr. Gruden danken wir für die Übernahme des Obmanns. Des Weiteren gebührt ihm sowie allen übrigen Mitgliedern dieses Arbeitskreises unser besonderer Dank für die kollegiale Arbeitsatmosphäre sowie die engagierte und konstruktive Mitarbeit.

Eine Vielzahl an Kollegen und Kolleginnen externer Forschungsinstitutionen haben uns bei der Literaturrecherche sowie dem Bereitstellen von Primärdaten unterstützt. Ihnen allen danken wir herzlich. Besonders viel Arbeit übernahmen dabei:

- Jack Chiodo, CH Environmental, Victoria, Australien
- Tim Grant, Centre for Design at RMIT, Melbourne, Australien
- Grégory Houillon, BG Consulting Engineers, Sion, Schweiz
- Dr. Atsushi Inaba, Research Centre for Life Cycle Assessment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Onogawa, Tsukuba, Ibaraki Japan
- Prof. Olivier Jolliet, Life Cycle Systems - Industrial Ecology, Environmental Science and Technology, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Schweiz
- Don O'Connor, S&T Squared Consultants Inc., Delta, BC, Kanada
- Prof. Dr. David Pimentel, College of Agriculture and Life Sciences at Cornell University, USA
- Dr. Michael Wang, US Argonne National Laboratory, USA
- Werner Weindorf, L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn
- Dr. Tetyana A. Zhelyezna, SEC "Biomass", Institute of Engineering Thermophysics, Kiev, Ukraine

Last but not least gilt unser ganz besonderer Dank unseren Familienangehörigen für ihr Verständnis und ihre Geduld, denn auch diesmal haben wir wieder feststellen müssen, dass eine solche Studie nicht in geregelten Arbeitszeiten zu erstellen ist.

Die Autoren



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Hintergrund und Ziele</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehensweise</b> .....	<b>2</b>
2.1	Literaturzusammenstellung .....	2
2.2	Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen für die Kraftstoff- bereitstellung .....	5
2.3	Kraftstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen der Fahrzeugnutzung sowie allgemeine Kraftstoffeigenschaften .....	6
2.4	Ableitung der Bandbreiten .....	9
2.5	Bezüge der Kraftstoffvergleiche .....	10
<b>3</b>	<b>Betrachtete Kraftstoffe</b> .....	<b>13</b>
3.1	Biokraftstoffe im Kontext des globalen Kohlenstoffkreislaufs .....	13
3.2	Auswahl und Kurzbeschreibung der betrachteten Kraftstoffe .....	16
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>20</b>
4.1	Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen .....	20
4.2	Weitere Umweltwirkungen von Biokraftstoffen .....	27
4.3	Kosten von Biokraftstoffen .....	32
4.4	Potenzial von Biokraftstoffen .....	36
4.5	Zukünftige Entwicklung von Biokraftstoffen .....	42
<b>5</b>	<b>Forschungsbedarf</b> .....	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>54</b>

## Anhang

A 1	Analysierte Parameter der untersuchten Studien .....	A 001
A 2	Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen .....	A 011
A 3	Weitere Umweltwirkungen von Biokraftstoffen .....	A 104
A 4	Kosten von fossilen Kraftstoffen und Biokraftstoffen .....	A 114
A 5	Nicht analysierte Publikationen .....	A 135
A 6	Gesamtes Literaturverzeichnis .....	A 143

## Abkürzungsverzeichnis





## 1 Hintergrund und Ziele

Der natürliche Treibhauseffekt wird vor allem durch den Wasserdampf der Atmosphäre hervorgerufen, während Kohlendioxid, Methan, FCKW, Ozon und Lachgas für den anthropogenen Treibhauseffekt hauptverantwortlich sind. Die Reduzierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen ist eines der wichtigsten klimapolitischen Ziele, um der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. Der Transportsektor hatte in Deutschland im Jahr 2000 einen Anteil von 21,9 % an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen, wovon wiederum ca. 90 % vom Straßenverkehr verursacht werden (UBA 2002). In Europa liegt der Anteil des Transportsektors an den gesamten Treibhausgasemissionen in der gleichen Größenordnung (21 % für das Jahr 2001, EEA 2003). Im Straßenverkehr könnte durch die verstärkte Nutzung von Biokraftstoffen ein Beitrag geleistet werden, um CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Dieses Ziel verfolgt auch die am 17.05.2003 in Kraft getretene EU-Richtlinie „zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor“. Hiernach soll der Marktanteil von Biokraftstoffen in allen Mitgliedsländern der EU im Jahr 2005 auf 2 % und bis Ende 2010 auf 5,75 % ansteigen (EU 2003). Im Grünbuch der Europäischen Kommission (2001) „Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit“ wird als Ziel festgelegt, dass 20 % der konventionellen Kraftstoffe bis 2020 durch alternative Kraftstoffe substituiert werden sollen. Durch den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen sollen jedoch nicht nur CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert und fossile Ressourcen geschont werden. Darüber hinaus bietet die Produktion von Biokraftstoffen auch Einkommensperspektiven für die Landwirtschaft und eine Diversifizierung des europäischen Energieträgermixes für den Verkehrssektor. Damit würde Europa unabhängiger von Öl-Importen werden.

Viele Studien zu Ökobilanzen von Biokraftstoffen kommen zu dem Ergebnis, dass Biokraftstoffe mehr oder weniger CO<sub>2</sub>-neutral sind. Die Ergebnisse differieren bisweilen aber beträchtlich. Um die derzeit verfügbaren Publikationen zu Ökobilanzen von Biokraftstoffen einander gegenüberzustellen und einer kritischen Bewertung zu unterziehen, wurde das IFEU von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) mit der vorliegenden Studie beauftragt<sup>1</sup>. Es sollen internationale Publikationen, die wissenschaftlich belastbare und nachvollziehbare Aussagen über Biokraftstoffe enthalten, analysiert und miteinander verglichen werden. Betrachtet werden alle Biokraftstoffe ausgehend von den derzeit im Einsatz befindlichen Kraftstoffen wie z. B. Pflanzenöl und Biodiesel aus Raps, Bioethanol aus Zuckerrohr und Mais, etc. bis hin zu Biokraftstoffen, die heute noch nicht großtechnisch hergestellt werden, wie beispielsweise BTL und Wasserstoff. Dabei steht die Untersuchung von Energie- und Treibhausgasbilanzen im Vordergrund, während Versauerung, Eutrophierung, Photosmog und Ozonabbau lediglich qualitativ betrachtet werden.

Da sich Biokraftstoffe aber nur dann auf dem Markt durchsetzen können, wenn sie wettbewerbsfähig sind und in entsprechendem Umfang zur Verfügung gestellt werden können, werden in der beauftragten Studie neben den ökologischen Untersuchungen auch Kosten- und Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen analysiert. Diese werden in den Kontext der ökologischen Implikationen gestellt. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand stellt die Identifikation des Forschungsbedarfs der genannten Themenfelder dar.

---

<sup>1</sup> Das Vorhaben wurde von der FVV, der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. gefördert.

## 2 Vorgehensweise

Zu Beginn dieser Studie wurden internationale Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie zu weiteren Umweltwirkungen, Kosten- und Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen mit Hilfe eines Auswahlverfahrens zusammengestellt (siehe Kapitel 2.1).

Aus den betrachteten Publikationen, wurden lediglich der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der biogenen Kraftstoffe bis in den Tank (Well-to-Tank Analyse) entnommen; der Lebensweg der fossilen Kraftstoffe wurde einheitlich angesetzt (siehe Kapitel 2.2).

Die Kraftstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen der Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel) sowie allgemeine Kraftstoffeigenschaften wurden auf einheitliche Werte festgelegt. Diese Vorgehensweise dient der Vergleichbarkeit der betrachteten Studien (siehe Kapitel 2.3).

Die Ergebnisse der ausgewählten Studien zu den Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der biogenen Kraftstoffe wurden miteinander verglichen und einer kritischen Überprüfung unterzogen. Hierzu wurden ebenfalls allgemeine Systemfestlegungen sowie die verwendeten Basisdaten herangezogen. Bezüglich der Energieaufwendungen, der Treibhausgasemissionen sowie der Kosten für die Bereitstellung von Biokraftstoffen wurde für alle Biokraftstoffe (untergliedert nach der jeweiligen Rohstoffbasis; Bsp. Bioethanol aus Weizen) eine Bandbreite abgeleitet. Nach welchen Kriterien die Ableitung der Bandbreite erfolgte, ist in Kapitel 2.4 beschrieben.

Die Ergebnisse des erschöpflichen Primärenergieverbrauchs (Energiebilanzen) und der Treibhausgasemissionen können unterschiedlich dargestellt werden, wie z.B. bezogen auf den Energieinhalt des Kraftstoffs (MJ), die Fahrleistung (km) oder die Flächenbelegung (ha). Auch kann man sich auf die Gesamtbilanz beziehen, die einen Kraftstoffvergleich zwischen einem biogenen Kraftstoff und dem jeweiligen fossilen Kraftstoffpendant darstellt (biogen – fossil) oder nur auf Teilbereiche wie die Bereitstellung des Kraftstoffs. Unterschiedliche Fragestellungen bedingen hier unterschiedliche Bezüge. Die gewählten Bezüge sind in Kapitel 2.5 zusammengestellt.

Nachdem die Ergebnisse zu den Energie- und Treibhausgasbilanzen, den weiteren Umweltwirkungen sowie den Kosten- und Potenzialabschätzungen zunächst getrennt voneinander betrachtet werden, folgt anschließend eine Zusammenführung dieser Ergebnisse.

### 2.1 Literaturzusammenstellung

Zunächst wurde anhand der IFEU-internen Datenbanken, Suchmaschinen im www, Online-Katalogen von Bibliotheken und Kontakten zu Kollegen aus anderen Instituten sowie durch Publikationshinweise durch die FVV-Mitglieder eine erste Liste von Publikationen zusammengestellt. Diese wurde von Experten aus allen Teilen der Welt geprüft und gegebenenfalls ergänzt.

Die so zusammengetragenen Publikationen wurden auf die Parameter Energiebilanz, Treibhausgase (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O), weitere Emissionen (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NMHC, CO, Partikel etc.),

Potenzial- sowie Kostenabschätzungen hin untersucht, wobei folgende Ausschlusskriterien zugrunde gelegt wurden:

- In der Publikation werden keine Primärdaten aufgeführt. Die Ergebnisse basieren auf einer Detailstudie, die jedoch berücksichtigt wird.
- Es liegen aktuellere Publikationen der gleichen Autoren vor.
- In der Publikation werden keine Primärdaten, sondern ausschließlich Daten anderer Autoren betrachtet.
- Die Publikationen sind nicht mehr auf dem aktuellen Stand.
- sonstige Begründungen (Die einzelnen Begründungen zu Publikationen, die nicht aus den zuvor genannten Gründen ausgeschlossen wurden, sind im Anhang A 5 aufgeführt).

Aus den o.g. Kriterien wurden ca. 80 Publikationen ausgeschlossen. Diese sind im Anhang A 5 aufgeführt. Daneben wurden ca. 400 Publikationen ausgeschlossen, bei denen sich herausstellte, dass sie die in dieser Studie betrachteten Themenfelder nur im weiteren Sinne abdecken. Diese Publikationen werden nicht aufgeführt. In der Tabelle 1 sind die Publikationen aufgelistet, die in dieser Studie analysiert werden. Hier wurde mit einem "x" kenntlich gemacht, zu welchen der Parameter Energiebilanz, Treibhausgase (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O), weitere Emissionen (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NMHC, CO etc.), Potenzial- und Kostenabschätzungen die jeweiligen Publikationen Ergebnisse beinhalten. Die weiteren Emissionen werden der Übersichtlichkeit halber nicht einzeln aufgeschlüsselt. Hierbei wird lediglich angegeben, wie viele der weiteren Emissionen in der jeweiligen Studie betrachtet wurden. Publikationen, bei denen die Parameter mit einem "(x)" kenntlich gemacht wurden, beinhalten zwar Ergebnisse zu diesen Parametern, diese Ergebnisse wurden jedoch nicht betrachtet. Dies kann beispielsweise damit zusammenhängen, dass es sich nicht um Primärdaten, sondern um Daten anderer Autoren handelt oder dass die Ergebnisse in aktuelleren Publikationen überarbeitet wurden. Da in einer Publikation häufig mehr als eine Kraftstoffkette untersucht wurde, ist die Anzahl der betrachteten Kraftstoffketten ebenfalls in der Tabelle 1 angegeben. Insgesamt wurden 109 Biokraftstoffketten vergleichend betrachtet. Eine Detailaufschlüsselung, welche Studien für welche Biokraftstoffe in dieser Untersuchung berücksichtigt wurden, findet sich im Anhang A 1.

Tabelle 1: In dieser Studie berücksichtigte Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen, weiteren Emissionen, Potenzial- und Kostenabschätzungen

Autor	Jahr	Bezug	Anzahl Kraftst.	Energiebilanz	Treibhausgase CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
Ademe	2002	Frankreich	8	x	x	x	x			
Atrax	2002	Schweden	1		x	x	x	5		x
Börjesson	2004	Schweden	1	x	x	x	x	9		x
CONCAWE	2002	EU	3	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
CSIRO	2001	Australien	6		x	x	x	2		
DfT	2003	weltweit	7							x
DLR et al.	2003	Europa	8							x
Dreier	2000	weltweit		(x)	(x)				x	
Dreier	1999	Deutschland	5	x	(x)			4	(x)	x
Elsayed	2003	UK	6	x	x	x	x			
Enerstrat	2003	Australien	1	x	x	x	x			
EST	2002	UK	3						x	
ETSU	1996	UK	3	x	x	x	x	5		
EUCAR	2003	EU	8	(x)	x	x	x			x
FAT	2000	Schweiz	1	x	x	x	x	10		
FfE	1999	Deutschland	6	x	x			4		
Fromentin	2000	Schweiz	1	x	x	x	x	7		x
GM	2002	EU	10	x	x	x	x			
GM	2001	Nordamerika	2	x	x	x	x			
Graboski	2002	USA	1	x						
IEA	2003	Nordam./EU	5	(x)	(x)	(x)	(x)			x
IEA	1999	weltweit	3	(x)	(x)			(4)	x	
IFEU	2004	Deutschland							x	
IFEU	2003	Deutschland	1	x	x	x	x	13		
IFEU	2002a	Deutschland	6	x	x	x	x	13		
IFEU	2002b	Deutschland	1	x	x	x	x	13		
IFEU	2002c	Deutschland	2	x	x	x	x	13		
IFEU	2001	Deutschland	1	x	x	x	x	13		
IFEU et al.	2000	Europa	14	x	x	x	x	11		(x)
IFO	2002	Deutschland	1							x
Jungmeier	2003	Österreich	9		(x)	(x)	(x)			x
JRC	2004	Europa	5						x	
JRC	2003	Europa	6						x	
JRC	2002a	Europa	1	(x)	(x)				x	x
JRC	2002b	Europa	1	(x)	(x)				x	x
Larson	1999	USA	1	x						
LBST	2003	EU	6						x	
LBST	2002	Deutschland	5	(x)	(x)					x
Levelton	2002	Kanada	4	x	x	x	x	5		
Levelton	2000	Kanada	1	x	x	x	x	5		
Levelton	1999	Kanada	1	x	x	x	x	5		
Levington	2000	UK	1	x	x		x	1		
Macedo	1997	Brasilien	1	x	x	x	x			
Marano	2001	USA	1		x	x	x			
Moreira	2002	Brasilien	1						x	

## Fortsetzung Tabelle 1

NREL	1998	USA	1	x	x	x	x	7		
NREL	2002	USA	1	x	x	x	x	2		x
NREL	1999	Kanada	1	x	x	x	x	5	x	
Pehnt	2002a	Deutschland	1	x	x	x	x	9		
Pehnt	2002b	Deutschland	1	x	x	x	x	9		
Pimentel	2003	USA	1	x						x
Pimentel	2001	USA	1	(x)					x	
Raschka	2002	k.A.	1							x
(S&T) <sup>2</sup>	2003	Kanada	1	x	(x)	(x)	(x)			
Schmitz	2003	Deutschland	4	(x)	(x)	(x)	(x)			x
Tan	2002a	Philippinen	1	x	x	x	x			
Thrän	2004	Deutschland	5						x	
Thuijl	2003	Europa	9							x
TU Münch.	2003	Deutschland	3	x	(x)	(x)	(x)	(4)		x
USDA	2002	USA	1	x						
VITO	1999	Belgien	1	x	x	x	x	4		
Wang	1999	USA	1	x	x	x	x			
Woods	2003	UK	7							x

x Ergebnisse werden betrachtet

(x) Ergebnisse werden nicht betrachtet

## 2.2 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen für die Kraftstoffbereitstellung

In dieser Studie wurden der Verbrauch an erschöpflicher Primärenergie (fossile + nukleare Primärenergie in MJ Hu) und die Treibhausgase Kohlendioxid, Lachgas und Methan betrachtet. Dabei wurde von dem Global Warming Potential (GWP), bezogen auf 100 Jahre ausgegangen. Es beschreibt die Klimawirksamkeit von Treibhausgasen für einen Zeithorizont von 100 Jahren und beträgt für CO<sub>2</sub> 1, für CH<sub>4</sub> 23 und für N<sub>2</sub>O 296 (IPCC 2001).

Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der biogenen Kraftstoffe bis in den Tank (Well-to-Tank Analyse) wurden aus den betrachteten Publikationen entnommen und setzen sich aus folgenden Bereichen zusammen:

- Landwirtschaft: Hier werden die Energieaufwendungen und frei werdenden Treibhausgase infolge des landwirtschaftlichen Anbaus summiert. Sie ergeben sich vor allem durch die Produktion von stickstoffhaltigen Düngemitteln und den Dieselverbrauch infolge der Bearbeitung der Anbauflächen. Bei Biokraftstoffen aus Reststoffen existiert dagegen keine landwirtschaftliche Vorkette.
- Transport der landwirtschaftlichen Produkte
- Konversion zu Biokraftstoffen
- Gutschriften von Nebenprodukten: Die bei der Biokraftstoffproduktion anfallenden Nebenprodukte substituieren konventionell hergestellte Produkte. Die zur Produktion der konventionellen Produkte benötigte erschöpfliche Primärenergie und die freiwerdenden

Treibhausgase werden den Biokraftstoffen gutgeschrieben. Im Falle einer Allokation, wird keine Gutschrift ausgewiesen. Stattdessen sind die Aufwendungen in den übrigen Bereichen entsprechend geringer.

- Distribution der Biokraftstoffe

Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der fossilen Kraftstoffe wurden vereinheitlicht. Dies gewährleistet bei einem Vergleich der analysierten Studien, dass ausschließlich die biogenen Lebenswege analysiert werden und diese nicht durch unterschiedliche Annahmen und Vorgehensweisen bezüglich der fossilen Lebenswege beeinflusst werden. Die Vorkette der fossilen Kraftstoffe wurde der IFEU-Datenbank entnommen.

## 2.3 Kraftstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen der Fahrzeugnutzung sowie allgemeine Kraftstoffeigenschaften

Um Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten Studien zu erreichen, wurden die Kraftstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen der Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel) sowie allgemeine Kraftstoffeigenschaften vereinheitlicht. Dabei wurden folgende Festlegungen getroffen:

- **Fahrzeuge der betrachteten Kraftstoffvergleiche:** Für alle betrachteten Kraftstoffe wurde als Fahrzeug ein PKW mit Verbrennungsmotor ausgewählt. Für Wasserstoff und Methanol wurde zusätzlich noch ein PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle betrachtet.
- **Zeitlicher Bezug:** Als zeitlicher Bezug wurde für den Vergleich das Jahr 2010 festgelegt, da neben derzeitigen auch zukünftige Fahrzeugtechnologien betrachtet wurden.
- **Datenbasis:** Die EUCAR-Studie (2003) stellt die Datenbasis dar. Es wird davon ausgegangen, dass diese Daten einen breiten Konsens finden, da sie von den Europäischen Automobilherstellern (EUCAR), von der Europäischen Ölindustrie (CONCAWE) und dem Forschungszentrum der Europäischen Kommission (JRC) getragen werden. Die „Alternative Fuels Contact Group“, die im Dezember 2003 einen Statusbericht zur Marktentwicklung sowie zum technischen und ökonomischen Stand von Alternativen Kraftstoffen veröffentlicht hat, bezieht sich ebenfalls auf diese Daten (AFCG 2003).
- Bezüglich Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen der PKW-Nutzung mit Ottokraftstoff werden in der EUCAR-Studie Werte für direkteinspritzende und herkömmliche Ottomotoren angegeben. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde auf eine Differenzierung zwischen diesen beiden Fahrzeugtypen verzichtet, da die beiden Werte nur um ca. 1 % voneinander abweichen. Es wurde davon ausgegangen, dass im Jahr 2010 beide Fahrzeugtechnologien im Einsatz sind, so dass hier der Mittelwert verwendet wurde.
- Ebenso wurde in dieser Studie ein Mittelwert für „CNG bi-fuel“ und „CNG dedicated“ verwendet, da auch hier davon auszugehen ist, dass im Jahr 2010 sowohl PKWs im Einsatz

sind, die mit Benzin oder mit Erdgas betrieben werden sowie Fahrzeuge, die ausschließlich mit Erdgas betrieben werden.

Tabelle 2: Kraftstoffverbräuche sowie Treibhausgasemissionen infolge der Fahrzeugnutzung sowie allgemeine Kraftstoffeigenschaften bezogen auf das Jahr 2010 (EUCAR (2003) und eigene Berechnungen)

	KS-Eigensch.		Kraftstoffverbrauch			Treibhausgasemissionen				
	Hu MJ/kg	Dichte kg/l	MJ/100km	l/100km	l/100km Otto-KS Äquiv.	CO <sub>2</sub> *	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Summe g CO <sub>2</sub> -Äquiv./km	
<b>PKW mit Ottomotor (Reinkraftstoffe)</b>										
Ottokraftstoff	43,2	0,745	188,95 <sup>(1)</sup>	5,87 <sup>(1)</sup>	5,87	138,65 <sup>(1)</sup>	0,4 <sup>(1)</sup>	0,5 <sup>(1)</sup>	139,55 <sup>(1)</sup>	
CNG	45,1		192,85 <sup>(2)</sup>		5,99	108,45 <sup>(2)</sup>	1,7 <sup>(2)</sup>	0,5 <sup>(2)</sup>	110,65 <sup>(2)</sup>	
Biogas	47,0 <sup>(4)</sup>		192,85 <sup>(3)</sup>		5,99	108,45 <sup>(3)</sup>	1,7 <sup>(3)</sup>	0,5 <sup>(3)</sup>	110,65 <sup>(3)</sup>	
Wasserstoff	120,1		167,50		5,20	0,0	0,0	0,5	0,5	
<b>PKW mit Ottomotor (Beimischungen zu Ottokraftstoff)<sup>(5)</sup></b>										
Ethanol (E5)	26,8	0,794	190,0		5,90	139,3	0,4	0,5	140,2	
Methanol (M5)	19,9	0,793	190,0 <sup>(6)</sup>		5,90	139,3 <sup>(6)</sup>	0,4 <sup>(6)</sup>	0,5 <sup>(6)</sup>	140,2 <sup>(6)</sup>	
ETBE (ETBE5)	36,05 <sup>(7)</sup>	0,742 <sup>(7)</sup>	190,0 <sup>(8)</sup>		5,90	139,3 <sup>(8)</sup>	0,4 <sup>(8)</sup>	0,5 <sup>(8)</sup>	140,2 <sup>(8)</sup>	
MTBE (MTBE5)	35,19 <sup>(7)</sup>	0,740 <sup>(7)</sup>	190,0 <sup>(10)</sup>		5,90	139,3 <sup>(9)</sup>	0,4 <sup>(9)</sup>	0,5 <sup>(9)</sup>	140,2 <sup>(9)</sup>	
<b>PKW mit Dieselmotor und DPF<sup>(10)</sup></b>										
Dieselmotor	43,1	0,832	179,5	5,00	5,58	131,4	0,2	1,6	133,2	
Biodiesel	36,8	0,890	179,7	5,49	5,58	137,0	0,2	1,6	138,8	
Pflanzenöl	36,0 <sup>(11)</sup>	0,922 <sup>(12)</sup>	179,7 <sup>(12)</sup>	5,41 <sup>(12)</sup>	5,58	137,0 <sup>(12)</sup>	0,2 <sup>(12)</sup>	1,6 <sup>(12)</sup>	138,8 <sup>(12)</sup>	
DME	28,4	0,670	172,4	9,06	5,36	116,1	0,2	1,6	117,9	
BTL	44,0	0,780	179,7	5,24	5,58	127,3	0,2	1,6	129,0	
<b>PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle</b>										
Wasserstoff	120,1		94,0		2,92	0,0	0,0	0,0	0,0	
Methanol	19,9	0,793	148,0		4,60	108,5	0,4	0,5	109,4	

<sup>(1)</sup> Mittelwert aus direktein-spritzenden und herkömmlichen Ottomotoren

<sup>(2)</sup> Mittelwert aus „CNG bi-fuel“ und „CNG dedicated“

<sup>(3)</sup> unter der Annahme, dass der heizwertbezogene Verbrauch von Biogas dem von CNG entspricht

<sup>(4)</sup> Quelle: Sundqvist (2003)

<sup>(5)</sup> Werte beziehen sich auf das Gemisch von Ottokraftstoff und dem angegebenen biogenen Anteil

<sup>(6)</sup> unter der Annahme, dass der heizwertbezogene Verbrauch von M5 dem von E5 entspricht

<sup>(7)</sup> Quelle: IFEU 2002

<sup>(8)</sup> unter der Annahme, dass der heizwertbezogene Verbrauch von ETBE5 dem von E5 entspricht

<sup>(9)</sup> unter der Annahme, dass der heizwertbezogene Verbrauch von MTBE5 dem von M5 entspricht

<sup>(10)</sup> für DME wurde ein PKW ohne Dieselpartikelfilter betrachtet

<sup>(11)</sup> Quelle: IFEU 2003

<sup>(12)</sup> unter der Annahme, dass der heizwertbez. Verbrauch von Pflanzenöl dem von Biodiesel entspricht

\* biogene CO<sub>2</sub>-Emissionen werden in der Bilanz mit Null bewertet

- Für die gasförmigen Kraftstoffe (CNG, Biogas und Wasserstoff) wurden keine Werte für die Dichte angegeben, da diese in Abhängigkeit vom Druck sehr stark variieren. Demzufolge wurde auch darauf verzichtet, den volumenbezogenen Kraftstoffverbrauch dieser Kraftstoffe anzugeben.
- Biogas war nicht Untersuchungsgegenstand der EUCAR-Studie. Die verwendeten Werte wurden deshalb wie folgt abgeleitet: Der Heizwert von 47,0 MJ/kg wurde der Studie von Sundqvist (2003) entnommen und die Daten zum Kraftstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen wurden aus der EUCAR-Studie abgeleitet. Vereinfachend wurde angenommen, dass der heizwertbezogene Kraftstoffverbrauch von Biogas dem von Erdgas entspricht. Damit entsprechen die Treibhausgasemissionen infolge der Fahrzeugnutzung mit Biogas ebenfalls denen mit Erdgas, wobei die biogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Biogas in der Bilanz gleich Null gesetzt werden.
- Bezüglich der Additive Ethanol, Methanol, ETBE und MTBE zu Ottokraftstoff wurde davon ausgegangen, dass die Kraftstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen infolge der Fahrzeugnutzung denen des Benzin-Ethanol-Gemisches entsprechen. Auf die Angabe der volumenbezogenen Kraftstoffverbräuche wurde bei den Additiven verzichtet, da die Additive nur in Verbindung mit Ottokraftstoff verbraucht werden und somit die Angabe des Verbrauchs eines Additiv unserer Meinung nach nicht aussagekräftig ist.
- Es wurde davon ausgegangen, dass im Jahr 2010 überwiegend Dieselmotoren mit Dieselpartikelfilter (DPF) im Einsatz sind, so dass die Optionen ohne Dieselpartikelfilter nicht weiter betrachtet wurden. Eine Ausnahme stellt die Nutzung von DME dar. Hierfür wurden die Werte für einen Dieselmotor ohne DPF herangezogen, da die Option „DME in einem Dieselmotor mit DPF“ in der EUCAR-Studie ebenfalls nicht betrachtet wurde.
- Die CO<sub>2</sub>-Emissionen infolge der Nutzung von Biokraftstoffen wurden in den Treibhausgasbilanzen gleich Null gesetzt, da bei deren Verbrennung genau die Menge an CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, die zuvor beim Anbau der energieliefernden Pflanzen der Atmosphäre entzogen wurden. Der fossile Anteil der Methyl-Ester (z.B. 109 kg Methanol / t RME) wurde ebenfalls in der CO<sub>2</sub>-Bilanz mit Null bewertet, da der fossile Input durch die Rückführung des Glycerins in den biogenen Kreislauf ausgeglichen wird.
- Die infolge der PKW-Nutzung bedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen des fossilen Anteils der Tertiär-Butyl-Ether (z.B. 53 % Isobuten bei ETBE) wurden in der CO<sub>2</sub>-Bilanz aufgeführt.
- Neben CO<sub>2</sub> setzen sich die CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen aus den angegebenen N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen zusammen. In Tabelle 2 wurden die CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen als CO<sub>2</sub>-Äquivalente dargestellt, wobei die IPCC Faktoren 23 für CH<sub>4</sub> und 296 für N<sub>2</sub>O verwendet wurden (IPCC 2001).

Der Kraftstoffverbrauch in l / 100 km Ottokraftstoffäquivalent wird für die in Tabelle 2 dargestellten fossilen und biogenen Kraftstoffe in Abbildung 1 veranschaulicht. Hierbei wird vor allem der geringe Kraftstoffverbrauch eines PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle deutlich, wobei Wasserstoff einen geringeren Verbrauch aufweist als Methanol. Der Kraftstoffverbrauch liegt in einem Dieselmotor generell unter dem eines Ottomotors. Eine Ausnahme stellt der Verbrauch von Wasserstoff in einem Ottomotor dar.



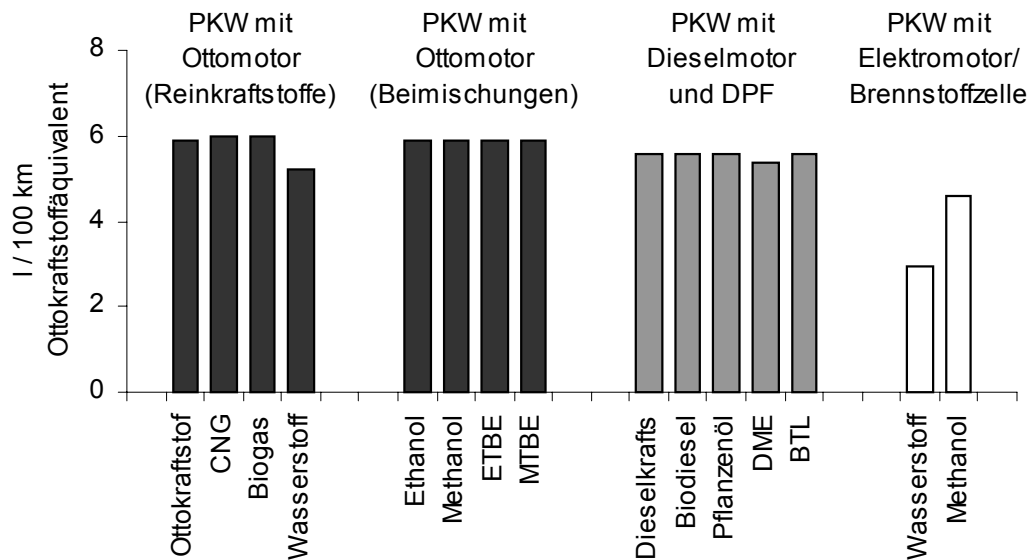


Abbildung 1: Kraftstoffverbrauch fossiler und biogener Kraftstoffe in l / 100 km Ottokraftstoff-äquivalent

## 2.4 Ableitung der Bandbreiten

Die Ergebnisse der ausgewählten Studien zu den Energieverbräuchen, Treibhausgasemissionen und Kosten für die Bereitstellung der biogenen Kraftstoffe variieren beträchtlich. Die Einzelergebnisse der Studien sind in Anhang A 2 für die Energie- und Treibhausgasbilanzen und in Anhang A 4 für die Kosten dargestellt.

Ziel dieser Studie ist es unter anderem, für die einzelnen Biokraftstoffe – getrennt nach Rohstoffbasis (Bsp. Bioethanol aus Mais) – auf der Basis der verfügbaren Literatur Aussagen zu Energie-, Treibhausgasbilanzen und Kosten zu treffen. Hierzu könnte die komplette Variabilität der in den einzelnen Studien aufgeführten Ergebnisse als eine Bandbreite angegeben werden. Diese Vorgehensweise ist nach unserer Meinung jedoch nicht zielführend, da die Ergebnisse bzw. Teilergebnisse einiger Studien als nicht repräsentativ angesehen werden. Aus diesem Grund wurden Bandbreiten ermittelt, die sich durch Anpassung, Neuberechnung oder gegebenenfalls Neueinschätzung der nicht repräsentativen Ergebnisse bzw. Einzelergebnisse ergaben. Die ermittelten Bandbreiten geben an, in welchem Bereich sich die Ergebnisse zu den Energie-, Treibhausgasbilanzen und Kosten für die einzelnen Biokraftstoffe – getrennt nach Rohstoffbasis – nach unserer Einschätzung befinden. Die folgenden Beispiele zeigen, aus welchen Gründen die Ergebnisse einzelner Studien als nicht repräsentativ angesehen werden und wie mit diesen bei der Ermittlung der Bandbreiten verfahren wurde.

- In einigen Studien wurde von Basisdaten ausgegangen, die nicht mehr den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln, so dass die Aufwendungen für die Bereitstellung heute niedriger sind als die in den jeweiligen Studien ermittelten. Dies war beispielsweise in den Studien von Pimentel (2003) und CSIRO (2001) der Fall. Pimentel (2003) ging von einem Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von Stickstoffdüngemitteln aus, der rund ein Drittel über dem liegt, der den aktuellen Stand der Technik darstellt. In der Stu-

die von CSIRO (2001) wurden für Bioethanol aus Molasse Konversionsdaten angenommen, die in der jüngeren Studie von Enerstrat (2003) aktualisiert wurden.

Generell wurde dieser Tatsache dadurch begegnet, dass ausschließlich aktuelle Studien untersucht wurden. Sollten in einigen Studien dennoch veraltete Annahmen zur Konversionstechnik getroffen worden sein, wurden diese bei der Ableitung der Bandbreite berücksichtigt. Dies erfolgte auf der Basis der in anderen Studien angegebenen Parameter (siehe Anhang A 2).

- In einigen Studien wurden Kuppelprodukte nicht angerechnet, wie beispielsweise in der FfE-Studie (1999).

Nach unserer Auffassung müssen bei der Produktion von Biokraftstoffen anfallende Kuppelprodukte berücksichtigt werden. In der ermittelten Bandbreite sind unterschiedliche Möglichkeiten in der Nutzung und Anrechnung von Kuppelprodukten enthalten. Dabei liefert die energetische Nutzung meist die geringsten Vorteile für die Kuppelprodukte, während die Vorteile bei der stofflichen Nutzung in Abhängigkeit des substituierten konventionellen Produktes variieren. Bei der Ableitung der Bandbreite wurde sowohl das Gutschriften- wie auch das Allokationsverfahren berücksichtigt, wobei das Gutschriftenverfahren als zielorientierter angesehen wird.

- In einigen Studien wurden nicht alle in dieser Studie betrachteten Treibhausgasemissionen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$ ) analysiert oder die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen im Bereich der Landwirtschaft nicht für alle Bereiche (Düngemittelproduktion + Emissionen vom Feld) angerechnet. Beispielsweise wurden die  $\text{N}_2\text{O}$ - und  $\text{CH}_4$ -Emissionen von ETSU (1996) und Tan (2002) nicht ermittelt und Macedo (1997) berücksichtigte die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen, die sich aus der Stickstoffdüngemittelproduktion ergeben nicht.

In diesen Fällen wurden die Ergebnisse bei der Ermittlung der Bandbreite um die fehlenden Bereiche ergänzt.

- In einigen Studien wurde auch menschliche Arbeit mit in die Energiebilanzen einbezogen, was in der Regel bei Ökobilanzen – wenn nicht bestimmte Fragestellungen dahinterstehen – nicht der Bilanzierungskonvention entspricht (z. B. Pimentel 2003). In diesen Fällen wurden die Ergebnisse bei der Ermittlung der Bandbreite um die entsprechenden energetischen Aufwendungen bereinigt.

## 2.5 Bezüge der Kraftstoffvergleiche

Die Ergebnisse des erschöpflichen Primärenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen können beispielsweise auf den Energieinhalt des Kraftstoffs (MJ), die Fahrleistung (km) oder die Flächenbelegung (ha) bezogen werden. Hierbei kann man sich auf Teilbereiche eines Kraftstoffs beziehen oder auf die Gesamtbilanz, bei der biogene Kraftstoffe mit konventionellen Kraftstoffen verglichen werden.

Nachfolgend werden die in diesem Bericht dargestellten Bezüge aufgeführt.

### Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse

In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse mit folgenden Bezügen dargestellt.

- **Hektarbezug:** Da unbestritten der größte Engpass zur Bereitstellung von Biokraftstoffen die verfügbare Fläche zur Bereitstellung von Biomasserohstoffen darstellt, werden die Ergebnisse der Gesamtbilanz auf einen Hektar und ein durchschnittliches Ertragsjahr bezogen.
  - Energiebilanz: Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in GJ / ha und Jahr.
  - Treibhausgasbilanz: Summe eingesparter CO<sub>2</sub>-Äquivalente in t/ha und Jahr.

### Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse und Reststoffen

In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse und Reststoffen mit folgenden Bezügen dargestellt.

- **Kilometerbezug:** Die Ergebnisdarstellung der Biokraftstoffe aus Reststoffen, und das gilt gleichermaßen auch für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse oder aus potenziell anderen Rohstoffquellen, erfolgt pro km, wobei auch hier wiederum die Gesamtbilanz betrachtet wird. Die hierbei zugrunde gelegten Kraftstoffverbräuche sowie Treibhausgasemissionen infolge der Fahrzeugnutzung sind in Tabelle 2 aufgeführt.
  - Energiebilanz: Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in MJ/km.
  - Treibhausgasbilanz: Summe eingesparter CO<sub>2</sub>-Äquivalente in g/km.

In Kapitel 4.3 werden die Bereitstellungs- und Vermeidungskosten von Biokraftstoffen mit folgenden Bezügen dargestellt:

- **Bereitstellungskosten:** Die Kosten für die Bereitstellung der Biokraftstoffe werden in €/GJ Kraftstoffinhalt und €/100 km dargestellt.
- **Vermeidungskosten:** Neben der Darstellung der Bereitstellungskosten werden in Kapitel 4.3 auch die Vermeidungskosten – Kosten pro vermiedenem Primärenergieträgerverbrauch bzw. vermiedenen Treibhausgasemissionen – dargestellt:
  - Energiebilanz: Kosten in € (Bereitstellungskosten der Biokraftstoffe abzüglich der Bereitstellungskosten für die fossilen Kraftstoffe) / Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in GJ.
  - Treibhausgasbilanz: Kosten in € (Bereitstellungskosten der Biokraftstoffe abzüglich der Bereitstellungskosten für die fossilen Kraftstoffe) / Summe eingesparter CO<sub>2</sub>-Äquivalente in t.

Neben den genannten Bezügen gibt es noch eine Reihe weiterer Bezüge, die entweder für Detailfragestellungen oder auch für plakative Darstellungen sinnvoll sind. Die folgenden Bezüge sind im Anhang A 2.3 dokumentiert.

- **WTT:** In der sogenannten Well-to-Tank Analyse werden ausschließlich der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung eines Kraftstoffpfades (Endpunkt: Kraftstoff im Tank des Fahrzeuges) betrachtet. Es handelt sich also nicht um komplette Bilanzergebnisse! Als Bezug ist hier MJ Kraftstoffinhalt gebräuchlich. Die Ergebnisse finden sich für alle betrachteten Kraftstoffe im Anhang (A 2.4.1).
  - Energiebilanz: Summe erschöpflicher Primärenergie für die Kraftstoffbereitstellung in MJ / MJ Kraftstoffinhalt.
  - Treibhausgasbilanz: Summe an Treibhausgasemissionen infolge der Kraftstoffbereitstellung in g CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt.
- **WTW:** In der sogenannten Well-to-Wheel Analyse erfolgt eine Zusammenführung der Well-to-Tank und Tank-to-Wheel Analyse. Dabei gibt Tank-to-Wheel den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen bei der Nutzung des Fahrzeugs in MJ / km bzw. g CO<sub>2</sub>-Äquiv. / km an (siehe Kapitel 2.2). Die Ergebnisse der Well-to-Wheel Analyse sind im Anhang A 2.4.2 dargestellt.
  - Energiebilanz: Summe erschöpflicher Primärenergie für die Kraftstoffbereitstellung und infolge der Fahrzeugnutzung in MJ / km.
  - Treibhausgasbilanz: Summe an Treibhausgasemissionen infolge der Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugnutzung in g CO<sub>2</sub>-Äquivalente / km.
- **Kraftstoffinhalt:** In Anhang A 2.4.3 erfolgt die Ergebnisdarstellung der Gesamtbilanz von Biokraftstoffen aus Reststoffen und Anbaubiomasse pro MJ Kraftstoffinhalt.
  - Energiebilanz: Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in MJ / MJ Kraftstoffinhalt.
  - Treibhausgasbilanz: Summe eingesparter CO<sub>2</sub>-Äquivalente in g / MJ Kraftstoffinhalt.
- **Effizienz:** In Anhang A 2.4.5 werden die Treibhausgasbilanzen in Relation zu den Energiebilanzen gesetzt. Hierdurch werden die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen als Effizienzkriterium dargestellt. Auch dieser Bezug wird gleichermaßen für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse wie für Biokraftstoffe aus Reststoffen dargestellt.
  - Treibhausgasbilanz: Summe eingesparter CO<sub>2</sub>-Äquivalente in kg / Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in MJ.

### 3 Betrachtete Kraftstoffe

In dieser Studie werden alle Kraftstoffe betrachtet, die aus Anbaubiomasse oder biogenen Reststoffen hergestellt werden und somit mehr oder weniger in den Kohlenstoffkreislauf eingebunden sind. In Kapitel 3.1 werden die Biokraftstoffe im Kontext des globalen Kohlenstoffkreislaufes betrachtet. In Kapitel 3.2 werden die einzelnen Biokraftstoffe kurz beschrieben.

#### 3.1 Biokraftstoffe im Kontext des globalen Kohlenstoffkreislaufs

Biokraftstoffe werden aus Biomasse produziert. Bei deren Verbrennung wird genau die Menge an  $\text{CO}_2$  frei, die der Atmosphäre zuvor über die Photosynthese der Pflanzen entzogen wurde. Hierdurch ergibt sich ein nahezu geschlossener  $\text{CO}_2$ -Kreislauf (vgl. Abb. 2). Neben der Verbrennung treten  $\text{CO}_2$ -Emissionen aber auch im Zuge der Bereitstellung von Biokraftstoffen auf. Diese ergeben sich beispielsweise aus der Produktion von stickstoffhaltigen Düngemitteln oder dem Dieseleinsatz in landwirtschaftlichen Maschinen. Andererseits fallen bei der Produktion von Biokraftstoffen wiederum Kuppelprodukte an, die konventionell hergestellte Produkte und zu deren Produktion benötigte erschöpfliche Primärenergie substituieren.

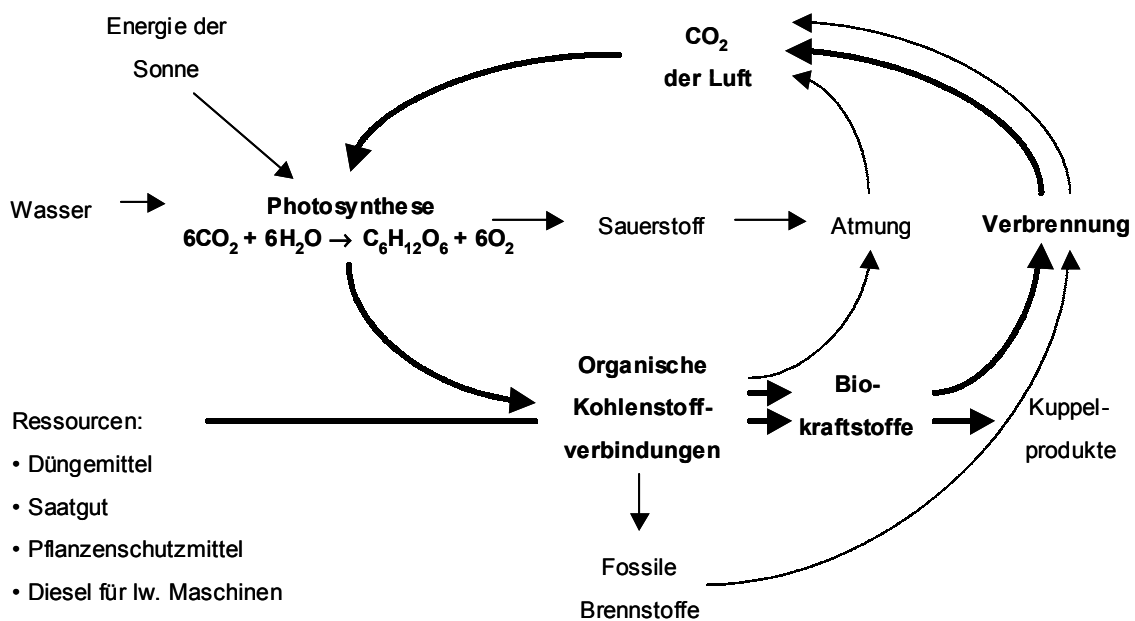


Abbildung 2:  $\text{CO}_2$ -Neutralität von Biokraftstoffen im Kontext des globalen Kohlenstoffkreislaufs

Bei der Photosynthese bauen die Pflanzen aus  $\text{CO}_2$ , Wasser und der Lichtenergie der Sonne Kohlenhydrate auf und scheiden dabei Sauerstoff aus. Aus den bei der Photosynthese gebildeten Kohlenhydraten baut die Pflanze andere organische Stoffe, wie z.B. Proteine auf. Die hierzu benötigte Energie gewinnt sie durch den Abbau von Kohlenhydraten. Bei diesem als Atmung bezeichneten Prozess wird der bei der Photosynthese gebildete Sauerstoff verbraucht und  $\text{CO}_2$  gebildet. Die Zellatmung verläuft demnach in umgekehrter Richtung wie die Photosynthese. Da bei der Photosynthese mehr Stoffmasse gebildet als veratmet wird, legen

die Pflanzen eine große Energiemenge fest. Bei der Bildung von Torf, Kohle, Erdöl und Erdgas wird Kohlenstoff in Form organischer Verbindungen aus dem Kreislauf ausgeschieden und abgelagert (vgl. Abb. 2). Diese in langen Zeiträumen gebildeten fossilen Kohlenstofflager werden heute verbrannt und das dabei entstehende CO<sub>2</sub> gelangt in die Atmosphäre. Hier reichert es sich seit der Industrialisierung an, was zum sogenannten Treibhauseffekt führt. Zwischen 1989 und 1998 wurden pro Jahr 6,3 Mrd. t C aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen emittiert. Hinzu kamen Emissionen in Höhe von 1,6 Mrd. t C pro Jahr aufgrund von Landnutzungsänderungen wie vor allem der Brandrodung in den Tropen. Diesen Emissionen stand eine Zunahme in der Atmosphäre von 3,3 Mrd. t C pro Jahr und eine Aufnahme durch den Ozean von 2,3 Mrd. t C pro Jahr gegenüber. Um die Bilanz auszugleichen, verbleiben noch 2,3 Mrd. t C pro Jahr als zusätzliche Senkenprozesse (Tab. 3). Diese werden vor allem durch den Altersaufbau der Wälder in der nördlichen Hemisphäre, durch die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Düngung der Pflanzen durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und durch den anthropogenen Stickstoffeintrag erklärt (Kohlmaier & Rohner 1998).

Tabelle 3: Weltweite CO<sub>2</sub>-Quellen und -Senken in Mrd. t C pro Jahr 1989 – 1998 (IPCC 2000)

	<b>C in Mrd. t pro Jahr</b>
<b>Weltweite CO<sub>2</sub>-Quellen</b>	<b>7,9 ± 1,4</b>
Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe	6,3 ± 0,6
Emissionen aufgrund Landnutzungsänderungen, insbesondere Brandrodung in den Tropen	1,6 ± 0,8
<b>Weltweite CO<sub>2</sub>-Senken</b>	<b>7,9 ± 2,3</b>
Zunahme in der Atmosphäre	3,3 ± 0,2
Aufnahme des Ozeans	2,3 ± 0,8
Weitere terrestrische Senken (z.B. nachwachsende Wälder, CO <sub>2</sub> -Düngungseffekt, anthropogener Stickstoffeintrag)	2,3 ± 1,3

Klimapolitische Überlegungen sehen in der Kohlenstoffbindung von Wäldern und Böden eine Möglichkeit zur Kompensation der seit der letzten Jahrzehnte steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Nach Kalkulationen von IPCC (IPCC 1996, in Kohlmaier & Rohner 1998) beträgt das weltweite Potenzial zur Kohlenstoffbindung durch Schutzmaßnahmen und Aufforstung von Wäldern zwischen 1995 bis 2050 im Mittel rund 1,3 Mrd. t C pro Jahr (vgl. Tab. 4). Das ist ca. ein Sechstel der weltweiten CO<sub>2</sub>-Quellen (vgl. Tab. 3). Die Kohlenstoffspeicherung durch Aufforstung von Wäldern kann jedoch nur so lange erfolgen, bis die potenziellen Reservoirs aufgefüllt sind. Dann bleibt noch das Kohlenstofflager in zivilisatorischer Verwendung, wobei Holz in Gebäuden mehr als fünf Jahrzehnte gespeichert wird, im Möbelbau 10 bis 20 Jahre und in Papier und Verpackungsmaterial nur 1 bis 2 Jahre (Kohlmaier & Rohner 1998).

Im landwirtschaftlichen Bereich stellt die Speicherfähigkeit des Bodens für Kohlenstoff ein wesentlich größeres Reservoir dar als die temporäre CO<sub>2</sub>-Bindung der Kulturpflanzen. Das Ausmaß der Senkenstärke des Bodens für CO<sub>2</sub> wird durch Standortfaktoren und Nutzung bestimmt. Dabei führt der Input organischer Dünger sowie die konservierende Bodenbearbeitung zu einer Zufuhr an organischer Substanz (Rogasik et al. 2000). Eine erhebliche Kohlenstoffsенке stellt der Boden nach einer Krümmenvertiefung dar. Hierdurch kommt es zunächst zu einer Ausdünnung der organischen Substanz und zu einer anschließenden Humus-

Neubildung bis zur Einstellung der ursprünglichen Gleichgewichts-C-Gehalte (Nieder et al. 1993).

Da die Kohlenstoffspeicherung durch Aufforstung nur so lange erfolgen kann, bis die potenziellen Reservoirs aufgefüllt sind und die Speicherung von Kohlenstoff im Boden ebenfalls begrenzt ist, handelt es sich hierbei bestenfalls um kurzfristige Möglichkeiten zur Kompensation der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Tabelle 4: Weltweites Potenzial zur Kohlenstoffbindung in Wäldern zwischen 1995 und 2050 in Mrd. t C bzw. in Mrd. t C pro Jahr (Quelle: IPCC 1996, in Kohlmaier & Rohner 1998)

	<b>C in Mrd. t 1995 - 2050</b>	<b>C in Mrd. t pro Jahr</b>
Hohen Breiten		
Aufforstung	2,4	0,0
Mittlere Breiten		
Aufforstung	11,8	0,2
Plantagen	0,7	0,0
Niedere Breiten		
Aufforstung	16,4	0,3
Plantagen	6,3	0,1
Regenerierung	11,5 – 28,7	0,2 – 0,5
Verlangsamte Waldzerstörung	10,8 – 20,8	0,2 – 0,4
<b>Summe</b>	<b>59,9 – 87,1</b>	<b>1,1 – 1,6</b>

## 3.2 Auswahl und Kurzbeschreibung der betrachteten Kraftstoffe

Nachdem in Kapitel 3.1 u.a. aufgezeigt wurde, dass Biokraftstoffe weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral sind, werden im folgenden die Biokraftstoffe beschrieben, die in dieser Studie betrachtet werden – unterteilt nach derzeit im Einsatz befindlichen und heute noch nicht großtechnisch hergestellten Biokraftstoffen (Abb. 3).

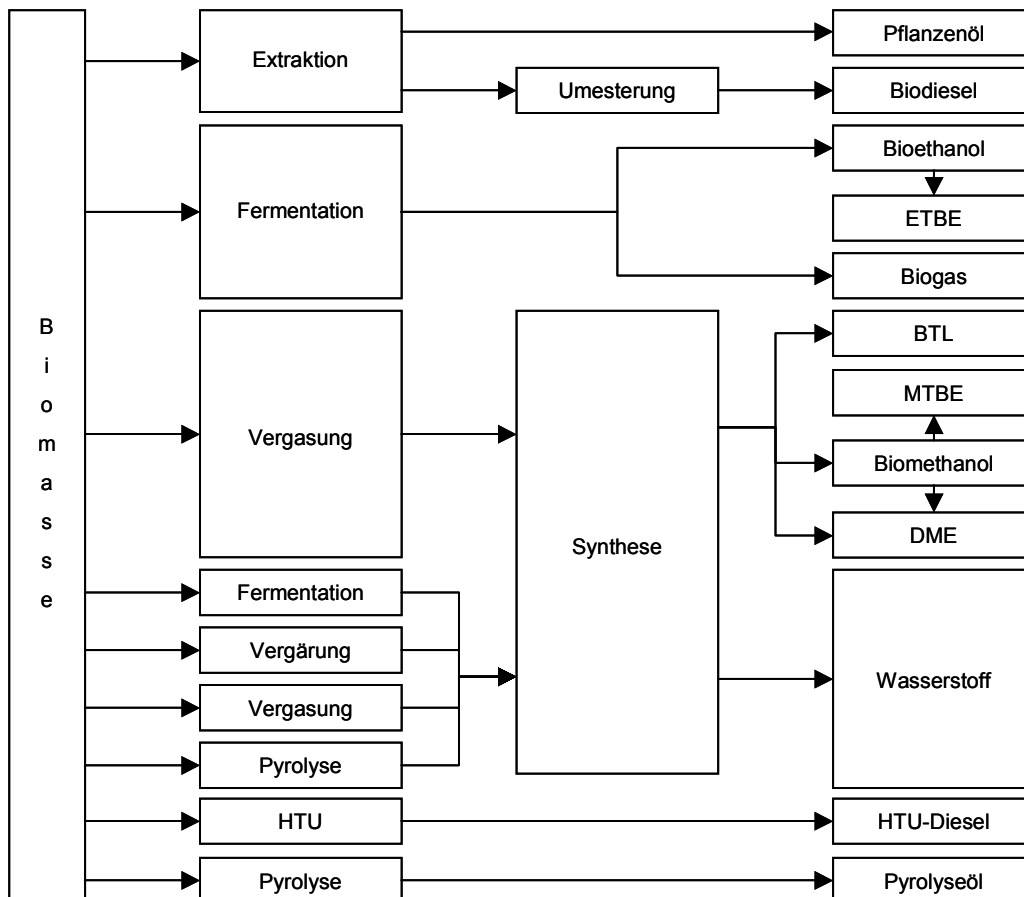


Abbildung 3: Biokraftstoffpfade

### Derzeit im Einsatz befindliche Biokraftstoffe

- **Bioethanol (EtOH)**

Von allen regenerativen Kraftstoffen weist Bioethanol weltweit die größte Verbreitung auf, wobei der höchste Anteil in Brasilien und in den USA produziert wird. In Brasilien wird Ethanol hauptsächlich aus Zuckerrohr und in den USA aus Mais produziert, in Europa dagegen hauptsächlich aus Weizen und aus Zuckerrüben. Die Ethanolproduktion aus Lignocellulose, Kartoffeln, Hirse und Siedlungsabfällen spielt dagegen derzeit im Kraftstoffsektor keine Rolle.

- **ETBE (Ethyltertiärbutylether)**

Für die länderspezifisch eingesetzten Rohstoffe zur ETBE-Produktion gilt das in dem vorherigen Abschnitt Beschriebene. ETBE wird in Frankreich bis zu 15 % dem Ottokraftstoff beigemischt.



- **Biodiesel**

Biodiesel wird vor allem in Europa und hier überwiegend aus Raps und in deutlich geringem Umfang auch aus Sonnenblumen produziert. In Nordamerika wird Biodiesel vor allem aus Sojabohnen und in geringem Umfang aus Canola hergestellt. In Südostasien wird Biodiesel aus Palmöl und in geringem Umfang auch aus Kokosnussöl produziert. In Großbritannien wird Biodiesel aus recyceltem Pflanzenöl und in Österreich und Deutschland auch aus Tierfett bzw. Altspesiefetten und -ölen hergestellt.

Die Umesterung von Biodiesel erfolgt in der Regel mit Methanol fossilen Ursprungs. Sie kann jedoch auch mit Biomethanol oder mit Bioethanol zu Pflanzenölethylestern erfolgen. Hierzu liegen uns allerdings keine Studien vor.

- **Pflanzenöl**

Reines Pflanzenöl wird derzeit nur in marginalen Mengen als Kraftstoff genutzt. In Deutschland wird überwiegend dezentral gepresstes Rapsöl eingesetzt, während in den USA vor allem Sojaöl Verwendung findet. Die im Vergleich zu Biodiesel geringere Bedeutung von reinem Pflanzenöl spiegelt sich auch in der gegenüber Biodiesel deutlich geringeren Anzahl an Studien wider.

### **Heute noch nicht großtechnisch hergestellte Biokraftstoffe**

- **Biomethanol (MeOH), MTBE (Methyltertiärbutylether), DME (Dimethylether), BTL (Biomass-to-Liquid)**

Diese Kraftstoffe können aus Synthesegas hergestellt werden, das aus der Vergasung von Biomasse resultiert. Ausgangsstoffe für die Vergasung stellen vor allem lignocellulosehaltigen Materialien wie Stroh und Holz dar, wobei auch andere Biomasserohstoffe vergast werden können.

- **Pyrolyseöl-Diesel**

Das bei der Pyrolyse (thermische Umwandlung von Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff) gewonnene Pyrolyseöl dient als Ausgangsmaterial für die Produktion eines Dieseleratzes. Auch bei diesem Prozess werden in Zukunft möglicherweise lignocellulosehaltige Materialien bevorzugt eingesetzt. Zu Pyrolyseöl-Diesel liegen uns keine Studien zu Energie- und Treibhausgasbilanzen vor.

- **HTU-Diesel (Hydro Thermal Upgrading)**

Bei der Produktion von HTU-Diesel wird ein Biorohöl (bio-crude) aus in Wasser verrotteter Biomasse gewonnen, aus dem dann ein Dieseleratz produziert wird. Als Ausgangsmaterialien eignen sich alle Biomasserohstoffe mit hohem Wassergehalt, wie beispielsweise Zuckerrübenpülpe. Zu HTU-Diesel liegen uns ebenfalls keine Studien zu Energie- und Treibhausgasbilanzen vor.

- **Biogas**

Das bei der anaeroben Vergärung von organischem Material (Gülle, Stroh, Gras, Abfälle, etc.) entstehende Biogas muss, bevor es als Kraftstoff genutzt werden kann, in seine Einzelbestandteile Methan, Kohlendioxid und Stickstoff zerlegt werden, wobei das gewonnene Methan als erdgasgleicher Kraftstoff eingesetzt werden kann.

- **Wasserstoff**

Für die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung.

- **Vergasung:** Das üblichste, derzeit in Pilot- und Demonstrationsvorhaben erprobte Verfahren ist die Vergasung von Biomasse, die bei geringeren Temperaturen als Kohlevergasung stattfinden kann und zu einem wasserstoffreichen Synthesegas führt. Verschiedene Vergasertypen und -verfahren stehen für die Wasserstoffproduktion bereit. Die höchsten Wasserstoffkonzentrationen weist die allotherme Wasserdampfvergasung auf, bei der die Wärme von außen zur Verfügung gestellt wird.
- **Vergärung (Biogas):** Geeignete Ausgangsstoffe können durch Vergärung in ein methanhaltiges Biogas zersetzt werden. Dieses kann wie Erdgas reformiert und zu reinem Wasserstoff aufbereitet werden.
- **Fermentation von wasserstoffhaltigen Zwischenprodukten:** Durch Fermentation können wasserstoffhaltige Zwischenprodukte wie beispielsweise Ethanol gewonnen werden, die ebenfalls in Wasserstoff reformiert werden können.
- **Pyrolyse:** Die Pyrolyse von Biomasse kann zur direkten Wasserstofferzeugung eingesetzt oder mit anderen thermochemischen Verfahren gekoppelt werden. So kann beispielsweise das Pyrolyseöl oder Pyrolysegas zu Wasserstoff reformiert werden, u. U. gekoppelt mit der Verbrennung des Pyrolysekokes.
- **Wasserstoffgewinnung aus Algen:** Spezielle Grünalgen, die das Enzym Hydrogenase besitzen, sind dazu fähig Wasserstoff zu produzieren. Die Wasserstoffproduktion erfolgt, wenn dem Wasser Schwefel entzogen wird. Ohne Schwefel sind die Algen nicht mehr in der Lage zu wachsen. Stattdessen wird die durch die Photosynthese gewonnene Energie mit Hilfe des Enzyms Hydrogenase dazu verwendet, um Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zu spalten. D.h., da die Algen nicht mehr in der Lage sind, die Energie der Photosynthese zu verwerten, geben sie die Energie in Form von Wasserstoff ab.

In Tabelle 5 sind alle Biokraftstoffe aufgeführt, zu denen Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen vorliegen und die in dieser Studie analysiert werden.

Tabelle 5: In dieser Studie betrachtete Biokraftstoffe zu Energie- und Treibhausgasbilanzen und die entsprechenden Kraftstoffpendants

<b>Biokraftstoffe</b>	<b>Fossile Kraftstoffpendants</b>
<b>Bioethanol</b>	
— Bioethanol aus Zuckerrohr	— Ottokraftstoff
— Bioethanol aus Mais	— Ottokraftstoff
— Bioethanol aus Weizen	— Ottokraftstoff
— Bioethanol aus Zuckerrüben	— Ottokraftstoff
— Bioethanol aus Lignocellulose	— Ottokraftstoff
— Bioethanol aus Kartoffeln	— Ottokraftstoff
— Bioethanol aus Molasse	— Ottokraftstoff
<b>ETBE</b>	
— ETBE aus Weizen	— Fossiles MTBE
— ETBE aus Zuckerrüben	— Fossiles MTBE
— ETBE aus Lignocellulose	— Fossiles MTBE
— ETBE aus Kartoffeln	— Fossiles MTBE
<b>Biodiesel</b>	
— Biodiesel aus Raps	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
— Biodiesel aus Sonnenblumen	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
— Biodiesel aus Sojabohnen	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
— Biodiesel aus Canola	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
— Biodiesel aus Kokosnussöl	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
— Biodiesel aus Tierfett	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
— Biodiesel aus Altspeisefetten	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
<b>Pflanzenöl</b>	
— Pflanzenöl aus Raps	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
— Pflanzenöl aus Sonnenblumen	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
<b>Biomethanol</b>	
— Biomethanol aus Lignocellulose	— Ottokraftstoff * / Methanol aus Erdgas
<b>MTBE</b>	
— MTBE aus Lignocellulose	— Fossiles MTBE
<b>DME</b>	
— DME aus Lignocellulose	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
<b>BTL</b>	
— BTL aus Lignocellulose	— Fossiler Dieselmotorkraftstoff
<b>Biogas</b>	
— Biogas aus organischen Reststoffen	— Ottokraftstoff * / Erdgas
— Biogas aus Anbaubiomasse	— Ottokraftstoff * / Erdgas
<b>Wasserstoff</b>	
— Wasserstoff aus Lignocellulose	— Ottokraftstoff * / Wasserstoff aus Erdgas
— Wasserstoff aus organischen Reststoffen	— Ottokraftstoff * / Wasserstoff aus Erdgas

\* In den Abbildungen 4 und 5 herangezogene Kraftstoffpendants

(Betrachtung weiterer Kraftstoffpendants und Antriebstechnologien im Anhang A 2.4.6)

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen und Gegenüberstellungen der betrachteten Biokraftstoffe getrennt nach den Bereichen „Energie- und Treibhausgasbilanzen“, „Weitere Umweltwirkungen“, „Kosten“, „Potenziale“ und „Zukünftige Entwicklungen“ aufgeführt und diskutiert. Die jeweiligen Detailbeschreibungen und Detailinterpretationen sowie alle Zwischenergebnisse sind im Anhang dokumentiert.

### 4.1 Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen

Die Analysen, Gegenüberstellungen und Interpretationen wurden gemäß der in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Die einzelnen Detailergebnisse sind im Anhang A 2 detailliert dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst:

#### **Ergebnis 1: Die vorhandenen Ökobilanzstudien decken noch nicht alle Biokraftstoffe ab**

Für viele Biokraftstoffe liegt eine Vielzahl an Studien zu Energie- und Treibhausgasbilanzen vor. Zu diesen Biokraftstoffen konnten große Bandbreiten abgeleitet werden, in der unterschiedliche Optionen (unterschiedliche Erträge, Verwendungszwecke der Nebenprodukte, Annahmen der Basisdaten) der Biokraftstoffproduktion berücksichtigt sind. Für einige Biokraftstoffe liegen jedoch nur wenige bzw. keine entsprechenden Studien vor:

- Von den derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen wurde Biodiesel aus Palmöl noch nicht untersucht.
- Von den heute noch nicht großtechnisch hergestellten Biokraftstoffen liegen keine Studien vor zu: Biodiesel aus Jatropha, Pyrolyseöl und HTU-Diesel.
- Jeweils nur zu einem Konversionspfad existieren Studien für DME, Methanol und BTL (Bereitstellung aus Lignocellulose). Für alle anderen Möglichkeiten, von Anbaubiomasse bis zum Einsatz von organischen Reststoffen, gibt es bisher noch keine Untersuchungen.
- Für einige Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse müssten zur besseren Absicherung der Bandbreite noch ergänzende Analysen durchgeführt werden. Dazu gehören Biodiesel aus Kokosnussöl sowie Bioethanol bzw. ETBE aus Zuckerrohr und aus Kartoffeln.

#### **Ergebnis 2: Nicht alle Ökobilanzstudien können als repräsentativ angesehen werden: Deswegen ist die Ableitung von Bandbreiten nötig**

Es zeigte sich, dass die Ergebnisse einer Reihe von Ökobilanzstudien nicht als repräsentativ angesehen werden können. Deswegen war es nötig, eigene Bandbreiten abzuleiten, die von den Minimum- und Maximumwerten der analysierten Studien abweichen. Aus folgenden Gründen werden Ökobilanzstudien als nicht repräsentativ angesehen (Näheres siehe Kap. 2.4):

- Nichtberücksichtigung von Kuppelprodukten
- Nichtberücksichtigung oder nur Teilberücksichtigung des Treibhausgases  $N_2O$  (Emission bei Düngerbereitstellung, Düngerapplikation, aus dem agrarischen Referenzsystem)
- Berücksichtigung von menschlicher Arbeit

- Basisdaten, die nicht mehr den Stand der Technik widerspiegeln (Konversionstechnologie, Düngereinsatzmengen etc.)
- Nichtberücksichtigung von agrarischen Referenzsystemen bzw. Alternativverwendungen

### **Ergebnis 3: Die Ergebnisse variieren in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen, wodurch sich große Bandbreiten ergeben**

Die abgeleiteten Bandbreiten (s. Abb. 4 und 5 für Biokraftstoffe im Vergleich mit den fossilen Kraftstoffpendants) resultieren aus Unterschieden in den Basisdaten, den Erträgen, der Verfahrenstechnik und in der Bewertung der Kuppelprodukte. Dies wird nachfolgend anhand von Beispielen erläutert.

#### **Basisdaten**

Für den Bereich der Landwirtschaft wurde in den einzelnen Studien von einem unterschiedlichen Betriebsmitteleinsatz ausgegangen. Beispielsweise variierte der Stickstoffdüngereinsatz in den analysierten Studien zu Bioethanol aus Weizen zwischen 53 (Elsayed 2003) und 195 kg N/ha (Levington 2000). Der Stickstoffdüngereinsatz ist im Bereich der Landwirtschaft oftmals für den erschöpflichen Primärenergieaufwand, die CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen hauptverantwortlich. Aber nicht nur die Einsatzmenge variierte erheblich, sondern auch der Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von Stickstoffdüngemitteln. In den Studien zu Bioethanol aus Mais variierte er zwischen 70 MJ/kg N (Pimentel 2003) und 42 MJ/kg N (GM 2001).

#### **Erträge**

In den Studien zu Ethanol variieren die Zuckerrübenenerträge zwischen 56 t/ha (IFEU et al. 2000, Bezug Deutschland) und 86 t/ha (IFEU et al. 2000, Bezug Niederlande) und die Weizenerträge zwischen 2,7 t/ha (S&T 2003) und 9,0 t/ha (Ademe 2002). Diese Erträge stellen für die jeweiligen Bezugsräume jeweils repräsentative Werte dar.

#### **Verfahrenstechnik**

Die unterschiedliche Verfahrenstechnik wirkt sich beispielsweise bei der BTL-Produktion aus. Hier sind der erschöpfliche Primärenergieaufwand und damit auch die Treibhausgasemissionen vor allem davon abhängig, wie gut die endotherme Synthesegasproduktion und die exotherme Fischer-Tropsch-Synthese aufeinander abgestimmt werden können.

#### **Bewertung der Kuppelprodukte**

In einigen Studien wurden die Primärenergieaufwendungen und Treibhausgasemissionen zu 100 % dem Zielprodukt zugeschrieben, so dass Kuppelprodukte nicht angerechnet wurden (FfE 1999). In der IFEU-Studie (2002) zu Bioethanol aus Zuckerrüben variiert die angesetzte Allokation zwischen 15 und 95 % bezogen auf Bioethanol. Bei der Analyse der Studien zu Bioethanol aus Weizen zeigte sich, dass die Vorteile für Bioethanol vergleichsweise gering sind, wenn das Gutschriftenverfahren angewendet wird, während die Vorteile für Bioethanol bei Anwendung des Allokationsverfahrens bis zu viermal höher ausfallen.

#### **Ergebnis 4: Die Ergebnisse sind von der Art des gegenübergestellten fossilen Kraftstoffs abhängig**

Wie Abbildung 5 zeigt, können die Energie- und Treibhausgasbilanzen von flüssigem Wasserstoff aus Lignocellulose bei der Gegenüberstellung mit Ottokraftstoff zugunsten des fossilen Kraftstoffs ausfallen, wenn die Hilfsenergie für die Verflüssigung aus einem fossil geprägtem Strommix stammt. Dagegen fallen die Ergebnisse von flüssigem Wasserstoff aus Lignocellulose bei der Gegenüberstellung mit flüssigem Wasserstoff aus Erdgas in jedem Fall zugunsten des Biokraftstoffs aus. Dies erklärt sich durch die wesentlich höheren Aufwendungen für die Bereitstellung von flüssigem Wasserstoff aus Erdgas im Vergleich zu Ottokraftstoff.

Die Detailergebnisse von einzelnen Biokraftstoffen im Vergleich zu unterschiedlichen fossilen Kraftstoffpendants und auch zu unterschiedlichen Antriebstechnologien (ICE versus FC) befinden sich im Anhang A 2.4.6.

#### **Ergebnis 5: Qualitative Ergebnisse für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse sind richtungssicher: Vorteile bei Energie- und Treibhausgasbilanzen**

Die Energie- und Treibhausgasbilanzen der betrachteten Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants fallen alle zugunsten der Biokraftstoffe aus. Das gilt in unseren Augen uneingeschränkt, obwohl vereinzelt Studien zum entgegengesetzten Schluss kommen (vgl. z.B. Pimentel 2003). Des Weiteren können folgende Detailergebnisse festgehalten werden:

- Die eingesparte Primärenergie und die vermiedenen Treibhausgasemissionen korrelieren beim Vergleich von Bioethanol, ETBE, Biodiesel und Pflanzenöl jeweils *untereinander* recht eng, so dass die Aussagen bezüglich der Primärenergie generell auch für die eingesparten Treibhausgasemissionen gelten.
  - Der Vergleich *zwischen* ETBE und Biodiesel zeigt bezogen auf die eingesparte Primärenergie Vorteile für ETBE – solange durch ETBE das fossile MTBE substituiert wird. Bei den vermiedenen Treibhausgasemissionen kann es je nach betrachtetem Rohstoff und Prozessführung gegenläufig sein.
- ETBE weist trotz des zusätzlichen Prozessschrittes bei allen untersuchten Biomasserohstoffen Vorteile gegenüber Bioethanol auf, auch hier solange ETBE fossiles MTBE ersetzt. Dies kommt dadurch zustande, da ETBE das mit relativ hohem Energieaufwand zu produzierende MTBE ersetzt, während Bioethanol den im Vergleich zu MTBE günstiger zu produzierenden Ottokraftstoff ersetzt.
  - Aus der Tatsache, dass ETBE Vorteile gegenüber Bioethanol aufweist und Bioethanol aus Zuckerrohr von allen Ethanolen am günstigsten abschneidet, kann der Schluss gezogen werden, dass ETBE aus Zuckerrohr die höchsten Vorteile aufweisen würde.
  - Die Produktion von ETBE aus Zuckerrüben ist somit die zweitgünstigste Option, wobei sich die größten Vorteile ergeben, wenn überdurchschnittlich hohe Zuckerrübenenerträge angesetzt werden.
- Beim Vergleich der Bioethanol- mit den Biodiesel-Optionen hängt es von den jeweiligen Rohstoffen ab, ob Bioethanol besser abschneidet als Biodiesel.
- Biodiesel aus Raps weist gegenüber reinem Rapsöl Vorteile auf, da das bei der Umesterung entstehende Kuppelprodukt Glycerin technisch produziertes Glycerin ersetzt.

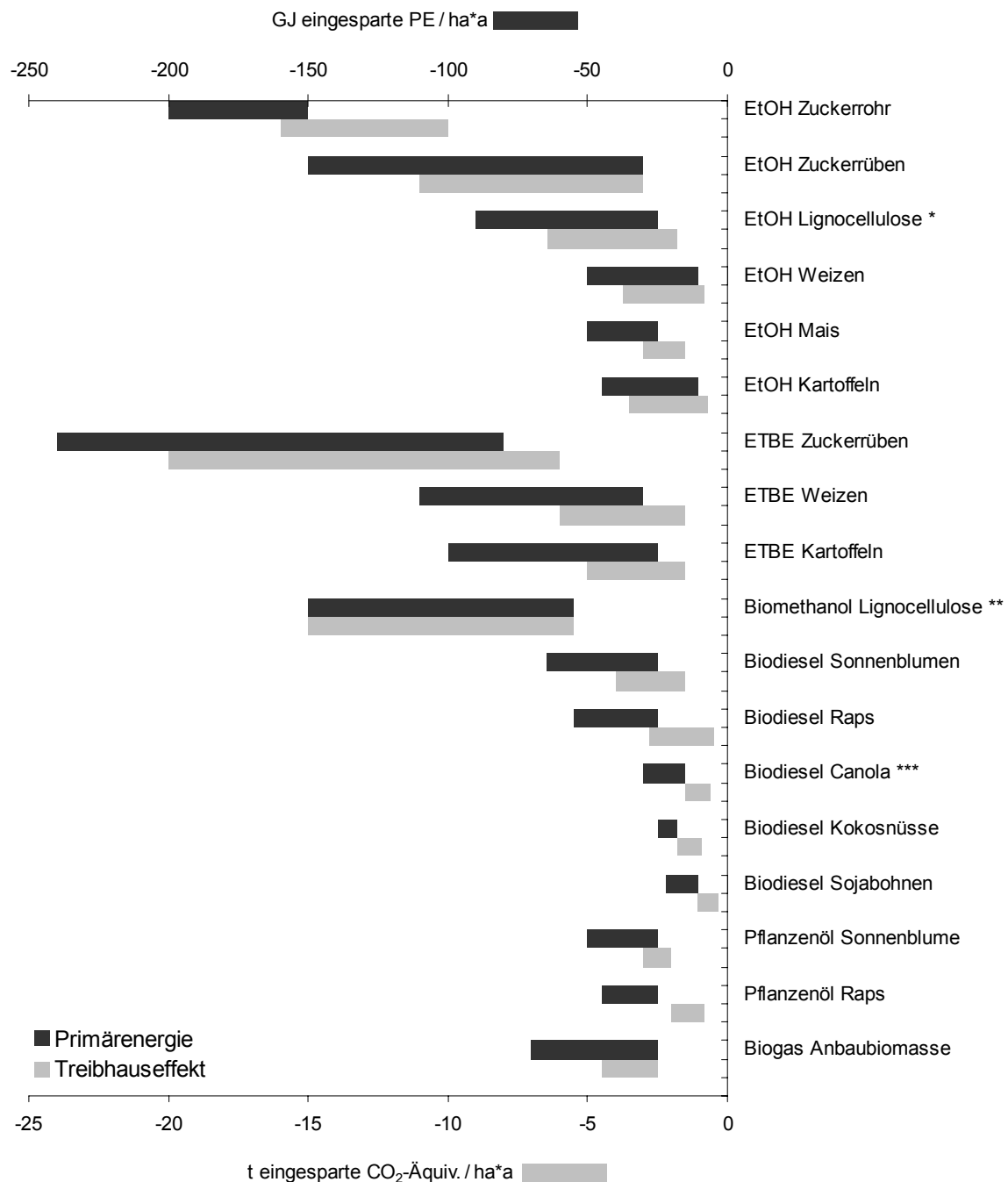


Abbildung 4: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen der analysierten Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants (vgl. Tabelle 5) in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / ha \* a. Die negativen Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe, da in diesem Fall Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Äquiv.-Emissionen im Gesamtvergleich eingespart werden. Der Nullpunkt bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenswegvergleich „Biokraftstoff minus fossiler Kraftstoff“ ausgeglichen sind.

\*: Die Bandbreiten für Ethanol aus Lignocellulose sind nicht uneingeschränkt mit den anderen vergleichbar, da hier Lignocellulose aus Anbaubiomasse und aus Reststoffen zusammengeführt wurden.

\*\* : nur aus Anbaubiomasse; \*\*\*: kanadischer Handelsname von Sommerraps

### **Ergebnis 6: Unterschiedliche Fragestellungen bedingen unterschiedliche Bezüge und liefern teils die gleichen, teils aber auch unterschiedliche Antworten**

Unterschiedliche Fragestellungen bedingen unterschiedliche Ergebnisbezüge. Bei begrenzt zur Verfügung stehenden Flächen spielt für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse der Flächenbezug eine große Rolle (s. Abb. 4). Wenn jedoch die Fahrleistung der mit Biokraftstoffen betriebenen Fahrzeuge – im Vergleich zu den mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen – analysiert werden soll, ist der Kilometerbezug zu wählen (s. Abb. 5). Während in Abbildung 4 nur Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse aufgeführt sind, lässt der Bezug auf den Kilometer einen Effizienzvergleich aller Kraftstoffe (aus Anbaubiomasse und aus Reststoffen) zu. Bei der Gegenüberstellung zeigt sich, dass viele Ergebnisse qualitativ gleichgerichtet verlaufen. So gilt beispielsweise das „Ergebnis 5“ auch für den Kilometerbezug. In einigen wenigen Fällen finden sich jedoch auch Unterschiede bzw. – durch den Vergleich mit Biokraftstoffen aus Reststoffen – zusätzliche Detailergebnisse:

- Im Gegensatz zur flächenbezogenen Betrachtung weist Ethanol bei allen untersuchten Biomasserohstoffen bezogen auf einen km Vorteile gegenüber ETBE auf. Die flächenbezogenen Vorteile von ETBE im Vergleich zu Ethanol erklären sich durch den vergleichsweise hohen energiebezogenen Hektarertrag von ETBE.

Zu weiteren Fragestellungen finden sich im Anhang A 2.4 Ergebniszusammenstellungen mit jeweils entsprechenden Bezügen: Neben Ergebnissen, die die gesamten Lebenswegvergleiche umfassen (Bezüge: pro MJ Kraftstoffinhalt, eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro eingesparte erschöpfliche Primärenergie etc.) sind dort auch entsprechende Ergebnisse für die WTW- und WTT-Analysen wiedergegeben.

#### **Erläuterung der Pfeile mit Fragezeichen :**

Die in Abbildung 5 dargestellten Pfeile mit Fragezeichen wurden bei allen Biokraftstoffen aus Reststoffen angebracht. Sie deuten an, dass sich die Vorteile der Biokraftstoffe bei Berücksichtigung des Alternativnutzens (z.B. Altspeisefett als Tierfutter) verschlechtern können. Bei den bisherigen Analysen wurde der Alternativnutzen gleich Null gesetzt. Da der Alternativnutzen im Rahmen dieser Studie nicht quantifiziert werden konnte, wird durch die Pfeile mit Fragezeichen die Richtung aufgezeigt, in die sich die Bilanzen bei Berücksichtigung des Alternativnutzens verändern können (siehe auch Ergebnis 7).



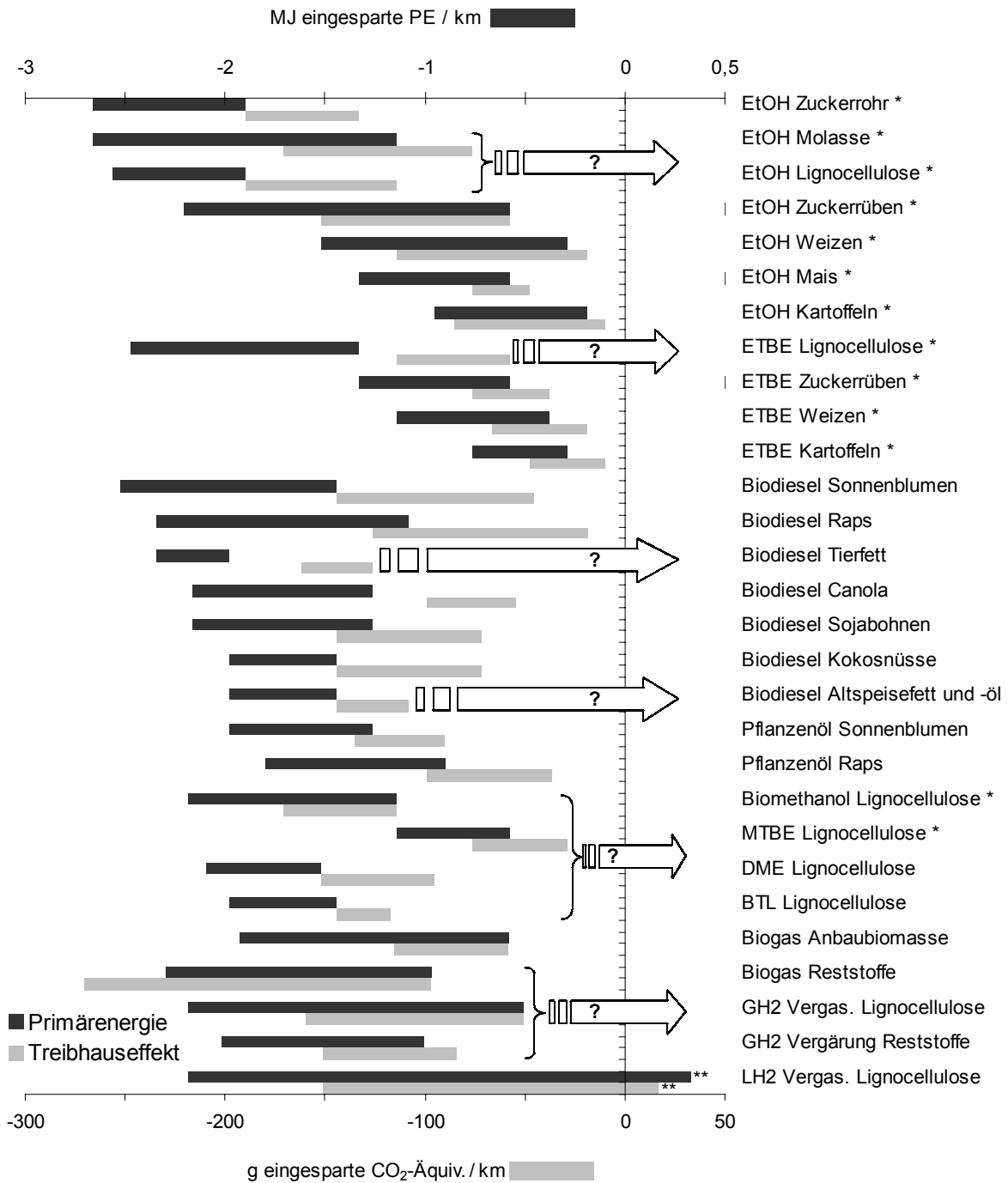


Abbildung 5: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen der analysierten Biokraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants (vgl. Tabelle 5) in MJ eingesparte Primärenergie bzw. g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/km. Die negativen Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe, da in diesem Fall Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Äquiv.-Emissionen im Gesamtvergleich eingespart werden. Der Nullpunkt bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenswegvergleich „Biokraftstoff minus fossiler Kraftstoff“ ausgeglichen sind. \*: Bezug: 100 % Biokraftstoff (bei ETBE/MTBE auch der foss. Anteil des ETBE/MTBE); Als Kraftstoffverbrauch wurde der der Beimischung angesetzt. \*\*: Große Bandbreite, da die Energieaufwendungen für die Bereitstellung und Distribution entweder durch erschöpfliche Primärenergieträger oder durch das produzierte Produktgas gedeckt werden können (siehe auch Ergebnis 4).

## **Ergebnis 7: Großer Forschungsbedarf zu einigen Biokraftstoffen aus Reststoffen wie BTL**

Bei einigen Biokraftstoffen, die potenziell aus organischen Reststoffen gewonnen werden können, liegen nur sehr wenige Untersuchungen vor (vgl. mit „Ergebnis 1“). Hinzu kommt, dass aus Ökobilanzsicht bei Biokraftstoffen aus organischen „Abfallbiomassen“ wie Altspeisefetten oder Abfallholz grundsätzlich deren reale oder potenzielle Alternativverwendungen mit berücksichtigt werden müssen. Dies wurde bei den bisherigen Analysen insofern außer Acht gelassen, als der Alternativnutzen zu Null gesetzt wurde. Bekanntermaßen werden einige Altspeiseöle im Tierfutterbereich oder Abfallholz zu Energiegewinnung eingesetzt. In den meisten Fällen fällt dabei eine mehr oder weniger große Gutschrift an, die die potenziellen Vorteile des Biokraftstoffes reduziert. Diese Richtung ist für die infragekommenden Biokraftstoffe in der Abbildung 5 mit den eingezeichneten **Pfeilen** dargestellt. Da ohne vertiefende Untersuchungen keine belastbare Bandbreite angegeben werden kann, ist dies dort mit einem **Fragezeichen** versehen. Es soll jedoch damit auch deutlich gemacht werden, dass im Extremfall der Biokraftstoff durchaus auch schlechter als der fossile Kraftstoff ausfallen kann, beispielsweise wenn Sägerestholz nicht direkt energetisch genutzt wird, weil die darin enthaltene Lignocellulose mit gewissen Konversionsverlusten zu einem Biokraftstoff verarbeitet wird.

## 4.2 Weitere Umweltwirkungen von Biokraftstoffen

Neben der Inanspruchnahme energetischer Ressourcen und Emissionen von Treibhausgasen gibt es weitere Wirkungen auf die Umwelt, die mit der Herstellung und Nutzung von Kraftstoffen verbunden sind. Betrachtet werden hier solche Umweltwirkungen, wie sie in den diversen Ökobilanzstudien erhoben wurden. Dazu zählen die Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung und Photosmog, für die Wirkungskategorie Ozonabbau der Einzelparameter Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und einige toxische Substanzen (s. Tab. 6).

Tabelle 6: In dieser Arbeit untersuchte Umweltwirkungen

Umweltwirkung	Aggregation	Parameter
<b>Ressourcenverbrauch Energie</b>	Kumulierte Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen	Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle, Uran
<b>Treibhauseffekt</b>	$\text{CO}_2$ -Äquivalente	$\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2\text{O}$ , $\text{SF}_6$ , FCKW, einige CKW, ...
<b>Versauerung</b>	$\text{SO}_2$ -Äquivalente	$\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , $\text{NH}_3$ , $\text{HCl}$ , $\text{HF}$ , $\text{H}_2\text{S}$ , ...
<b>Eutrophierung</b>	$\text{PO}_4$ -Äquivalente	$\text{NO}_x$ , $\text{NH}_3$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{NO}_3^-$
<b>Photosmog</b>	$\text{C}_2\text{H}_4$ -Äquivalente bzw. $\text{NO}_x$ -korrig. $\text{C}_2\text{H}_4$ -Äquivalente	$\text{CH}_4$ , NMHC, $\text{NO}_x$ , ...
<b>Ozonabbau</b>		$\text{N}_2\text{O}$ (Lachgas)
<b>Toxizitäten</b>		diverse

Die Gegenüberstellung und Interpretation wurde zunächst kraftstoffspezifisch vorgenommen. Welche einzelnen Literaturquellen für welche Kraftstoffe betrachtet wurden und die Detailergebnisse sind im Anhang A 3 dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst:

### Ergebnis 8: Die Anzahl der Ökobilanzstudien zu den sonstigen Umweltwirkungen ist äußerst gering

Die Analyse aller Studien zeigt, dass die weiteren Umweltwirkungen von Biokraftstoffen in wenigen Studien so umfassend dargestellt sind, dass eine Interpretation möglich ist. Bei vielen wurden nur einzelne Parameter bilanziert (beispielsweise  $\text{SO}_2$ ), was eine Interpretation auf der Basis von Umweltwirkungen nicht zulässt. Wenn beispielsweise nur  $\text{SO}_2$  bilanziert wurde, ist eine Diskussion zur Versauerung, bei der insbesondere auch  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  bei den Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse eine besonders große Bedeutung haben, nicht möglich. In einem Fall wurden für die weiteren Umweltwirkungen nicht alle Lebenswegabschnitte berücksichtigt, so dass die Ergebnisse nicht mit denen der anderen Studien vergleichbar sind. Tabelle 7 gibt einen Überblick, wieviel vergleichbare Studien zu den einzelnen Kraftstoffen jeweils vorliegen, und Tabelle 8 listet die Studien auf, die die sonstigen Umweltwirkungen umfassend bilanziert haben samt den jeweils dort betrachteten Kraftstoffen.

Während für häufiger eingesetzte Biokraftstoffe wie Biodiesel oder Bioethanol die weiteren Umweltwirkungen meist von mehreren Studien dargestellt werden, fehlen für bestimmte zukünftige Kraftstoffe wie BTL und MTBE entsprechende Analysen ganz. Doch auch für bereits auf dem Markt befindliche Biokraftstoffe fehlen eingehende Untersuchungen der weiteren Umweltwirkungen wie bei Bioethanol aus Zuckerrohr oder Biodiesel aus Altspeiseölen.

Tabelle 7: Anzahl der Quellen zu weiteren Umweltwirkungen der einzelnen Biokraftstoffe

Biokraftstoff	alle Biomassearten	Anbaubiomasse	Reststoffe
Bioethanol	3 (+ 6 unvollständig)	2 (+ 5 unvollständig)	2 (+ 2 unvollständig)
ETBE	4	3	2
Biodiesel	5 (+ 5 unvollständig)	5 (+ 5 unvollständig)	(1 unvollständig)
Pflanzenöl	1 (+ 1 unvollständig)	1 (+ 1 unvollständig)	0
Biomethanol	2 (+ 3 unvollständig)	1 (+ 3 unvollständig)	1 (+ 1 unvollständig)
MTBE	0	0	0
DME	1 (+ 1 unvollständig)	0	1
BTL	0	0	0
Biogas	(2 unvollständig)	(1 unvollständig)	(2 unvollständig)
Wasserstoff	(2 unvollständig bzw. nicht vergleichbar)	0	(2 unvollständig bzw. nicht vergleichbar)

Tabelle 8: Quellen mit vollständiger Darstellung der weiteren Umweltwirkungen

Quelle	betrachtete Biokraftstoffe
FAT 2000	Biodiesel aus Raps
Fromentin 2000	Bioethanol aus Anbaubiomasse und Reststoffen
IFEU et al. 2000	ETBE und Biodiesel aus diversen Anbaubiomassen
IFEU 2001	Rapsöl
IFEU 2002a	Bioethanol und ETBE aus diversen Anbaubiomassen
IFEU 2002b	Biodiesel aus Sonnenblume
IFEU 2002c	Biomethanol aus Reststoffen, DME aus Reststoffen
IFEU 2003	Biodiesel aus Raps
NREL 1999	ETBE aus Reststoffen
NREL 2002	Bioethanol aus Reststoffen
Pehnt 2002	Biomethanol aus Reststoffen
VITO 1997	Biodiesel aus Raps

### Ergebnis 9: Die Ergebnisse hängen stark von Fragestellung und Bilanzierungsweisen ab

Die Analyse der diversen Ökobilanzstudien zeigt, dass die Ergebnisse in viel stärkerem Maß als bei den Energie- und Treibhausgasbilanzen von den Fragestellungen und Bilanzierungsweisen abhängen. Insbesondere sind zu nennen:

- **Alternativverwendung bei Kraftstoffen aus Rest- oder Abfallstoffen:** Je nach Fragestellung können die zu betrachtenden Systemgrenzen für denselben Biokraftstoff deutlich unterschiedlich ausfallen – insbesondere, wenn organische Reststoffe oder Abfälle als Rohstoffe eingesetzt werden. So kann – je nach Fragestellung – bei der Ökobilanz zu Biodiesel aus Altfetten das Altfett ohne „ökologischen Rucksack“ in die Bilanz eingehen,

aber es kann auch ein alternativer Verwendungszweck wie Energiegewinnung durch Verbrennung gegengerechnet werden. Oder das beim Weizenanbau anfallende Stroh könnte als Energielieferant bei der Bioethanolproduktion aus Weizen fungieren.

- **Bereitstellung des Energiebedarfs:** Der Energiebedarf für die Konversion zum fertigen Biokraftstoff kann aus unterschiedlichen Quellen gedeckt werden: aus dem Stromnetz, durch industrie-eigene Kraft- oder Wärmebereitstellung mittels Erdgas, leichtem oder gar schwerem Heizöl etc., was für die Klimagas- und Energiebilanzen in der Regel weniger große Auswirkungen hat, dafür umso mehr bei den Emissionen wie  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$ . Auch kann eine große Rolle spielen, ob neben fossilen auch biogene Energieträger zur Abdeckung des Energiebedarfs eingesetzt werden. Beispiel: CSIRO (2001) weist für Bioethanol aus Weizen eine Option der Verarbeitung mit fossilen Brennstoffen und eine mit Weizenstroh aus, was sogar zu einem Vorzeichenwechsel beim Photosmog führt.
- **Emissionsortbetrachtung:** Anders als bei den Energie- und Klimagasbilanzen spielt bei den luftgetragenen Emissionen der Emissionsort eine besonders große Rolle. Beispielsweise sind auf hoher See durch Ozeandampfer freigesetzte Dieselpartikelemissionen (Verbrennung von Schweröl etc.) toxikologisch völlig anders zu bewerten als Dieselpartikelemissionen durch Fahrzeuge in Innenstädten. In Einzelfällen kann es dabei in der Gesamtbilanz sogar zu Vorzeichenwechsel kommen (s. Tab. 9 nach Reinhardt 1999). Dem kann durch Bilanzierungsmethoden wie in Borken (1999) beschrieben begegnet werden. In IFEU (alle Jahre) wurde dies berücksichtigt, bei den anderen Ökobilanzen zu Biokraftstoffen bisher nicht.

Tabelle 9: RME-Bilanz zu den toxikologisch relevanten und den gesamten Stickoxidemissionen, bezogen auf 1 kg Dieselpartikelfreisetzung bzw. Dieselpartikelfreisetzungäquivalent

Lebenswegabschnitt	Stickoxide regional (Ortsklasse I und II)* g/kg DK	Stickoxide gesamt (Ortsklasse I, II, und III)* mg/kg DK
Bereitstellung RME	0,85	-1,34
Nutzung RME	10,19	10,19
Bereitstellung Dieselpartikelfreisetzung	0,65	0,79
Nutzung Dieselpartikelfreisetzung	10,19	10,19
<b>Saldo</b>	<b>0,20</b>	<b>-2,12</b>

\* Ortsklasse I = Emissionsort Stadt, II = Emissionsort Land, III = Emissionsort Ozean

- **Berücksichtigung von Kuppelprodukten:** Es existieren ökobilanztechnisch verschiedene Möglichkeiten des Umgangs mit Kuppelprodukten, die bei der Bereitstellung des Biokraftstoffs entstehen. Vorzugsweise sollten Gutschriften erteilt werden, da dadurch die Realität besser beschrieben wird. In einigen Studien werden aber die gemeinsamen Aufwendungen auf die verschiedenen Produkte aufgeteilt. Zum Beispiel wird das bei der Extraktion von Rapsöl aus dem Korn anfallende Rapsschrot als Futtermittel verwendet. In diesem Fall wird ein anderes Eiweißfuttermittel wie Sojaschrot gegengerechnet. Es gibt aber auch Studien, die die Aufwendungen anhand der Masse, des ökonomischen Wertes oder Energiegehalts aufteilen. Daraus ergeben sich teils drastische Unterschiede im Ergebnis.

### **Ergebnis 10: Ergebnisse hier nur qualitativ darstellbar**

Wie oben aufgeführt, liegt pro Biokraftstoff eine jeweils nur äußerst geringe Anzahl an Ökobilanzstudien (s. Tab. 7) vor. Darüber hinaus sind die quantitativen Ergebnisse in besonderem Maß von den unter „Ergebnis 9“ diskutierten Punkten abhängig, so dass eine Ableitung von Bandbreiten für die betrachteten Größen analog zur Vorgehensweise bei den Energie- und Treibhausgasbilanzen wissenschaftlich nicht belastbar ist.

### **Ergebnis 11: Unterschiedliche Ergebnisse für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse und aus Reststoffen**

Für die Umweltwirkungen Versauerung, Eutrophierung und den Parameter Lachgas gibt es deutliche Unterschiede bei Biokraftstoffen aus angebaute Biomasse und solchen aus biogenen Reststoffen.

- **Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse:** Aufgrund der großen Stickstoffemissionen ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), die im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Produktion von Anbaubiomasse entstehen, sind die Ergebnisse sowohl für die Versauerung und Eutrophierung als auch Lachgas qualitativ richtungssicher zu Ungunsten des Biokraftstoffs. Dies gilt selbst dann, wenn man verschiedene Bilanzierungsarten für die Eutrophierung (aquatisch und terrestrisch, über wasser- und luftgetragene Emissionen) beim Vergleich des Bio- und des fossilen Kraftstoffs zugrunde legt.

Ist darüber hinaus eine quantitative Bestimmung gewünscht, muss eine Einzelfallanalyse die genauen Verhältnisse ermitteln.

- **Biokraftstoffe aus Reststoffen:** Die Ergebnisse für Biokraftstoffe aus Reststoffen sind dagegen nicht als richtungssicher einzustufen. Schon für die qualitative Bestimmung der Vor- bzw. Nachteile bei der Versauerung und der Eutrophierung muss daher jeder Einzelfall einer eigenen Analyse unterzogen werden. Der Parameter  $\text{N}_2\text{O}$  spielt bei diesen Kraftstoffen in der Regel keine signifikante Rolle. Dies gilt es im Einzelfall jedoch zu überprüfen.

### **Ergebnis 12: Meist keine Aussage zu Photosmog möglich**

Beim Photosmog liegt noch ein großer Erkenntnisbedarf vor. Das hängt damit zusammen, dass bisher der Photosmog mittels POCP-Äquivalenten bilanziert wurde, in die praktisch nur Kohlenwasserstoffe eingehen. Aber auch  $\text{NO}_x$  kann signifikant zum Entstehen von Photosmog in Abhängigkeit seiner Konzentration relativ zu der der Kohlenwasserstoffe und unter bestimmten meteorologischen Voraussetzungen beitragen. Das wird mit den so genannten  $\text{NO}_x$ -korrelierten POCP-Äquivalenten berücksichtigt, was bisher aber in nur sehr wenigen Ökobilanzstudien angewandt wird. In (IFEU 2003) zu RME ergab sich dabei ein Vorzeichenwechsel. Insofern kann zusammengefasst werden, dass aus heutiger Sicht eine richtungssichere Aussage zu Photosmog nur in solchen Fällen möglich ist, wenn die Kohlenwasserstoffe und die  $\text{NO}_x$  über die Gesamtbilanz das gleiche Vorzeichen haben. Dabei gilt aber insbesondere, dass die Emissionsbilanzierung unter Wirkungsgesichtspunkten vorgenommen werden muss (siehe „Emissionsortbilanzierung“ unter Ergebnis 9), was außer bei IFEU (alle Jahre) in Ökobilanzen zu Biokraftstoffen nicht berücksichtigt wurde.

Sowohl die Bilanzierungsmethode als auch das zu bilanzierende Gesamtsystem kann also zu Vorteilen oder Nachteilen für den Biokraftstoff führen. Für gegebene Rahmenbedingungen ist somit immer eine Einzelfallanalyse notwendig.

### **Ergebnis 13: Großer Erkenntnisbedarf bei toxischen Parametern und Emissionsunterschieden bei der motorischen Nutzung**

Nur sehr wenige Studien betrachten mehr als etwa fünf Parameter (s. Tab. 1). Größen wie die zur Öko- und Humantoxizität beitragenden Kohlenwasserstoffe Formaldehyd, Benzol und PAK oder auch die Partikel sind für eine Gesamteinschätzung der ökologischen Auswirkungen von Biokraftstoffen ebenfalls sehr wichtig. Hierbei fehlen belastbare Einschätzungen über den gesamten Lebensweg hinweg. Aber auch, wie sich die Emissionen in unterschiedlichen Zumischungen, wie sie derzeit diskutiert werden bzw. teilweise schon auf dem Markt sind, in unterschiedlichen Motorenkonzepten verhalten, ist derzeit wissenschaftlich belastbar nicht einzuschätzen. Dies gilt auch für  $\text{NO}_x$ , falls signifikante Emissionsunterschiede auftreten sollten.

### 4.3 Kosten von Biokraftstoffen

In diesem Kapitel werden die Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen denen von herkömmlichen Kraftstoffen gegenübergestellt. Die Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen setzen sich aus den Rohstoffkosten, den Kosten für den Transport der Rohstoffe, den Konversionskosten, den Einnahmen durch Nebenprodukte sowie den Kosten für die Verteilung zusammen. Steuern und Gewinnaufschläge der Kraftstoffe werden nicht berücksichtigt, da sie den Vergleich verfälschen würden.

Die Daten wurden auf der Basis der in Tabelle 1 aufgeführten Quellen – nach kritischer Prüfung und gegebenenfalls Anpassung – zusammengestellt. Einzelheiten hierzu sind im Anhang A 4 dokumentiert.

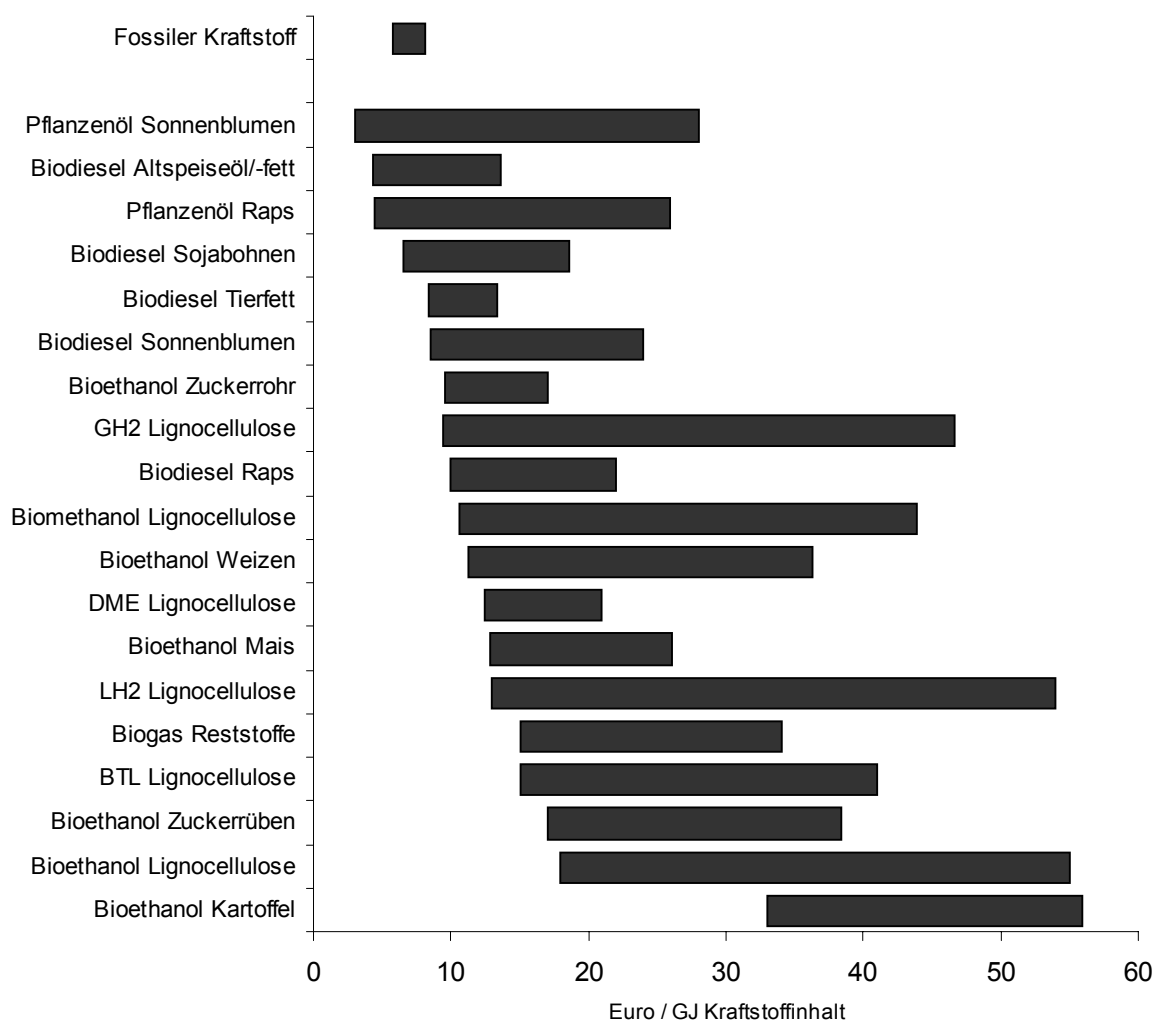


Abbildung 6: Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen im Vergleich zu den Bereitstellungskosten von fossilem Kraftstoff in Euro/GJ Kraftstoffinhalt.



#### **Ergebnis 14: Die vorhandenen Kostenabschätzungen decken noch nicht alle Biokraftstoffe ab**

- Zu ETBE liegen keine Kostenabschätzungen vor.
- Bei einigen Biokraftstoffen (Bioethanol aus Zuckerrohr, Biodiesel aus Sojabohnen) fand keine Aufteilung der Bereitstellungskosten auf die Einzelbereiche: Rohstoffkosten, Konversionskosten, Einnahmen durch Nebenprodukte und Verteilung statt. Diese Kostenabschätzungen sind nicht nachvollziehbar und lassen keine Interpretation zu.

#### **Ergebnis 15: Die Bereitstellungskosten von fossilen Kraftstoffen sind meist günstiger als die von Biokraftstoffen**

Der Vergleich der Produktionskosten in Euro / GJ Kraftstoffinhalt zeigt, dass fossile Kraftstoffe meist kostengünstiger produziert werden können als Biokraftstoffe (Abb. 6). In einigen Fällen lassen sich Biokraftstoffe allerdings auch zu den Kosten von fossilen Kraftstoffen produzieren.

- Dies gilt für Biodiesel aus Altspeisefetten, wenn man davon ausgeht, dass keine Rohstoffkosten anfallen und dass niedrige Konversionskosten angesetzt werden. Die Konversionskosten unterliegen einer gewissen Bandbreite und können auch höher sein, so dass sich Biodiesel aus Altspeisefetten nicht mehr zu den Preisen von fossilen Kraftstoffen produzieren lässt.
- Die Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Raps und Sonnenblumen unterliegen einer großen Schwankungsbreite und können unter günstigen Bedingungen ebenfalls zu den Kosten von fossilen Kraftstoffen produziert werden. Bei der in der Abbildung dargestellten Bandbreite wurde zugrundegelegt, dass die Rohstoffkosten zur Produktion von Pflanzenöl mit denen von Biodiesel identisch sind und dass die Konversionskosten der Pflanzenölproduktion – aufgrund des fehlenden Prozessschrittes für die Umesterung – geringer sind als die der Biodieselproduktion. Ob die Bereitstellungskosten von Pflanzenöl geringer sind als die von Biodiesel, hängt jedoch in besonderem Maß von den Erlösen durch den Verkauf von Glycerin ab. Bei hohem Erlös liegen die Bereitstellungskosten von Biodiesel unter denen von Pflanzenöl, bei niedrigen Erlösen sind sie höher als von Pflanzenöl.

Diese grundsätzlichen Zusammenhänge gelten auch für andere Bezüge, so z. B. für Euro pro 100 km (s. Abb. 7). Aufgrund des geringeren Kraftstoffverbrauchs schneidet hier jedoch Wasserstoff gegenüber allen anderen Kraftstoffen vergleichsweise günstiger ab als bei dem Bezug Euro pro GJ Kraftstoffinhalt. Dies gilt in geringerem Maße auch für die Biodieselvarianten, die gegenüber den Ethanolvarianten vergleichsweise günstiger abschneiden als beim Bezug pro GJ Kraftstoffinhalt.

#### **Ergebnis 16: Keine eindeutigen Unterschiede bei Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse gegenüber solchen aus Reststoffen**

Die Produktion von Biokraftstoffen aus Reststoffen ist in einigen Fällen kostengünstiger als die aus Anbaubiomasse. Aufgrund der äußerst großen Bandbreite insbesondere bei den Bereitstellungskosten für die Reststoffe (kostenlose Anlieferung, kostenaufwändiges Einsammeln von Waldrestholz etc.) ist eine Verallgemeinerung nicht möglich. Vergleiche müssen jeweils für einzelne Biokraftstoffe und die jeweils zugrundeliegenden Randbedingungen durchgeführt werden.

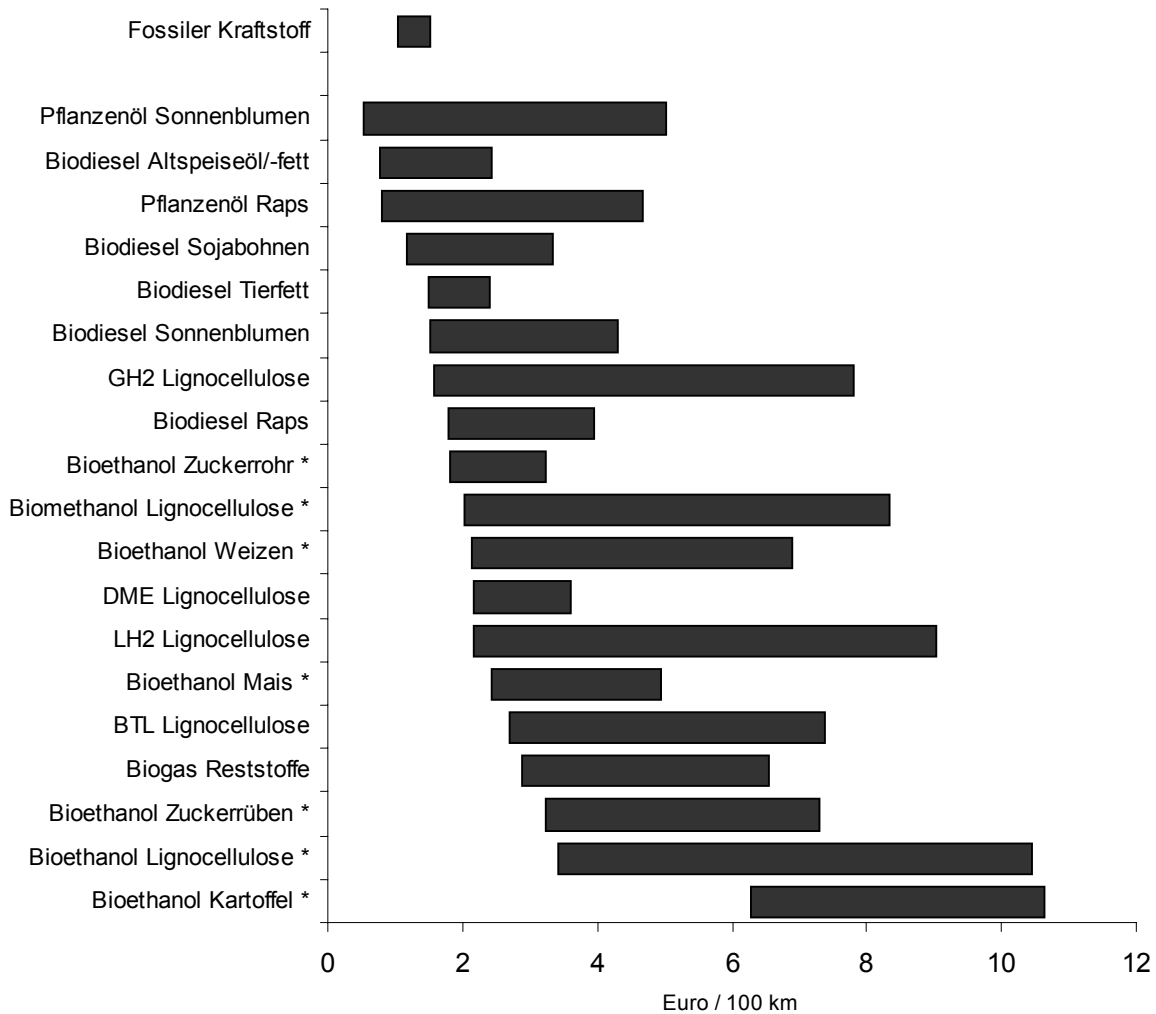


Abbildung 7: Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen (ohne Fahrzeugkosten) im Vergleich zu den Bereitstellungskosten von fossilem Kraftstoff in Euro / 100 km.

\*: Bezug: 100 % Biokraftstoff; Als Kraftstoffverbrauch wurde der der Beimischung angesetzt (vgl. Tab. 2).

### Ergebnis 17: Die Vermeidungskosten (Kosten pro vermiedenen Klimagasemissionen bzw. eingesparten Energieträgern) zeigen eine extreme Bandbreite

Bei den Randbedingungen, unter denen Biokraftstoffe günstiger als fossile Kraftstoffe produziert werden können (s. „Ergebnis 15“), entstehen keine Kosten pro vermiedenen Klimagasemissionen oder eingesparten Energieträgern, sondern ein „Gewinn“. Für die Mehrzahl der Biokraftstoffe entstehen jedoch Vermeidungskosten, die einer extremen Bandbreite unterliegen (Abb. 8). Die Vermeidungskosten sind bei den Biokraftstoffen am höchsten, deren Bereitstellungskosten hoch und deren eingesparte Primärenergie bzw. Treibhausgasemissionen gering sind, wie beispielsweise bei Bioethanol aus Kartoffeln.

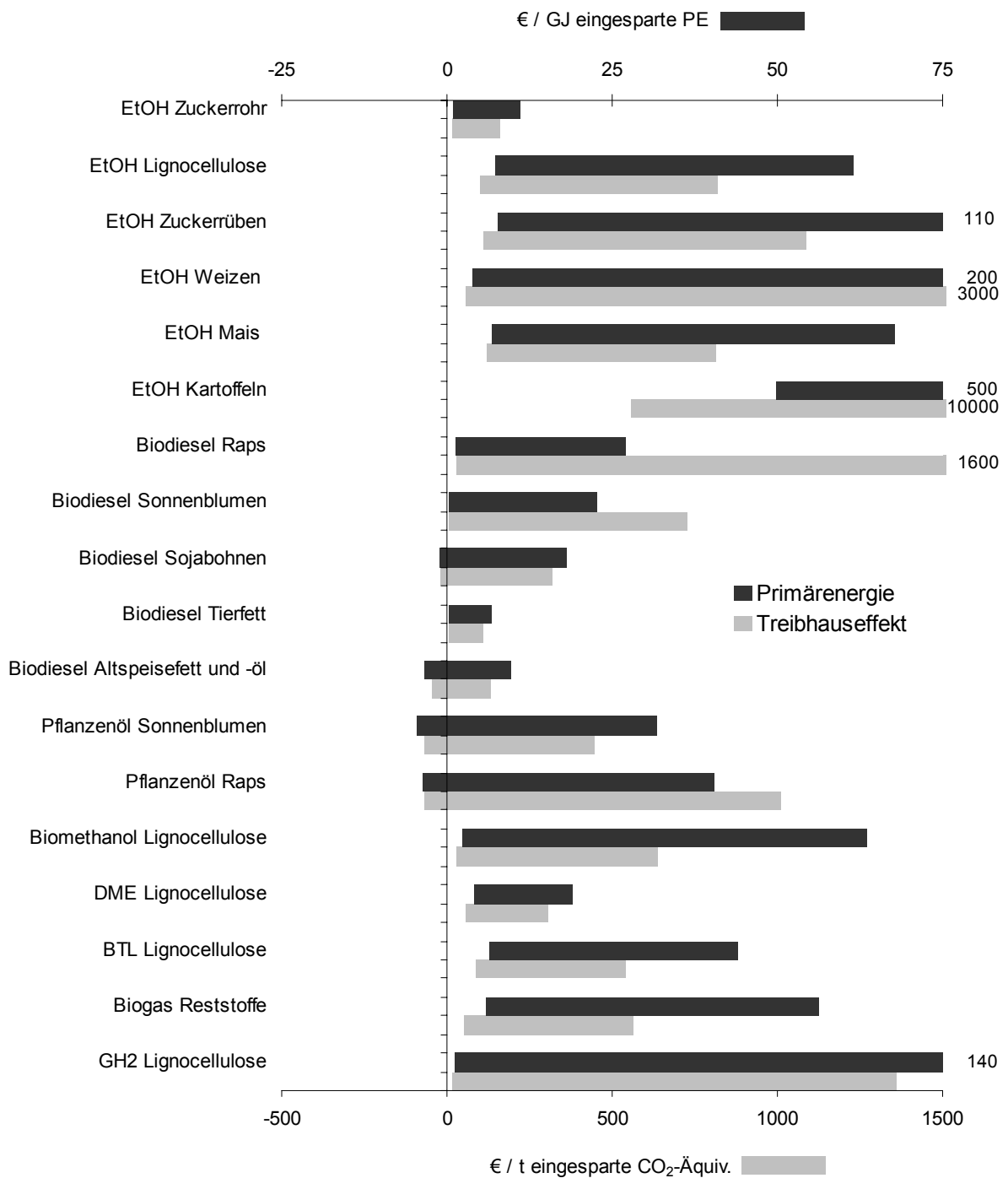


Abbildung 8: Kosten pro vermiedenem Primärenergieträgerverbrauch bzw. Treibhausgasemissionen in Euro /GJ eingesparter erschöpfliche Primärenergie bzw. Euro/t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

### **Ergebnis 18: Die Ergebnisse sind sehr variabel und nur bedingt miteinander vergleichbar**

Die Bereitstellungskosten können enorm variieren. Zwar wurde für jeden Biokraftstoff bereits eine große Bandbreite abgeleitet, dennoch hält sich die Vergleichbarkeit aus folgenden Gründen in starken Grenzen:

- Die Bereitstellungskosten von fossilen Kraftstoffen sind neben den Konversionskosten in besonderem Maß vom Rohölpreis abhängig, während bei den Biokraftstoffen auch noch andere Faktoren eine große Rolle spielen können. Bei den Kraftstoffen aus Anbaubiomasse sind das vor allem die Produktionskosten in der Landwirtschaft, die in vielen Ländern subventioniert wird. Damit wird das „reale Bild“ verzerrt. So variieren die Kosten für Raps in den untersuchten Studien zwischen 8 (IEA 2003) und 35 Euro / GJ Kraftstoffinhalt (Woods 2003) und für Weizen zwischen 5,6 und 33,5 Euro / GJ Kraftstoffinhalt (JRC 2003). Bei den Biokraftstoffen aus Rest- bzw. Abfallstoffen können entgangene Alternativverwendungserlöse genauso eine Rolle spielen wie vermiedene Entsorgungskosten.
- Die Bereitstellungskosten wurden für unterschiedliche Bezugsräume zusammengestellt, deren natürliche und wirtschaftliche Voraussetzungen nicht direkt miteinander vergleichbar sind, wie z. B. bei Bioethanol aus Zuckerrohr in Brasilien, Biodiesel aus Soja in den USA und Bioethanol aus Zuckerrübe in Europa.
- Einerseits werden die Bereitstellungskosten von derzeit auf dem Markt befindlichen Kraftstoffen angegeben, die auf real vorkommenden Kosten basieren. Andererseits werden jedoch auch zukünftige, heute noch nicht großtechnisch hergestellte Kraftstoffe betrachtet. Deren Bereitstellungskosten konnten in den betrachteten Studien nur mehr oder weniger plausibel abgeschätzt werden.

Abschließend sei noch einmal darauf aufmerksam gemacht, dass die hier dargestellten Kosten eine Art Momentaufnahme darstellen. Die für unterschiedliche Bezugsräume und für auf dem Markt befindliche als auch für zukünftige Kraftstoffe zusammengestellten Bereitstellungskosten hängen in besonderem Maß vom Weltmarktpreis von Rohöl, landesspezifischen Subventionspraktiken in der Landwirtschaft und ebenfalls länderspezifisch unterschiedlichen Personal- und Transportkosten ab, so dass sich aus diesen Zahlen keine Prognosen ableiten lassen. Als Momentaufnahme jedoch können die Zahlen durchaus Hinweise auf gewisse Zusammenhänge geben, da die Bandbreiten unter dem Gesichtspunkt bestmöglicher Vergleichbarkeit abgeleitet wurden.

## **4.4 Potenziale von Biokraftstoffen**

Die Analyse der Potenziale von Biokraftstoffen erfolgt auf der Grundlage der in Tabelle 1 aufgeführten Literatur für die Bezüge Deutschland, EU und Welt. Dabei zeigt sich, dass es zu einer Untersuchung gibt, die die verfügbaren Potenziale quantifizieren und solche, die die Potenziale qualitativ beschreiben, Szenarien berechnen oder das Erreichen von Zielen diskutieren wie beispielsweise die EU-Ziele gemäß der am 17.05.2003 in Kraft getretenen EU-Richtlinie zur Förderung von Biokraftstoffen. Zunächst werden einige Kernaussagen der analysierten Studien aufgeführt, die Szenarien oder qualitative Argumentationen entwi-

ckelt haben. Die daran anschließende Tabelle 10 gibt einen Überblick über die betrachteten Studien und die entsprechenden Potenzialabschätzungen, sofern sie beziffert wurden.

- **JRC (2004):** Die Kernaussage dieser Studie ist, dass ausgehend vom derzeitigen Einsatz an Biokraftstoffen in der EU (0,3 %) noch große Anstrengungen notwendig sind, um bis 2005 einen Anteil von 2 % bzw. bis 2010 einen Anteil von 5,75 % – gemäß Biokraftstoffrichtlinie – zu erreichen.  
In dieser Studie erfolgt die Festlegung des Flächenbedarfs zur Erreichung der EU-Ziele (EU-15, EU-25 und EU-27).
  - Um bis 2005 einen Anteil an Biokraftstoffen von 2 % zu erreichen, wäre folgender Anteil an Ackerflächen notwendig:
    - EU-15: 5 – 12 %
    - EU-25: 5 – 9 %
    - EU-27: 4 – 8,5 %
  - Um bis 2010 einen Anteil an Biokraftstoffen von 5,75 % zu erreichen, wäre folgender Anteil an Ackerflächen notwendig:
    - EU-15: 16 – 40 %
    - EU-25: 14 – 27 %
    - EU-27: 12 – 23 %
- **IEA (1999):** Die dort aufgeführten Abschätzungen untersuchten die Potenziale, wenn 10 % des weltweiten Kraftstoffeinsatzes durch alternative Kraftstoffe ersetzt werden. Dabei wurde von einem Kurzzeitszenario (1 bis 5 Jahre) und einem Langzeitszenario (15 bis 25 Jahre) ausgegangen und die folgenden Biokraftstoffe betrachtet: Methanol aus Cellulose, Ethanol aus zuckerhaltigen Pflanzen, Ethanol aus stärkehaltigen Pflanzen und RME.
  - Um das o.g. Ziel zu erreichen, stellt die landwirtschaftlich genutzte Fläche den begrenzenden Faktor dar. In Bezug auf die Flächeninanspruchnahme erreicht im Kurzzeitszenario kein Biokraftstoff das 10 %-Ziel. Im Langzeitszenario können lediglich Ethanol aus Zuckerrüben oder anderen stark zuckerhaltigen Pflanzen und Methanol aus Lignocellulose das 10 %-Ziel erreichen.
  - Die Produktionskapazität zum Erreichen des 10 %-Zieles ist im Kurzzeitszenario für keinen Biokraftstoff und im Langzeitszenario für Methanol aus Lignocellulose, Ethanol aus zucker- und stärkehaltigen Pflanzen und für RME gegeben.
  - Die Verfügbarkeit der Infrastruktur ist sowohl im Kurzzeit- wie auch im Langzeitszenario für alle betrachteten Biokraftstoffe gegeben.
  - Die Nutzung der betrachteten Biokraftstoffe stellt sowohl im Kurzzeit- wie auch im Langzeitszenario keine Probleme dar.
- **Pimentel (2001):** Hier wird angeführt, dass die Konversion von Biomasse in Energie ein gewisses Potenzial hat, um zur Reduzierung des weltweiten Energiebedarfs beizutragen. Allerdings müssen die damit verbundenen Probleme in Bezug auf die Umwelt, Gesundheit und die Wirtschaft sorgfältig bewertet werden. Oberste Priorität sollte die Bereitstellung von Nahrungsmitteln haben, um die schnell wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Bei einer Ethanolproduktion aus Getreide erwartet Pimentel negative Auswirkungen

auf die Sozial- und Wirtschaftssysteme. Ein groß angelegtes Ethanolprogramm würde zu einer Kraftstoffinflation und zu höheren Nahrungsmittelpreisen führen.

Tabelle 10: Potenzialabschätzungen unterschiedlicher Autoren für die Bezüge D, (UK), EU und Welt

Quelle	Bezug	Potenzial in PJ/a	Bemerkungen		
Thrän 2004	D	430 – 834*	aus biogenen Festbrennstoffen		
		103 – 252*	davon 178 – 207 durch Halmgut 563 durch holzartige Reststoffe		
		318 – 464*	aus Anbaubiomasse davon max. 103 durch Pflanzenöl / RME max. 120 durch Ethanol aus Weizen max. 252 durch Ethanol aus Zuckerrüben		
			aus Reststoffen zur Biogaserzeugung		
			*: Technische Erzeugungspotenziale, Zahlen nicht addierbar		
IFEU 2004	D	10 – 530		techn. Potenz.	nachhalt. Potenz.
			2010	220	10
			2030	380	170
			2050	530	350
				nur Anbaubiomasse	
Öko-Institut 2004	D			„Biomasse“- Szenario	„Umwelt“- Szenario
			2010	143	102
			2020	149	87
			2030	153	103
				Anbaubiomasse und Reststoffe	
DLR 2004	D			Biomasse* wird bevorzugt im Ver- kehrssektor einge- setzt	Biomasse** wird bevorzugt im statio- nären Bereich ein- gesetzt
			2010	150	30
			2030	320	65
			2050	420	100
				* Anbaubiomasse ** Anbaubiomasse und Reststoffe	
EST 2002	UK	200 - 1000	200 durch RME 200 – 500 durch Ethanol 800 – 1000 durch Methanol oder Wasserstoff aus Lignocellulose		
			* Zahlen nicht addierbar, da die für den Energie- pflanzenanbau prognostizierte Fläche von 4 Mio ha nur einmal genutzt werden kann		

Fortsetzung Tabelle 10

JRC 2003	EU-CC-12			2005	2010
			Biodiesel		
			konventionelles Szenario	42,8	71,1
			optimales Szenario	36,0	127,3
			Bioethanol		
			konventionelles Szenario	44,9	50,9
			optimales Szenario	85,2	172,3
LBST 2003	EU	680 – 1630	aus Restholz und Reststroh		
			davon	min	max
			Wasserstoff	975	1568
			Methanol	690	1625
			BTL	1011	1597
			Ethanol	681	1076
		410 – 1140	aus schnellwachsenden Bäumen		
			davon	min	max
			Wasserstoff	708	1104
			Methanol	501	1144
			BTL	734	1124
			Ethanol	411	630
		360 – 590	Biogas aus Gräsern		
		360 – 590	via Biogas		
			davon	min	max
			Biogas	360	592
			Wasserstoff	249	410
			Methanol	272	446
		319	Pflanzenöl		
CONCAWE 2002	EU-15	260 – 680	7,1 Mt/a = 260 PJ/a durch RME		
			11,5 Mt/a = 310 PJ/a durch Ethanol aus Weizen		
			25,3 Mt/a = 680 PJ/a durch Ethanol aus Z-Rüben		
			* Zahlen nicht addierbar, da die für den Energiepflanzenanbau veranschlagte Fläche von 5,6 Mio ha (= Flächenstilllegung) nur einmal genutzt werden kann		
JRC 2002a/b	EU	197 – 770	5,0 Mt/a = 197 PJ/a durch RME		
			10,7 Mt/a = 284 PJ/a durch Ethanol aus Weizen		
			28,8 Mt/a = 770 PJ/a durch Ethanol aus Z-Rüben		
			* Zahlen nicht addierbar, da die für den Energiepflanzenanbau veranschlagte Fläche von 5,5 Mio ha (= Flächenstilllegung) nur einmal genutzt werden kann		
JRC 2004	EU	k.A.	quantitativ s.o.		
Moreira 2002	Welt	47.000	Ethanol aus Zuckerrohr im Jahr 2020		
Dreier 2000	Welt	263.000	aus Anbaubiomasse und nachhaltiger Forstwirtschaft		
			150.000 Ethanol		
			108.000 Methanol		
			5.000 Pflanzenöl		
		43.000	aus Reststoffen, Restholz, Ernterückst.		
			20.000 Ethanol		
			15.000 Methanol		
			8.000 Biogas		
IEA 1999	Welt	k.A.	Szenarien s. o.		
Pimentel 2001	Welt	k.A.	qualitativ s. o.		

### **Ergebnis 19: Generell hohes Potenzial von Biokraftstoffen, was sich jedoch bei Berücksichtigung von Flächen- und Nutzungskonkurrenzen verringert**

Die Gegenüberstellung der Potenzialanalysen von Biokraftstoffen zeigt, dass die Ergebnisse in einem weiten Bereich variieren. So schätzen einige Autoren das Potenzial von Biokraftstoffen als sehr gering ein (Pimentel 2001, JRC 2004), während andere Autoren davon ausgehen, dass Biokraftstoffe ein sehr hohes Potenzial aufweisen und einen wesentlichen Beitrag zur Deckung des Kraftstoffeinsatzes leisten können. Beispielsweise beträgt das von Dreier (2000) ermittelte, weltweite technische Potenzial von Biokraftstoffen rund das dreifache des derzeitigen, weltweiten Kraftstoffverbrauchs und das für Großbritannien ermittelte Potenzial von Methanol bzw. Wasserstoff entspricht 50 % des derzeitigen Kraftstoffverbrauchs von Großbritannien (1.600 PJ/a; der zukünftige Kraftstoffverbrauch wird je nach Transportaufkommen und verwendeter Technologie mit 1.000 – 2.250 PJ/a beziffert; EST 2002). Dem gegenüber liegt der Einsatz an Biokraftstoffen derzeit in Deutschland bei ca. 0,8 %, in der EU-15 bei ca. 0,5 % und in den USA bei etwa 0,9 % (IEA 2003).

Dass die Potenzialangaben bei den verschiedenen Autoren so weit auseinanderliegen, hängt im Wesentlichen von mehreren Faktoren ab, die den jeweiligen Potenzialanalysen in unterschiedlicher Ausprägung zugrundegelegt wurden:

**Betrachtete Biokraftstoffe:** Das Potenzial von Biokraftstoffen ist u. a. davon abhängig, welche Biokraftstoffe betrachtet werden. Dementsprechend fallen Potenziale niedriger aus, wenn nur die heute bereits eingesetzten Biokraftstoffe betrachtet werden wie bei CONCAWE 2002, JRC 2002, JRC 2003 und JRC 2004, als wenn auch zukünftige Kraftstoffe wie etwa BTL und Wasserstoff eingerechnet werden (Thrän 2004, EST 2002, LBST 2003, Dreier 2000). Denn es wird angenommen, dass die zukünftigen Kraftstoffe vor allem aus Lignocellulose hergestellt werden wie aus Restholz, Reststroh oder schnellwachsenden Bäumen, womit ein weiterer Rohstoff zur Biokraftstoffproduktion hinzukäme und sich dadurch das Potenzial durch diese zusätzlichen Nutzungsmöglichkeiten vergrößert. Ein weiterer Punkt ist, dass von den derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen beispielsweise Ethanol aus Zuckerrüben je Flächeneinheit ein über doppelt so hohes Potenzial aufweist wie Biodiesel aus Raps, so dass das Potenzial von Biokraftstoffen auch von der Art des Biomasseanbaus abhängig ist.

**Flächenkonkurrenz:** Die derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffe werden überwiegend aus Anbaubiomasse (Raps, Sojabohnen, Mais, Weizen, Zuckerrohr, Zuckerrüben) und zu einem geringen Teil aus organischen Reststoffen (Altspeisefette) gewonnen. Das Potenzial von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse hängt in erster Linie von der zur Verfügung stehenden Fläche ab, während das Reststoff-Potenzial flächenunabhängig ist. Die Fläche zur Produktion von Biokraftstoffen steht in Konkurrenz mit den Flächen zur Nahrungsmittelproduktion und den Flächen, die dem Naturschutz vorbehalten sein sollen. Alle Autoren sehen in der Deckung mit Nahrungsmitteln eine höhere Priorität als im Energiepflanzenanbau. Die Flächen zur Nahrungsmittelproduktion sind vor allem von der Bevölkerungsentwicklung abhängig, die in den einzelnen Bezugsräumen unterschiedlich prognostiziert wird. Während in Deutschland von einem Bevölkerungsrückgang ausgegangen wird, wird weltweit mit einem Bevölkerungsanstieg gerechnet, so dass aus Sicht der Nahrungsmittelproduktion in Deutschland zukünftig eher mehr Flächen und weltweit eher weniger Flächen für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung stehen.

Neben den Flächen für die Nahrungsmittelproduktion fordert auch der Naturschutz Flächen ein, wobei unter bestimmten Voraussetzungen eine Gewinnung von Biomasse auf Teilen



dieser Flächen durchaus möglich ist. Die Flächen, die für den Naturschutz bereitgestellt werden, stehen in direkter Konkurrenz zu den Flächen der Nahrungsmittelproduktion. Da der Nahrungsmittelproduktion eine höhere Priorität zugewiesen wird als dem Energiepflanzenanbau, greift die Nahrungsmittelproduktion wiederum auf die Flächen zurück, die für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung gestanden hätten.

Für Deutschland erfolgte bereits eine Potenzialabschätzung unter Berücksichtigung diverser Nachhaltigkeitsziele einschließlich der Belange des Natur-, Gewässer- und des Bodenschutzes (IFEU 2004). Dabei wurden neben einer Reihe weiterer Annahmen berücksichtigt:

- Zukünftig geringere spezifische Flächeninanspruchnahmen durch Verkehr, Haushalte und Industrie
- Ausweitung des ökologischen Landbaus. Dadurch größere Flächeninanspruchnahme aufgrund geringerer gesamtflächenbezogener Erträge. (Die Bundesregierung sieht eine Erhöhung des Ökolandbaus von derzeit ca. 4 % auf 20 % vor.)
- zu schaffende Flächen für die Umsetzung des im Bundesnaturschutzgesetz festgelegten Ziele (§3 und 5 BNatSchG)
- eine größere Flächeninanspruchnahme durch mehrjährige Pflanzen auf stark erosionsgefährdeten Standorten.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei Berücksichtigung solcher Ziele die Potenziale zum Teil erheblich gegenüber den technischen Potenzialen unterscheiden (vgl. Tab. 10). Für andere Bezugsräume wie EU und Welt sind uns diesbezüglich keine differenzierten Potenzialabschätzungen bekannt. Eine Art Zielrichtung verabschiedete hierzu kürzlich der WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen): Demnach sollten 10 – 20 % der weltweiten Landfläche dem Naturschutz vorbehalten bleiben und nicht mehr als 3 % für den Anbau von Energiepflanzen und für Plantagen zur Kohlenstoffspeicherung genutzt werden (WBGU 2004).

**Nutzungskonkurrenz:** Für das Potenzial von Biokraftstoffen spielt die Nutzungskonkurrenz der Biomasse ebenfalls eine große Rolle. In den meisten Studien werden bei der Bestimmung der technischen Potenziale die verfügbaren Biomassen zu 100 % dem Kraftstoffmarkt zugeordnet. Das stellt somit eine theoretische Obergrenze dar. In der Realität werden sich die Biomassepotenziale in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden Rahmenbedingungen in unterschiedlichem Ausmaß auf Biokraftstoffe, den Strom- und Wärmemarkt sowie stofflich genutzte Biomassen aufteilen. Wird dies berücksichtigt, so können sich die Ergebnisse deutlich ändern. Beispielsweise wird das Biokraftstoffpotenzial in Deutschland für das Jahr 2050 auf etwa ein Viertel reduziert, wenn man davon ausgeht, dass das Biomassepotenzial bevorzugt im stationären Bereich eingesetzt wird, statt es bevorzugt im Verkehrssektor einzusetzen (vgl. Tab. 10, DLR 2004). Für die übrigen Bezugsräume (EU und Welt) sind uns keine tiefgehenden, belastbaren Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen, in denen die Nutzungskonkurrenz der Biomasse berücksichtigt wird, bekannt.

**Politische Rahmenbedingungen:** Neben der Verfügbarkeit neuer Technologien zur Produktion von Biokraftstoffen aus Lignocellulose und der Flächen- und Nutzungskonkurrenz ist das Potenzial von Biokraftstoffen in starkem Maße von den politischen Rahmenbedingungen abhängig. Dies zeigt sich beispielsweise an der Einführung der Flächenstilllegungsverpflichtung. Dieses Marktsteuerungsinstrumentes legt seit geraumer Zeit fest, dass bestimmte Mengen der Ackerfläche nicht für die Nahrungsmittelproduktion genutzt werden dürfen, durchaus aber für den Anbau bestimmter nachwachsender Rohstoffe wie Raps für Biodiesel.

In einigen Studien basieren die Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse genau auf diesen Stilllegungsflächen (vgl. CONCAWE 2002 und JRC 2002).

**Ergebnis 20: Quantifizierung der Potenziale unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten und Nutzungskonkurrenzen steht insbesondere für den Bezug „weltweit“ noch aus**

Dies ergibt sich aus der vorstehenden Diskussion zu Ergebnis 19.

## **4.5 Zukünftige Entwicklung von Biokraftstoffen**

In diesem Kapitel erfolgt die Analyse der zukünftigen Entwicklung von derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen hinsichtlich ihrer Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie der weiteren Umweltwirkungen. Für heute noch nicht großtechnisch hergestellte Biokraftstoffe stellen die Bandbreiten der Energie- und Treibhausgasbilanzen in Kapitel 4.1 bereits die zukünftige Entwicklung dar. Auf die Analyse der zukünftigen Entwicklung der Kosten wurde bereits in Kapitel 4.3, Ergebnis 18 ff. eingegangen, während zukünftige Potenziale in Kapitel 4.4 beschrieben sind.

Bei der Analyse der zukünftigen Entwicklung von Biokraftstoffen werden die in Tabelle 11 aufgelisteten Publikationen analysiert. Hierbei werden keine neuen Bandbreiten der Energie- und Treibhausgasbilanzen abgeleitet, sondern verbal argumentiert, wie sich die Energie- und Treibhausgasbilanzen in Zukunft ändern können. Dies erfolgt anhand einer Analyse der ergebnisbestimmenden Teilbereiche (Landwirtschaft und Konversion) und den diese Teilbereiche bestimmenden Basisdaten.

**Ergebnis 21: Zukünftige Entwicklung der Energie- und Treibhausgasbilanzen kann lediglich bis 2010 aufgezeigt werden**

Ziel dieser Arbeit war es, die zukünftige Entwicklung der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen bis 2025 aufzuzeigen. Dies sollte auf der Grundlage bereits vorhandener Publikationen erfolgen. Es zeigte sich jedoch, dass in den vorhandenen Publikationen lediglich Aussagen bis 2010 enthalten sind, so dass in dieser Studie ebenfalls keine Aussagen über das Jahr 2010 erfolgen können.

Die zukünftige Entwicklung von Energie- und Treibhausgasbilanzen kann über einen Zeitraum von mehr als 10/15 Jahren nicht belastbar abgeschätzt werden. Allerdings könnten für die nächsten 50 Jahre durchaus unterschiedliche Szenarien aufgezeigt werden, ähnlich denen in Kapitel 4.4 über die Potenziale von Biokraftstoffen.

Tabelle 11: Publikationen, die hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Biokraftstoffen analysiert werden

Bezugsjahr	Autor	Jahr	Bezugs- raum	Energie bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.
					CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
<b>Bioethanol aus Mais</b>								
2012	Graboski	2002	USA	x				
2010	Levelton	2000	Kanada	x	x	x	x	(5)
2010	Wang	1999	USA	x	(x)	(x)	(x)	
<b>Bioethanol aus Weizen</b>								
2009	Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x	
2010	IEA *	2003	N-Am./EU	(x)	(x)	(x)	(x)	
<b>Bioethanol aus Zuckerrüben</b>								
2009	Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x	
2010	IEA *	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)	
2028	CEC *	2001	USA	(x)				
<b>Bioethanol aus Lignocellulose</b>								
2010	Levelton	1999	Kanada	x	x	x	x	(5)
<b>Bioethanol aus Siedlungsabfällen</b>								
2028	CEC *	2001	USA	(x)				
<b>Biodiesel aus Raps</b>								
2009	Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x	
<b>Biodiesel aus Sonnenblumen</b>								
2009	Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x	
<b>Biodiesel aus Sojabohnen</b>								
2010	Levelton *	2002	Kanada	(x)	(x)	(x)	(x)	(5)
<b>Biodiesel aus Canola</b>								
2010	Levelton *	2002	Kanada	(x)	(x)	(x)	(x)	(5)
<b>Biodiesel aus Tierfett</b>								
2010	Levelton *	2002	Kanada	(x)	(x)	(x)	(x)	(5)

\* lediglich partielle Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Biokraftstoffen

## **Ergebnis 22: In Zukunft geringerer Primärenergieaufwand und geringere Treibhausgasemissionen für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen**

Sowohl die Entwicklungen im Bereich der Landwirtschaft (Anstieg der Biomasserträge und geringerer Primärenergieaufwand für landwirtschaftliche Betriebsmittel) als auch die Entwicklungen im Bereich der Konversion (höhere Biokraftstoffträge und geringerer Energieverbrauch für die Konversion) bewirken, dass die Vorteile von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse in Bezug auf den Primärenergieaufwand und die Treibhausgasemissionen gegenüber den konventionellen Kraftstoffen in Zukunft ansteigen. Die höheren Biokraftstoffträge führen jedoch auch dazu, dass die Gutschriften durch Nebenprodukte in Zukunft nicht mehr so hoch ausfallen, wodurch die zuvor genannten Vorteile für die Biokraftstoffe reduziert werden (vgl. Levelton 1999).

Auf die Entwicklungen des Primärenergieaufwandes und der Treibhausgasemissionen im Bereich der Landwirtschaft und der Konversion wird im folgenden detailliert eingegangen:

### **Entwicklungen im Bereich der Landwirtschaft**

Im Bereich der Landwirtschaft bewirkt der zukünftige Anstieg der Biomasserträge, von dem alle Autoren ausgehen (Tab. 12), Vorteile für die Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen.

Insgesamt kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass der Primärenergieaufwand und damit auch die Treibhausgasemissionen im Bereich landwirtschaftlicher Betriebsmittel in Zukunft geringer werden, wodurch die Vorteile für die Biokraftstoffe gegenüber den konventionellen Kraftstoffen ansteigen. Der Primärenergieaufwand wird einerseits durch die eingesetzte Menge an Betriebsmitteln und andererseits durch den Primärenergieaufwand für die Bereitstellung der Betriebsmittel bestimmt.

Von den in der Landwirtschaft eingesetzten Betriebsmitteln wirkt sich der Stickstoffeinsatz am stärksten auf die Energie- und Treibhausgasbilanzen aus. In den letzten Jahren konnte der Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von mineralischen Stickstoffdüngern kontinuierlich gesenkt werden. Dagegen divergieren die Aussagen zu dem zukünftigen Stickstoffdüngereinsatz. Während einige Autoren von einem Anstieg des Stickstoffdüngeraufwandes ausgehen (Graboski 2002), rechnen andere Autoren mit einem rückläufigem Stickstoffdüngeraufwand (Levelton 2000) (Tab. 12).

Sowohl Graboski (2002) wie auch Levelton (2000) gehen von einem rückläufigem Phosphordüngeraufwand aus.

Der Deseleinsatz wird nach Graboski (2002) bis 2012 ebenfalls zurückgehen, was er mit dem Anstieg an Flächen, auf denen keine Bodenbearbeitung stattfindet, begründet.

Die bedeutendste Reduktion des Betriebsmitteleinsatzes sieht Graboski (2002) bei den Pflanzenschutzmitteln, deren Aufwandmenge sich von 2000 bis 2012 nahezu halbieren wird. Als Gründe nennt er ein besseres Management im Umgang mit Pflanzenschutzmitteln, die Entwicklung wirkungsvollerer Pflanzenschutzmittel, die eine geringere Dosis erforderlich machen, sowie den Einsatz von genetisch verändertem Saatgut, durch dessen Anwendung Insektizide eingespart werden können. Die Auswirkungen des Pflanzenschutzmitteleinsatzes auf die Energie- und Treibhausgasbilanzen sind jedoch gering.

Tabelle 12: Zukünftige Entwicklung von Basisdaten zu Energie- und Treibhausgasbilanzen

Autor	Biokraftstoff	Biomasse	Bezugsraum	Bezugsjahr	Biomassertrag in t/ha	N-Dünger aufwand in kg/ha	Biokraftstofftertrag in l/t
Graboski 2002	Ethanol	Mais	USA	2000	8,7	150	399
Graboski 2002	Ethanol	Mais	USA	2012	9,5	153	422
Levelton 2000	Ethanol	Mais	Kanada	2000	7,2	140	k.A.
Levelton 2000	Ethanol	Mais	Kanada	2010	8,3	133	k.A.
Wang 1999	Ethanol	Mais	USA	2000	7,8	151	384
Wang 1999	Ethanol	Mais	USA	2005	8,2	145	399
Wang 1999	Ethanol	Mais	USA	2010	n.b. *	n.b. *	n.b. *
Wang 1999	Ethanol	Holz	USA	2005	k.A.	k.A.	288
Wang 1999	Ethanol	Holz	USA	2010	k.A.	k.A.	371
Wang 1999	Ethanol	Gräser	USA	2005	k.A.	k.A.	303
Wang 1999	Ethanol	Gräser	USA	2010	k.A.	k.A.	390
Levelton 1999	Ethanol	Mais	Kanada	2000	k.A.	k.A.	470
Levelton 1999	Ethanol	Mais	Kanada	2010	k.A.	k.A.	475
Levelton 1999	Ethanol	Maisstroh	Kanada	2000	k.A.	k.A.	345
Levelton 1999	Ethanol	Maisstroh	Kanada	2010	k.A.	k.A.	420
Levelton 1999	Ethanol	Weizenstr.	Kanada	2000	k.A.	k.A.	330
Levelton 1999	Ethanol	Weizenstr.	Kanada	2010	k.A.	k.A.	400
Levelton 1999	Ethanol	Heu	Kanada	2000	k.A.	k.A.	305
Levelton 1999	Ethanol	Heu	Kanada	2010	k.A.	k.A.	370
Levelton 1999	Ethanol	Gras	Kanada	2000	k.A.	k.A.	310
Levelton 1999	Ethanol	Gras	Kanada	2010	k.A.	k.A.	375
Öko-Institut 2004 **	Biodiesel	Raps	Deutschl.	2000	3,4	165	437
Öko-Institut 2004 **	Biodiesel	Raps	Deutschl.	2010	5,1	247	437
Öko-Institut 2004 **	Biodiesel	Raps	Deutschl.	2020	6,1	296	437
Öko-Institut 2004 **	Biodiesel	Raps	Deutschl.	2030	7,2	348	437
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Weizen	Deutschl.	2000	7,44	165	370
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Weizen	Deutschl.	2010	9,30	206	370
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Weizen	Deutschl.	2020	11,16	247	370
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Weizen	Deutschl.	2030	13,02	288	370
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Kartoffel	Deutschl.	2000	39,3	k.A.	k.A.
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Kartoffel	Deutschl.	2010	45,2	k.A.	k.A.
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Kartoffel	Deutschl.	2020	51,1	k.A.	k.A.
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Kartoffel	Deutschl.	2030	56,9	k.A.	k.A.
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Zuckerrübe	Deutschl.	2000	55,5	145	98
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Zuckerrübe	Deutschl.	2010	61,0	160	98
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Zuckerrübe	Deutschl.	2020	66,6	174	98
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Zuckerrübe	Deutschl.	2030	72,1	189	98
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Heu	Deutschl.	2000	8,30	k.A.	k.A.
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Heu	Deutschl.	2010	8,80	k.A.	k.A.
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Heu	Deutschl.	2020	9,40	k.A.	k.A.
Öko-Institut 2004 **	Ethanol	Heu	Deutschl.	2030	9,90	k.A.	k.A.

\* dieser Fall wurde nicht betrachtet, da Wang (1999) davon ausgeht, dass Ethanol im Jahr 2010 aus Lignocellulose bzw. Cellulose hergestellt wird (s.u.)

\*\* Datengrundlage zur Berechnung der Biokraftstoffpotenziale

### **Entwicklungen im Bereich der Konversion**

Im Bereich der Konversion gehen alle Autoren davon aus, dass die Biokraftstofferträge aufgrund des technischen Fortschritts ansteigen werden (Tab. 12), wodurch sich Vorteile für die Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen ergeben.

Der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen infolge der Konversion von Biokraftstoffen werden nach Aussagen der einzelnen Autoren zurückgehen, wodurch sich ebenfalls Vorteile für die Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen ergeben.

- Graboski (2002) geht davon aus, dass Ethanol aus Mais im Jahr 2012 zu ca. 81 % mit dem Trockenmahlverfahren gewonnen wird. Im Vergleich zu dem Nassmahlverfahren, das heute überwiegend angewendet wird, ist der Energiebedarf beim Trockenmahlverfahren geringer, so dass der Energiebedarf zur Produktion von Ethanol aus Mais im Jahr 2012 im Mittel geringer ist. Graboski (2002) sieht in den heute schon bestehenden Anlagen, die nach dem Trockenmahlverfahren arbeiten, jedoch kein Potenzial, dass diese ihren Energiebedarf in naher Zukunft senken können.
- Nach Wang (1999) wird sich der Energiebedarf sowohl beim Trocken- wie auch beim Nassmahlverfahren in Zukunft verringern.

### **Ergebnis 23: Zukünftige Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen aus Reststoffen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen nicht vorhersehbar**

Bei Biokraftstoffen aus organischen Reststoffen können sich in Zukunft andere Alternativverwendungen der organischen Reststoffen ergeben, so dass die zukünftigen Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen aus Reststoffen im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen nicht vorhersehbar sind.

## 5 Forschungsbedarf

Es wurde aufgezeigt, dass die vorhandenen Studien noch nicht oder noch nicht ausreichend alle Biokraftstoffe abdecken. Im Einzelnen liegt – allerdings durchaus je nach Fragestellung – noch folgender Forschungsbedarf vor:

### zu Energie- und Treibhausgasbilanzen:

- Zu den Energie- und Treibhausgasbilanzen von den derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen liegt keine Studie zu Biodiesel aus Palmöl vor.
- Von den heute noch nicht großtechnisch hergestellten Biokraftstoffen liegen keine Studien vor zu: Biodiesel aus Jatropha, Pyrolyseöl und HTU-Diesel.
- Jeweils nur zu einem Konversionspfad existieren Studien für DME, Methanol und BTL (Bereitstellung aus Lignocellulose). Für alle anderen Möglichkeiten von Anbaubiomasse bis zum Einsatz von organischen Reststoffen gibt es bisher noch keine Untersuchungen.
- Für einige Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse müssten zur besseren Absicherung der Bandbreite noch ergänzende Analysen durchgeführt werden. Dazu gehören Biodiesel aus Kokosnussöl sowie Bioethanol bzw. ETBE aus Zuckerrohr und aus Kartoffeln.
- Bei einigen Biokraftstoffen, die potenziell aus organischen Reststoffen gewonnen werden können, liegen nur sehr wenige Untersuchungen vor. Hinzu kommt, dass aus Ökobilanzsicht bei Biokraftstoffen aus organischen „Abfallbiomassen“ wie Altspisefetten oder Abfallholz grundsätzlich deren reale oder potenzielle Alternativverwendungen mit berücksichtigt werden müssen. In den analysierten Studien, wurde der Alternativnutzen außer Acht gelassen, indem er zu Null gesetzt wurde. Hierzu sollten zwingend entsprechende Bilanzen angefertigt werden, da erst dann eine belastbare Bandbreite angegeben werden kann, die im Extremfall Nachteile für den Biokraftstoff anzeigt – im Vergleich zum fossilen Kraftstoff (s. Kap. 4.1).

### zu den weiteren ökologischen Umweltwirkungen:

- Da richtungssichere Ergebnisse lediglich für Biodiesel aus Raps und Sonnenblume, diverse Ethanole und ETBE vorliegen, sind für alle anderen Biokraftstoffe noch entsprechende Analysen notwendig. Dabei liegt zum Teil unterschiedliches Erkenntnisinteresse vor:
  - **Kraftstoffe aus Anbaubiomasse:** Bei den Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse fallen in der Regel die Ergebnisse zur Versauerung, der Eutrophierung und zu Lachgas zu Ungunsten der Biokraftstoffe im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten aus. Die Ergebnisse können hierbei beträchtlich variieren. Eine relativ genaue Bilanzierung der quantitativen Effekte lässt sich im Einzelfall durchführen, wobei hierfür jeweils die genaue Fragestellung zu präzisieren ist und der Stand der Technik der Ökobilanzierung zu berücksichtigen ist. Die Ergebnisse sind insbesondere dann hilfreich, wenn sie zur Schwachstellenanalyse verwendet werden, d. h., um Möglichkeiten herauszufinden, wie die negativen Auswirkungen der Biokraftstoffe beispielsweise durch Verfahrensoptimierungen oder Änderungen im landwirtschaftlichen Anbauregime minimiert werden können.
  - **Kraftstoffe aus Reststoffen:** Die Bilanzen der sonstigen Umweltwirkungen der Biokraftstoffe aus Reststoffen können gegenüber ihren fossilen Pendanten vorteilig oder nachteilig ausfallen. Analysen zur Bestimmung der grundsätzlichen Zusammenhänge,

d. h., für welche Rohstoffe, unter welchen Konversionsrouten, unter welchen Randbedingungen und bei welchen Alternativverwendungen die Bilanzen überhaupt tendenziell vorteilig (oder nachteilig) ausfallen, sind unverzichtbar. Diese könnten dann bei Bedarf durch Optimierungsanalysen im obigen Sinn ergänzt werden. Dies gilt ausnahmslos für alle Biokraftstoffe aus Reststoffen von Bioethanol aus Lignozellulose über Biodiesel aus Altfetten bis hin zu BTL aus diversen organischen Reststoffen.

- Von solchen Bilanzen unberührt bleibt die Tatsache, dass die „sonstigen Umweltwirkungen“ – anders als die Energie- und Treibhausgasbilanzen – in besonderem Maß von den realen Verhältnissen und Randbedingungen wie Energieversorgungsstruktur, Konversionstechnologien, landwirtschaftlichen Verhältnissen etc. abhängen, so dass für die speziell vorliegenden jeweils Einzelanalysen notwendig sind.
- Neben den weiteren Umweltwirkungen wie Versauerung, Eutrophierung, Ozonabbau usw. sollten die Biokraftstoffe auch aus naturschutzfachlicher Sicht bewertet werden.
- Zur Unterstützung der Ökobilanz, aber auch zur besseren Einschätzung der Auswirkungen der Biokraftstoffe auf die Lufthygiene sind repräsentative Abgasmessungen der Biokraftstoffe (in allen angedachten Beimengungen) in den neuesten Motorenkonzepten notwendig. Hierbei sollten neben den limitierten auch nicht limitierte Komponenten, wie z.B. Aromate, PAK und Aldehyde, sowie die Partikelanzahl, die Partikelgrößenverteilung und die mutagenen und zytotoxischen Wirkungen von Biokraftstoffen relativ zu konventionellen Kraftstoffen untersucht werden. Darüber hinaus sollten die physikalischen Eigenschaften der Biokraftstoffe näher untersucht werden.

#### **zu Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen:**

- Zu ETBE liegen keine Kostenabschätzungen vor.
- Bei einigen Biokraftstoffen (Bioethanol aus Zuckerrohr, Biodiesel aus Sojabohnen) sind keine detaillierten Kostenabschätzungen vorhanden, bei denen die gesamten Bereitstellungskosten auf die Einzelbereiche (Rohstoffkosten, Konversionskosten, Einnahmen durch Nebenprodukte und Verteilung) aufgeteilt wurden. Diese Kostenabschätzungen sind nicht nachvollziehbar und eine Interpretation ist in diesen Fällen nicht möglich.
- Es empfiehlt sich eine Studie anzufertigen, die die Subventionspraktiken in der Landwirtschaft und die Personalkosten in unterschiedlichen Bezugsräumen so analysiert und aufbereitet, dass die Kosten zielgerichtet miteinander verglichen werden können.
- Analog zu den Energie- und Treibhausgasbilanzen müssten auch hinsichtlich der Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen aus organischen Reststoffen deren reale oder potenzielle Alternativverwendungen mit berücksichtigt werden.

#### **zu Potenzialen von Biokraftstoffen:**

- In den verfügbaren Studien zu Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen wurde die Flächenkonkurrenz in Hinblick auf Naturschutzaspekte und die Nutzungskonkurrenz des Biomassepotenzials (Erzeugung von Strom und Wärme bzw. von Kraftstoffen) nur in jeweils einer Studie und hier nur für den Bezugsraum Deutschland betrachtet. Für weitere Bezugsräume (EU, Welt) fehlen solche Betrachtungen.

#### **zur zukünftigen Entwicklung von Biokraftstoffen:**

- Die zukünftige Entwicklung der Energie- und Treibhausgasbilanzen von derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen wird in den verfügbaren Publikationen nur bis 2010 be-



schrieben. Über diesen Zeitpunkt hinaus ist es zwar nicht möglich, die Realität zielsicher einzuschätzen, jedoch könnten unterschiedliche Szenarien aufgezeigt werden.

- Die zukünftige Entwicklung bis 2010 wurde bisher nur für einen Teil der derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffe analysiert.
  - Für ETBE, Pflanzenöle, Bioethanol aus Zuckerrohr und aus Kartoffeln sind keine Analysen vorhanden
  - Bezüglich Biodiesel existieren lediglich Analysen für Biodiesel aus Raps und Sonnenblumen.
- Die zukünftige Entwicklung der weiteren Umweltwirkungen wurde bisher in keiner Studie analysiert.

## 6 Zusammenfassung

Die Analyse der weltweit vorliegenden Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen, weiteren Umweltwirkungen sowie Kosten- und Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen zeigt, dass die Ergebnisse stark variieren, häufig nur bedingt miteinander vergleichbar sind und dass z.T. noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Dennoch konnten zu jedem der genannten Bereiche Einzelergebnisse abgeleitet werden. Nachfolgend werden diese Einzelergebnisse aufgeführt und es wird beschrieben, in welchen Bereichen und warum manche Ergebnisse nur bedingt miteinander vergleichbar sind und wo noch Forschungsbedarf besteht.

### Energie- und Treibhausgasbilanzen

- **Vorteile für Biokraftstoffe:** Die Energie- und Treibhausgasbilanzen der betrachteten Biokraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants fallen alle zugunsten der Biokraftstoffe aus – von Extremen abgesehen.
- **Hohe Variabilität der Ergebnisse:** Bei Betrachtung der unterschiedlichen Studien zu Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen ergeben sich hohe Schwankungsbreiten in den Ergebnissen, die einen direkten Vergleich zwischen den unterschiedlichen Biokraftstoffoptionen nicht immer zulassen. Die hohen Schwankungsbreiten ergeben sich durch die Annahme günstiger bzw. weniger günstiger Randbedingungen, sei es in Bezug auf den Anbau, die Konversion oder die Bewertung der Kuppelprodukte. Für einen direkten Vergleich zwischen unterschiedlichen Biokraftstoffoptionen müssen die Systemgrenzen genau festgelegt werden.
- **Ranking der Biokraftstoffe:**
  - Bei der flächenbezogenen Betrachtung weist ETBE Vorteile gegenüber allen anderen Biokraftstoffen auf.
  - Bioethanol schneidet in Abhängigkeit der Rohstoffbasis besser oder schlechter ab als Biodiesel bzw. Pflanzenöl.
  - Bei Annahme gleicher Systemgrenzen weist Biodiesel Vorteile gegenüber Pflanzenöl auf.
  - Um Biokraftstoffe aus Reststoffen – wie beispielsweise BTL – umfassend bewerten zu können, muss der Alternativnutzen berücksichtigt werden. In den analysierten Studien blieb dieser jedoch außer acht.
- **Vorteile von der geographischen Lage abhängig:** Die Vorteile einiger Biokraftstoffe sind nicht in allen geographischen Räumen gegeben. So ist die Bioethanolproduktion aus Zuckerrohr auf tropische Klimabedingungen beschränkt und der Zuckerrübenanbau an Regionen der mittleren Breiten mit besonders guten Böden gebunden.
- **Zukünftige Entwicklung:** In Zukunft werden die Vorteile der derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse gegenüber den konventionellen Kraftstoffen ansteigen. Dies beruht auf einem Anstieg der Biomasseerträge, einem geringeren Primärenergieaufwand für landwirtschaftliche Betriebsmittel, höheren Biokraftstoffträgen sowie des geringeren Energieverbrauchs infolge der Konversion (vgl. Kapitel 4.5).
- **Forschungsbedarf:** Die vorhandenen Ökobilanzstudien decken noch nicht alle Biokraftstoffe ab.

## Weitere Umweltwirkungen

Neben der Inanspruchnahme fossiler Ressourcen und der Verstärkung des Treibhauseffektes werden durch die Produktion und Nutzung von Kraftstoffen weitere Umweltwirkungen wie Eutrophierung, Versauerung und Ozonabbau mitverursacht.

- **Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse:** Bei der Produktion von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse führen die im Zuge der landwirtschaftlichen Produktion entstehenden Stickstoffemissionen dazu, dass Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse gegenüber fossilen Kraftstoffen Nachteile hinsichtlich Versauerung, Eutrophierung und Ozonabbau aufweisen.
- **Biokraftstoffe aus Reststoffen:** Für Biokraftstoffe aus Reststoffen können für diese Umweltwirkungen keine richtungssicheren Aussagen getroffen werden. Für die qualitative Bestimmung der Vor- bzw. Nachteile bei Versauerung und Eutrophierung muss jeder Einzelfall einer eigenen Analyse unterzogen werden. N<sub>2</sub>O als Parameter für die Umweltwirkung Ozonabbau spielt bei Biokraftstoffen aus Reststoffen in der Regel keine signifikante Rolle.
- **Ergebnisse in Abhängigkeit der Fragestellung:** Die Ergebnisse hängen in stärkerem Maße von der Fragestellung und Bilanzierungsweisen ab als bei den Energie- und Treibhausgasbilanzen. Beispielsweise spielt bei den luftgetragenen Emissionen der Emissionsort eine besonders große Rolle. So sind auf hoher See durch Ozeandampfer freigesetzte Dieselpartikelemissionen (Verbrennung von Schweröl etc.) toxikologisch völlig anders zu bewerten als Dieselpartikelemissionen durch Fahrzeuge in Innenstädten (weitere Beispiele finden sich in Kap. 4.3, Ergebnis 9).
- **Forschungsbedarf:** Für einige Kraftstoffe fehlen eingehende Untersuchungen der weiteren Umweltwirkungen und in den vorhandenen Studien werden häufig nur einzelne Parameter bilanziert (beispielsweise SO<sub>2</sub>), was eine Interpretation auf der Basis von Umweltwirkungen nicht zulässt.

## Zusammenfassung Ökologische Sicht

**Vor- und Nachteile:** Die aufgeführten Einzelergebnisse zeigen, dass sowohl Biokraftstoffe, wie auch fossile Kraftstoffe jeweils Vor- und Nachteile aufweisen. Dabei liegen die ökologischen Vorteile von Biokraftstoffen in der Schonung fossiler Ressourcen und der Verminderung des Treibhauseffektes. Dagegen weisen Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse Nachteile hinsichtlich Eutrophierung, Versauerung und Ozonabbau auf. Eine wissenschaftlich objektive Entscheidung für oder gegen Bio- oder fossile Kraftstoffe kann daher aus ökologischer Sicht nicht getroffen werden. Die Gesamteinschätzung muss deshalb auf ein subjektives Wertesystem zurückgreifen. Sollte beispielsweise der Schonung fossiler Ressourcen und der Verminderung des Treibhauseffektes die höchste Priorität eingeräumt werden, wäre eine Einschätzung zugunsten der Biokraftstoffe aus ökologischer Sicht gerechtfertigt.

## Bereitstellungskosten

**Geringere Bereitstellungskosten bei fossilen Kraftstoffen:** Der Vergleich der Bereitstellungskosten zeigt, dass fossile Kraftstoffe meist kostengünstiger produziert werden können als Biokraftstoffe. Unter günstigen Bedingungen lassen sich jedoch auch Biodiesel aus Altspesiefetten, Pflanzenöl aus Raps und Pflanzenöl aus Sonnenblumen zu den Kosten von

fossilen Kraftstoffen produzieren. Diese Ergebnisse müssen jedoch in Zukunft nicht durchgängig Bestand haben, so dass sich aus diesen Zahlen keine Prognosen ableiten lassen.

- **Hohe Variabilität der Ergebnisse:** Auch bezüglich der Bereitstellungskosten ergeben sich durch die Annahme günstiger bzw. weniger günstiger Randbedingungen in Bezug auf den Anbau, die Konversion oder die Bewertung von Kuppelprodukten hohe Schwankungsbreiten in den Ergebnissen, die einen direkten Vergleich zwischen den unterschiedlichen Biokraftstoffoptionen nicht immer zulassen. Bei Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse können die Produktionskosten durch Subventionen in der Landwirtschaft verzerrt werden. Bei den Biokraftstoffen aus Rest- bzw. Abfallstoffen können entgangene Alternativverwendungserlöse genauso eine Rolle spielen wie vermiedene Entsorgungskosten.
- **Vergleichbarkeit der Bezugsräume:** Die natürlichen und wirtschaftlichen Voraussetzungen der unterschiedlichen Bezugsräume sind nicht direkt miteinander vergleichbar, wie z. B. bei Bioethanol aus Zuckerrohr in Brasilien, Biodiesel aus Soja in den USA und Bioethanol aus Zuckerrübe in Europa.
- **Beurteilung zukünftiger Kraftstoffe:** Einerseits werden die Bereitstellungskosten von derzeit auf dem Markt befindlichen Kraftstoffen angegeben, die auf real vorkommenden Kosten basieren. Andererseits werden jedoch auch zukünftige, heute noch nicht großtechnisch hergestellte Kraftstoffe betrachtet. Deren Bereitstellungskosten konnten in den betrachteten Studien nur mehr oder weniger plausibel abgeschätzt werden.
- **Forschungsbedarf:** Kostenabschätzungen liegen noch nicht zu allen Biokraftstoffen vor und häufig sind die gesamten Bereitstellungskosten nicht auf die Einzelbereiche aufgeteilt, so dass sie nicht nachvollziehbar sind.

## Potenziale

Das technische Potenzial von Biokraftstoffen ist generell sehr hoch, wenn alle Möglichkeiten der Biokraftstoffproduktion und derzeit noch nicht verfügbare Technologien zur Produktion von Biokraftstoffen berücksichtigt werden. Ob und wann diese Technologien zur Verfügung stehen, kann jedoch nach dem derzeitigen Wissensstand nicht abgeschätzt werden. Nach den Vorstellungen von führenden Automobilherstellern wird die Technologie zur Produktion von BTL mittelfristig und die zur Produktion von Wasserstoff langfristig verfügbar sein.

Im Gegensatz zu den hohen Biokraftstoffpotenzialen liegt der Einsatz an Biokraftstoffen derzeit in Deutschland bei ca. 0,8 % und in der EU bei ca. 0,3 % (JRC 2004). Bis die Technologien zur Produktion von neuen Biokraftstoffen verfügbar sind, ist das Potenzial von Biokraftstoffen vor allem von den politischen Rahmenbedingungen, der Flächenkonkurrenz und der Nutzungskonkurrenz abhängig, wobei diese Faktoren ebenfalls für die Zukunft nicht vorhersehbar sind.

- **Flächenkonkurrenz:** Das Potenzial von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse hängt in erster Linie von der zur Verfügung stehenden Fläche ab, während das Potenzial von Reststoffen flächenunabhängig ist. Die Fläche zur Produktion von Biokraftstoffen steht in Konkurrenz mit den Flächen zur Nahrungsmittelproduktion und den Flächen die dem Naturschutz vorbehalten sein sollen. In der IFEU-Studie (2004) wurde für Deutschland gezeigt, dass sich das Technische Potenzial von Biokraftstoffen durch die Berücksichtigung von Naturschutzaspekten (einschließlich dem Gewässer- und Bodenschutz) erheblich reduziert. Für andere Bezugsräume stehen derartige Studien noch aus.

- **Nutzungskonkurrenz:** Dass die Nutzungskonkurrenz von Biomasse für das Potenzial von Biokraftstoffen eine große Rolle spielt, wurde in der DLR-Studie (2004) gezeigt. So reduziert sich das Potenzial von Biokraftstoffen in Deutschland für das Jahr 2050 auf etwa ein Viertel, wenn man davon ausgeht, dass das Biomassepotenzial bevorzugt im stationären Bereich eingesetzt wird, statt es bevorzugt im Verkehrssektor einzusetzen. Für die übrigen Bezugsräume (EU und Welt) existieren noch keine Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen, in denen die Nutzungskonkurrenz der Biomasse berücksichtigt wird. In den übrigen Studien wird davon ausgegangen, dass die gesamte verfügbare Biomasse in den Kraftstoffsektor fließt.
- **Forschungsbedarf:** Für die Bezüge EU und Welt liegen bisher keine Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen vor, in denen die Flächenkonkurrenz in Hinblick auf Naturschutzaspekte und die Nutzungskonkurrenz des Biomassepotenzials betrachtet wurde.

## 7 Literaturverzeichnis

- ADEME 2002/ Direction of Agriculture and Bioenergies of the French Environment and Energy Management Agency (ADEME) & French Direction of the Energy and Mineral Resources (DIREM) (2002): Bilans Énergétiques et gaz à effet de serre des filières de Production de Biocarburants en France.
- AFCG 2003/ Alternative Fuels Contact Group (2003): Market Development of Alternative Fuels.
- Atrax 2002/ Atrax Energi AB et al. (2002): The Bio-DME Project, Phase 1. Report to Swedish National Energy Administration (STEM).
- Börjesson 2004/ Börjesson, P. & Berglund, M. (2004): Environmental Analysis of Biogas Systems – Part I: Fuel Cycle Emissions; Part II: Environmental Impact when replacing various Reference Systems. Manuskripte zur 2<sup>nd</sup> World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection 10 – 14 May 2004 Rome, Italy.
- CONCAWE 2002/ Armstrong, A.P., Baro, J., Dartoy, J., Groves, A.P., Nikkonen, J. & Rickeard D.J. (2002): Energy and Greenhouse Gas Balance of Biofuels for Europe - An Update.
- CSIRO 2001/ Beer, T., Morgan, G., Lepszewicz, J., Anyon, P., Edwards, J., Nelson, P., Watson, H. & Williams, D. (2001): Comparison of Transport Fuels. Life-Cycle Emission Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles. Australia.
- DfT 2003/ DfT (2003): International Resource Costs of Biodiesel and Bioethanol.
- DLR 2003/ DLR, IfE & ISVS (2003): Renewable Fuels for Cross Border Transportation. Final Report to the European Commission.
- DLR 2004/ DLR, IFEU, & WI (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.
- Dreier 1999/ Dreier, T. (1999): Biogene Kraftstoffe – Energetische, ökologische und ökonomische Analyse. IfE Schriftenreihe Heft 38.
- Dreier 2000/ Dreier, T. (2000): Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe. IfE Schriftenreihe Heft 42.
- Duncan 2003/ Duncan, J. (2003): Costs of Biodiesel Production. Prepared for: Energy Efficiency and Conservation Authority.
- EEA 2003 / European Environmental Agency (2003): Greenhouse Gas Emission Trends and Projections in Europe 2003 – Tracking Progress by the EU and acceding and Candidate Countries towards achieving their Kyoto Protocol Targets. Final Draft Environmental Issue Report 36.

- EIA 2004 / EIA (2004): World Crude Oil Prices 02/20/2004 unter <http://www.eia.doe.gov/> (zuletzt geöffnet am 27.02.2004).
- Elsayed 2003/ Elsayed, M.A., Matthews, R. & Mortimer, N.D. (2003): Carbon and Energy Balances for a Range of Biofuels Options.
- Enerstrat 2003/ Enerstrat (2003): CSR Fuel Ethanol Lifecycle Analysis. Prepared for CSR Sugar in association with APACE Research.
- EST 2002/ Eyre, N. (EST), Fergusson, M. (IEEP), Mills, R. (NSCA) (2002): Fuelling Road Transport – Implications for Energy Policy.
- ETSU 1996/ Gover, M.P., Collings, S.A., Hitchcock, G.S., Moon, D.P. & Wilkins, G.T. (1996): Alternative Road Transport Fuels – A Preliminary Life-Cycle Study for the UK. Energy Technology Support Unit, Oxford.
- EU 2003/ Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor. Amtsblatt L-123/42 vom 17. Mai 2003.
- EUCAR 2003/ EUCAR, CONCAWE & JRC (2003): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context.
- Europäische Kommission (2001): Grünbuch – Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit. Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften
- FAT 2000/ Heinzer, L., Gaillard, G., Dux, D., Stettler, C. (2000): Ökologische und ökonomische Bewertung von Bioenergieträgern. Vergleichende Untersuchungen von Stückholzheizung, Rapsmethylester und Fernwärme aus Heu. FAT-Schriftenreihe 52.
- FfE 1999/ Dreier, T. (1999b): Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil V Biogene Kraftstoffe. Auftraggeber: Bayerische Forschungsförderung / Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Bearbeitet am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München.
- Fromentin 2000/ Fromentin A., Biollay F., Dauriat A., Lucas-Porta H., Marchand J. D., Sarlos G., (2000): Caractérisation de filières de Production de Bioéthanol dans le contexte Helvétique. Programme de recherche Biomasse, Annexes au Rapport, Office Fédéral de l'Énergie.
- GM 2001/ General Motors Corporation (2001): Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – North American Analysis.
- GM 2002/ General Motors Corporation (2002): Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European study. Annex "Full Background Report" – Methodology, Assumptions, Descriptions, Calculations, Results- to the Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study.

- Graboski 2002/ Graboski M.S. (2002). Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Ethanol. Prepared for the National Corn Growers Association.
- IEA 1999/ International Energy Agency (IEA) (1999): Automotive Fuels for the future: The search for Alternatives, Paris.
- IEA 2003/ International Energy Agency (IEA) (2003): Analysis of Biofuels.
- IFEU 2000/ IFEU (Hrsg.) (2000): Bioenergy for Europe: Which Ones Fit Best? A Comparative Analysis for the Community. Final Report. Under support of DG XII, in Collaboration with BLT, CLM, CRES, CTI, FAT, INRA, and TUD, Heidelberg 2000.
- IFEU 2001/ Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. (2001): Ökologischer Vergleich von RME und Rapsöl. Projekt im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, finanziert durch das Ministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft.
- IFEU 2002a/ Patyk, A. & Reinhardt, G.A. (2002a): Ökobilanz von Bioethanol und Bio-Ethyl-Tertiär-Butylether (ETBE). Interner Bericht des IFEU. Auszugsweise veröffentlicht in: Reinhardt, G. A. & Uihlein, A. (2002): Bioethanol and ETBE versus other Biofuels for Transportation. An Ecological Comparison. In International Organizing Committee of ISAF (ed.): Proceedings of the 14th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XIV), 12 - 15 November 2002, Phuket (Thailand) 2002.
- IFEU 2002b/ Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. (2002b): Ökobilanz von Sonnenblumenöl-methylester (SME). Interner Bericht des IFEU. Auszugsweise veröffentlicht in: Reinhardt, G. A. & Uihlein, A. (2002): Bioethanol and ETBE versus other Biofuels for Transportation. An Ecological Comparison. In International Organizing Committee of ISAF (ed.): Proceedings of the 14th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XIV), 12 - 15 November 2002, Phuket (Thailand) 2002.
- IFEU 2002c/ Patyk, A. & Reinhardt, G.A. (2002c): Ökobilanz von Bio-MeOH und Bio-DME. Interner Bericht des IFEU. Auszugsweise veröffentlicht in: Reinhardt, G. A.: Ökologische Bewertung erneuerbarer Kraftstoffe. Proceedings of the Symposium "Zukünftige Kraftstoffe für moderne Antriebe", Köln, 24 - 25 Juni 2003.
- IFEU 2003/ Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. (2003): Erweiterung der Ökobilanz von RME. Projekt im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V..
- IFEU 2004/ Reinhardt, G.A., Gärtner, S.O. (IFEU) & Scheurlen (IUS) (2004): Teilbericht „Energie aus Biomasse und Naturschutz“. In: DLR, IFEU, & WI (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.
- IFO 2002/ Schöpe, M. & Brischkat, G. (2002): Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Rapsanbaus zur Biodieselproduktion in Deutschland. ifo Schnelldienst 6/2002, S. 3-10.
- IPCC 2000 / IPCC (2000): Summary for Policymakers – Land use, Land-use change, and Forestry. A Special report of the IPCC.
- IPCC 2001/ IPCC (2001): Climate Change 2001 – Third Assessment Report. Cambridge UK.



- JRC 2002a/ Enguádanos, M., Soria, A., Kavalov, B., Jensen, P. (2002): Techno-economic Analysis of Bio-diesel Production in the EU: A short summary for Decision-Makers. Report EUR 20279 EN.
- JRC 2002b/ Enguádanos, M., Soria, A., Kavalov, B., Jensen, P. (2002): Techno-economic Analysis of Bio-alcohol Production in the EU: A short Summary for Decision-Makers. Report EUR 20280 EN.
- JRC 2003/ Kavalov, B., Jensen, P., Papageorgiou, D., Schwensen, C., Olsson, J.-P. (2003): Biofuel Production Potential of EU-Candidate Countries. Final Report EUR 20835 EN Addendum to the Final Report EUR 20836 EN.
- JRC 2004/ Kavalov, B. (2004): Biofuel Potentials in the EU. Report EUR 21012 EN.
- Jungmeier 2003/ Jungmeier, G., Hausberger, S. & Canella L. (2003): Treibhausgas-Emissionen und Kosten von Transportsystemen – Vergleich von biogenen mit fossilen Treibstoffen. Projekt Nr.: IEF.2000.GF.013, Projektkoordination: Joanneum Research, Institut für Energieforschung.
- Kohlmaier & Rohner 1998/ Kohlmaier, G. & Rohner, M. (1998): CO<sub>2</sub>-Senke der Wälder und Klimaschutz. Studie im Rahmen des Forschungsprojektes „Biosphäre, Klima und Ökonomie im globalen Kohlenstoffkreislauf“.
- Larson 1999/ Larson, E.D. & Haiming, J. (1999): Biomass Conversion to Fischer-Tropsch Liquids: Preliminary Energy Balances. Proceeding of the 4<sup>th</sup> Biomass Conference of the Americas, Oakland, California, 29 Aug. – 2 Sept. 1999.
- LBST 2002/ Altmann, M., Blandow, V., Niebauer, P., Schindler, J., Schurig, V., Weindorf, W. Wurster, R. & Zittel, W. (2002): Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung. Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- LBST 2003/ Schindler, J. & Weindorf, W. (2003): “Well-to-Wheel” – Ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkraftstoffen und -antrieben. Präsentation vom 12. April 2003 in Nürnberg.
- Levelton 1999/ Levelton Engineering Ltd. (1999): Assessment of Net Emissions of Greenhouse Gases from Ethanol-Blended Gasolines in Canada: Lignocellulosic Feedstocks.
- Levelton 2000/ Levelton Engineering Ltd. & (S&T)<sup>2</sup> Consulting Inc. (2000): Assessment of Net Emissions of Greenhouse Gases from Ethanol-Gasoline Blends in Southern Ontario.
- Levelton 2002/ Levelton Engineering Ltd. & (S&T)<sup>2</sup> Consulting Inc. (2002): Assessment of Biodiesel and Ethanol Diesel Blends, Greenhouse Gas Emissions, Exhaust Emissions, and Policy Issues.

- Levington 2000/ Richards, I.R. (2000): Energy Balances in the growth of Oilseed Rape for Biodiesel and of Wheat for Bioethanol. Report for the British Association of Bio Fuels and Oils (BABFO).
- Macedo 1997/ Macedo, I.C., (1997): Greenhouse Gas Emissions and Bio-Ethanol Production/Utilization in Brazil. Centro de Tecnologia Copersucar, Internal Report CTC-05/97.
- Marano, J.J. & Ciferno, J.P. (2001): Life-Cycle Greenhouse-Gas Emissions Inventory for Fischer-Tropsch Fuels. Prepared for U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory.
- Moreira 2002/ Moreira, J.R. (2002). The Brazilian Energy Initiative - Biomass Contribute. Prepared for the Biotrade Workshop, Amsterdam, The Netherlands, September 9-10, 2002.
- Nieder et al. 1993/ Nieder, R., Kersebaum, K.C., Widmer, P. & Richter, J. (1993): Untersuchungen zur Stickstoff-Immobilisation in mineralisch gedüngten Ackerböden aus Löß während der Vegetationszeit von Winter-Weizen. In: Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 156, S. 293-300.
- NREL 1998/ Sheehan J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M. & Shapouri, H. (1998): Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. Colorado, USA.
- NREL 1999/ Kadam, K.L., Camobreco, V.J., Glazebrook, B.E., Forrest, L.H., Jacobson, W.A., Simeroth, D.C., Blackburn, W.J. & Nehoda K.C. (1999): Environmental Life Cycle Implications of Fuel Oxygenate Production from California Biomass - Technical Report Section 1: Project Overview – References.
- NREL 2002/ Sheehan, J., Aden, A., Riley, C., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Lighthle, D., Nelson, R. Walsh, M. & Cushman, J. (2002): Is Ethanol from Corn Stover sustainable? Adventures in Cyber-Farming. A Life-Cycle-Assessment of the Production of Ethanol from Corn Stover for use in a flexible Fuel Vehicle. Draft Report for Peer Review, December 23, 2002.
- Öko-Institut 2004/ Fritsche, U., Jenseit, W., Hünecke, K., Rausch, L. & Wiegmann, K. (Öko-Institut, Darmstadt), Heinz, A. (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik – UMSICHT), Thrän, D. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig – IE), Gärtner, S., Patyk, A. & Reinhardt, G. (Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH Heidelberg – IFEU), Baur, F., Bemann, U., Groß, B., Heib, M. & Ziegler, C. (Institut für Zukunfts-Energie-Systeme, Saarbrücken – IZES), Flake, M. & Schmehl, M. (TU Braunschweig, Institut für Geoökologie, Abt. Umweltsystemanalyse), Simon, S. (TU München, Lehrstuhl f. Wirtschaftslehre d. Landbaues) (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Endbericht des Verbundprojekts, gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Projektträger: FZ Jülich.

- Pehnt 2002a/ Pehnt, M. (2002a): Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 476, VDI Verlag, Düsseldorf 2002.
- Pehnt 2002b/ Pehnt, M. & Gärtner, S.O. (2002b): Ökobilanz von gasförmigem Wasserstoff aus Holzvergasung. Interner Bericht des IFEU, basiert auf: Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 476, VDI Verlag, Düsseldorf 2002.
- Pimentel 2001/ Pimentel, D. (2001): The Limits of Biomass Utilization. In Encyclopedia of Physical Science and Technology Third Edition. Vol 2: S. 159-171.
- Pimentel 2003/ Pimentel, D. (2003): Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics and Environmental Impacts are Negative. Natural Resources Research, Vol. 12, No. 2, S. 127-134.
- Raschka 2002/ Raschka, M. (2002): Methanol als Energieträger in einem nachhaltigen Energiesystem? Fachgebiet Energiesysteme, Veranstaltung „Neue Entwicklung auf den Energiemärkten“ 2002.
- Reinhardt 1999/ Reinhardt, G. A. (1999): Ressourcen- und Emissionsbilanzen: Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Texte 79/99, Umweltbundesamt Berlin.
- Rogasik et al. 2000/ Rogasik, J., Schnug, E. & Rogasik, H. (2000): Landbau und Treibhauseffekt: Quellen und Senken für CO<sub>2</sub> bei unterschiedlicher Landbewirtschaftung. Arch. Acker-Pfl. Boden., 2000 Vol. 45, S 105-121. Malaysia
- (S&T)<sup>2</sup> 2003/ (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. (2003): The Addition of Ethanol from Wheat to GHGenius.
- Schmitz 2003/ Schmitz, N. (Hrsg.) (2003): Bioethanol in Deutschland. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 21.
- Tan 2002/ Tan, R.R., Culaba, A.B. & Purvis, M.R.I. (2002a): Carbon Balance Implications of Coconut Biodiesel Utilization in the Philippine Automotive Transport Sector
- Thrän 2004/ Thrän, D. & Kaltschmitt, M. (2004): Status Quo und Potenziale der energetischen Biomassenutzung in Deutschland – Wozu sollen welche Biomassepotenziale genutzt werden? In: Bundesverband BioEnergie e. V. und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2004): Tagungsband: Ausbau der Bioenergie – im Einklang mit dem Natur- und Umweltschutz?! Eine Standortbestimmung. 10. Februar 2004, Berlin. S. 45-66.
- Thuijl 2003/ Thuijl, van E., Roos, C.J. & Beurskens, L.W.M. (2003): An Overview of Biofuel Technologies, Markets and Policies in Europe.

TU München 2003/ Igelspacher, R. (2003): Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol im Verkehrssektor. Gefördert durch: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik im Institut für Energietechnik, TU München Prof. Dr.-Ing. U. Wagner, München im Juni 2003.

UBA 2002/ Umweltbundesamt (2002): Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland 1990 – 2000. Stand Juli 2002. <http://www.umweltdaten.de/luft/ed-2000.pdf>; zuletzt geöffnet am 16.02.2004.

USDA 2002/ Shapouri, H., Duffield, J.A. & Wang, M. (2002): The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update. Economic Report No. 813.

VITO 1999/ Ceuterick, D. & Spirinckx C. (1999): Comparative LCA of Biodiesel and Fossil Diesel Fuel, VITO, Belgium.

Wang 1999/ Wang, M., Saricks, C. & Santini D. (1999): Effects of Fuel Ethanol Use on Fuel-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emissions.

WBGU 2004/ WBGU (2004): Politikpapier 3 – Erneuerbare Energien für eine nachhaltige Entwicklung: Impulse für die renewables 2004.

Woods 2003/ Woods, J. & Bauen, A. (2003): Technology Status Review and Carbon Abatement Potential of Renewable Transport Fuels in the UK.

# Anhang

<b>A 1</b>	<b>Analysierte Parameter der untersuchten Studien</b>	<b>A 01</b>
A 1.1	Bioethanol	A 01
A 1.2	ETBE	A 03
A 1.3	Biodiesel	A 05
A 1.4	Pflanzenöl	A 07
A 1.5	Methanol	A 08
A 1.6	MTBE	A 08
A 1.7	DME	A 08
A 1.8	BTL	A 09
A 1.9	Biogas	A 09
A 1.10	Gasförmiger Wasserstoff	A 10
A 1.11	Flüssiger Wasserstoff	A 10
<b>A 2</b>	<b>Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen</b>	<b>A 11</b>
<b>A 2.1</b>	<b>Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse (je ha)</b>	<b>A 12</b>
<b>A 2.1.1</b>	<b>Bioethanol – Gegenüberstellung von Bioethanol aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen</b>	<b>A 12</b>
a)	Bioethanol aus Zuckerrohr	A 14
b)	Bioethanol aus Mais	A 16
c)	Bioethanol aus Weizen	A 18
d)	Bioethanol aus Zuckerrüben	A 20
e)	Bioethanol aus Lignocellulose	A 22
f)	Bioethanol aus Kartoffeln	A 24
<b>A 2.1.2</b>	<b>ETBE – Gegenüberstellung von ETBE aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen</b>	<b>A 26</b>
a)	ETBE aus Weizen	A 28
b)	ETBE aus Zuckerrüben	A 30
c)	ETBE aus Kartoffeln	A 32
<b>A 2.1.3</b>	<b>Biodiesel – Gegenüberstellung von Biodiesel aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen</b>	<b>A 34</b>
a)	Biodiesel aus Raps	A 36
b)	Biodiesel aus Sonnenblumen	A 38
c)	Biodiesel aus Sojabohnen	A 40
d)	Biodiesel aus Canola	A 42
e)	Biodiesel aus Kokosnussöl	A 44
<b>A 2.1.4</b>	<b>Pflanzenöl</b>	<b>A 46</b>
a)	Pflanzenöl aus Raps	A 48
b)	Pflanzenöl aus Sonnenblumen	A 50

<b>A 2.1.5 Biomethanol</b> .....	<b>A 52</b>
a) Biomethanol aus Lignocellulose .....	A 52
<b>A 2.1.6 Biogas</b> .....	<b>A 54</b>
a) Biogas aus (Ligno)-Cellulose .....	A 54
<b>A 2.2 Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse (je MJ Kraftstoffinhalt)</b> .....	<b>A 56</b>
<b>A 2.2.1 Bioethanol</b> .....	<b>A 56</b>
a) Bioethanol aus Zuckerrohr .....	A 56
b) Bioethanol aus Mais .....	A 57
c) Bioethanol aus Weizen .....	A 58
d) Bioethanol aus Zuckerrüben .....	A 59
e) Bioethanol aus Lignocellulose .....	A 60
f) Bioethanol aus Kartoffeln .....	A 61
<b>A 2.2.2 ETBE</b> .....	<b>A 62</b>
a) ETBE aus Weizen .....	A 62
b) ETBE aus Zuckerrüben .....	A 63
c) ETBE aus Kartoffeln .....	A 64
<b>A 2.2.3 Biodiesel</b> .....	<b>A 65</b>
a) Biodiesel aus Raps .....	A 65
b) Biodiesel aus Sonnenblumen .....	A 66
c) Biodiesel aus Sojabohnen .....	A 67
d) Biodiesel aus Canola .....	A 68
e) Biodiesel aus Kokosnussöl .....	A 69
<b>A 2.2.4 Pflanzenöl</b> .....	<b>A 70</b>
a) Pflanzenöl aus Raps .....	A 70
b) Pflanzenöl aus Sonnenblumen .....	A 71
<b>A 2.2.5 Biomethanol</b> .....	<b>A 72</b>
a) Biomethanol aus Lignocellulose .....	A 72
<b>A 2.2.6 Biogas</b> .....	<b>A 73</b>
a) Biogas aus (Ligno)-Cellulose .....	A 73
<b>A 2.3 Biokraftstoffe aus Reststoffen</b> .....	<b>A 74</b>
<b>A 2.3.1 Ethanol</b> .....	<b>A 74</b>
a) Ethanol aus Molasse .....	A 74
b) Ethanol aus Lignocellulose .....	A 76
<b>A 2.3.2 ETBE</b> .....	<b>A 78</b>
a) ETBE aus Lignocellulose .....	A 78
<b>A 2.3.3 Biodiesel</b> .....	<b>A 80</b>
a) Biodiesel aus Tierfett .....	A 80
b) Biodiesel aus Altspisefetten und -ölen .....	A 81

<b>A 2.3.4 Biomethanol</b> .....	<b>A 082</b>
a) Biomethanol aus Lignocellulose .....	A 082
<b>A 2.3.5 MTBE</b> .....	<b>A 084</b>
a) MTBE aus Lignocellulose .....	A 084
<b>A 2.3.6 BTL</b> .....	<b>A 086</b>
a) BTL aus Lignocellulose .....	A 086
<b>A 2.3.7 Biogas</b> .....	<b>A 088</b>
a) Biogas aus organischen Reststoffen .....	A 088
<b>A 2.3.8 Gasförmiger Wasserstoff</b> .....	<b>A 090</b>
a) Gasförmiger Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose .....	A 090
b) Gasförmiger Wasserstoff durch Vergärung organischer Reststoffe ..	A 092
<b>A 2.3.9 Flüssiger Wasserstoff</b> .....	<b>A 094</b>
a) Flüssiger Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose .....	A 094
<b>A 2.4 Energie- und Treibhausgasbilanzen mit verschiedenen Bezügen ...</b>	<b>A 096</b>
A 2.4.1 Well-to-Tank Analyse von Biokraftstoffen .....	A 097
A 2.4.2 Well-to-Wheel Analyse von Biokraftstoffen .....	A 098
A 2.4.3 Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (je MJ Kraftstoffinhalt) .....	A 099
A 2.4.4 Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (je km) .....	A 100
A 2.4.5 Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (in kg eingesparte CO <sub>2</sub> -Äquivalente/MJ eingesparte Primärenergie) .....	A 101
A 2.4.6 Wasserstoff und Methanol aus Lignocellulose im Vergleich zu unterschiedlichen fossilen Kraftstoffpendants und Antriebstechnologien (je km) .....	A 102
<b>A 3 Weitere Umweltwirkungen von Biokraftstoffen</b> .....	<b>A 104</b>
<b>A 3.1 Bioethanol</b> .....	<b>A 104</b>
<b>A 3.2 ETBE</b> .....	<b>A 106</b>
<b>A 3.3 Biodiesel</b> .....	<b>A 107</b>
<b>A 3.4 Pflanzenöl</b> .....	<b>A 109</b>
<b>A 3.5 Biomethanol</b> .....	<b>A 110</b>
<b>A 3.6 DME aus Lignocellulose</b> .....	<b>A 111</b>
<b>A 3.7 Biogas</b> .....	<b>A 112</b>
<b>A 3.8 Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose</b> .....	<b>A 113</b>
<b>A 4 Kosten von fossilen Kraftstoffen und Biokraftstoffen</b> .....	<b>A 114</b>
<b>A 4.1 Fossile Kraftstoffe</b> .....	<b>A 115</b>

<b>A 4.2 Biokraftstoffe</b> .....	<b>A 116</b>
<b>A 4.2.1 Bioethanol</b> .....	<b>A 116</b>
a) Bioethanol aus Zuckerrohr .....	A 116
b) Bioethanol aus Mais .....	A 117
c) Bioethanol aus Weizen .....	A 118
d) Bioethanol aus Zuckerrüben .....	A 119
e) Bioethanol aus Lignocellulose .....	A 120
f) Bioethanol aus Kartoffeln .....	A 121
<b>A 4.2.2 Biodiesel</b> .....	<b>A 122</b>
a) Biodiesel aus Raps .....	A 122
b) Biodiesel aus Sonnenblumen .....	A 123
c) Biodiesel aus Sojabohnen .....	A 124
d) Biodiesel aus Altspeisefetten und -ölen .....	A 125
e) Biodiesel aus Tierfett .....	A 126
<b>A 4.2.3 Pflanzenöl</b> .....	<b>A 127</b>
a) Pflanzenöl aus Raps .....	A 127
b) Pflanzenöl aus Sonnenblumen .....	A 128
<b>A 4.2.4 Biomethanol</b> .....	<b>A 129</b>
a) Biomethanol aus Lignocellulose .....	A 129
<b>A 4.2.5 DME</b> .....	<b>A 130</b>
a) DME aus Lignocellulose .....	A 130
<b>A 4.2.6 BTL</b> .....	<b>A 131</b>
a) BTL aus Lignocellulose .....	A 131
<b>A 4.2.7 Biogas</b> .....	<b>A 132</b>
a) Biogas aus Reststoffen .....	A 132
<b>A 4.2.8 Gasförmiger Wasserstoff (GH<sub>2</sub>)</b> .....	<b>A 133</b>
a) Gasförmiger Wasserstoff aus Lignocellulose .....	A 133
<b>A 4.2.9 Flüssiger Wasserstoff (LH<sub>2</sub>)</b> .....	<b>A 134</b>
a) Flüssiger Wasserstoff aus Lignocellulose .....	A 134
<b>A 5 Publikationen, die in der Studie nicht analysiert wurden, weil</b> .....	<b>A 135</b>
a) keine Primärdaten aufgeführt werden. Die Ergebnisse basieren auf einer Detailstudie, die jedoch berücksichtigt wird. ....	A 135
b) aktuellere Publikationen der gleichen Autoren vorliegen .....	A 136
c) keine Primärdaten, sondern ausschließlich Daten anderer Autoren betrachtet werden .....	A 137
d) sie nicht mehr auf dem aktuellen Stand sind (1995 und älter) .....	A 137
e) sonstige Begründungen vorliegen .....	A 139
<b>A 6 Gesamtes Literaturverzeichnis (alphabetisch nach Autoren sortiert)</b> .....	<b>A 143</b>



## A 1 Analyisierte Parameter der untersuchten Studien

In den nachfolgenden Tabellen wurde mit einem "x" kenntlich gemacht, zu welchen der Parameter Energiebilanz, Treibhausgase (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O), weitere Emissionen (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NMHC, CO etc.), Potenzial- und Kostenabschätzungen die jeweiligen Publikationen Ergebnisse beinhalten. Die „weiteren Emissionen“ werden der Übersichtlichkeit halber nicht einzeln aufgeschlüsselt. Hierbei wird lediglich angegeben, wie viele der weiteren Emissionen in der jeweiligen Studie betrachtet wurden. Publikationen, bei denen die Parameter mit einem "(x)" kenntlich gemacht wurden, beinhalten zwar Ergebnisse zu diesen Parametern, die hier jedoch nicht weiter betrachtet werden. Dies kann damit zusammenhängen, dass es sich nicht um Primärdaten, sondern um Daten anderer Autoren handelt, dass die Ergebnisse in aktuelleren Publikationen überarbeitet wurden etc. Aufgeführt wurden diese Publikationen dennoch, da sie Aussagen zu Potenzial- und/oder Kostenabschätzungen beinhalten.

### A 1.1 Bioethanol

#### a) Bioethanol aus Zuckerrohr

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Macedo	1997	Brasilien	x	x	x	x			
DfT	2003	weltweit						x	
Moreira	2002	Brasilien					x		

#### b) Bioethanol aus Mais

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Levelton	2000	Kanada	x	x	x	x	5		
GM	2001	Nordamerika	x	x	x	x			
Pimentel	2003	USA	x					x	
USDA	2002	USA	x						
Wang	1999	USA	x	x	x	x			
Graboski	2002	USA	x						
TU München	2003	Deutschland	x	(x)	(x)	(x)	(4)	x	
DfT	2003	weltweit						x	
IEA	2003	Nordamerika	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Pimentel	2001	USA	(x)					x	
Schneider	2001	USA						x	
JRC	2003	Europa						x	
Thuijl	2003	Europa						x	
DLR et al.	2003	EU						x	
Schmitz	2003	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)		x	

## c) Bioethanol aus Weizen

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x			x
IFEU	2002a	Deutschland	x	x	x	x	13		
TU München	2003	Deutschland	x	(x)	(x)	(x)	(4)		x
Levington	2000	UK	x	x		x	1		
Elsayed	2003	UK	x	x	x	x			
ETSU	1996	UK	x	x			5		
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			
(S&T) <sup>2</sup>	2003	Kanada	x	(x)	(x)	(x)			
CSIRO	2001	Australien		x	x	x	2		
DfT	2003	weltweit							x
IEA	2003	Nordam./EU	(x)	(x)	(x)	(x)			x
JRC	2003	Europa						x	x
CONCAWE	2002	EU	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
DLR et al.	2003	EU							x
Woods	2003	UK							x
Thrän	2004	Deutschland						x	
Schmitz	2003	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)			x
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)			x

## d) Bioethanol aus Zuckerrüben

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
GM	2002	EU	x	x	x	x			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	X			x
IFEU	2002a	Deutschland	x	x	x	X	13		
TU München	2003	Deutschland	x	(x)	(x)	(x)	(4)		x
FfE	1999	Deutschland	x	x			4		
Fromentin	2000	Schweiz	x	x	x	x	7		x
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			
Elsayed	2003	UK	x	x	x	x			
DfT	2003	weltweit							x
JRC	2003	Europa						x	x
IEA	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)			x
Thuijl	2003	Europa							x
CONCAWE	2002	EU	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
DLR et al.	2003	Europa							x
Thrän	2004	Deutschland						x	
LBST	2002	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)			x
Schmitz	2003	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)			x
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)			x

**e) Bioethanol aus Lignocellulose**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x			x
Levelton	1999	Kanada	x	x	x	x	5	x	
NREL	2002	USA	x	x	x	x	2		x
GM	2002	EU	x	x	x	x			
Fromentin	2000	Schweiz	x	x	x	x	7		x
Elsayed	2003	UK	x	x	x	x			
CSIRO	2001	Australien		x	x	x	2		
DfT	2003	weltweit							x
IEA	2003	Nordam./EU	(x)	(x)	(x)	(x)			x
JRC	2002a	Europa	(x)	(x)				x	x
Thuijl	2003	Europa							x
LBST	2003	Europa	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Woods	2003	UK							x
EST	2002	Deutschland						x	
LBST	2002	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)			x
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)			x

**f) Bioethanol aus Kartoffeln**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
IFEU	2002a	Deutschland	x	x	x	x	13		
JRC	2003	Europa						x	x
DLR et al.	2003	Europa							x
Schmitz	2003	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)			x

**g) Bioethanol aus Molasse**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
CSIRO	2001	Australien		x	x	x	2		
Enerstrat	2003	Australien	x	x	x	x			

**A 1.2 ETBE****a) ETBE aus Weizen**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
IFEU	2002a	Deutschland	x	x	x	x	13		
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			

**b) ETBE aus Zuckerrüben**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
GM	2002	EU	x	x	x	x			
IFEU et al.	2000	Europa	x	x	x	x	11		
		Deutschland	x	x	x	x	11	(x)	
		Frankreich	x	x	x	x	11	(x)	
		Niederlande	x	x	x	x	11	(x)	
IFEU	2002a	Deutschland	x	x	x	x	13		
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			
Fromentin	2000	Schweiz	x	x	x	x	7		

**c) ETBE aus Lignocellulose**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Fromentin	2000	Schweiz	x	x	x	x			
NREL	1999	Kanada	x	x	x	x	5	x	

**d) ETBE aus Kartoffeln**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
IFEU	2002a	Deutschland	x	x	x	x	13		

### A 1.3 Biodiesel

#### a) Biodiesel aus Raps

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
GM	2002	EU	x	x	x	x			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x		x	
IFEU et al.	2000	Europa	x	x	x	x	11		
		Dänemark	x	x	x	x	11	(x)	
		Deutschland	x	x	x	x	11	(x)	
		Frankreich	x	x	x	x	11	(x)	
		Österreich	x	x	x	x	11	(x)	
		Schweiz	x	x	x	x	11	(x)	
IFEU	2003	Deutschland	x	x	x	x	13		
FfE	1999	Deutschland	x	x			4		
ETSU	1996	UK	x	x	x	x			
Levington	2000	UK	x	x		x	1		
Elsayed	2003	UK	x	x	x	x			
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			
VITO	1997	Belgien	x	x	x	x	(4)		
FAT	2000	Schweiz	x	x	x	x	(10)		
CSIRO	2001	Australien		x	x	x	2		
IEA	1999	weltweit	(x)	(x)			(4)	x	
DfT	2003	weltweit						x	
IEA	2003	Europa	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
JRC	2003	Europa						x	
Thuijl	2003	Europa						x	
DLR et al.	2003	Europa						x	
CONCAWE	2002	EU	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Woods	2003	UK						x	
Thrän	2004	Deutschland					x	x	
Ifo	2002	Deutschland						x	
Dreier	1999	Deutschland	(x)	(x)				x	
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)		x	

**b) Biodiesel aus Sonnenblumen**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
EUCAR	2003	Europa	x	x	x	x		x	
IFEU et al.	2000	Europa	x	x	x	x	11		
		Frankreich	x	x	x	x	11	(x)	
		Griechenland	x	x	x	x	11	(x)	
		Italien	x	x	x	x	11	(x)	
IFEU	2002b	Deutschland	x	x	x	x	13		
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			
JRC	2003	Europa					x	x	
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)		x	

**c) Biodiesel aus Sojabohnen**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Levelton	2002	Kanada	x	x	x	x	5		
NREL	1998	USA	x	x	x	x	7		
CSIRO	2001	Australien		x	x	x	2		
DfT	2003	weltweit						x	

**d) Biodiesel aus Canola**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Levelton	2002	Kanada	x	x	x	x	5		
CSIRO	2001	Australien		x	x	x	2		

**e) Biodiesel aus Kokosnussöl**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Tan	2002a	Philippinen	x	x	x	x			

**f) Biodiesel aus Altspisefetten- und ölen**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Elsayed	2003	UK	x	x	x	x			
Levelton	2002	Kanada	x	x	x	x			
Woods	2003	UK						x	
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)		x	

**g) Biodiesel aus Tierfett**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Levelton	2002	Kanada	x	x	x	x	5		
Duncan	2003	Australien						x	

**A 1.4 Pflanzenöl****a) Pflanzenöl aus Raps**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			Weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
IFEU	2001	Deutschland	x	x	x	x	13		
FfE	1999	Deutschland	x	x			4		
Elsayed	2003	UK	x	x	x	x			
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			
DLR et al.	2003	Europa						x	
LBST	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Thrän	2003	Deutschland						x	
Dreier	1999	Deutschland	(x)	(x)				x	

**b) Pflanzenöl aus Sonnenblumen**

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			Weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Ademe	2002	Frankreich	x	x	x	x			

## A 1.5 Biomethanol

### a) Biomethanol aus Lignocellulose

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x			
GM	2002	EU	x	x	x	x			
Pehnt	2002	Deutschland	x	x	x	x	9		
IFEU	2002c	Deutschland	x	x	x	x	13		
FfE	1999	Deutschland	x	x			4		
Dreier	1999	Deutschland	x					x	
ETSU	1996	UK	x	x	x	x			
IEA	1999	weltweit	(x)	(x)			(4)	x	
DLR et al.	2003	Europa						x	
LBST	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Woods	2003	UK						x	
EST	2002	UK					x		
LBST	2002	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Raschka	2002	k.A.						x	

## A 1.6 MTBE

### a) MTBE aus Lignocellulose

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
GM	2002	EU	x	x	x	x			

## A 1.7 DME

### a) DME aus Lignocellulose

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x		x	
IFEU	2002c	Deutschland	x	x	x	x	9		
Atrax	2002	Schweden		x	x	x	5	x	
IEA	1999	weltweit	(x)	(x)			(4)	x	
Thuijl	2003	Europa						x	



## A 1.8 BTL

### a) BTL aus Lignocellulose

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Larson	1999	USA	x						
Marano	2001	USA		x	x	x			
GM	2002	EU	x	x	x	x			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x		x	
Woods	2003	UK						x	
Thuijl	2003	Europa						x	
DLR et al.	2003	Europa						x	
LBST	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)	x		
Thrän	2003	Deutschland					x		

## A 1.9 Biogas

### a) Biogas aus organischen Reststoffen

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
GM	2002	EU	x	x	x	x			
FfE	1999	Deutschland	x	x			4		
Börjesson	2003	Schweden	x	x	x	x	9	x	
DLR et al.	2003	Europa						x	
LBST	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)	x		
Thrän	2003	Deutschland					x	x	
Dreier	1999	Deutschland	(x)	(x)				x	
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)		x	

### b) Biogas aus (Ligno)-Cellulose

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
Börjesson	2003	Schweden	x	x	x	x	9	x	
LBST	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)	x		
Jungmeier	2003	Österreich		(x)	(x)	(x)		x	

## A 1.10 Gasförmiger Wasserstoff

### a) Gasförmiger Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- Ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
GM	2002	EU	x	x	x	x			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x		x	
Pehnt	2004	Deutschland	x	x	x	x	9		
FfE	1999	Deutschland	x	x			4		
Dreier	1999	Deutschland	x	x			4	x	
DLR et al.	2003	Europa						x	
LBST	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
Woods	2003	UK						x	
EST	2002	UK						x	
LBST	2002	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)		x	

### b) Gasförmiger Wasserstoff durch Vergärung organischer Reststoffe

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- Ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
GM	2002	EU	x	x	x	x			

## A 1.11 Flüssiger Wasserstoff

### a) Flüssiger Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose

Autor	Jahr	Bezug	Energie- bilanz	Treibhausgase			weitere Emiss.	Poten- Ziale	Kos- ten
				CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O			
EUCAR	2003	EU	x	x	x	x		x	
Dreier	1999	Deutschland	x	x			4	x	
DLR et al.	2003	Europa						x	
LBST	2003	EU	(x)	(x)	(x)	(x)		x	
EST	2002	UK						x	
LBST	2002	Deutschland	(x)	(x)	(x)	(x)		x	

## **A 2 Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen**

In Kapitel 4.1 sind die Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen dargestellt und erläutert. In diesem Kapitel werden die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Autoren zu einem Biokraftstoff aus dem gleichen Biomasserohstoff dargestellt, die Ursachen für die Unterschiede aufgezeigt und die Ableitung der Bandbreite erläutert. Darüber hinaus erfolgt eine Gegenüberstellung der einzelnen Biokraftstoffe (z.B. Bioethanol) aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen. Dargestellt werden die Vor- bzw. Nachteile in Bezug auf die erschöpfliche Primärenergie und die Treibhausgasemissionen, indem der fossile Lebensweg von dem biogenen Lebensweg subtrahiert wird (s. Kap. 2.2 – 2.5).

Zur vollständigen Dokumentation werden in Anhang 2.4 die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen zusammengestellt, die im Hauptbericht nicht dargestellt sind.

## **A 2.1 Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse (je ha)**

### **A 2.1.1 Bioethanol – Gegenüberstellung von Bioethanol aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen**

Die eingesparte Primärenergie und die vermiedenen Treibhausgasemissionen korrelieren bei den in Abbildung A–1 dargestellten Bioethanolen sehr eng, so dass die Aussagen bezüglich der Primärenergie in gleichem Maße für die eingesparten Treibhausgasemissionen gelten. Die Energie- und Treibhausgasbilanzen für Bioethanol im Vergleich zu Ottokraftstoff fallen bei allen Autoren zugunsten des Bioethanols aus. Von allen analysierten Bioethanolen sind die Vorteile bezüglich der eingesparten Primärenergie und der vermiedenen Treibhausgasemissionen pro Hektar am höchsten, wenn fossiler Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Zuckerrohr ersetzt wird. Dies ist vor allem auf den hohen Ethanolertrag von 7.000 l/ha zurückzuführen. Die zweitgrößten Vorteile weist Bioethanol aus Zuckerrüben auf. Auch hierfür ist der vergleichsweise hohe Ethanolertrag von ca. 6.000 l/ha mitverantwortlich. Die hohe Schwankungsbreite ergibt sich aus den unterschiedlich veranschlagten Zuckerrübenenerträgen, die in den betrachteten Studien zwischen 51,2 (EUCAR 2003) und 86,0 t/ha (IFEU et al. 2000, Bezugsraum Niederlande) variieren.

Die Vorteile der Bioethanolproduktion aus Zuckerrohr sind jedoch nicht in allen geographischen Räumen der Erde gegeben, da der Zuckerrohranbau nur unter tropischen Klimabedingungen möglich ist. Ähnlich verhält es sich mit dem Anbau von Zuckerrüben, wobei Zuckerrüben besonders hohe Ansprüche an den Boden stellen.

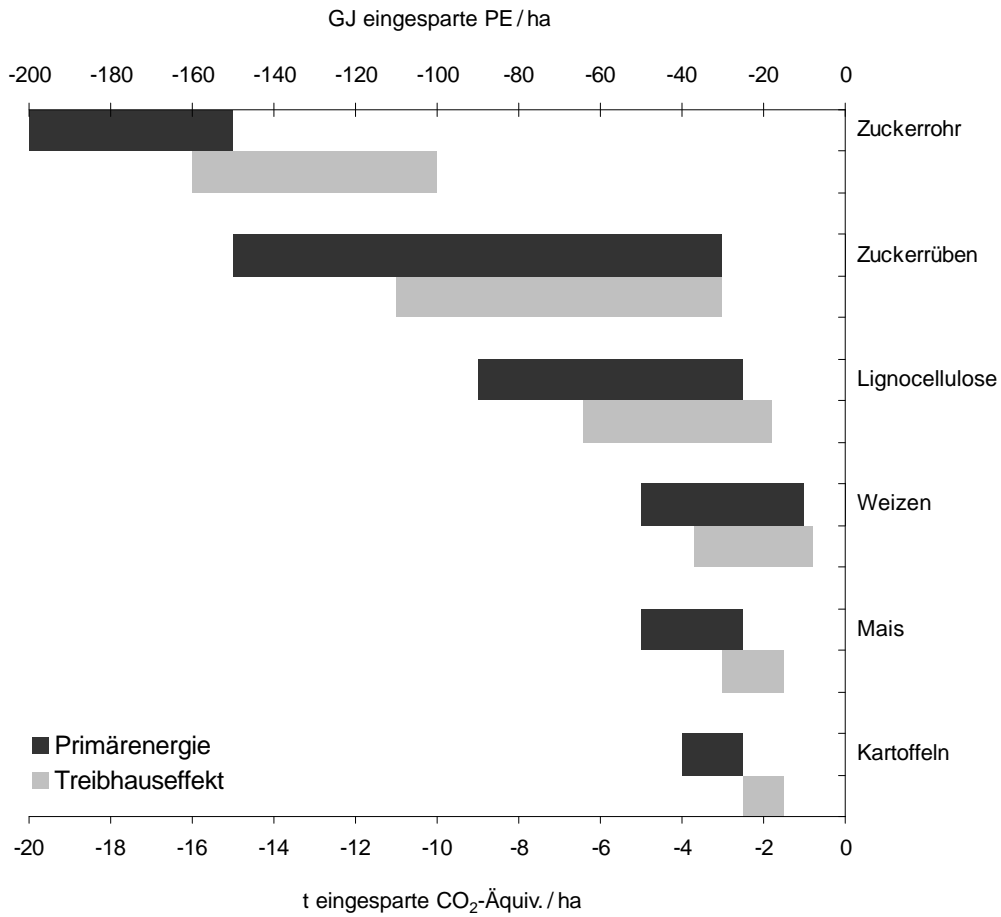


Abb. A-1: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / ha\* a. Negative Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe.

### **a) Bioethanol aus Zuckerrohr**

Bezüglich dem erschöpflichen Primärenergieaufwand und den Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Bioethanol aus Zuckerrohr im Vergleich zu Ottokraftstoff liegt nur eine Publikation vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

#### **Energieaufwand/-einsparung**

Beim Vergleich mit Ottokraftstoff ergibt sich eine günstigere Energiebilanz für Bioethanol aus Zuckerrohr.

Durch die Gutschrift, die sich aus der Verbrennung von Bagasse (faserartige Bestandteile der Zuckerrohrpflanze) ergibt, können die Energieaufwendungen für die landwirtschaftliche Produktion von Zuckerrohr und für die Konversion zu Bioethanol nahezu ausgeglichen werden.

Der abgeleitete Wert für die eingesparte Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Zuckerrohr ersetzt wird, orientiert sich an der Studie von Macedo (1997). Die Schwankungsbreite ergibt sich vor allem aus der unterschiedlichen Nutzung der Bagasse.

#### **Treibhauseffekt**

Treibhausgasemissionen werden vermieden, wenn Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Zuckerrohr ersetzt wird.

Macedo (1997) bilanzierte  $\text{CH}_4$  nicht über den gesamten Lebensweg und berücksichtigte nur die direkten  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen vom Feld und nicht die  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen, die sich aus der Stickstoffdüngemittelproduktion ergeben. Dies führt dazu, dass die Menge an vermiedenen Treibhausgasemissionen von Macedo überschätzt wird.

Auf der anderen Seite berechnete er bezüglich der Treibhausgasemissionen weder mit einem Gutschrift-, noch mit einem Allokationsverfahren hinsichtlich dem Nebenprodukt Bagasse. Hierdurch wird die Menge an vermiedenen Treibhausgasemissionen von Macedo unterschätzt.

Da die Studie von Macedo (1997) die einzige uns vorliegende Bilanzierung der Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Bioethanol aus Zuckerrohr ist, wird diese Studie zur Ableitung der vermiedenen Treibhausgasemissionen, wenn Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Zuckerrohr ersetzt wird, herangezogen. Die angegebene Bandbreite basiert auf den o.g. Gründen.

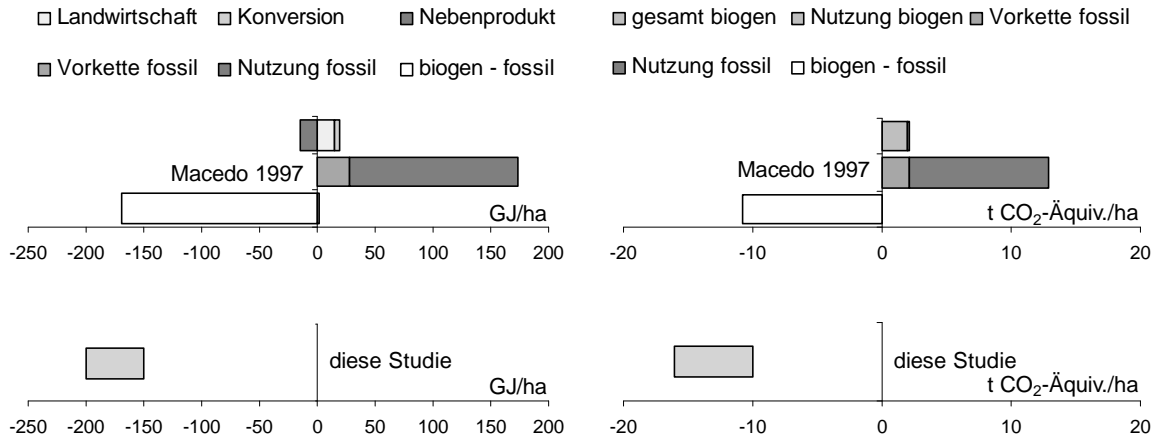


Abb. A-2: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Zuckerrohr im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha\*a.

## **b) Bioethanol aus Mais**

### **Energieaufwand/-einsparung**

Mit Ausnahme von Pimentel (2003) ermittelten alle Autoren eine günstigere Energiebilanz für Bioethanol aus Mais im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff.

Bei Pimentel (2003) ist vor allem der erschöpfliche Primärenergieaufwand im Bereich der Landwirtschaft höher als bei den anderen Autoren. Dies erklärt sich einerseits durch den höheren Primärenergieaufwand für die Produktion, Verpackung und den Transport von Stickstoffdüngemitteln, der bei Pimentel mit 70 MJ/kg N veranschlagt wurde, während er in den übrigen Studien zwischen 42 und 51 MJ/kg N variiert. Im Vergleich zu den übrigen Studien berücksichtigte Pimentel im Bereich der Landwirtschaft ebenfalls noch Investitionsgüter, den Energieaufwand für Bewässerung und menschliche Arbeitskraft, wobei diese Aufwendungen 17 %, 11 % bzw. 3 % des landwirtschaftlichen Bereichs ausmachen.

In der Studie von Pimentel (2003) wird die Landwirtschaft umfassender betrachtet als in den übrigen Studien. Dennoch wird davon ausgegangen, dass der erschöpfliche Primärenergieaufwand für die landwirtschaftliche Produktion von Mais niedriger ist, als der von Pimentel ermittelte Wert. Dies kann vor allem damit begründet werden, dass Pimentel einen nicht mehr zeitgemäßen Primärenergieaufwand für die Produktion, Verpackung und den Transport von Stickstoffdüngemitteln und einen Primärenergieaufwand für menschliche Arbeit veranschlagte, der in Ökobilanzen im allgemeinen nicht berücksichtigt wird. Der abgeleitete Wert für die eingesparte Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Mais ersetzt wird, orientiert sich demnach an den übrigen Studien.

### **Treibhauseffekt**

Treibhausgasemissionen werden vermieden, wenn Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Mais ersetzt wird.

Die Treibhausgasemissionen wurden nur in zwei Studien betrachtet. Die ermittelte Bandbreite schließt die Ergebnisse dieser Studien ein.



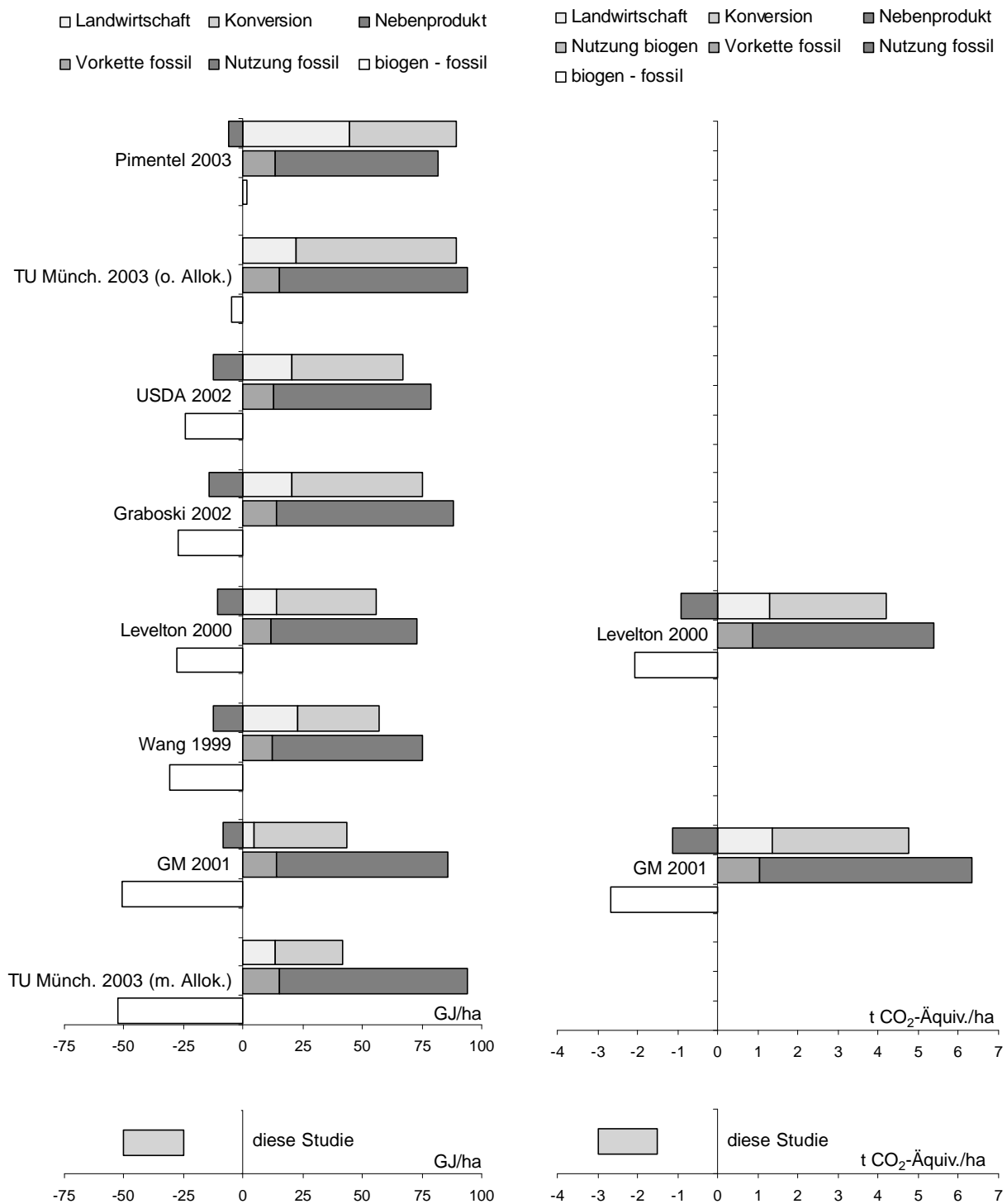


Abb. A-3: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Mais im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha\*a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha\*a.

## c) Bioethanol aus Weizen

### Energieaufwand/-einsparung

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für Bioethanol aus Weizen im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff.

Bei ETSU (1996) sind die Vorteile für Bioethanol am geringsten, was vor allem mit dem vergleichsweise hohen Aufwand für die Konversion zu erklären ist. Es wird zwar nicht bestritten, dass es vereinzelt in einigen Ländern noch immer solche energieintensiven Anlagen gibt, sie stellen jedoch nicht mehr den aktuellen Stand der Technik dar, so dass diese Ergebnisse zur Ableitung der Bandbreite nicht herangezogen werden.

Bei S&T (2003) waren die Vorteile für Bioethanol gering, was durch den vergleichsweise sehr geringen Weizenertrag zu erklären ist, der in dieser Studie veranschlagt wurde. Während der Weizenertrag in den übrigen Studien zwischen 6,8 und 9,0 t/ha variiert, gingen S&T (2003) von einem Weizenertrag von 2,7 t/ha aus. Da dieser Weizenertrag für Kanada durchaus als repräsentativ angesehen werden kann, fließen auch diese Ergebnisse in die Ableitung der Bandbreite mit ein.

Neben den genannten Faktoren werden die Ergebnisse des erschöpflichen Primärenergieaufwandes vor allem durch die Bewertung der Kuppelprodukte bestimmt. Levington (2001) setzte in einem Szenario den Energiegehalt des Weizenstrohs als Gutschrift an. Hierbei handelt es sich um die Bilanzierung einer anderen Fragestellung, die mit den anderen Studien nicht vergleichbar ist.

Des Weiteren wurde die bei der Ethanolproduktion aus Weizen anfallende Trockenschlempe von Levington (2001) nicht bewertet. Alle anderen Autoren berechneten entweder eine Gutschrift für Trockenschlempe ((ETSU (1996), S&T (2003), EUCAR (2003); in der EUCAR Studie wurde die Gutschrift nicht separat ausgewiesen, sondern ist in der Konversion enthalten) oder sie führten eine Allokation für Trockenschlempe durch (TU München (2003), IFEU (2002a), Elsayed (2003), Ademe (2002)). Hierbei zeigt sich, dass die Ergebnisse in Abhängigkeit des gewählten Bewertungsverfahrens erheblichen Schwankungen unterliegen.

Bei der Ableitung der Bandbreite für die eingesparte Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Weizen ersetzt wird, wurden die o.g. Ausführungen berücksichtigt. Die Schwankungsbreite basiert vor allem auf der Annahme unterschiedlicher Weizenerträge und in Abhängigkeit des Bewertungsverfahrens der Kuppelprodukte.

### Treibhauseffekt

Bezüglich der Treibhausgasemissionen ermittelten ebenfalls alle Autoren eine günstigere Bilanz für Bioethanol aus Weizen im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff.

Analog zum erschöpflichen Primärenergieaufwand werden die Ergebnisse von Levington (2001) aus den o.g. Gründen nicht weiter betrachtet.

Nicht alle Autoren ermittelten die vollständigen CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen. So wurden die N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen in der Studie von ETSU (1996) nicht ermittelt.

Die abgeleitete Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen ergibt sich analog zu dem erschöpflichen Primärenergieaufwand vor allem in Abhängigkeit des Bewertungsverfahrens der Kuppelprodukte und der unterschiedlichen Erträge.

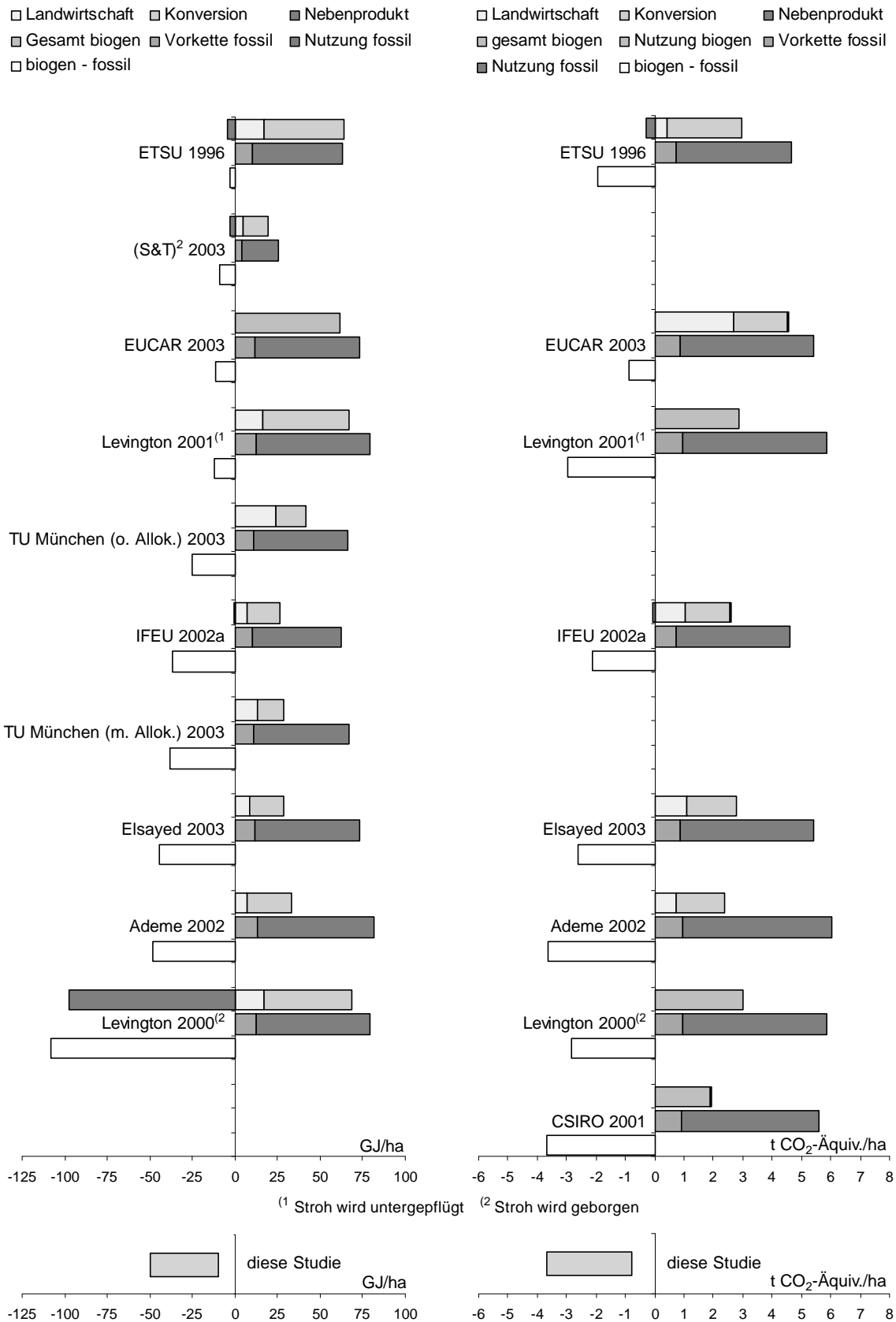


Abb. A-4: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Weizen im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

## d) Bioethanol aus Zuckerrüben

### Energieaufwand/-einsparung

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für Bioethanol aus Zuckerrüben im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff.

Ähnlich wie bei Ethanol aus Weizen variieren auch die Ergebnisse von Ethanol aus Zuckerrüben vor allem in Abhängigkeit des Biomasseertrages und der Bewertung der Kuppelprodukte.

- Bei FfE (1999) sind die Vorteile für Bioethanol am geringsten, was dadurch zu erklären ist, dass kein Gutschriften- oder Allokationsverfahren für Nebenprodukte durchgeführt wurde. Hinzu kommt, dass FfE (1999) mit 51,2 t/ha einen geringen Flächenertrag angesetzt hat.
- In dem Basisszenario der EUCAR-Studie (2003) wurde eine Gutschrift für Rübenschnitzel und Zuckerrübenpülpe ermittelt, wobei davon ausgegangen wurde, dass diese Nebenprodukte als Tierfutter eingesetzt werden. Geht man dagegen davon aus, dass aus den Nebenprodukten Biogas erzeugt wird, was u.a. zur Deckung des Energiebedarfs der Ethanolanlage genutzt werden kann, sind die Vorteile für den Biokraftstoff wesentlich höher. Diese Option findet sich in der „optimierten Variante“ der IFEU-Studie (2002). Die Unterschiede zwischen der EUCAR- und der IFEU-Studie sind jedoch auch noch auf andere Ursachen zurückzuführen wie beispielsweise unterschiedliche Annahmen bezüglich der Erträge oder der N-Zufuhr.
- Unterschiedliche Ergebnisse kommen auch dadurch zustande, dass die Höhe der Allokation zwischen Rübenschnitzeln und Ethanol variieren kann. Vergleiche hierzu IFEU 2002 (0,15), IFEU 2002 (0,55) und IFEU 2002 (0,95).

Der abgeleitete Wert für die eingesparte Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Zuckerrüben ersetzt wird, orientiert sich an den Studien, in denen die Nebenprodukte berücksichtigt wurden. Dabei fließen alle Möglichkeiten zur Bewertung von Kuppelprodukten in die Bandbreite ein. Dass die Bandbreite über den in den betrachteten Studien ermittelten Maximalwert hinausgeht, ist dadurch zu erklären, dass höhere Erträge berücksichtigt wurden. Als maximaler Zuckerrübenenertrag wurden 86 t/ha veranschlagt. Dieser Wert basiert auf der IFEU et al.-Studie (2000), in der ETBE aus Zuckerrüben mit Bezugsraum Niederlande untersucht wurde.

### Treibhauseffekt

Zur Ableitung der Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen wurde von den gleichen Annahmen ausgegangen, die zuvor bei der Energiebilanz beschrieben wurden.

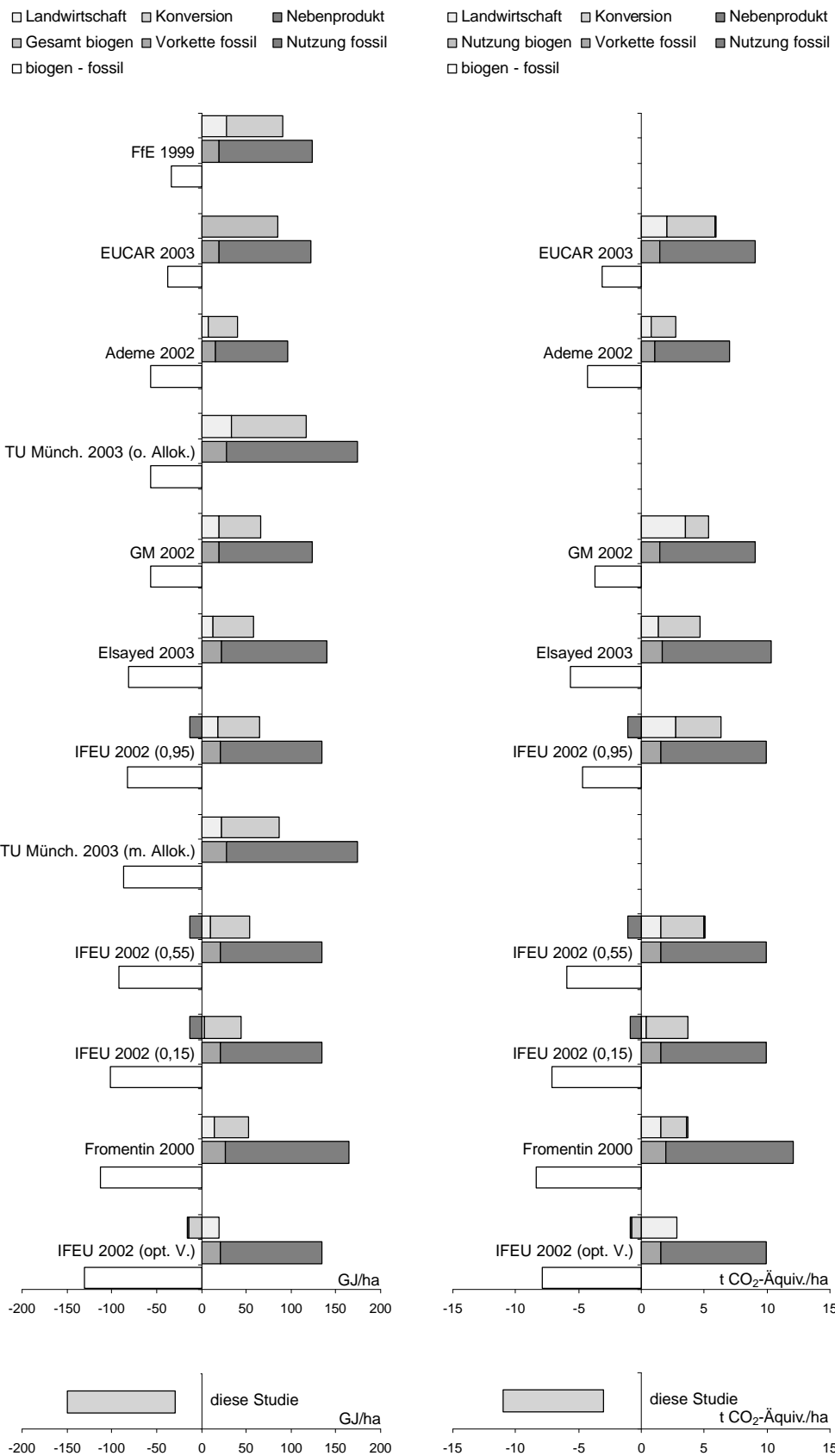


Abb. A-5: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Zuckerrüben im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

### e) Bioethanol aus Lignocellulose

Nachfolgend werden alle lignocellulosehaltigen Rohstoffe betrachtet, bei denen sich die Energie- und Treibhausgasbilanzen flächenbezogen darstellen lassen. Dies betrifft sowohl Anbaubiomasse (Gras, Heu) wie auch Reststoffe (Stroh).

#### Energieaufwand/-einsparung

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für Bioethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff. Die Konversion von Lignocellulose in Bioethanol ist zwar mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Dieser Energieaufwand kann jedoch durch die energetische Nutzung des Lignins kompensiert und z.T. auch überkompensiert werden, so dass der Aufwand an erschöpflicher Primärenergie für die Konversion bei allen Autoren vergleichsweise gering ist. Der Energiegewinn durch die Nutzung des Lignins wurde bei Levelton (1999) von dem erschöpflichen Primärenergieaufwand für Landwirtschaft und Konversion subtrahiert.

Die eingesparte Primärenergie pro Hektar ist vor allem vom Ethanolertrag je Hektar abhängig, der wiederum vom Biomasseertrag und vom Ethanolertrag des Konversionsprozesses abhängig ist.

Der Biomasseertrag unterscheidet sich innerhalb der lignocellulosehaltigen Materialien, wobei Gras den höchsten (11,0 (Fromentin 2000) – 11,5 t/ha (Levelton 1999)) und Getreidestroh den niedrigsten Biomasseertrag der hier betrachteten lignocellulosehaltigen Materialien aufweist (3,8 (Elsayed 2003) – 4,3 t/ha (Levelton 1999)). Maisstroh nimmt eine Mittelstellung ein (6,2 (Levelton 1999) – 8,3 t/ha (NREL 2002)).

Der von Fromentin (2000) angesetzte Ethanolertrag war mit 153 l/t ca. halb so hoch, wie der der übrigen Studien, in denen er zwischen 300 und 345 l/t (Levelton 1999) variiert.

Der aus den vorliegenden Studien abgeleitete Wert unterliegt vor allem aufgrund der unterschiedlichen lignocellulosehaltigen Materialien einer hohen Schwankungsbreite.

#### Treibhauseffekt

In den betrachteten Studien besteht eine enge Korrelation zwischen den Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Bioethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff, und der erschöpflichen Primärenergie.

Die Treibhausgasemissionen der Bereiche Landwirtschaft und Konversion sind in den betrachteten Studien in etwa so hoch wie die Gutschriften der Nebenprodukte, so dass hier mehr oder weniger ein Ausgleich erfolgte.

Analog zur erschöpflichen Primärenergie ist der Ethanolertrag je Hektar auch bezüglich der Treibhausgasemissionen ergebnisbestimmend.

Aus den o.g. Gründen unterliegt der abgeleitete Wert für die vermiedenen Treibhausgasemissionen pro Hektar ähnlich hohen Schwankungen wie der abgeleitete Wert der eingesparten Primärenergie pro Hektar.

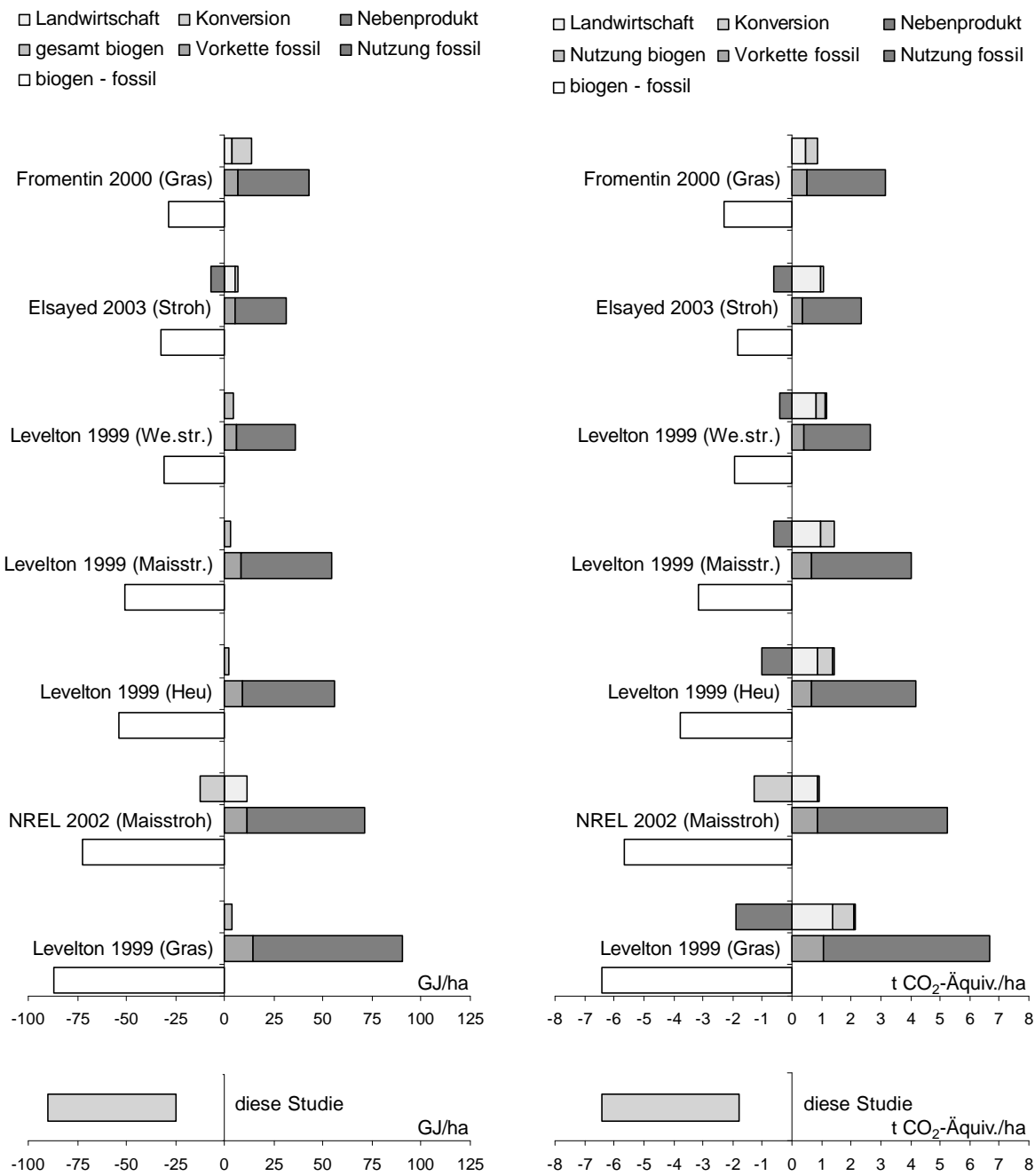


Abb. A-6: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

**f) Bioethanol aus Kartoffeln**

Zur Bereitstellung von Bioethanol aus Kartoffeln im Vergleich zu Ottokraftstoff liegt nur eine Publikation vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

**Energieaufwand/-einsparung**

Die Energiebilanz für Bioethanol aus Kartoffeln im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff fällt zugunsten von Bioethanol aus.

Bei der Bioethanolproduktion aus Kartoffeln fällt Kartoffelschlempe als Kuppelprodukt an. Sie kann entweder verfüttert oder auf den Acker ausgebracht werden. Die Verfütterung ist zunehmend mit Problemen behaftet, so dass in der IFEU-Studie (2002) die Ausbringung der Schlempe auf den Acker unterstellt wird. Hierdurch erfolgt eine Gutschrift, indem Minereraldünger substituiert wird.

Der abgeleitete Wert für die eingesparte Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Kartoffeln ersetzt wird, orientiert sich an der IFEU-Studie (2002). Dabei erklärt sich die Schwankungsbreite durch mögliche Ertragsunterschiede und mögliche Unterschiede in den Konversionsrouten. Da zu Bioethanol aus Kartoffeln nur eine Studie vorliegt, sollten zur besseren Absicherung der Bandbreite noch weitere Analysen durchgeführt werden.

**Treibhauseffekt**

Die Treibhausgasbilanz für Bioethanol aus Kartoffeln fällt im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff ebenfalls zugunsten von Bioethanol aus.

Analog zur eingesparten Primärenergie basiert auch der abgeleitete Wert für die vermiedenen Treibhausgasemissionen auf der IFEU-Studie (2002). Auch hier sollten zur besseren Absicherung der Bandbreite noch weitere Analysen durchgeführt werden.



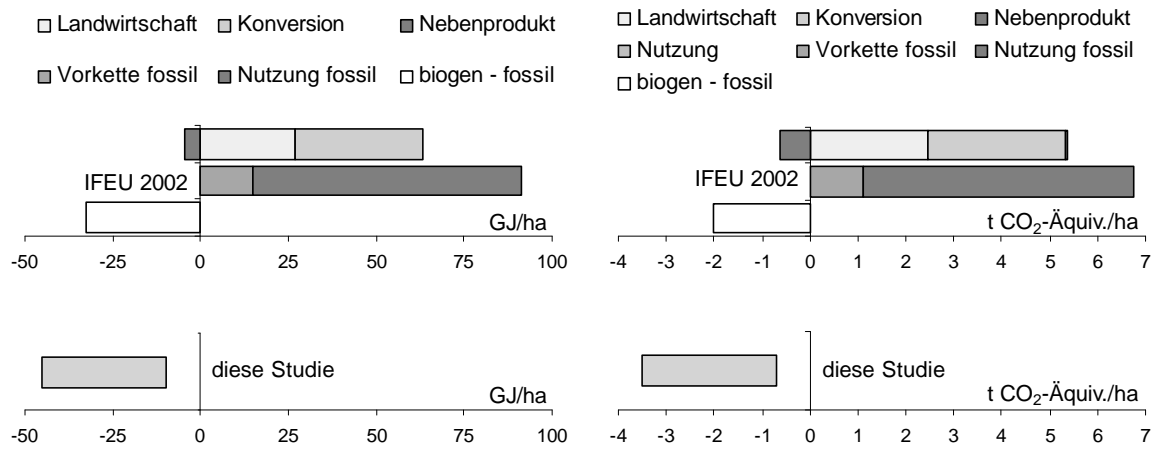


Abb. A-7: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Kartoffeln im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha\*a.

### **A 2.1.2 ETBE – Gegenüberstellung von ETBE aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen**

Die Unterschiede bezüglich der eingesparten Primärenergie und den vermiedenen Treibhausgasemissionen verhalten sich bei den einzelnen Biomasserohstoffen, aus denen ETBE produziert wird, in gleicher Weise wie bei den Biomasserohstoffen zur Bioethanolproduktion. So weist ETBE aus Zuckerrüben Vorteile gegenüber ETBE aus Weizen und Kartoffeln auf. Die Ursachen und Konsequenzen hierfür sind ebenfalls mit denen der Bioethanolproduktion aus den unterschiedlichen Biomasserohstoffen identisch (S. A-12).

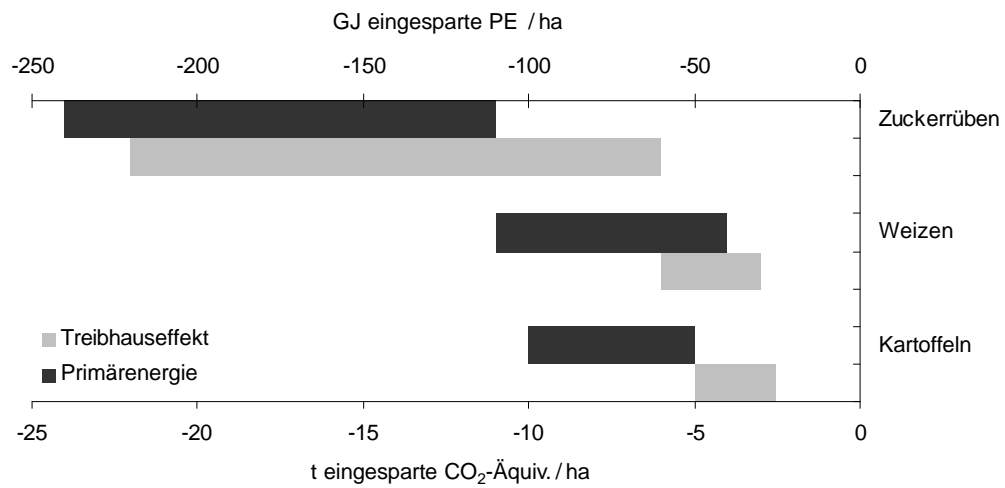


Abb. A-8: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus unterschiedlichen Anbaubio-masserohstoffen im Vergleich zu fossilem MTBE in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / ha \* a. Negative Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe.

## a) ETBE aus Weizen

### **Energieaufwand/-einsparung**

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für ETBE aus Weizen, wenn es fossilem MTBE gegenübergestellt wird.

Der Energieaufwand zur Bereitstellung von ETBE wird vor allem durch den fossilen Anteil des ETBE bestimmt. Zur Produktion von ETBE werden ca. 55 % fossiles Isobuten und 45 % Bioethanol benötigt. Aufgrund des hohen Primärenergieaufwandes für den fossilen Anteil des ETBE wirken sich die unterschiedlichen Annahmen einzelner Autoren im Bereich der Landwirtschaft und Konversion verhältnismäßig gering aus.

Die Unterschiede zwischen den Studien werden in erster Linie durch die Annahmen unterschiedlicher Erträge hervorgerufen. Während in der IFEU-Studie (2002) von einem Ertrag von 6,8 t/ha ausgegangen wurde, veranschlagte Ademe (2002) einen Ertrag von 9,0 t/ha, wodurch sich in der Studie von Ademe wesentlich höhere Vorteile für ETBE im Vergleich zu fossilem MTBE ergeben.

Analog zur Ableitung der Bandbreite für Ethanol aus Weizen wurde auch bei der Ableitung der Bandbreite von ETBE aus Weizen die komplette Bandbreite repräsentativer Erträge berücksichtigt. Dabei wurden auch die vergleichsweise niedrigen Erträge, die für Kanada repräsentativ sind, mit eingeschlossen (vgl. Ethanol aus Weizen).

### **Treibhauseffekt**

Bezüglich der Treibhausgasemissionen ermittelten ebenfalls alle Autoren eine günstigere Bilanz für ETBE aus Weizen im Vergleich zu fossilem MTBE.

Die abgeleitete Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen ergibt sich wie bei dem erschöpflichen Primärenergieaufwand vor allem in Abhängigkeit der unterschiedlichen Erträge. Auch hier wurde die komplette Bandbreite der Weizenerträge berücksichtigt, die auch in den Studien zu Bioethanol aus Weizen berücksichtigt wurde.

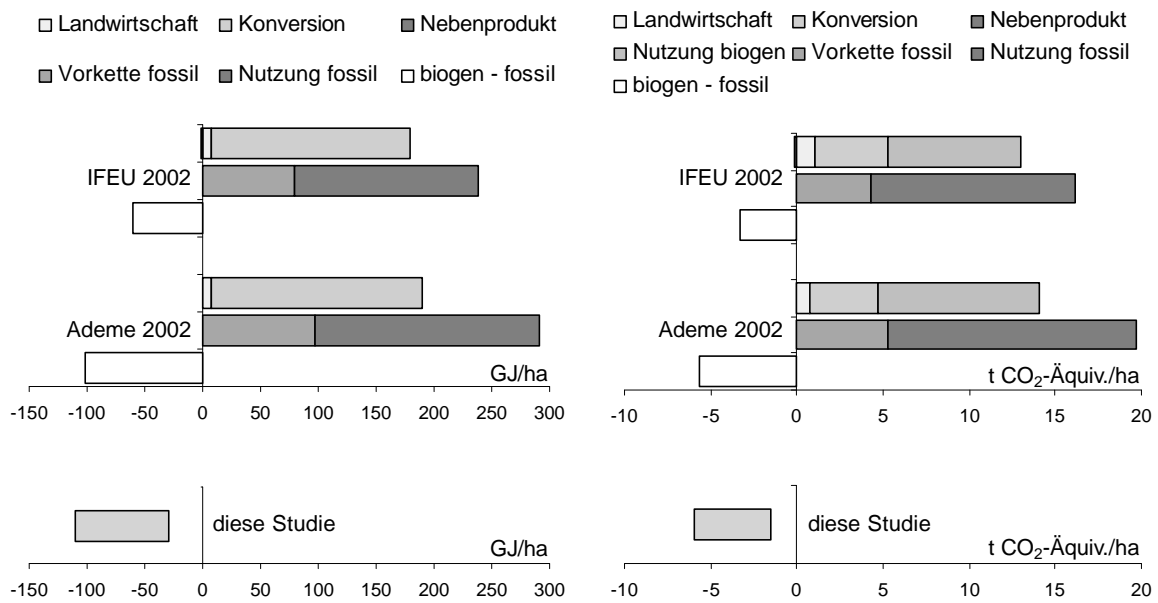


Abb. A-9: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus Weizen im Vergleich zu fossilem MTBE in GJ eingesparte Primärenergie/ha\*a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha\*a.

## **b) ETBE aus Zuckerrüben**

### **Energieaufwand/-einsparung**

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für ETBE aus Zuckerrüben, wenn fossiles MTBE ersetzt wird.

Auch bei der Bereitstellung von ETBE aus Zuckerrüben wird der Energieaufwand vor allem durch den fossilen Anteil des ETBE bestimmt, so dass die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen in den Bereichen Landwirtschaft und Konversion verhältnismäßig gering sind.

Fromentin (2000) ermittelte einen vergleichsweise hohen Energieaufwand für die Bereitstellung von ETBE aus Zuckerrüben, wodurch sich extrem geringe Vorteile für ETBE ergeben. Dies resultiert aus einem sehr hoch veranschlagten Energieaufwand für Naphta. Da dieser Energieaufwand lediglich beziffert wird und nicht erklärt bzw. anhand von angegebenen Basisdaten nachvollziehbar ist, werden diese Ergebnisse bei der Ableitung der Bandbreite nicht berücksichtigt.

Die Bandbreite des Energieaufwandes zur Bereitstellung von ETBE aus Zuckerrüben ergibt sich analog zu Bioethanol aus Zuckerrüben vor allem durch Berücksichtigung unterschiedlicher Erträge und der unterschiedlichen Bewertung der Kuppelprodukte (vgl. Bioethanol aus Zuckerrüben). Bei der Ableitung der Bandbreite wurde das komplette in der Literatur vorgefundene Spektrum an Erträgen berücksichtigt. Der von Fromentin (2000) ermittelte Energieaufwand für die Bereitstellung von ETBE aus Zuckerrüben wurde nicht in die Bandbreite aufgenommen.

### **Treibhauseffekt**

Bezüglich der Treibhausgasemissionen ermittelten ebenfalls alle Autoren eine günstigere Bilanz für ETBE aus Zuckerrüben im Vergleich zu fossilem MTBE.

Die abgeleitete Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen schließt alle Ergebnisse aus den einzelnen Studien mit ein. Auch hier ergab sich die Schwankungsbreite vor allem in Abhängigkeit unterschiedlicher Erträge.

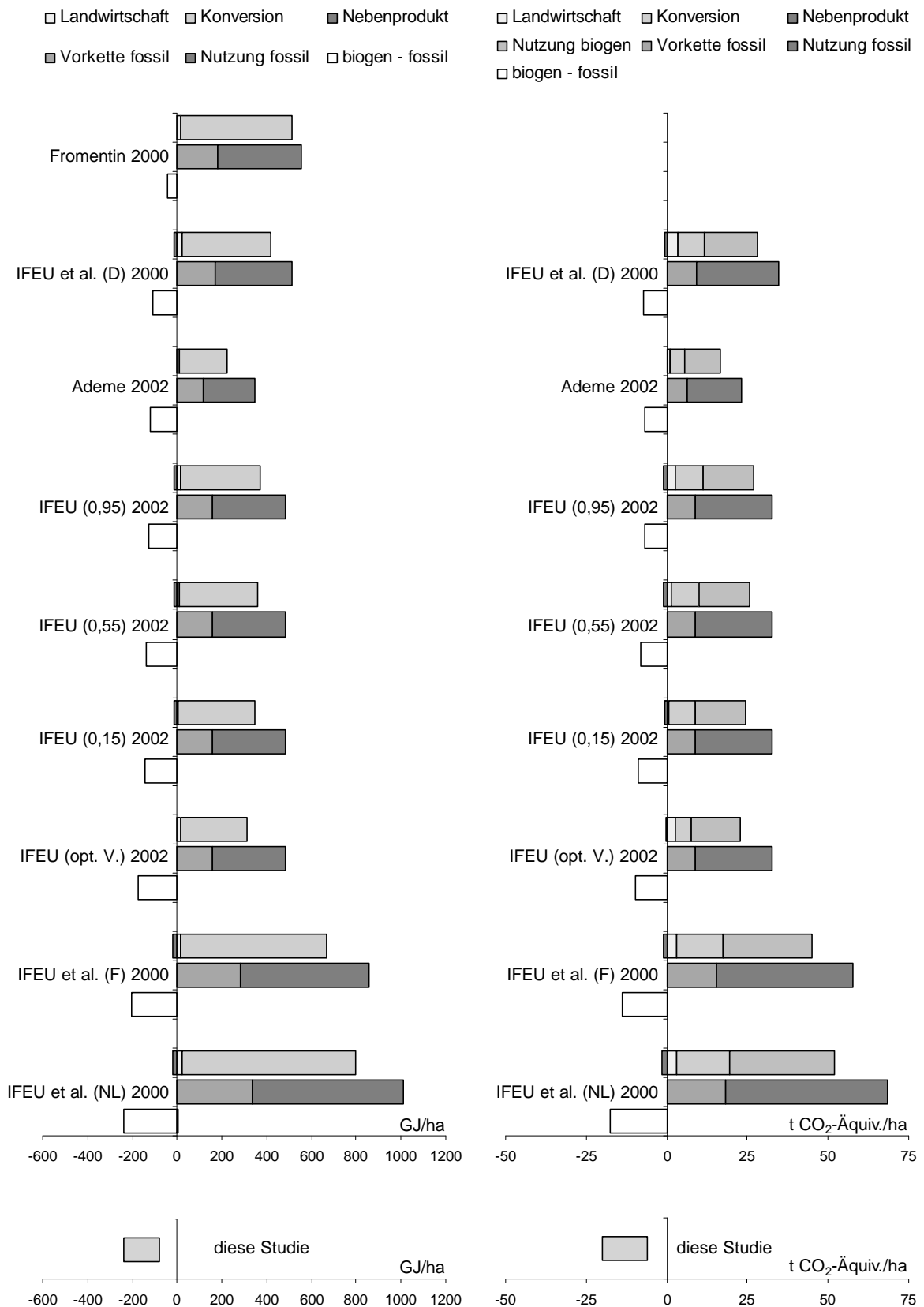


Abb. A-10: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus Zuckerrüben im Vergleich zu fossilem MTBE in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

**c) ETBE aus Kartoffeln**

Zur Bereitstellung von ETBE aus Kartoffeln im Vergleich zu fossilem MTBE liegt nur eine Studie vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

**Energieaufwand/-einsparung**

Die Energiebilanz für ETBE aus Kartoffeln im Vergleich zu fossilem MTBE fällt zugunsten von ETBE aus.

Die abgeleitete Bandbreite orientiert sich an der IFEU-Studie (2002), wobei mögliche Ertragsunterschiede und mögliche Unterschiede in den Konversionsrouten berücksichtigt wurden.

**Treibhauseffekt**

Die Treibhausgasbilanz für ETBE aus Kartoffeln fällt im Vergleich zu fossilem MTBE ebenfalls zugunsten von Bioethanol aus.

Die Ableitung der Bandbreite erfolgte nach den gleichen Gesichtspunkten wie die Ableitung der Bandbreite zur eingesparten Primärenergie.



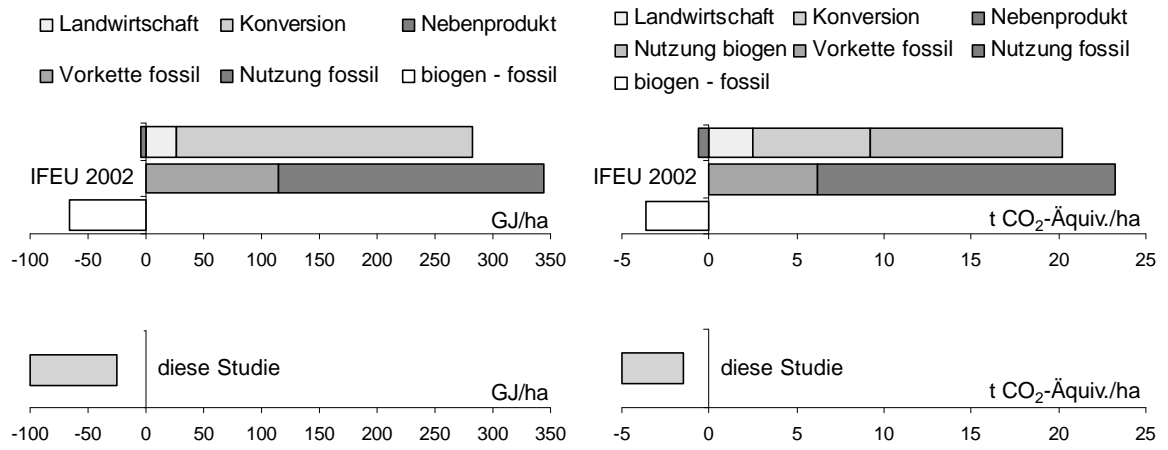


Abb. A-11: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus Kartoffeln im Vergleich zu fossilem MTBE in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha\*a.

### **A 2.1.3 Biodiesel – Gegenüberstellung von Biodiesel aus unterschiedlichen Anbau-biomasserohstoffen**

Analog zu Bioethanol und ETBE korreliert die eingesparte Primärenergie auch beim Vergleich von Biodiesel zu fossilem Dieselkraftstoff sehr eng mit den vermiedenen Treibhausgasemissionen. D.h., dass die Aussagen bezüglich der Primärenergie in gleichem Maße für die eingesparten Treibhausgasemissionen gelten.

In den untersuchten Studien wird gezeigt, dass Primärenergie eingespart und Treibhausgasemissionen vermieden werden, wenn fossiler Dieselkraftstoff durch Biodiesel ersetzt wird. Tendenziell ergeben sich die größten Vorteile, wenn fossiler Dieselkraftstoff durch Biodiesel aus Sonnenblumen ersetzt wird. Dies ist vor allem auf den höheren Ölertrag pro ha zurückzuführen. Dieser ergibt sich aus dem Flächenertrag der Ölfrüchte und der Ölausbeute der Früchte. Im Vergleich zu Raps sind die Flächenerträge von Sonnenblumen in etwa gleich hoch, während aus einer Tonne Sonnenblumen ca. 100 l mehr Biodiesel erzeugt werden kann, so dass der flächenbezogene Biodieselertrag höher ist. Bei Biodiesel aus Canola wirkt sich im Vergleich zu Biodiesel aus Sonnenblumen bzw. Raps vor allem der geringere Flächenertrag von Canola nachteilig auf die Energie- und Treibhausgasbilanzen aus. Bei Canola handelt es sich um eine kanadische Sommerrapsorte, die in der Regel nicht die Erträge von Winterraps in Europa erzielt. Im Vergleich zu den übrigen Ölfrüchten führt der geringe Biodieselertrag je t Biomasse bei Biodiesel aus Sojabohnen zu geringeren Vorteilen.

Neben dem Ölertrag wirkt sich beim Vergleich von Biodiesel aus Sonnenblumen und Biodiesel aus Raps zusätzlich der geringere Stickstoffeinsatz beim Anbau der Sonnenblumen aus. Vor allem die N<sub>2</sub>O-Emissionen und damit auch die Summe der Treibhausgasemissionen sind dadurch bei Biodiesel aus Sonnenblumen geringer, wodurch sich höhere eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen ergeben.

Der Anbau von Ölfrüchten ist nicht in allen geographischen Regionen möglich und die natürlichen Bedingungen unterscheiden sich erheblich in den derzeitigen Anbauregionen. In Deutschland führen relativ günstige und stabile klimatische Bedingungen sowie intensive Produktionssysteme zu den höchsten Rapsertträgen von bis zu etwa 4 t pro ha und Jahr. Dagegen sind die geringen Erträge in Kanada (1,4 – 1,7 t Raps pro ha und Jahr) eine Folge der weniger geeigneten natürlichen Bedingungen und der extensiven Produktionssysteme. In den Anbauregionen von Sojabohnen (Argentinien, Brasilien, China und USA) sind die klimatischen Bedingungen und Böden für den Sojabohnenanbau geeignet, so dass relativ hohe Erträge von 2,0 – 3,3 t pro ha und Jahr erzielt werden (Parkhomenko 2003).

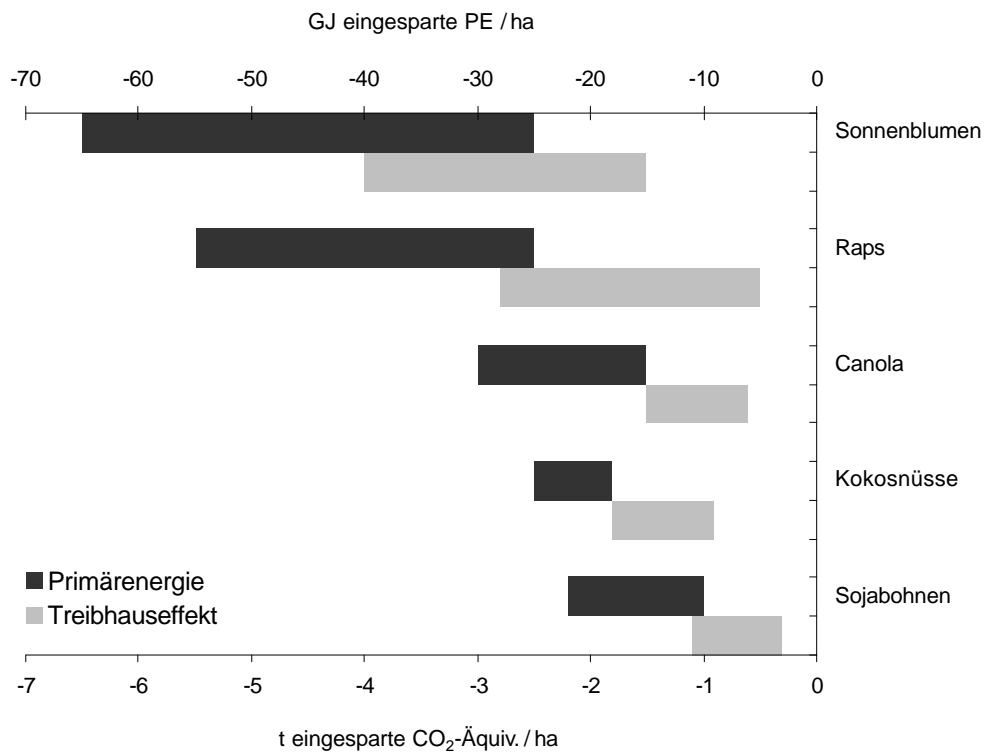


Abb. A-12: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / ha \* a. Negative Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe.

## a) Biodiesel aus Raps

### Energieaufwand/-einsparung

Die Energiebilanz für Biodiesel aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff fällt bei allen Autoren zugunsten des Biodiesels aus. Entlang der Biodieselproduktionskette fallen als Nebenprodukte Rapsextraktionsschrot und Glycerin an. Der methodische Umgang mit diesen Nebenprodukten unterscheidet sich in den einzelnen Studien, wodurch die eingesparte Primärenergie pro Hektar ebenfalls hohen Schwankungen unterliegt.

ETSU (1996) ermittelten eine vergleichsweise geringe Menge an eingesparter Primärenergie, was auf mehrere Ursachen zurückzuführen ist:

- Der hohe Primärenergieaufwand im Bereich der Landwirtschaft erklärt sich durch den vergleichsweise hohen Stickstoffdüngemittelsatz von 185 kg N/ha und vor allem durch den hoch angesetzten Primärenergieaufwand für die Produktion der Stickstoffdüngemittel, der mit 65 MJ/kg veranschlagt wurde. Letzterer stellt nicht mehr den aktuellen Stand der Technik dar.
- An Nebenprodukten wurde nur Rapsextraktionsschrot berücksichtigt, während für Glycerin weder eine Gutschrift noch eine Allokation berechnet wurde.

FfE (1999) berücksichtigte keine Nebenprodukte, weshalb die eingesparte Primärenergie von Biodiesel aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in dieser Studie ebenfalls vergleichsweise gering ist.

In der Studie von Elsayed (2003) und Ademe (2002) wurde ein Allokationsverfahren und in den übrigen Studien ein Gutschriftenverfahren angewendet.

Trotz Anwendung eines Gutschriftenverfahrens wurde in der IFEU et al. Studie (2000), mit Bezugsraum Frankreich eine vergleichsweise geringe Menge an eingesparter Primärenergie ermittelt. Das ist mit dem generell hohen Betriebsmitteleinsatz zu erklären, wobei hier vor allem der hohe Stickstoffdüngeraufwand von 180 kg N/ha bedeutsam ist.

In der IFEU et al. Studie (2000) ist die Bedeutung des landwirtschaftlichen Referenzsystems sehr unterschiedlich. Während es mit Bezugsraum Deutschland ca. 7 % der gesamten Gutschrift ausmacht, beträgt der Anteil des landwirtschaftlichen Referenzsystems an der gesamten Gutschrift mit Bezug Schweiz ca. 32 %.

Bei der Ableitung der Bandbreite der eingesparten Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Dieselkraftstoff durch Biodiesel aus Raps ersetzt wird, wurden alle Studien in die Bandbreite eingeschlossen, in denen die bei der Biodieselproduktion anfallenden Nebenprodukte angerechnet wurden.

### Treibhauseffekt

Bezüglich der Treibhausgasemissionen ermittelten ebenfalls alle Autoren eine günstigere Bilanz für Biodiesel aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff.

Die höchsten Vorteile für Biodiesel aus Raps wurden in der Studie von Ademe (2002) ermittelt. Das hängt vor allem mit den vergleichsweise niedrig angesetzten N<sub>2</sub>O-Emissionen vom Feld zusammen. Denn während die meisten Autoren 1,25 % N je Stickstoffdünger-N anrechneten (nach IPCC-Guidelines), ging Ademe (2002) lediglich von 0,5 % N je Stickstoffdünger-N aus.

In der abgeleiteten Bandbreite sind die Ergebnisse aus allen aufgeführten Studien eingeschlossen. Eine Ausnahme stellen die Ergebnisse von Ademe (2002) dar, die aufgrund der besseren Vergleichbarkeit mit anderen Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse nicht in die abgeleitete Bandbreite einfließen.

- Landwirtschaft   □ Konversion   ■ Nebenprodukt
- gesamt biogen   ■ Vorkette fossil   ■ Nutzung fossil
- biogen - fossil

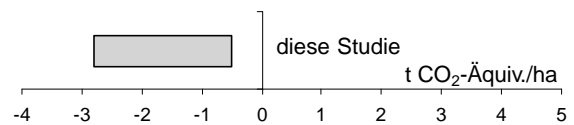
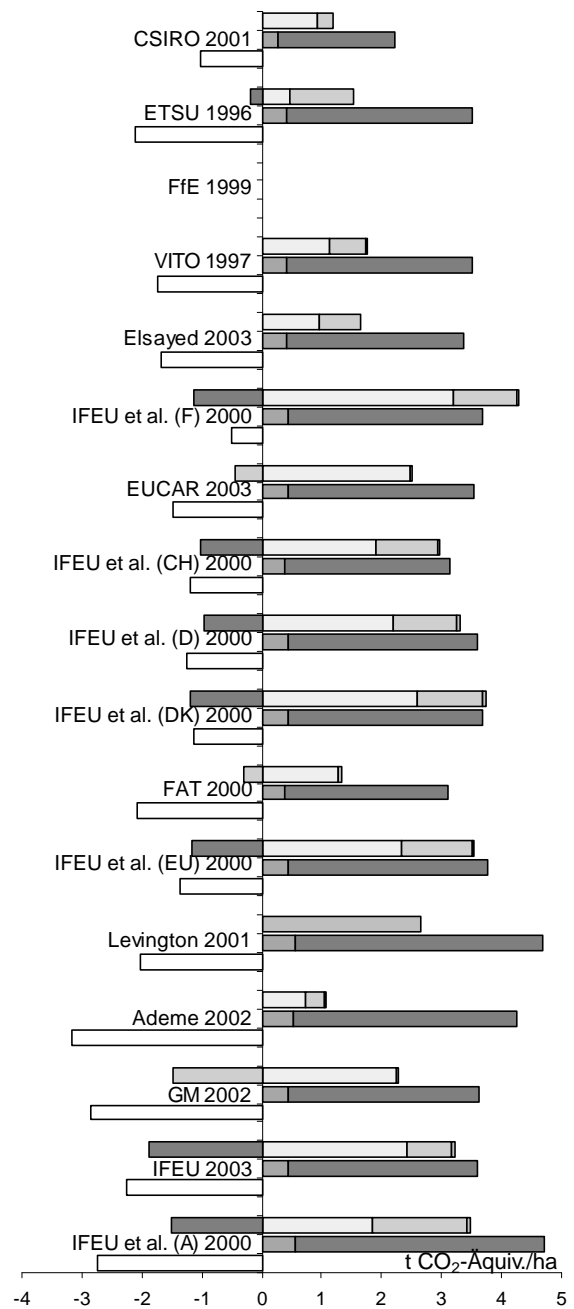
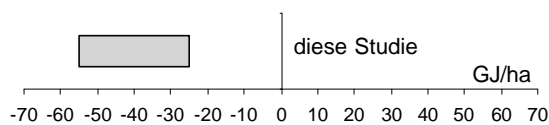
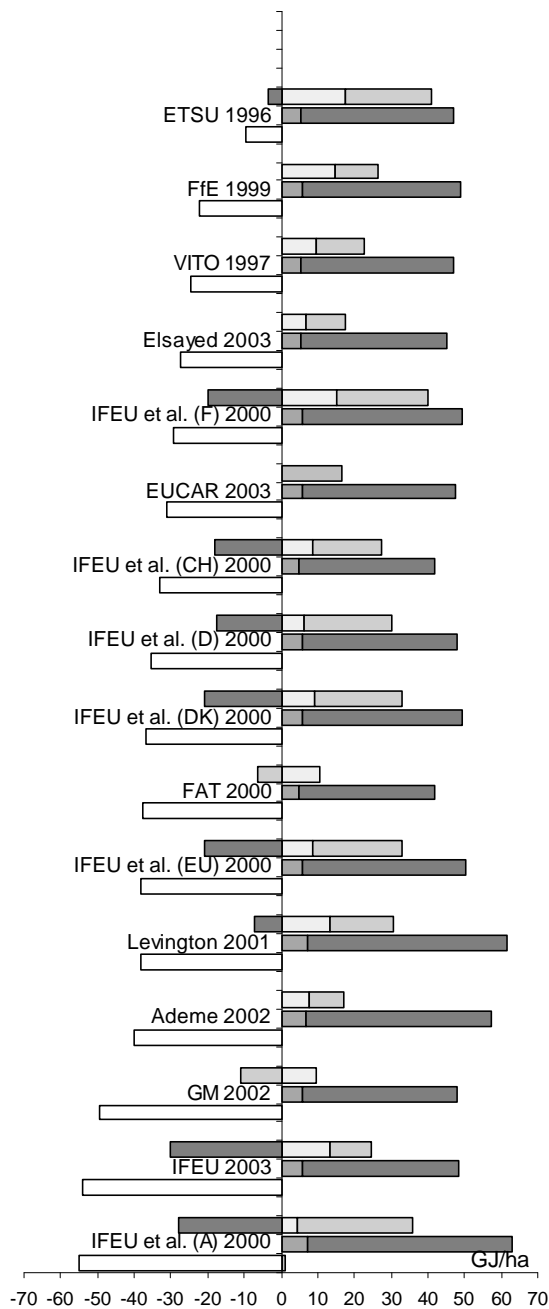


Abb. A-13: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

## **b) Biodiesel aus Sonnenblumen**

### **Energieaufwand/-einsparung**

Die Energiebilanz für Biodiesel aus Sonnenblumen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff fällt bei allen Autoren zugunsten des Biodiesels aus.

Die abgeleitete Bandbreite der eingesparten Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Dieselmotorkraftstoff durch Biodiesel aus Sonnenblumen ersetzt wird, schließt die Ergebnisse aus allen betrachteten Studien ein. Dabei ergibt sich die Schwankungsbreite vor allem aus der unterschiedlichen Bewertung der Nebenprodukte (Sonnenblumenextraktionsschrot und Glycerin) und der Annahme unterschiedlicher Erträge.

### **Treibhauseffekt**

Die Treibhausgasbilanz für Biodiesel aus Sonnenblumen fällt im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff ebenfalls bei allen Autoren zugunsten von Biodiesel aus.

Auch hier schließt die abgeleitete Bandbreite die Ergebnisse aus allen betrachteten Studien ein. Die Schwankungsbreite basiert ebenfalls in erster Linie auf der unterschiedlichen Bewertung der Nebenprodukte und der Annahme unterschiedlicher Erträge.

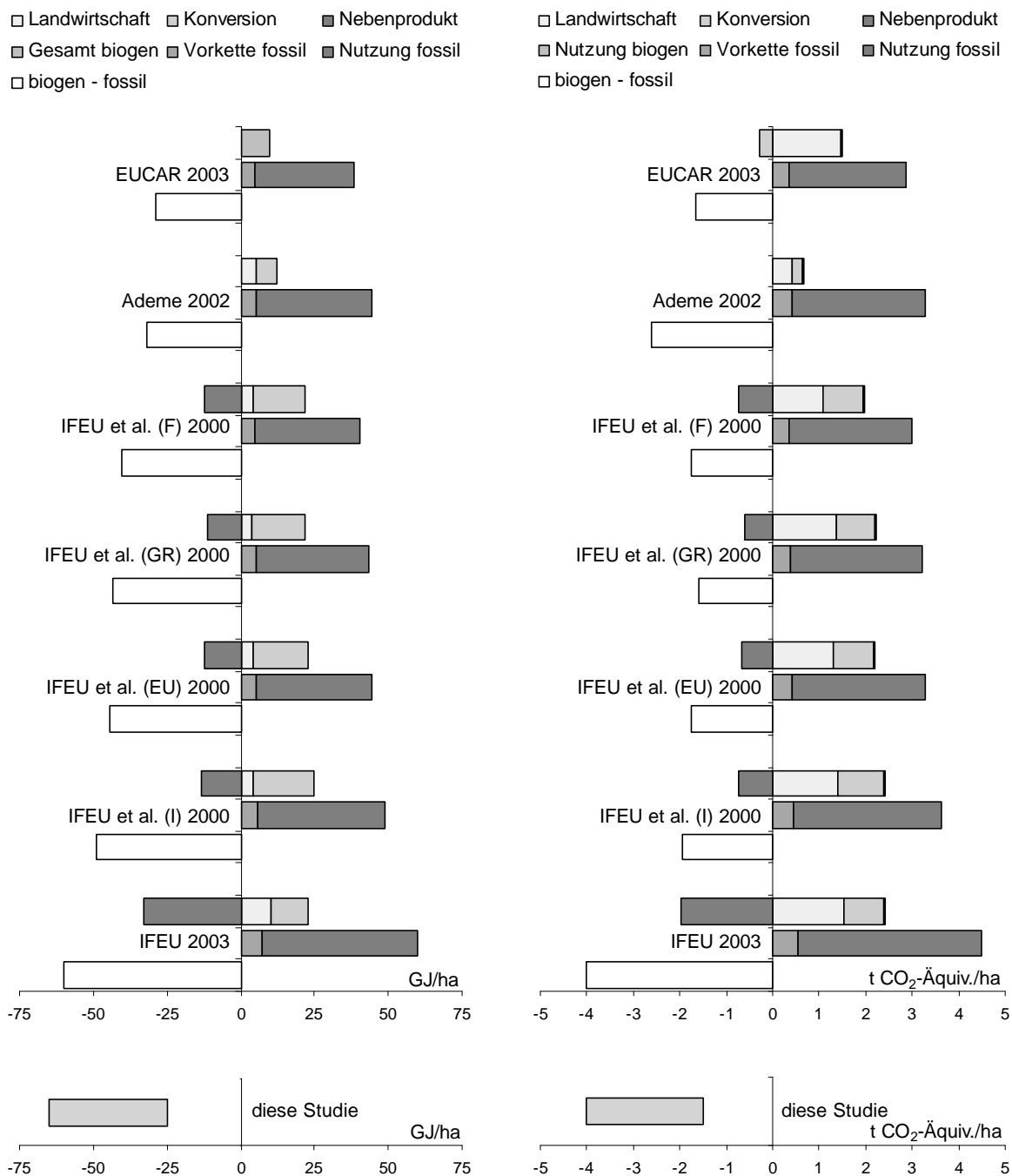


Abb. A-14: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Sonnenblumen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha\*a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha\*a.

## c) Biodiesel aus Sojabohnen

### Energieaufwand/-einsparung

Die Energiebilanz für Biodiesel aus Sojabohnen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff fällt bei den beiden betrachteten Studien zugunsten des Biodiesels aus.

Die von Levelton (2002) ermittelte Menge an eingesparter Primärenergie ist höher als die von NREL (1998) ermittelte Menge, da Levelton von einem höheren Sojabohnenertrag und einem höheren Biodieselertrag je t Sojabohnen ausging.

Die Unterschiede zwischen den ermittelten Werten von Levelton (2002) und NREL (1998) sind jedoch vor allem auf den unterschiedlichen Umgang mit den bei der Biodieselproduktion anfallenden Nebenprodukten zurückzuführen. NREL führte im Bereich der Landwirtschaft eine massenbezogene Allokation von Sojaöl (18 %) und Sojaschrot (82 %) und im Bereich der Konversion eine massenbezogene Allokation von Biodiesel (82 %), Seifengrundstoff (18 %) und Glycerin (0,06 %) durch. Levelton ermittelte dagegen eine Gutschrift für Sojaschrot und Glycerin.

Die abgeleitete Bandbreite der eingesparten Primärenergie beinhaltet die unterschiedlichen Annahmen und Verfahren zur Bewertung der Kuppelprodukte der beiden aufgeführten Studien.

### Treibhauseffekt

In den untersuchten Studien wurde gezeigt, dass Treibhausgasemissionen vermieden werden, wenn fossiler Dieselkraftstoff durch Biodiesel aus Sojabohnen ersetzt wird.

Die oben genannten Unterschiede zwischen der Studie von NREL (1998) und Levelton (2002) betreffen ebenso die Treibhausgasemissionen. CSIRO (2001) wandte wie Levelton das Gutschriftenverfahren an. Die Gutschriften wurden allerdings nicht separat ausgewiesen, sondern von den Emissionen der entsprechenden Bereiche subtrahiert.

Dass die eingesparte Primärenergie bei CSIRO (2001) geringer ist als die der anderen Studien, liegt vor allem an dem um nahezu 50 % geringeren Biodieselertrag je Hektar.

Die abgeleitete Bandbreite schließt die Ergebnisse aus allen betrachteten Studien ein.



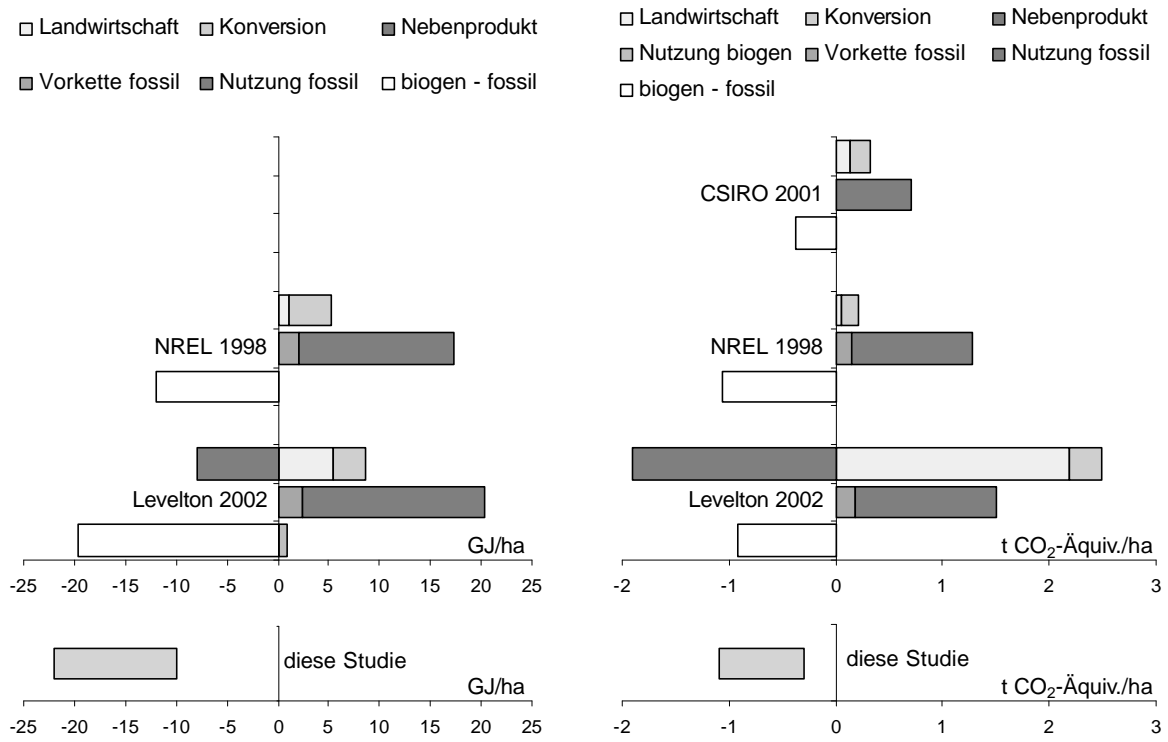


Abb. A-15: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Sojabohnen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha\*a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äqui-valente/ha\*a.

## **d) Biodiesel aus Canola**

### **Energiebedarf**

Die Energiebilanz für Biodiesel aus Canola im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff fällt zugunsten des Biodiesels aus.

Levelton (2002) wandte das Gutschriftenverfahren für die Nebenprodukte Canolaschrot und Glycerin an.

Die Ableitung der Bandbreite der eingesparten Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Dieselkraftstoff durch Biodiesel aus Canola ersetzt wird, basiert auf den Werten von Levelton, wobei auch höhere Erträge in die Abschätzung eingeflossen sind. Levelton veranschlagte einen Canolaertrag von 1,3 t/ha.

### **Treibhauseffekt**

Treibhausgasemissionen werden vermieden, wenn fossiler Dieselkraftstoff durch Biodiesel aus Canola ersetzt wird.

CSIRO (2001) berechnete wie Levelton (2002) Gutschriften für Canolaschrot und Glycerin. Die Gutschriften wurden in der Studie von CSIRO allerdings nicht separat ausgewiesen, sondern von den Emissionen der Bereiche Landwirtschaft und Konversion subtrahiert.

Bei der Ableitung der Bandbreite für die vermiedenen Treibhausgasemissionen wurde von den beiden betrachteten Studien ausgegangen. Auch hier gingen höhere Canolaerträge in die Abschätzung ein.

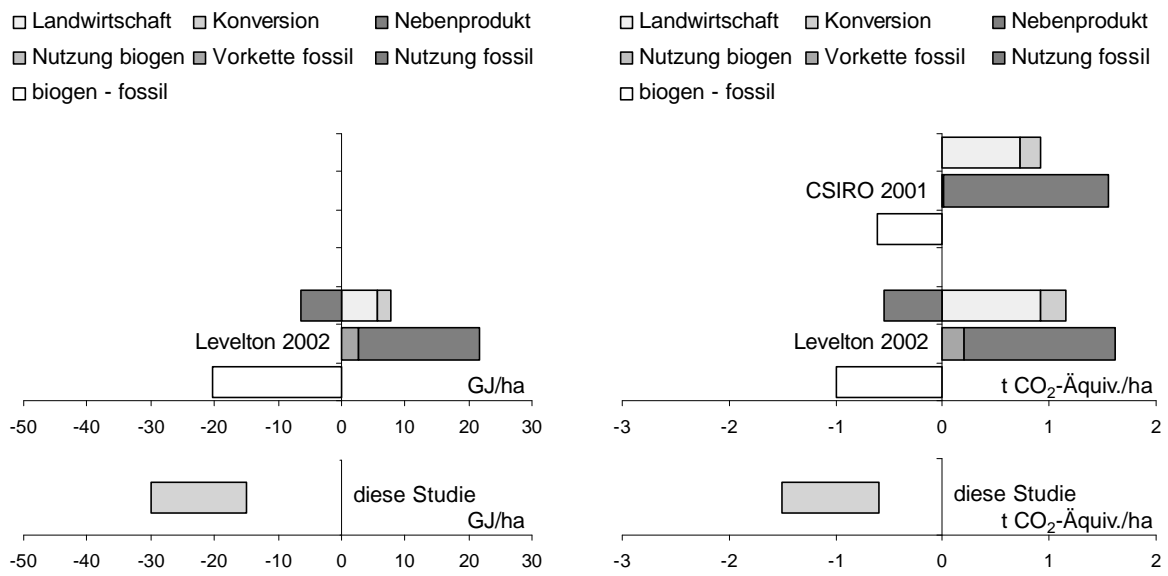


Abb. A-16: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Canola im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

### **e) Biodiesel aus Kokosnüssen**

Bezüglich dem erschöpflichen Primärenergieaufwand und den Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Biodiesel aus Kokosnüssen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff liegt nur eine Publikation vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

#### **Energieaufwand/-einsparung**

Die Energiebilanz für Biodiesel aus Kokosnüssen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff fällt zugunsten des Biodiesels aus.

Für den Bereich der landwirtschaftlichen Produktion von Kokosnüssen wird in der Studie von Tan (2002) unterstellt, dass keine Energie aufgewendet werden muss, da kein Maschinen- oder Betriebsmitteleinsatz erfolgt, sondern ausschließlich menschliche und tierische Arbeitskraft eingesetzt werden.

Als Nebenprodukte werden Coprakuchen und Glycerin berücksichtigt, wobei eine massenbezogene Allokation zwischen Biodiesel (55,3 %) und den Nebenprodukten vorgenommen wurde.

Bezüglich des Konversionsprozesses wurde in der Studie von Tan (2002) davon ausgegangen, dass so viele Kokosnussreststoffe eingesetzt werden, dass die Wärme und der Strom für die Konversion daraus produziert werden kann. Veranschlagt wurden jedoch noch 2,86 MJ/kg für fossiles Methanol.

Die abgeleitete Bandbreite der eingesparten Primärenergie pro Hektar ergibt sich aus der unterschiedlichen Nutzung der Kokosnussreststoffe. So kann durch die Nutzung der Kokosnussreststoffe weniger oder mehr Energie erzeugt werden, als für die Konversion benötigt wird. Darüber hinaus wurde bei der Ableitung der Bandbreite berücksichtigt, dass die landwirtschaftliche Produktion der Kokosnüsse auch mit Maschinen und dem Einsatz von Betriebsmitteln erfolgen kann.

#### **Treibhauseffekt**

Aufgrund der geringen Aufwendungen im Bereich der Landwirtschaft und der Konversion werden Treibhausgasemissionen vermieden, wenn fossiler Dieselmotorkraftstoff durch Biodiesel aus Kokosnüssen ersetzt wird.

In der Studie von Tan (2002) wurden keine CO<sub>2</sub>-Äquivalente, sondern nur CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet. Da keine stickstoffhaltigen Düngemittel eingesetzt werden, hat die Nichtberücksichtigung der N<sub>2</sub>O-Emissionen kaum Auswirkungen auf das Ergebnis. Und die Nichtberücksichtigung der CH<sub>4</sub>-Emissionen ist bei der Bereitstellung von Biokraftstoffen in der Regel nicht ergebnisrelevant.

Bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden in der Studie von Tan (2002) unterschiedliche Szenarien für die Nutzung der Kokosnussreststoffe ermittelt.

Bei der Ableitung der Bandbreite für die vermiedenen Treibhausgasemissionen wurden die gleichen Faktoren berücksichtigt, die auch zur Ableitung der Bandbreite der eingesparten Primärenergie berücksichtigt wurden.

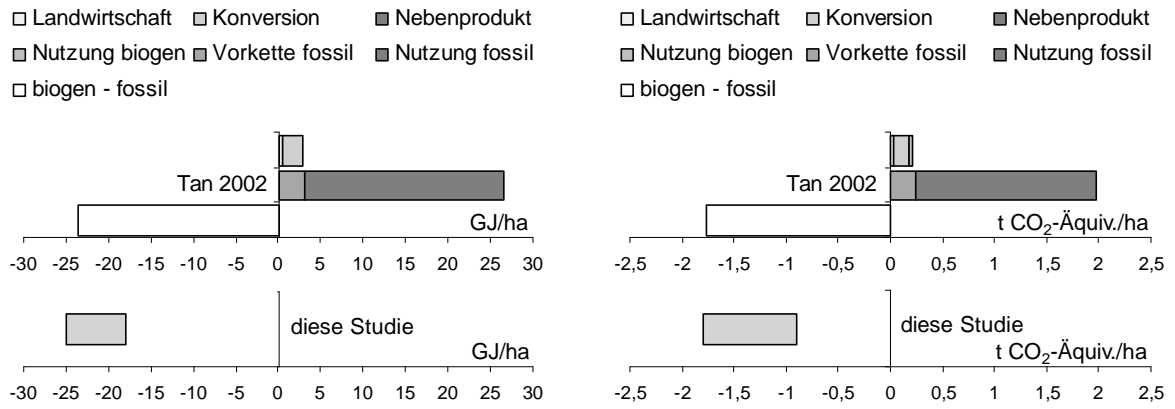


Abb. A-17: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Kokosnüssen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha\*a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha\*a.

#### **A 2.1.4 Pflanzenöl – Gegenüberstellung von Pflanzenöl aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen**

Wie bei der Gegenüberstellung von Biodiesel aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen wirkt sich auch bei der Gegenüberstellung von Pflanzenöl aus Sonnenblumen und Raps der höhere Ölertrag von Sonnenblumen sowie der geringere Stickstoffeinsatz beim Anbau der Sonnenblumen auf die eingesparte Primärenergie und die eingesparten Treibhausgasemissionen aus. Dabei führen diese beiden Unterschiede dazu, dass die Vorteile von Pflanzenöl aus Sonnenblumen bei Annahme gleicher Systemgrenzen höher sind als die von Pflanzenöl aus Raps. Durch den geringeren Stickstoffeinsatz beim Sonnenblumenanbau treten zudem auch geringere N<sub>2</sub>O-Emissionen auf, wodurch sich Vorteile der Treibhausgasbilanz ergeben.

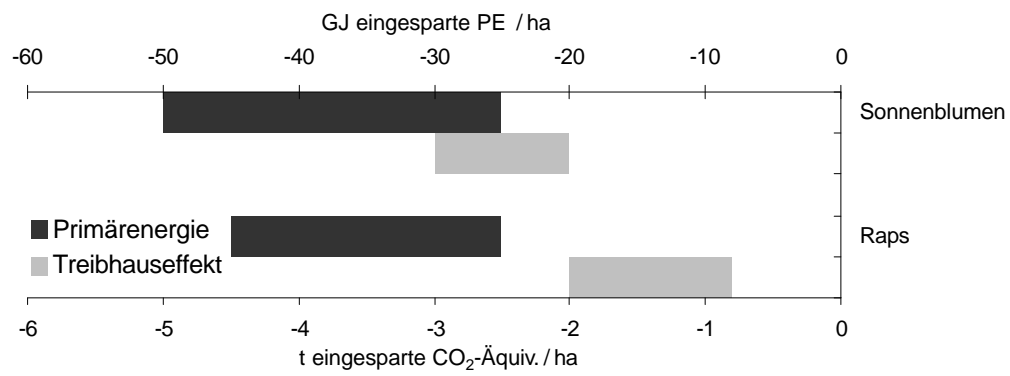


Abb. A-18: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Pflanzenöl aus unterschiedlichen Anbaubiomasserohstoffen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / ha \* a. Negative Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe.

## a) Pflanzenöl aus Raps

### Energieaufwand/-einsparung

Die Energiebilanz für Pflanzenöl aus Raps fällt im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff bei allen Autoren zugunsten des Pflanzenöls aus.

Die betrachteten Studien unterscheiden sich vor allem im methodischen Umgang mit den Nebenprodukten. Für das nach der Pressung und Extraktion anfallende Rapsextraktions-schrot wurde in der IFEU-Studie (2001) eine Gutschrift berechnet, während in der Studie von Elsayed (2003) und Ademe (2002) ein Allokationsverfahren angewendet wurde. In der FfE-Studie (1999) erfolgte eine Allokation zu 100 % des Zielproduktes Pflanzenöl.

In der FfE-Studie (1999) war die ermittelte Menge an eingesparter Primärenergie am geringsten, was vor allem dadurch begründet werden kann, dass hier keine Gutschrift oder Allokation für die Nebenprodukte ermittelt wurde.

Bei der Ableitung der Bandbreite der eingesparten Primärenergie pro Hektar, wenn fossiler Dieselkraftstoff durch Pflanzenöl aus Raps ersetzt wird, wurde sich an den Studien orientiert, die die anfallenden Nebenprodukte berücksichtigten. Die Schwankungsbreite ergibt sich vor allem durch die Annahme höherer bzw. niedrigerer Rapserträge und unterschiedlicher Annahmen bezüglich des Betriebsmitteleinsatzes (vgl. auch Biodiesel aus Raps).

### Treibhauseffekt

In den betrachteten Studien fällt die Treibhausgasbilanz für Pflanzenöl aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff zugunsten von Pflanzenöl aus.

Wie bereits in der Analyse von Biodiesel aus Raps, wurden die höchsten Vorteile auch für Pflanzenöl aus Raps in der Studie von Ademe (2002) ermittelt. Hierfür sind vor allem die vergleichsweise niedrig angesetzten  $N_2O$ -Emissionen vom Feld verantwortlich (0,5 % N je Stickstoffdünger-N, während 1,25 % N je Stickstoffdünger-N nach IPCC-Guidelines veranschlagt werden).

Bei der Ableitung der Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen wurden die gleichen Annahmen zugrunde gelegt, wie bei der eingesparten Primärenergie. Die vermiedenen Treibhausgasemissionen, die sich aus der Studie von Ademe (2002) ergeben, fließen aufgrund der besseren Vergleichbarkeit mit anderen Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse, nicht in die abgeleitete Bandbreite ein.



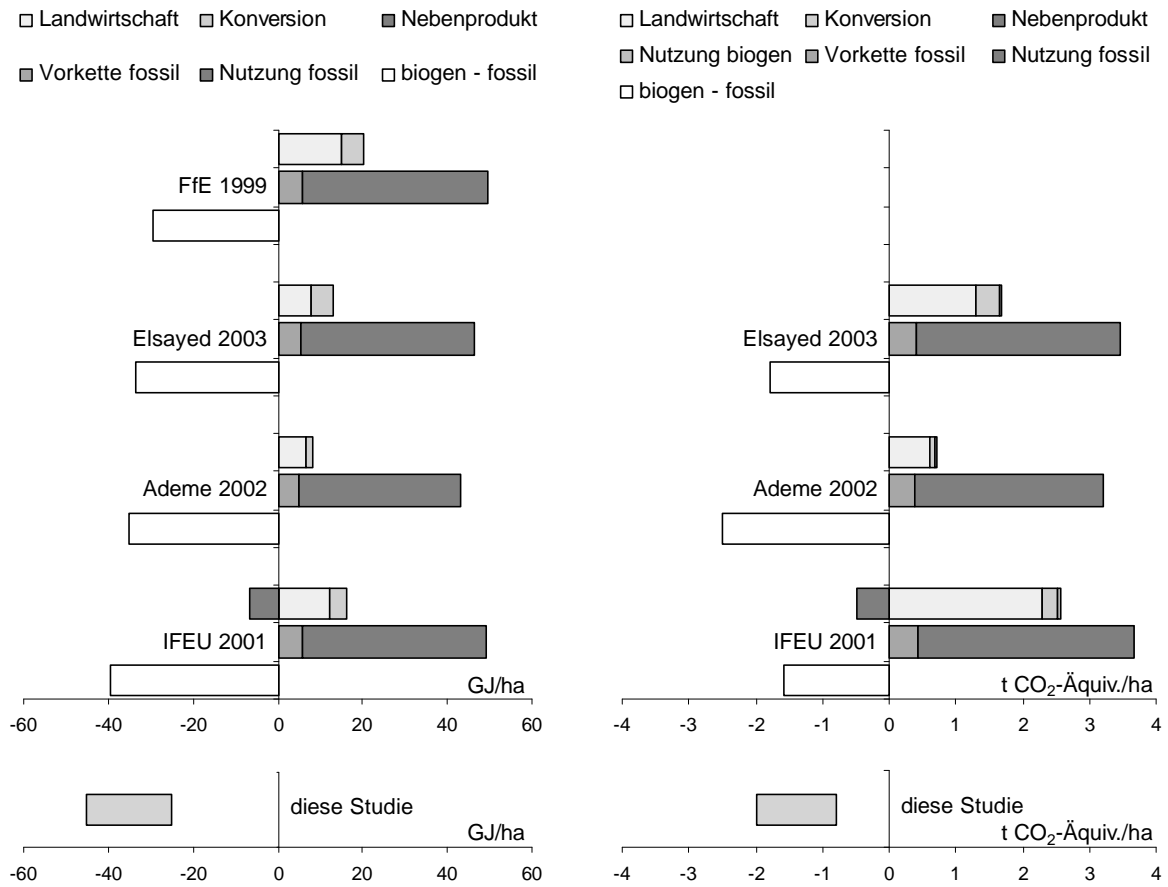


Abb. A-19: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Pflanzenöl aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

**b) Pflanzenöl aus Sonnenblumen**

Zu dem erschöpflichen Primärenergieaufwand und den Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Pflanzenöl aus Sonnenblumen im Vergleich zu fossilem Dieselmotortreibstoff liegt nur eine Publikation vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

**Energieaufwand/-einsparung**

In der Studie von Ademe (2002) fällt die Energiebilanz für Pflanzenöl aus Sonnenblumen im Vergleich zu fossilem Dieselmotortreibstoff zugunsten des Pflanzenöls aus.

Die abgeleitete Bandbreite der eingesparten Primärenergie orientiert sich an der Studie von Ademe (2002). Die Schwankungsbreite ergibt sich vor allem aus der Annahme unterschiedlicher Erträge und in Analogie zu Biodiesel aus Sonnenblumen.

**Treibhauseffekt**

Die Treibhausgasbilanz für Pflanzenöl aus Sonnenblumen fällt im Vergleich zu fossilem Dieselmotortreibstoff in der Ademe-Studie (2002) ebenfalls zugunsten von Pflanzenöl aus.

Die abgeleitete Bandbreite orientiert sich auch hier an der Studie von Ademe (2002), wobei auch hier Analogieschlüsse zu Biodiesel aus Sonnenblumen gezogen wurden.

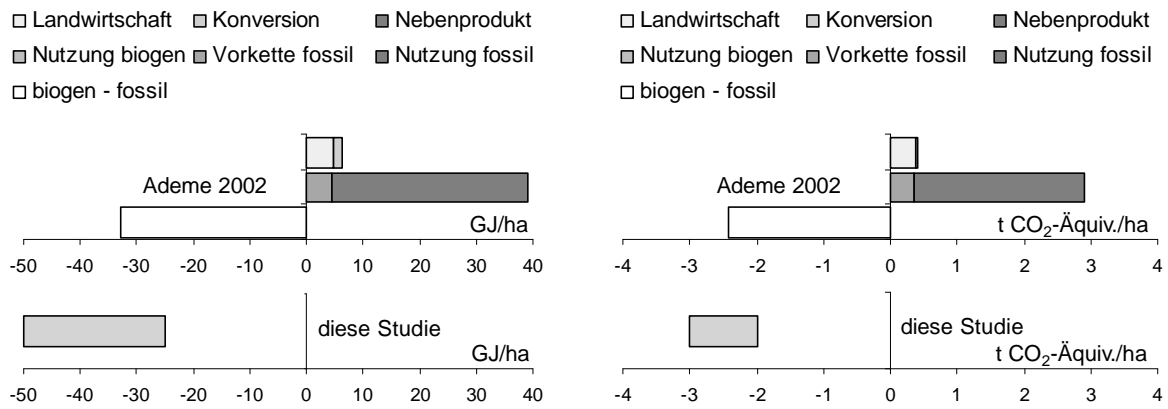


Abb. A-20: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Pflanzenöl aus Sonnenblumen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

## **A 2.1.5 Biomethanol**

### **a) Biomethanol aus Lignocellulose**

#### **Energieaufwand/-einsparung**

Die Energiebilanz für Biomethanol aus Lignocellulose fällt im Vergleich zu Ottokraftstoff zugunsten des Biomethanols aus.

Die ermittelten Vorteile sind vor allem vom Biomethanolertrag pro ha abhängig, der je nach betrachtetem lignocellulosehaltigen Rohstoff variiert. So liegt der Ertrag von Biomethanol aus Miscanthus bei ca. 9.000 l/ha (FfE 1999), während bei Waldrestholz ein Ertrag von ca. 6.000 l/ha ermittelt wurde (ETSU 1996).

Bei der Ableitung der Bandbreite der eingesparten Primärenergie wurden unterschiedliche Erträge der lignocellulosehaltigen Rohstoffe berücksichtigt.

#### **Treibhauseffekt**

Die Treibhausgasbilanz für Biomethanol aus Lignocellulose fällt im Vergleich zu Ottokraftstoff ebenfalls zugunsten von Biomethanol aus.

Bei der Ableitung der Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen, wurden die gleichen Annahmen zugrunde gelegt, wie bei der eingesparten Primärenergie.

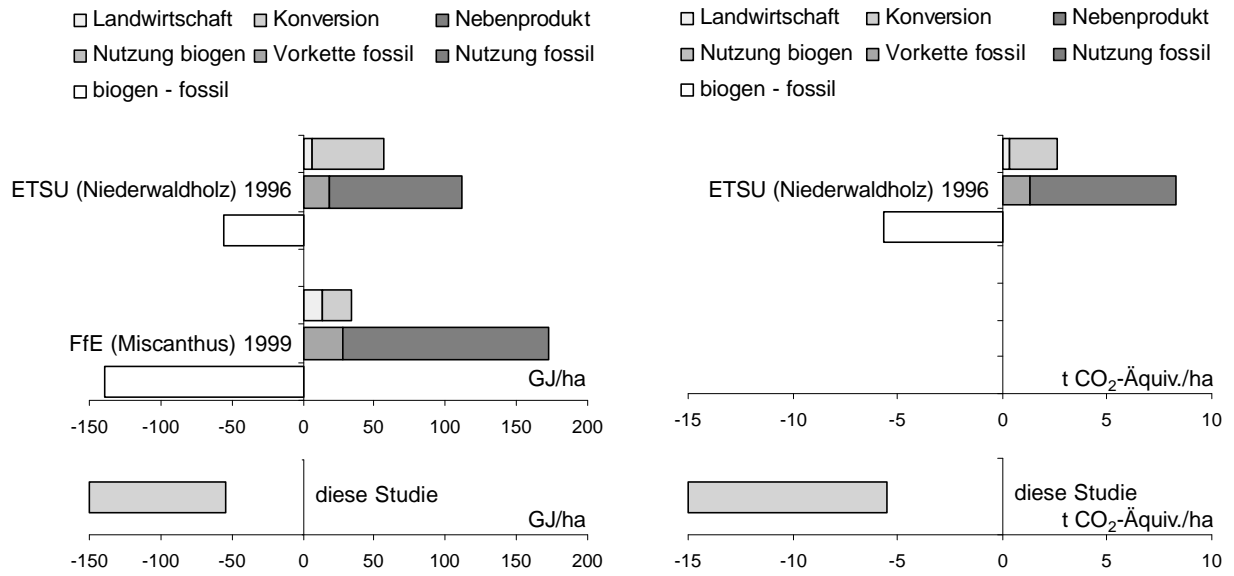


Abb. A-21: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biomethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie/ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ha \* a.

## **A 2.1.6 Biogas**

### **a) Biogas aus (Ligno)-Cellulose**

Zu dem erschöpflichen Primärenergieaufwand und den Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Biogas aus Anbaubiomasse im Vergleich zu Ottokraftstoff liegt nur eine Publikation vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

#### **Energieaufwand/-einsparung**

In der Studie von Börjesson (2004) fällt die Energiebilanz für Biogas aus Klee gras im Vergleich zu Ottokraftstoff zugunsten von Biogas aus.

Die abgeleitete Bandbreite der eingesparten Primärenergie für Biogas aus Anbaubiomasse orientiert sich an der Studie von Börjesson (2004) und an der abgeleiteten Bandbreite von Biogas aus Reststoffen (A 2.3.7). Im Vergleich zu Biogas aus Reststoffen, ist der Aufwand für den Anbau der Biomasse bei Biogas aus Anbaubiomasse höher. Hinzu kommt eine größere Schwankungsbreite aufgrund der Variabilität der Erträge unterschiedlicher Rohstoffe.

#### **Treibhauseffekt**

Die Treibhausgasbilanz für Biogas aus Anbaubiomasse fällt im Vergleich zu Ottokraftstoff ebenfalls zugunsten von Pflanzenöl aus.

Auch hier orientiert sich die abgeleitete Bandbreite an der Studie von Börjesson (2004), wobei auch hier Analogieschlüsse zu der abgeleiteten Bandbreite von Biogas aus Reststoffen gezogen wurden.

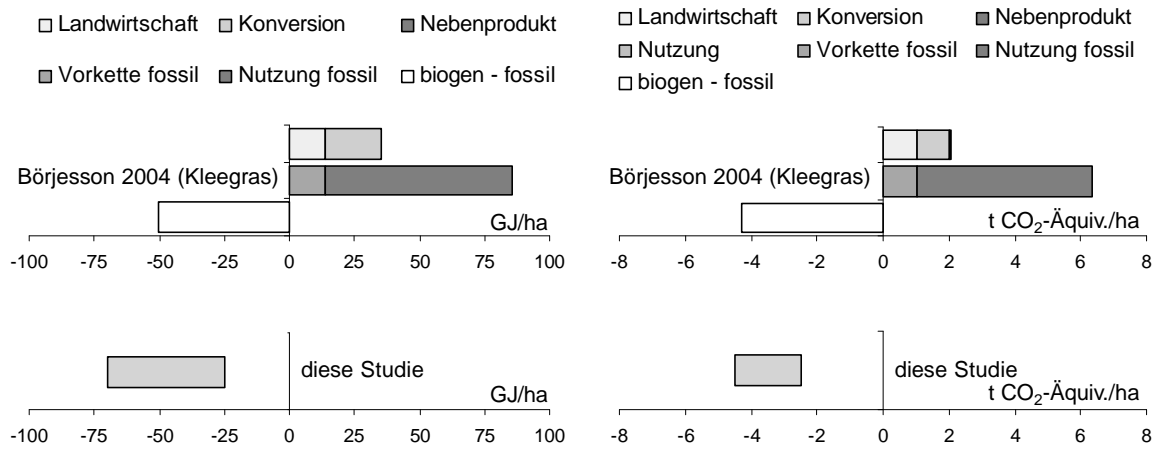


Abb. A-22: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biogas aus (Ligno)-Cellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff in GJ eingesparte Primärenergie / ha \* a bzw. in t eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / ha \* a.

## A 2.2 Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse (je MJ Kraftstoffinhalt)

Für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse wurden neben dem Flächenbezug ebenfalls Bandbreiten mit dem Bezug je MJ Kraftstoffinhalt abgeleitet. Hierbei fällt die Schwankungsbreite geringer aus, da der Variabilität der Biomasseerträge eine geringere Bedeutung zukommt. Da ansonsten bei der Ableitung der Bandbreiten die gleichen Gesichtspunkte berücksichtigt wurden, die bereits im vorherigen Kapitel beschrieben sind, wird in diesem Kapitel auf eine Beschreibung verzichtet.

### A 2.2.1 Bioethanol

#### a) Bioethanol aus Zuckerrohr

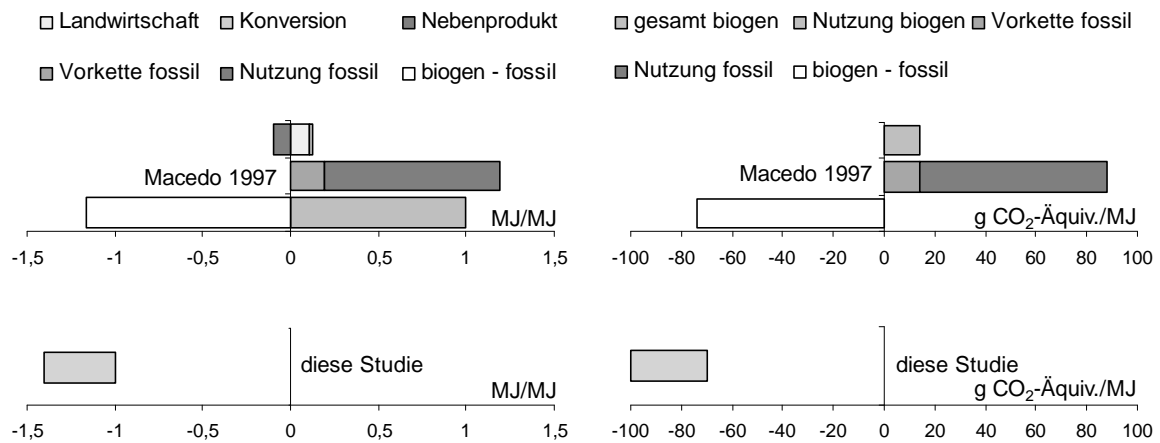


Abb. A-23: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Zuckerrohr im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt.



**b) Bioethanol aus Mais**

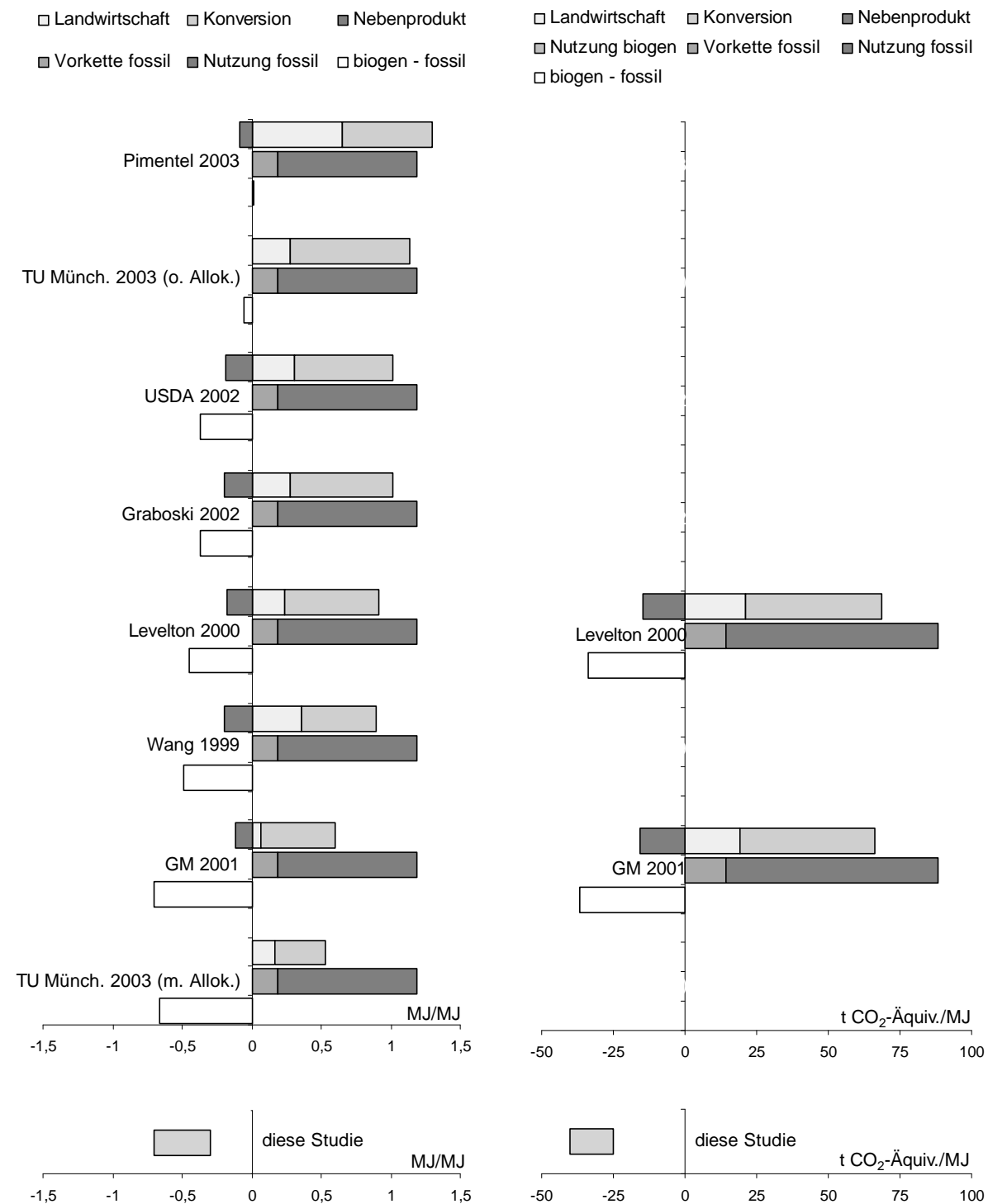


Abb. A-24: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Mais im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**c) Bioethanol aus Weizen**

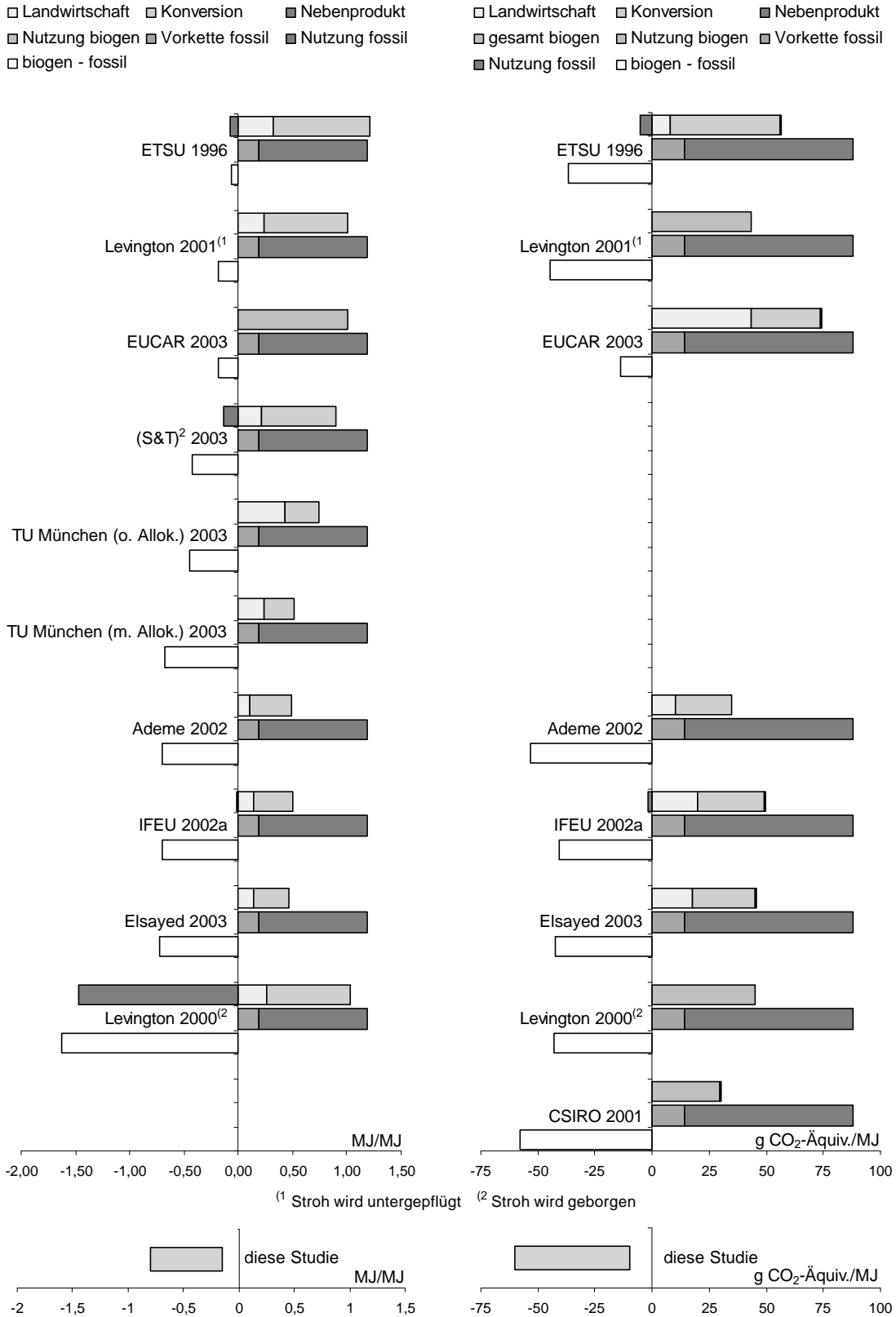


Abb. A-25: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Weizen im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**d) Bioethanol aus Zuckerrüben**

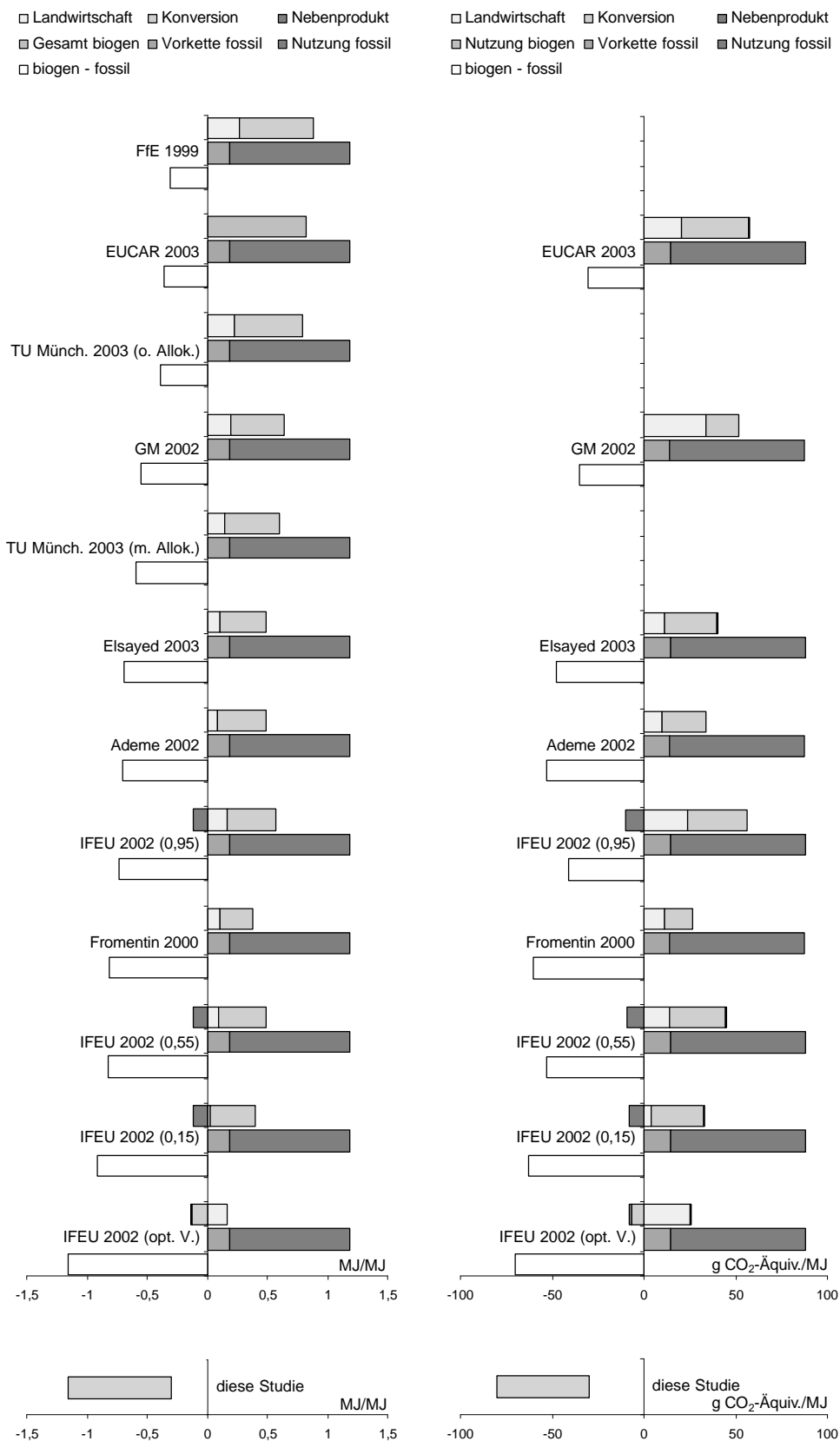


Abb. A–26: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Zuckerrüben im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**e) Bioethanol aus Lignocellulose**

Landwirtschaft 
  Konversion 
  Nebenprodukt  
 gesamt biogen 
  Nutzung biogen 
  Vorkette fossil  
 Nutzung fossil 
  biogen - fossil

Landwirtschaft 
  Konversion 
  Nebenprodukt  
 Gesamt biogen 
  Nutzung biogen 
  Vorkette fossil  
 Nutzung fossil 
  biogen - fossil

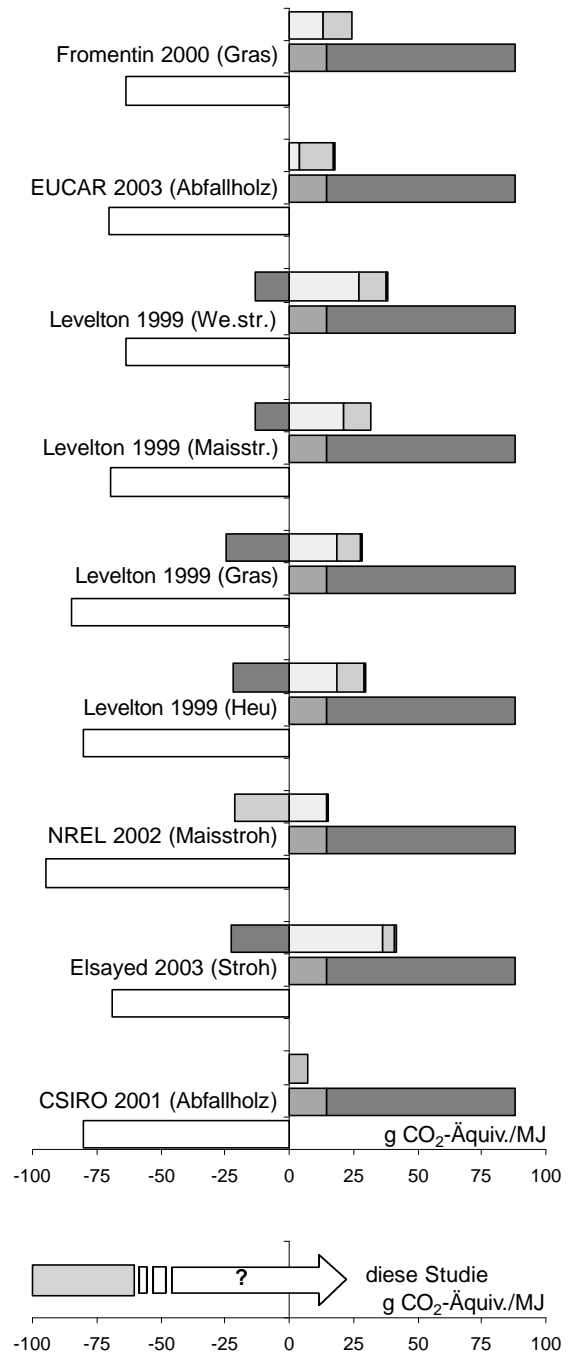
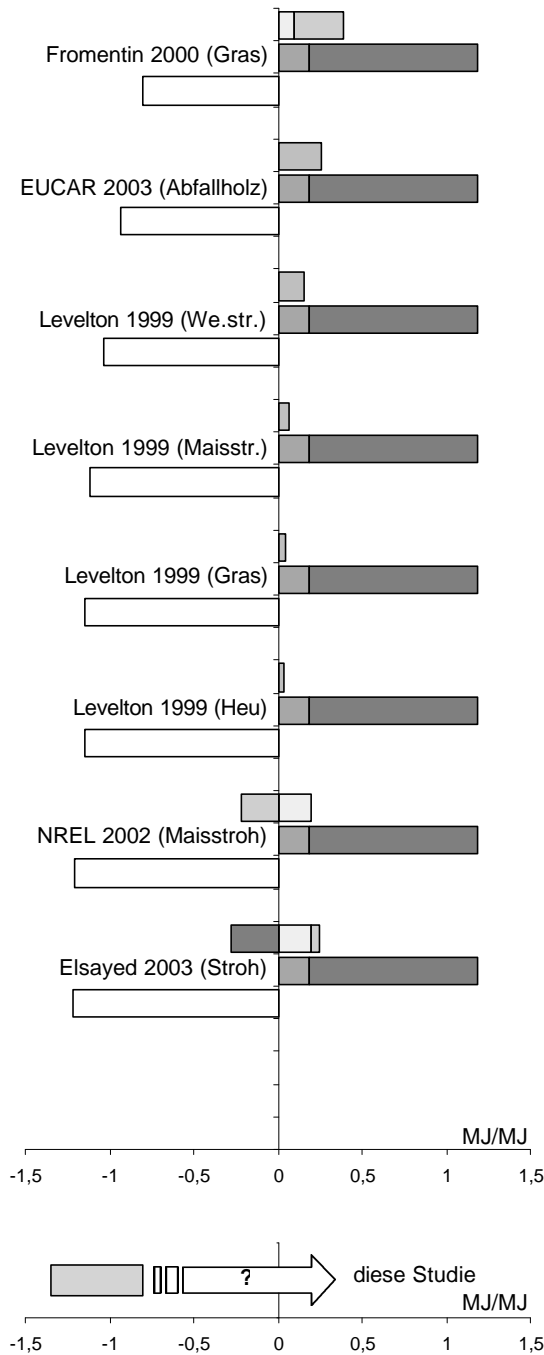


Abb. A-27: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**f) Bioethanol aus Kartoffeln**

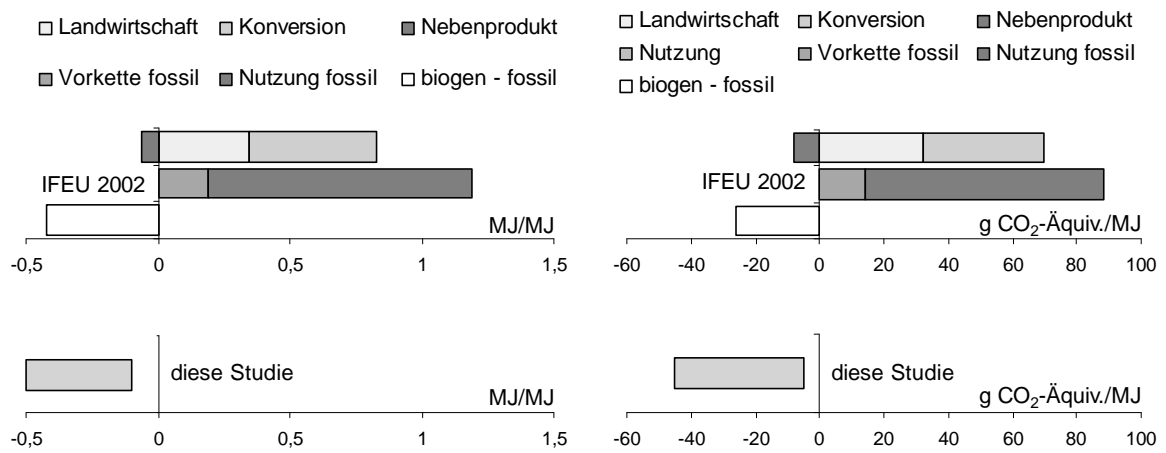


Abb. A–28: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Kartoffeln im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ.

## A 2.2.2 ETBE

### a) ETBE aus Weizen

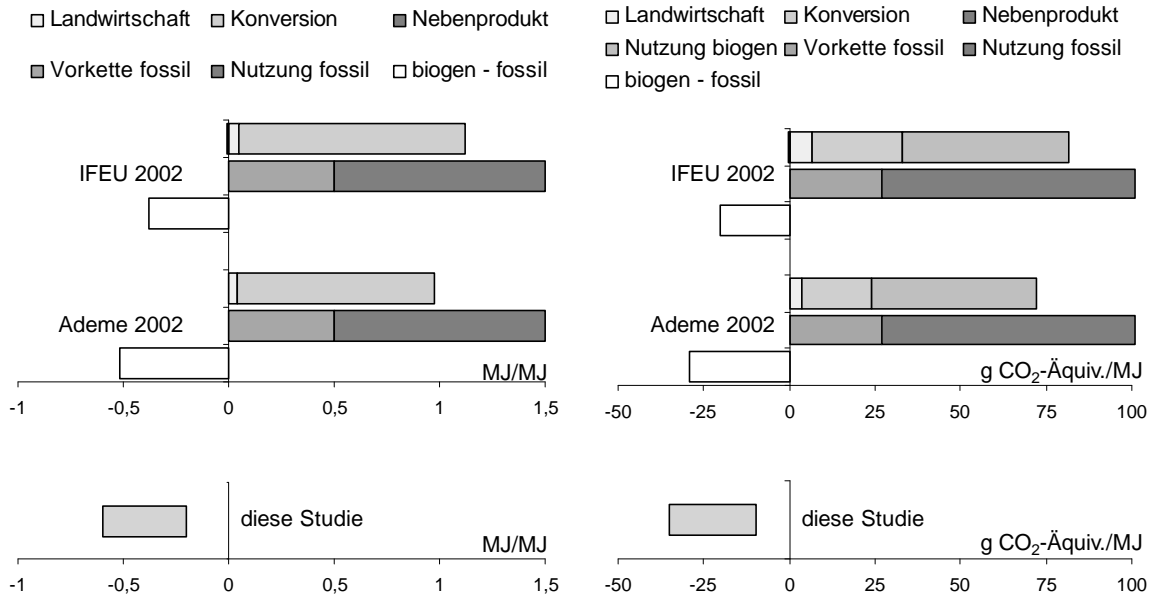


Abb. A–29: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus Weizen im Vergleich zu fossilem MTBE in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**b) ETBE aus Zuckerrüben**

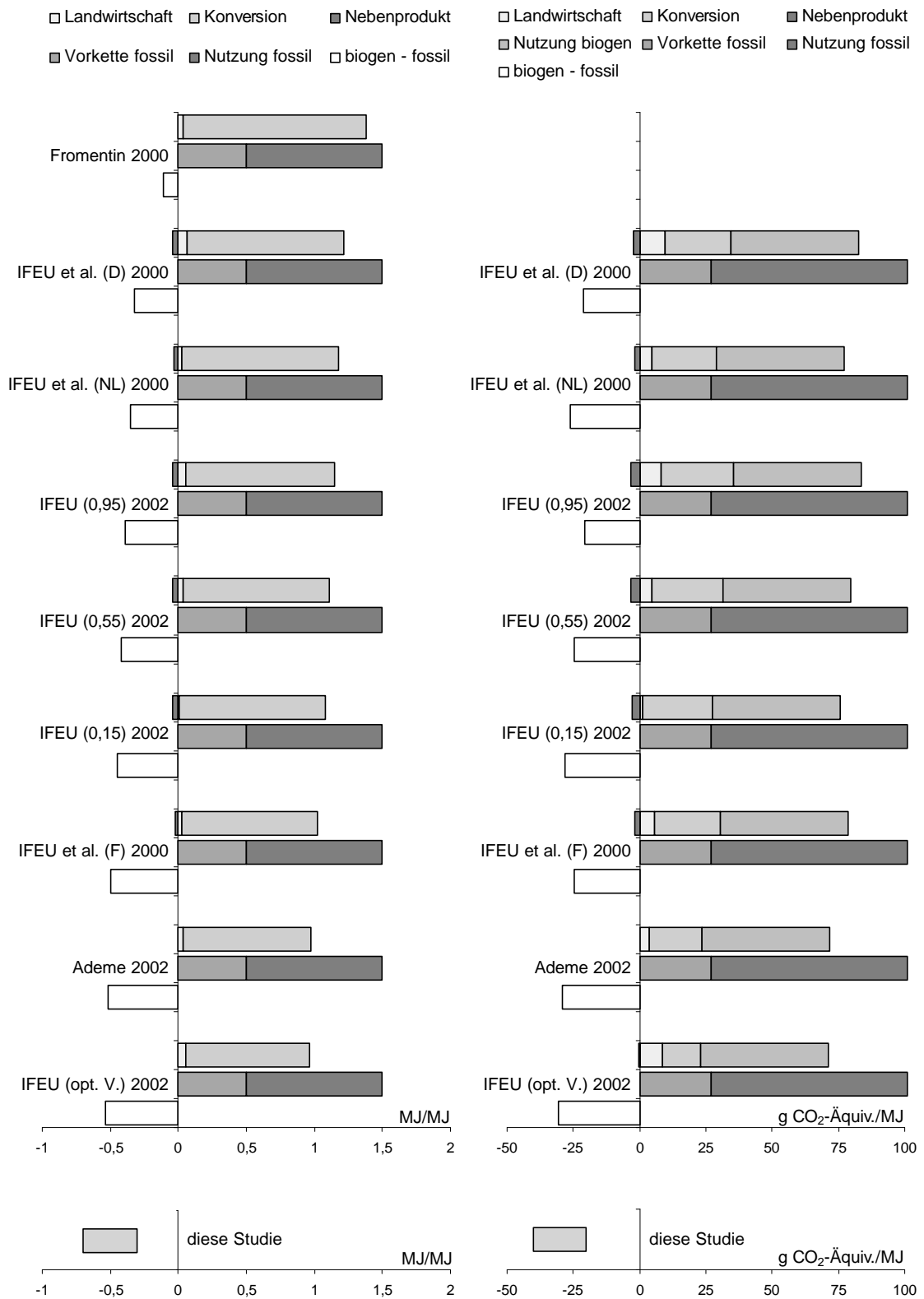


Abb. A-30: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus Zuckerrüben im Vergleich zu fossilem MTBE in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**c) ETBE aus Kartoffeln**

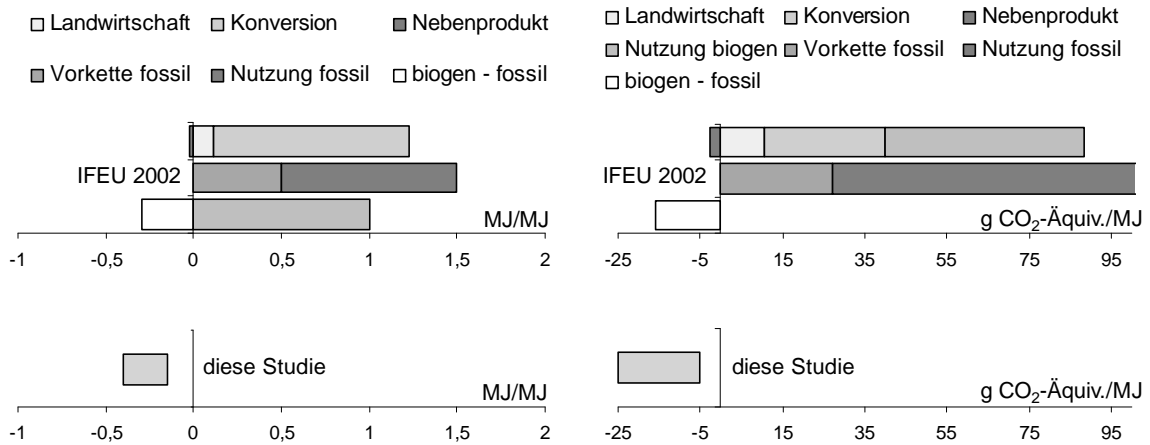


Abb. A–31: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus Kartoffeln im Vergleich zu fossilem MTBE in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.



### A 2.2.2 Biodiesel

#### a) Biodiesel aus Raps

- Landwirtschaft □ Konversion ■ Nebenprodukt
- gesamt biogen ■ Vorkette fossil ■ Nutzung fossil
- biogen - fossil

- Landwirtschaft □ Konversion ■ Nebenprodukt
- gesamt biogen ■ Nutzung biogen ■ Vorkette fossil
- Nutzung fossil □ biogen - fossil

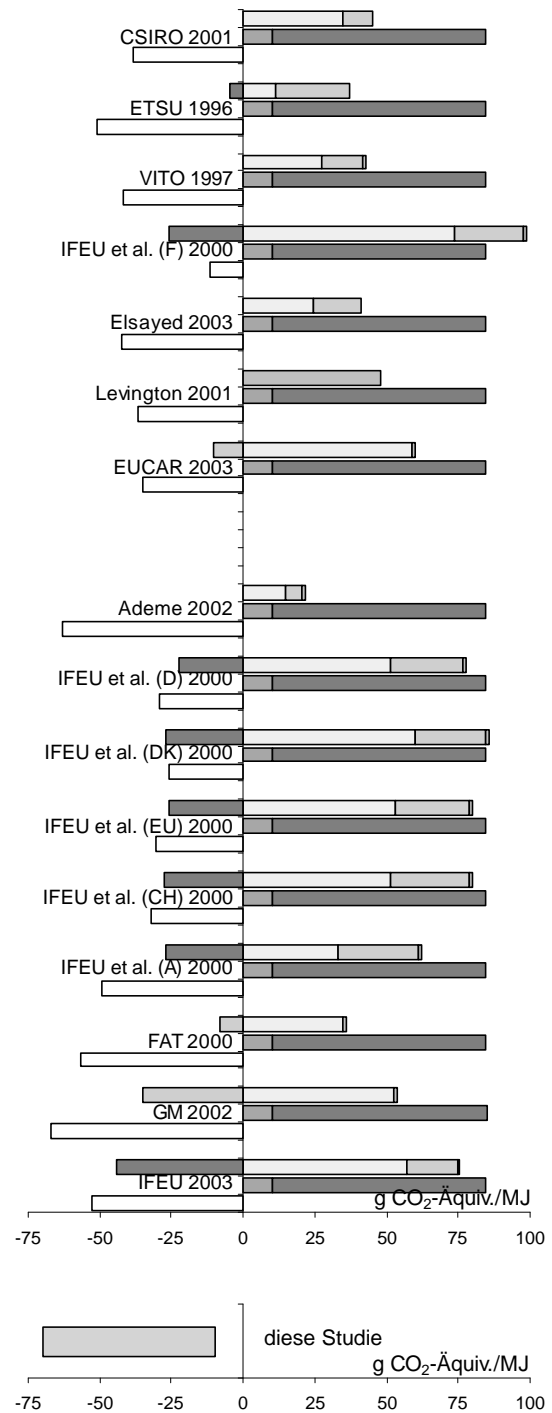
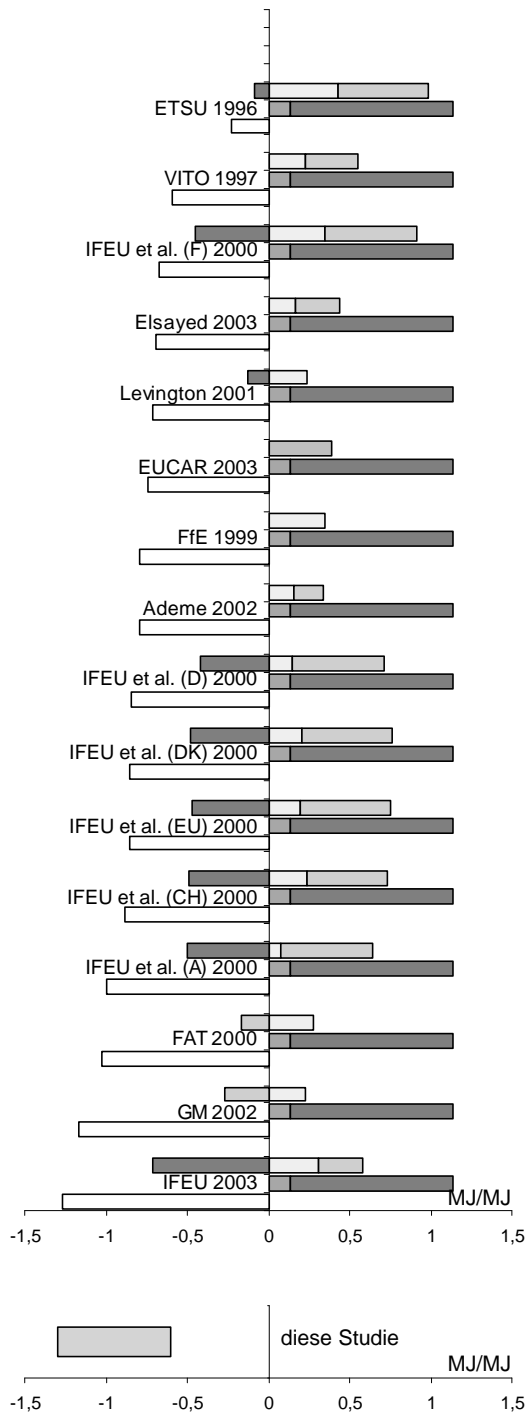


Abb. A-32: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**b) Biodiesel aus Sonnenblumen**

Landwirtschaft 
  Konversion 
  Nebenprodukt  
 Gesamt biogen 
  Vorkette fossil 
  Nutzung fossil  
 biogen - fossil

Landwirtschaft 
  Konversion 
  Nebenprodukt  
 Nutzung biogen 
  Vorkette fossil 
  Nutzung fossil  
 biogen - fossil

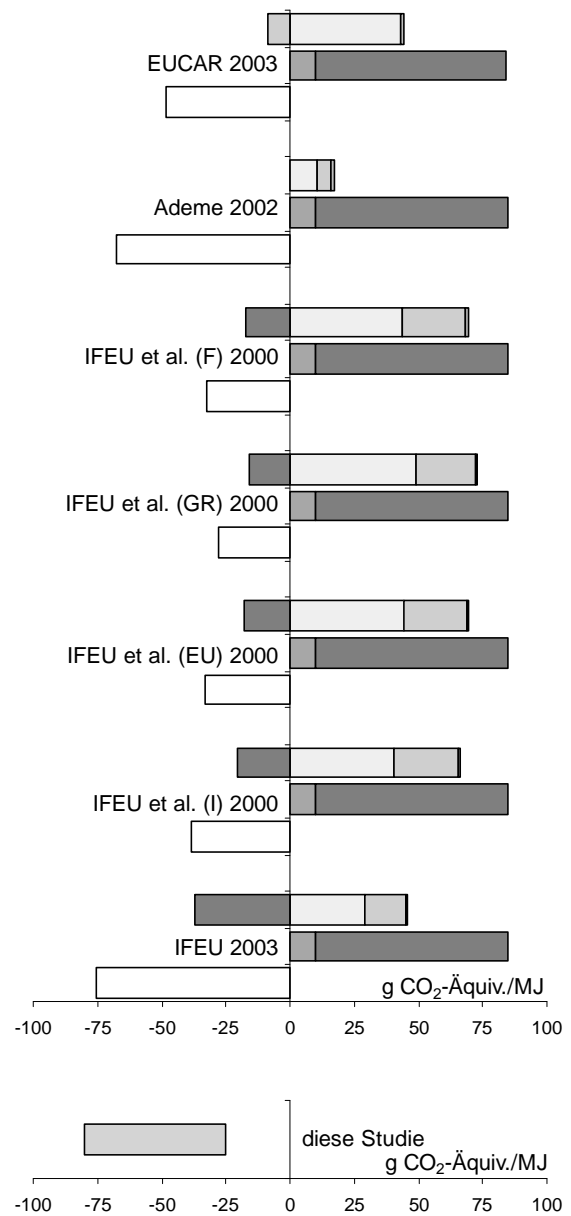
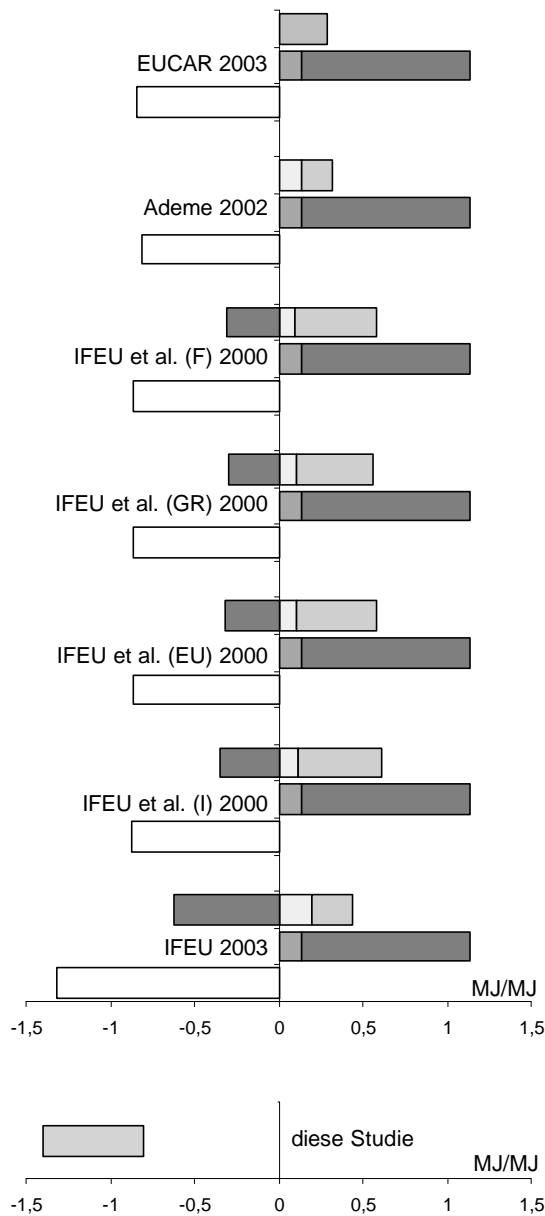


Abb. A-33: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Sonnenblumen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**c) Biodiesel aus Sojabohnen**

- Landwirtschaft   □ Konversion   ■ Nebenprodukt
- Nutzung biogen   □ Vorkette fossil   ■ Nutzung fossil
- biogen - fossil

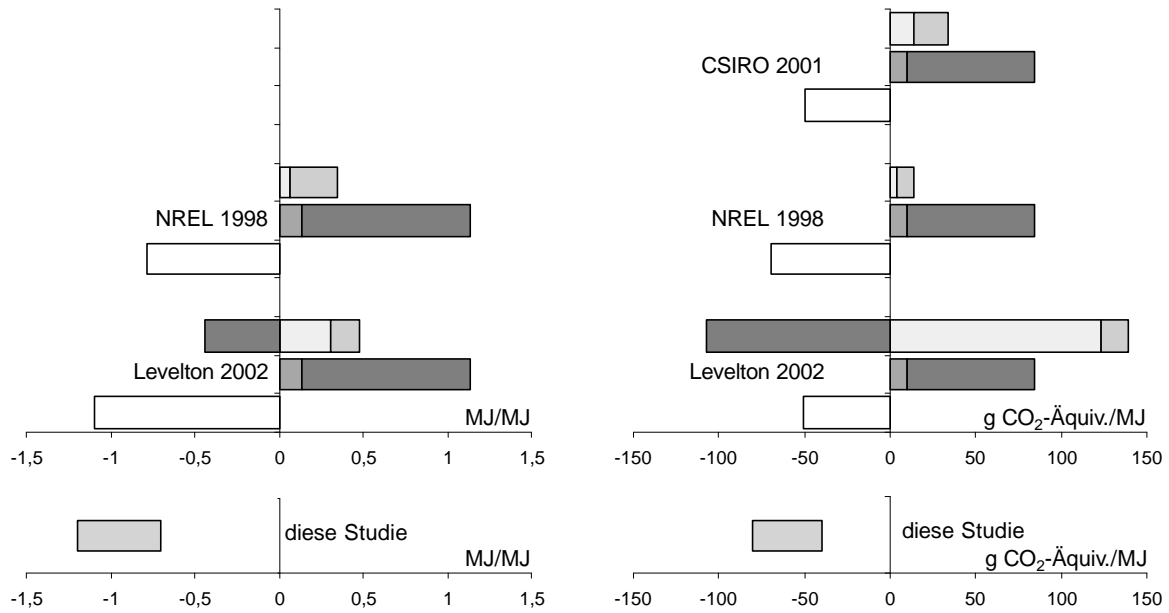


Abb. A-34: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Sojabohnen im Vergleich zu fossilem Dieseldieselkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie /MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

## d) Biodiesel aus Canola

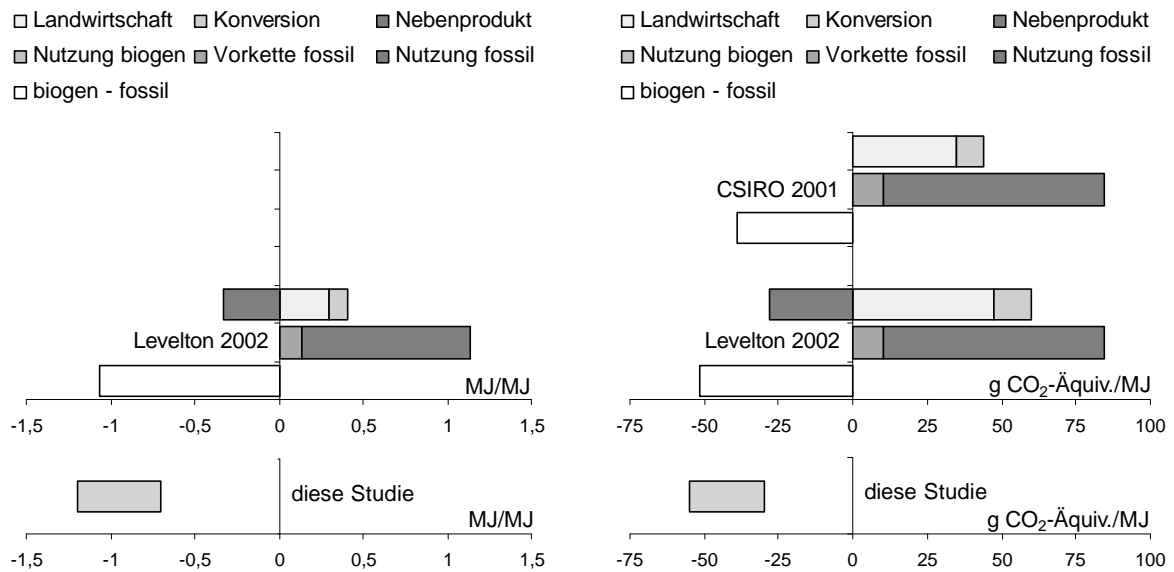


Abb. A-35: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Canola im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**e) Biodiesel aus Kokosnüssen**

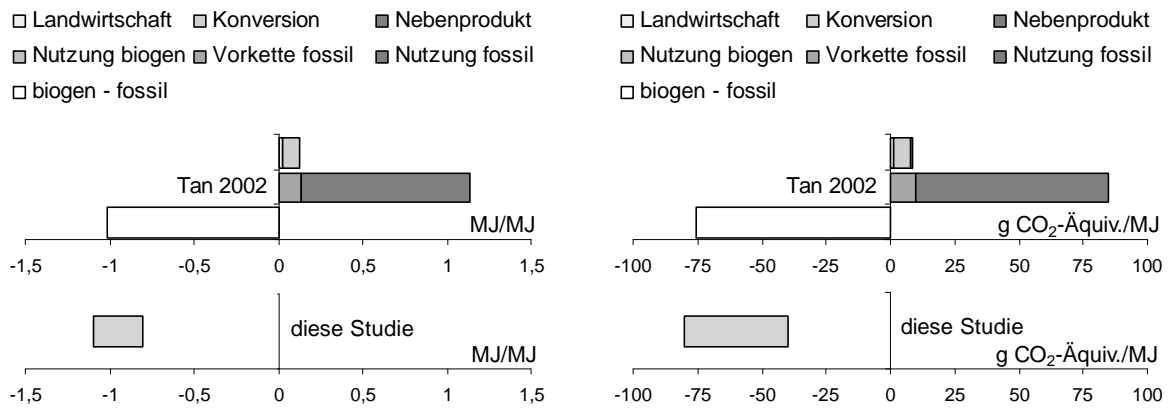


Abb. A-36: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Kokosnüssen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

### A 2.2.3 Pflanzenöl

#### a) Pflanzenöl aus Raps

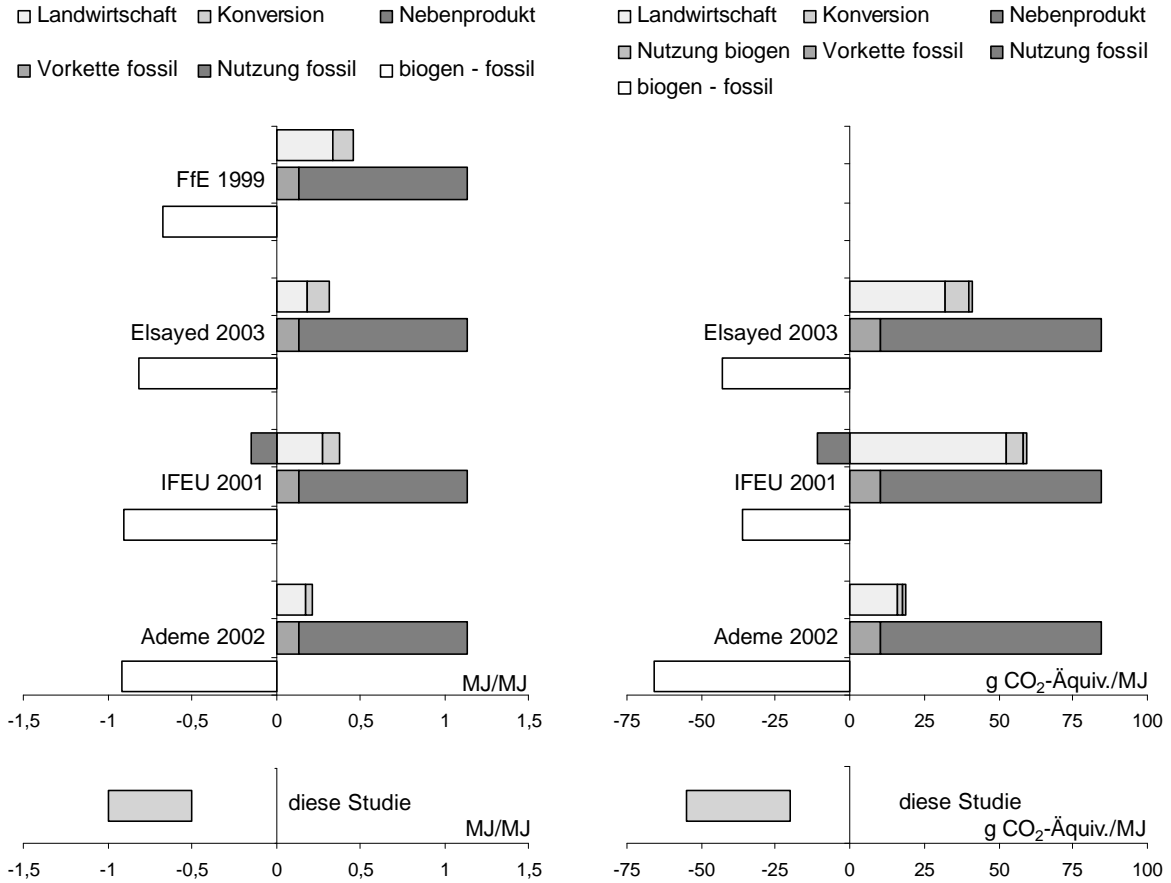


Abb. A-37: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Pflanzenöl aus Raps im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

**b) Pflanzenöl aus Sonnenblumen**

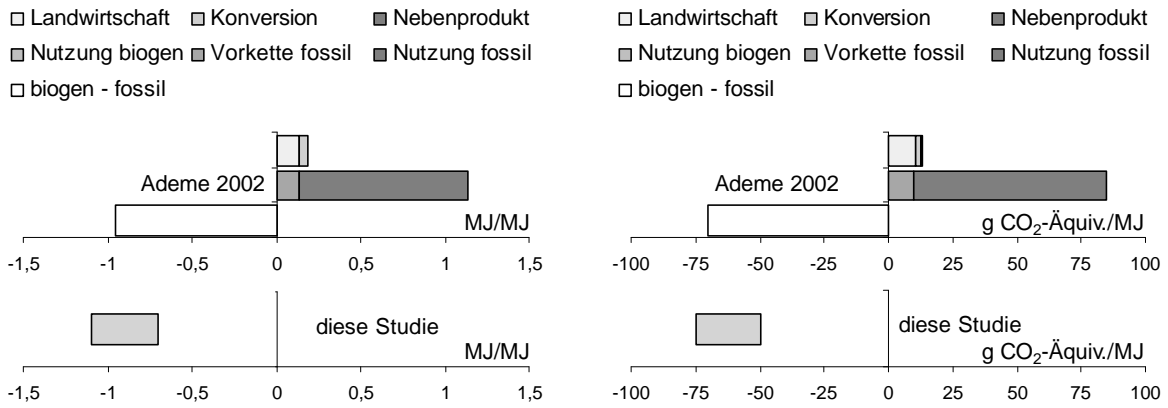


Abb. A-38: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Pflanzenöl aus Sonnenblumen im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

### A 2.2.4 Biomethanol

#### a) Biomethanol aus Lignocellulose

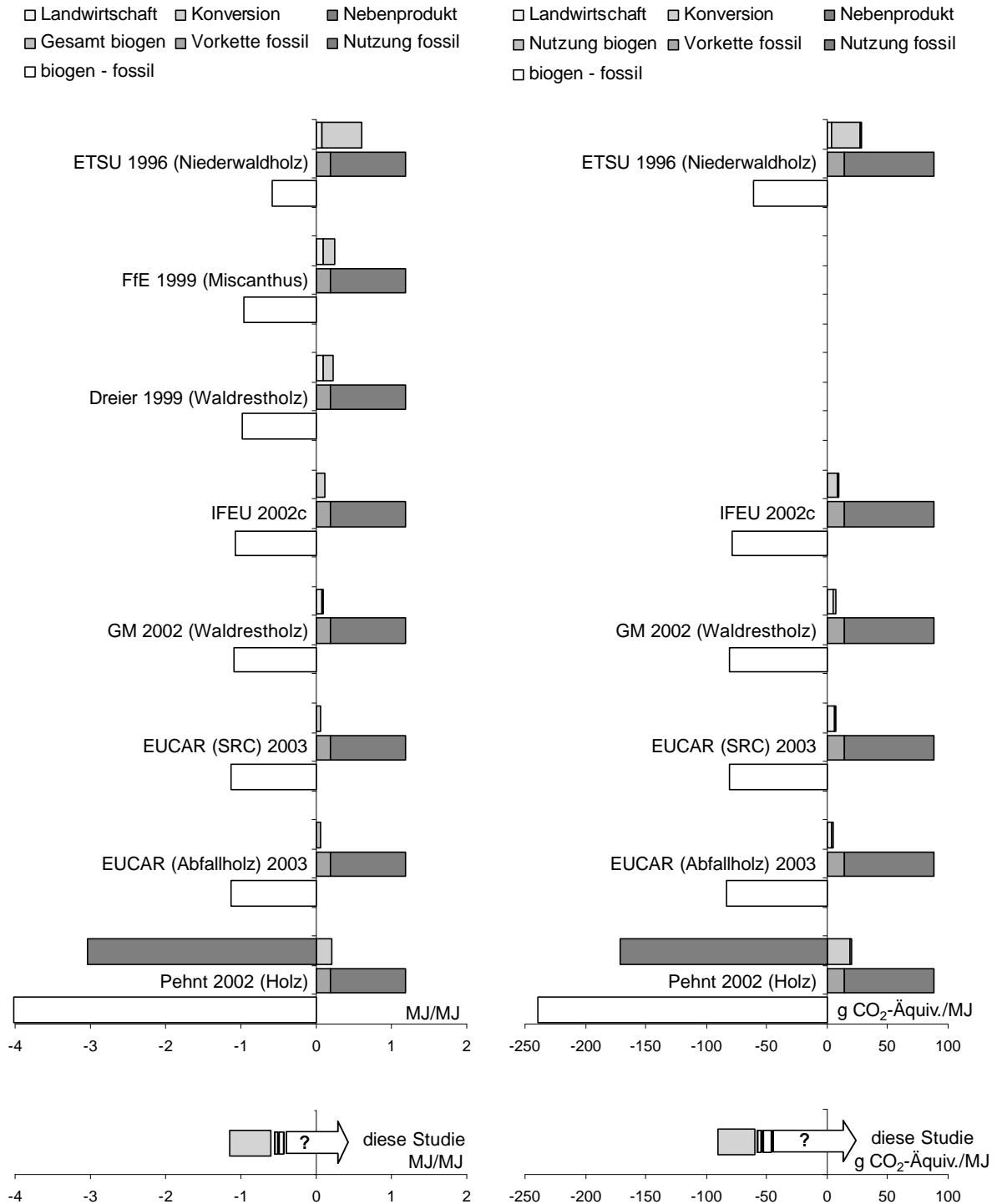


Abb. A-39: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biomethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

\* neben Anbaubiomasse werden hier auch Reststoffe aufgeführt



**A 2.2.5 Biogas**

**a) Biogas aus (Ligno)-Cellulose**

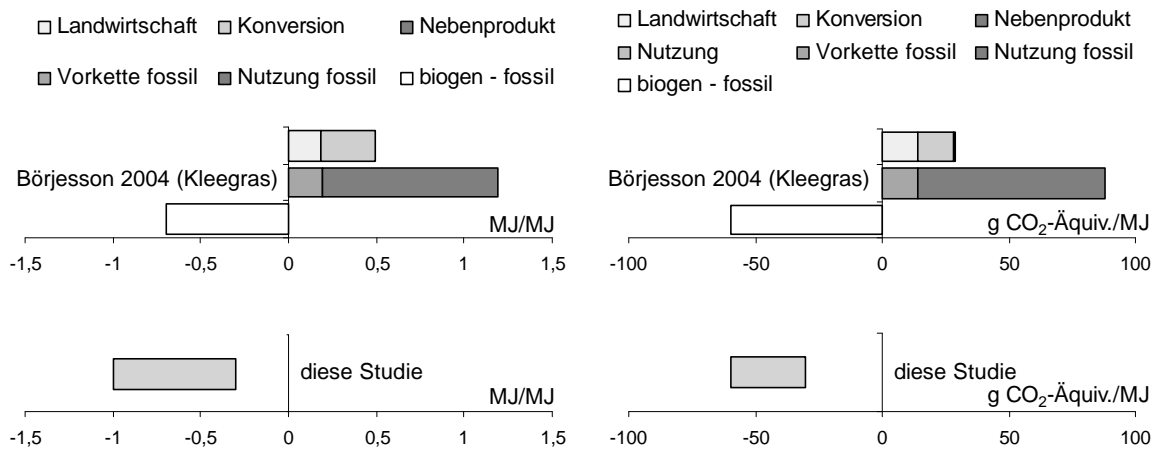


Abb. A-40: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biogas aus (Ligno)-Cellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

## A 2.3 Biokraftstoffe aus organischen Reststoffen

Die Bandbreite der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen aus organischen Reststoffen wurde für den Bezug MJ Kraftstoffinhalt abgeleitet. Bei einigen Biokraftstoffen wurden zur Dokumentation zusätzlich auch solche aus Anbaubiomasse mit aufgenommen.

### A 2.3.1 Ethanol

#### a) Bioethanol aus Molasse

##### Energieaufwand/-einsparung

Beim Vergleich mit Ottokraftstoff ergibt sich eine günstigere Energiebilanz für Bioethanol aus Molasse. Mit Enerstrat (2003) liegt jedoch nur eine Publikation vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

Auch wenn die Einzelprozesse bezüglich des erschöpflichen Energieaufwandes nicht explizit ausgewiesen sind, so kann davon ausgegangen werden, dass der gesamte Bereitstellungsaufwand für den biogenen Lebensweg zu ca. 98 % zu Lasten der Konversion geht. Zu erklären ist der geringe Primärenergieaufwand für den landwirtschaftlichen Bereich durch das angewandte Allokationsverfahren, bei dem die landwirtschaftlichen Aufwendungen zu 95,7 % zu Lasten des Zuckers gehen.

Wie sich bei den Erläuterungen in Bezug auf den Treibhauseffekt zeigt, wurden in der Studie von Enerstrat (2003) sehr günstige Konversionsdaten zugrunde gelegt. Die angegebene Bandbreite ergibt sich unter der Annahme weniger günstiger Konversionsdaten.

##### Treibhauseffekt

Sowohl in der Studie von CSIRO (2001) wie auch in der von Enerstrat (2003) war die Sarina Brennerei in Nord Queensland/Australien Untersuchungsgegenstand. In beiden Studien wurde methodisch generell nach DIN EN ISO 14040 vorgegangen und in beiden Studien wurde eine monetäre Allokation nach Zucker und Molasse vorgenommen. Dennoch wurden nach Enerstrat (2003) nahezu vier mal so hohe Treibhausgasemissionen berechnet wie nach CSIRO (2001).

Enerstrat (2003) ermittelte geringere Treibhausgasemissionen infolge der Konversion, da Enerstrat mit aktuelleren Daten der Sarina Brennerei rechnete. Dies betrifft z.B. den Energieinput. Hierbei ging CSIRO (2001) davon aus, dass er zu 50 % aus Bagasse und zu 50 % aus Kohle gedeckt wird, während Enerstrat einen Bagasseanteil von 70 % veranschlagte.

Der Anteil an Treibhausgasemissionen infolge der Landwirtschaft ist in etwa gleich hoch. Allerdings wurde auch in diesem Teilbereich unterschiedlich vorgegangen. Bei dem Allokationsverfahren nach CSIRO (2001) gingen die landwirtschaftlichen Aufwendungen zu 4,3 % zu Lasten der Molasse, während sie bei dem Allokationsverfahren nach Enerstrat (2003) nur zu 2,9 % zu Lasten der Molasse gingen. Sowohl CSIRO (2001) wie auch Enerstrat (2003) berücksichtigten nur die N<sub>2</sub>O-Emissionen vom Feld, während die aus der N-Düngerproduktion nicht berücksichtigt wurden.

Der abgeleitete Wert für die vermiedenen Treibhausgasemissionen, wenn Ottokraftstoff durch Bioethanol aus Molasse ersetzt wird, basiert vor allem auf den Ergebnissen von Enerstrat (2003), da die Daten der Konversion in dieser Studie aktueller sind. Analog zur

eingesparten Primärenergie wird eine Bandbreite angegeben, die weniger günstige Verhältnisse für die Konversion berücksichtigt. Dass die N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der N-Düngerproduktion in beiden Studien nicht berücksichtigt wurden, wirkt sich verhältnismäßig gering aus, da sie aufgrund des Allokationsverfahrens nur zu 2,9 bzw. 4,3 % angerechnet werden würden.

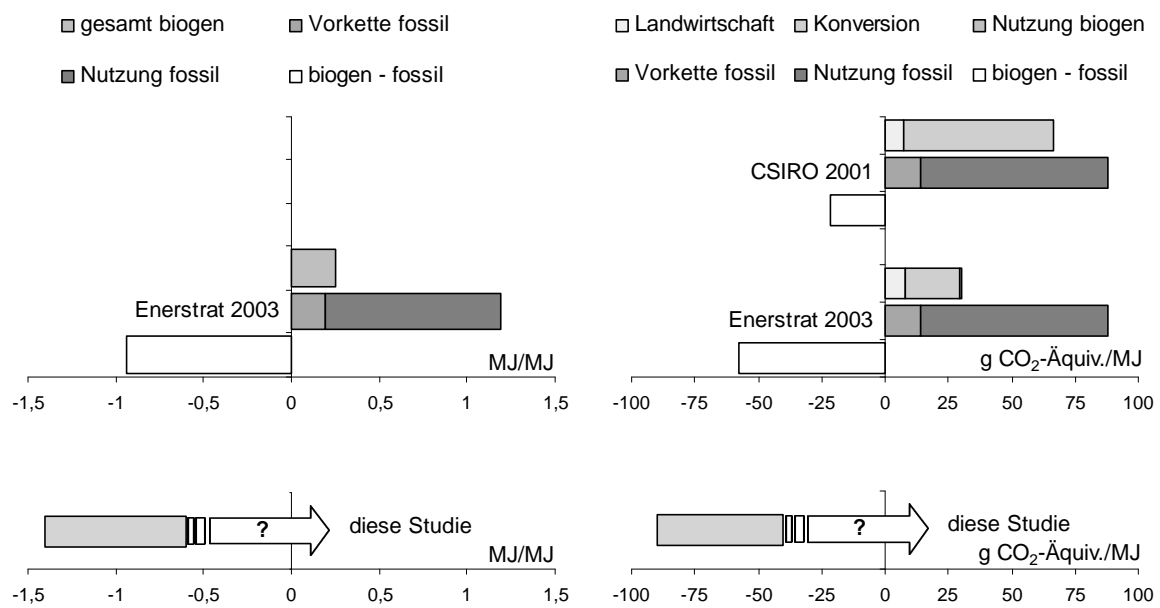


Abb. A-41: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Molasse im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

**b) Bioethanol aus Lignocellulose**

Neben lignocellulosehaltigen Reststoffen (Abfallholz, Stroh) wird nachfolgend auch Bioethanol aus Anbaubiomasse (Gras, Heu) betrachtet.

**Energieaufwand/-einsparung**

Wie bereits in Anhang A 2.1.1e gezeigt wurde, ermittelten alle Autoren eine günstigere Energiebilanz für Bioethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff.

Die abgeleitete Bandbreite schließt die Ergebnisse aller Autoren ein, wobei die Schwankungsbreite vor allem davon abhängig ist, inwieweit der Energieaufwand infolge der Konversion durch die energetische Nutzung des Lignins kompensiert bzw. überkompensiert wird.

**Treibhauseffekt**

Im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff, ermittelten ebenfalls alle Autoren eine günstigere Treibhausgasbilanz für Bioethanol aus Lignocellulose.

Auch hier schließt die abgeleitete Bandbreite die Ergebnisse aller Autoren ein. Neben der unterschiedlichen energetischen Nutzung des Lignins ergibt sich die Schwankungsbreite durch unterschiedliche Annahmen im Bereich der Landwirtschaft. So wurden beispielsweise von Elsayed (2003) auch bei Reststoffen  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen infolge der Stickstoffdüngung berücksichtigt. Diese sind für die Treibhausgasemissionen im Bereich der Landwirtschaft hauptverantwortlich.

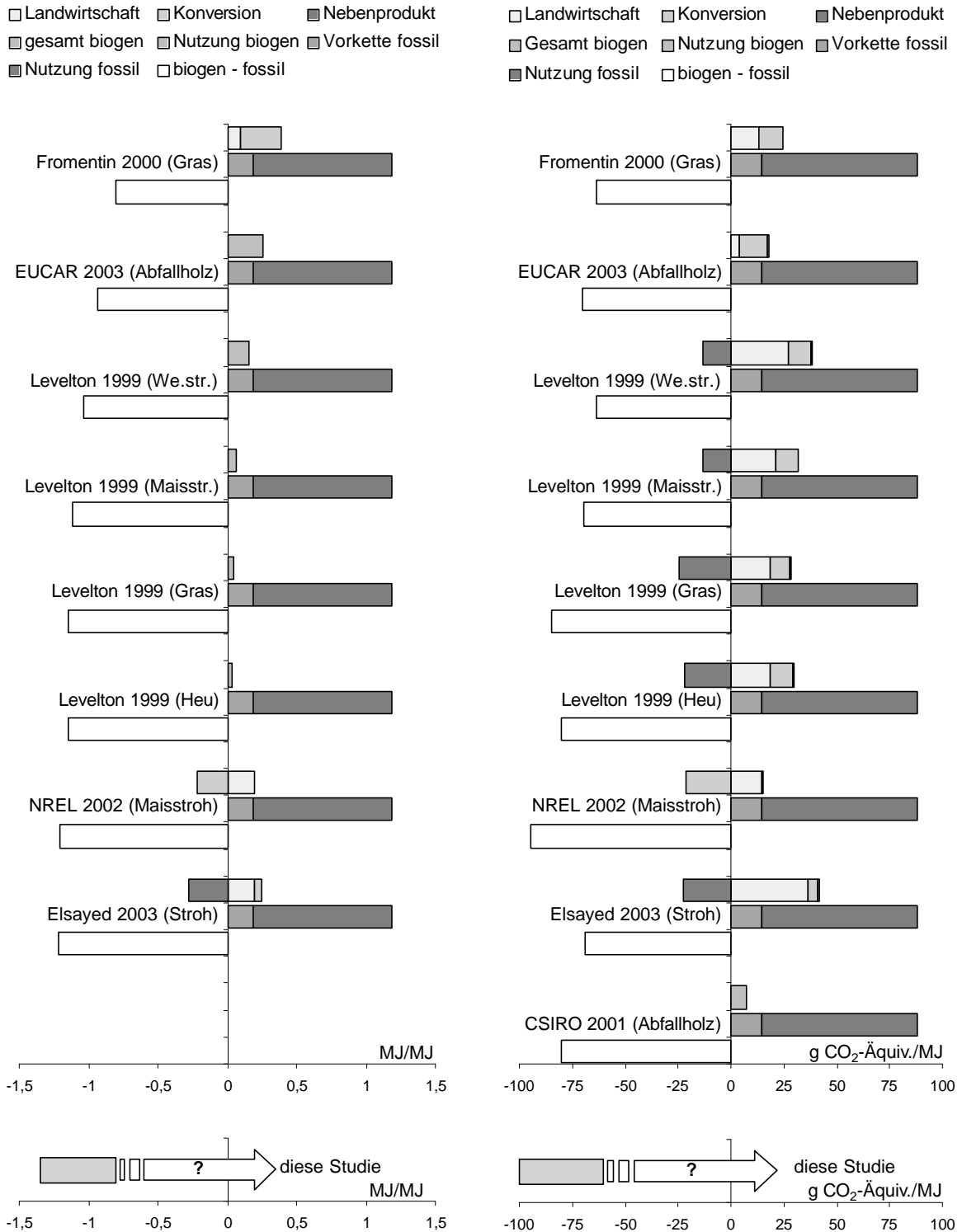


Abb. A-42: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

\* Neben Reststoffen wird hier auch Anbaubiomasse aufgeführt

## A 2.3.2 ETBE

### a) ETBE aus Lignocellulose

Neben lignocellulosehaltigen Reststoffen (Reisstroh, Restholz) wird nachfolgend auch ETBE aus Anbaubiomasse (Gras, Niederwaldholz) betrachtet.

Eine flächenbezogene Betrachtung von ETBE aus Lignocellulose konnte im Anhang A 2.1.2 nicht erfolgen, da in den Studien zu Anbaubiomasse keine Erträge aufgeführt sind.

### Energieaufwand/-einsparung

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für ETBE aus Lignocellulose, wenn fossiles MTBE ersetzt wird.

Der Energieaufwand für die Bereitstellung von ETBE aus Lignocellulose wird vor allem durch den fossilen Anteil des ETBE und die energetische Nutzung des Lignins bestimmt.

Wie bereits bei ETBE aus Zuckerrüben fließen die Ergebnisse von Fromentin (2000) auch hier nicht in die abgeleitete Bandbreite ein. Fromentin (2000) ermittelte einen vergleichsweise hohen Energieaufwand für die Bereitstellung von ETBE, was eine Folge des sehr hoch veranschlagten Energieaufwandes für Naphta war. Dieser Energieaufwand wird lediglich beziffert und nicht erklärt bzw. ist nicht anhand der angegebenen Basisdaten nachvollziehbar.

Die abgeleitete Bandbreite schließt die Ergebnisse aller Autoren ein – mit Ausnahme der Ergebnisse von Fromentin (2000), die aus den o.g. Gründen ausgeschlossen wurden. Dabei ist die Schwankungsbreite vor allem davon abhängig, inwieweit der Energieaufwand infolge der Konversion durch die energetische Nutzung des Lignins kompensiert bzw. überkompensiert wird.

### Treibhauseffekt

Auch bezüglich der Treibhausgasemissionen ermittelten alle Autoren eine günstigere Bilanz für ETBE aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem MTBE.

Die abgeleitete Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen schließt alle Ergebnisse der einzelnen Studien mit ein. Auch hier ergab sich die Bandbreite vor allem in Abhängigkeit der energetischen Nutzung des Lignins.

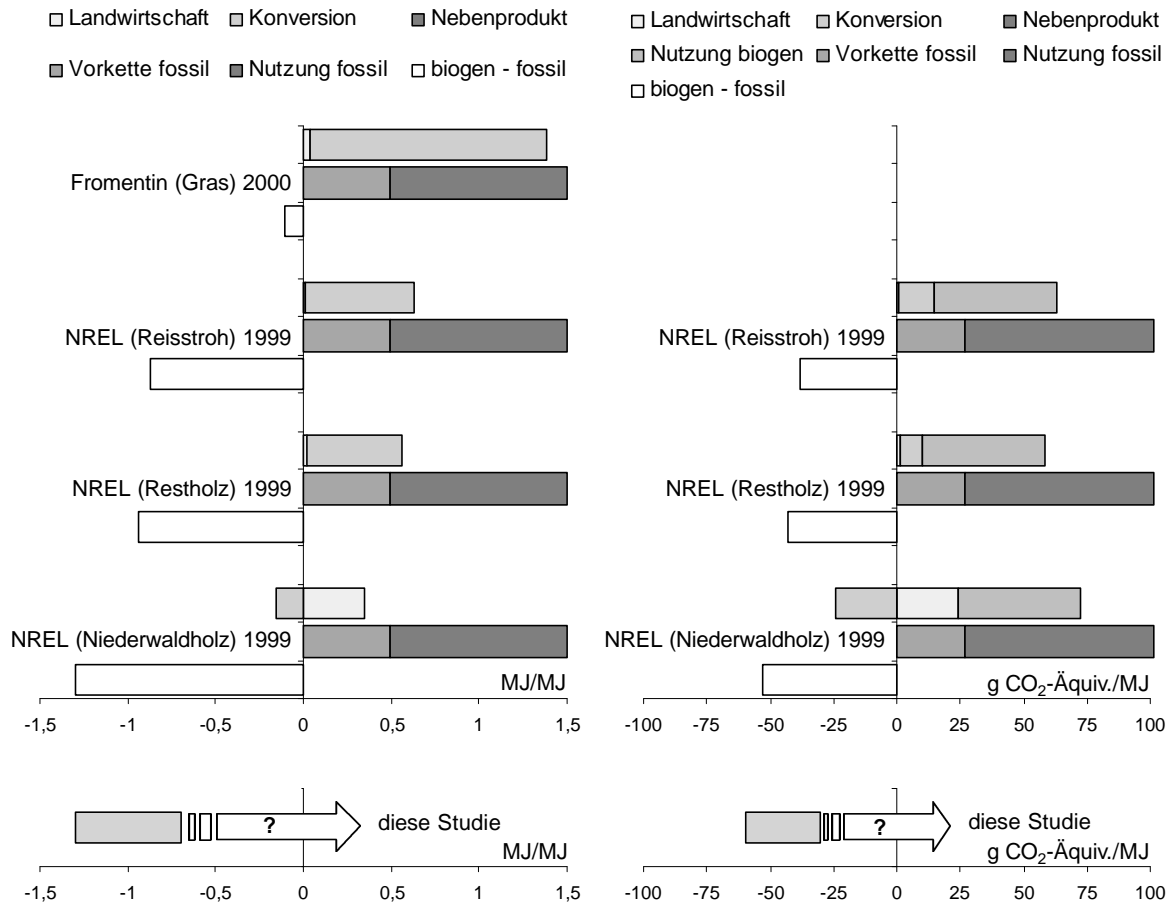


Abb. A-43: Energie- und Treibhausgasbilanzen von ETBE aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem MTBE in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente /MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

\* Neben Reststoffen wird hier auch Anbaubiomasse aufgeführt

### A 2.3.3 Biodiesel

#### a) Biodiesel aus Tierfett

##### Energieaufwand/-einsparung

Im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff ist die Energiebilanz von Biodiesel aus Tierfett günstiger.

Die Nebenprodukte Tiermehl und Glycerin werden von Levelton (2002) in Form eines Gutschriftenverfahrens bewertet.

Die abgeleiteten Werte an eingesparter Primärenergie pro MJ Kraftstoff orientieren sich an denen von Levelton (2002). Die Schwankungsbreite ergibt sich aufgrund unterschiedlicher Annahmen hinsichtlich der Konversion und aufgrund unterschiedlicher Mengen anfallenden Tiermehls.

##### Treibhauseffekt

Die Treibhausgasbilanz von Biodiesel aus Tierfett fällt im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff ebenfalls zugunsten des Biodiesels aus.

Der erschöpfliche Primärenergieaufwand korreliert sehr eng mit den Treibhausgasemissionen, so dass sich die Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen nach den gleichen Gesichtspunkten orientiert wie die Ableitung der Bandbreite der eingesparten Primärenergie.

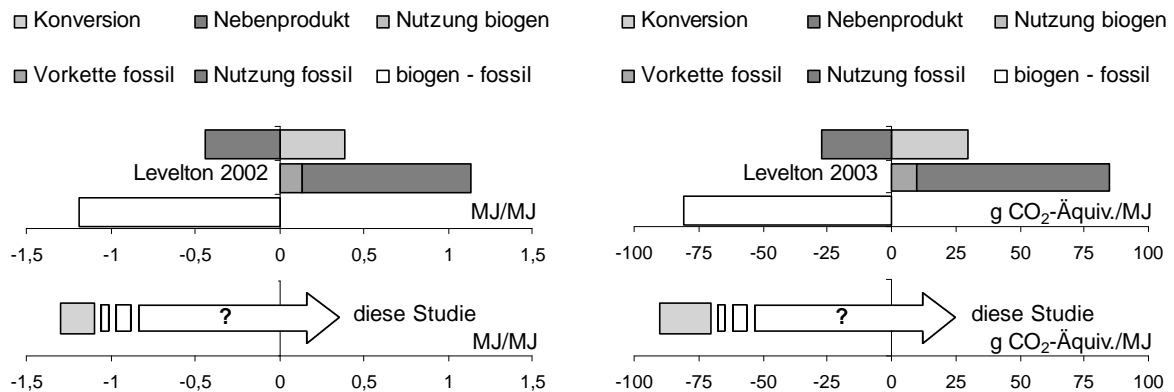


Abb. A-44: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Tierfett im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.



## b) Biodiesel aus Altspisefetten und -ölen

### Energieaufwand/-einsparung

Die Energiebilanz für Biodiesel aus Altspisefetten und -ölen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff fällt zugunsten des Biodiesels aus.

Das bei der Biodieselproduktion aus Altspisefetten und -ölen anfallende Nebenprodukt Glycerin wurde in Form einer Gutschrift berücksichtigt.

Die abgeleiteten Werte an eingesparter Primärenergie pro MJ Kraftstoff orientieren sich an den Werten von Levelton (2002) und Elsayed (2003).

### Treibhauseffekt

Da bei der Biodieselproduktion aus Reststoffen keine N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der Landwirtschaft resultieren, korreliert der erschöpfliche Primärenergieaufwand sehr eng mit den Treibhausgasemissionen.

Die Bandbreite der vermiedenen Treibhausgasemissionen orientiert sich wie die Ableitung der Bandbreite an eingesparter Primärenergie an den ermittelten Werten der beiden betrachteten Studien.

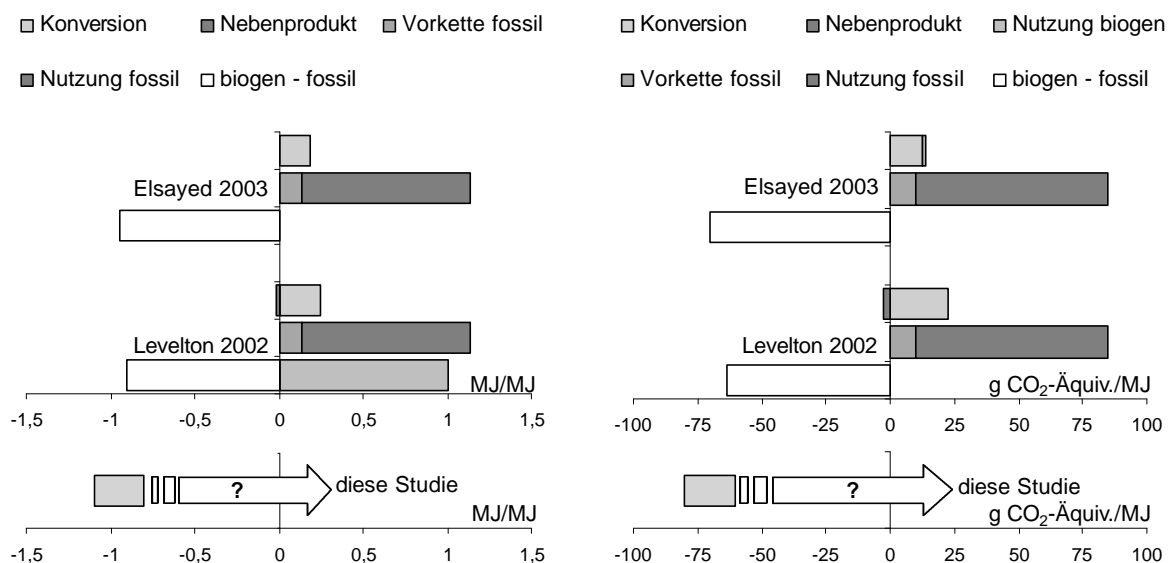


Abb. A-45: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biodiesel aus Altspisefetten und -ölen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

## A 2.3.4 Biomethanol

### a) Biomethanol aus Lignocellulose

Neben lignocellulosehaltigen Reststoffen (Abfallholz, Waldrestholz) wird nachfolgend auch Biomethanol aus Anbaubiomasse (Niederwaldholz, Miscanthus) betrachtet.

#### Energieaufwand/-einsparung

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für Biomethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff.

Aufgrund eines von den anderen untersuchten Anlagen abweichenden verfahrenstechnischen Konzeptes ermittelte Pehnt (2002) eine Gutschrift für Biomethanol, wodurch sich wesentlich größere Vorteile für den Biokraftstoff ergeben. Die Gutschrift ergibt sich dadurch, dass ein (energetisch erheblicher) Teil des produzierten Produktgases nicht für die Methanolsynthese genutzt, sondern in einem Blockheizkraftwerk verstromt wird und somit konventionell produzierte Energie und Wärme ersetzt. Da bei diesem Verfahren nicht ausschließlich Kraftstoffe produziert werden, sondern daneben auch noch Strom und Wärme zur anderweitigen Nutzung produziert wird, ist dieses Verfahren mit den übrigen nicht vergleichbar.

Mit Ausnahme der Ergebnisse von Pehnt (2002) schließt die abgeleitete Bandbreite die Ergebnisse aller Autoren ein, wobei die Schwankungsbreite vor allem von dem Anteil an eingesetzter erschöpflicher Primärenergie im Vergleich zum Einsatz von prozessintern anfallendem Produktgas abhängig ist.

#### Treibhauseffekt

Analog zur Energiebilanz ermittelten alle Autoren eine günstigere Treibhausgasbilanz für Bioethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff.

Auch hier wurden die Ergebnisse von Pehnt (2002) aufgrund der nicht gegebenen Vergleichbarkeit nicht mit in die Bandbreite eingeschlossen. Die abgeleitete Bandbreite ist hier ebenfalls vom Anteil eingesetzter erschöpflicher Primärenergie im Vergleich zu eingesetztem Produktgas abhängig.

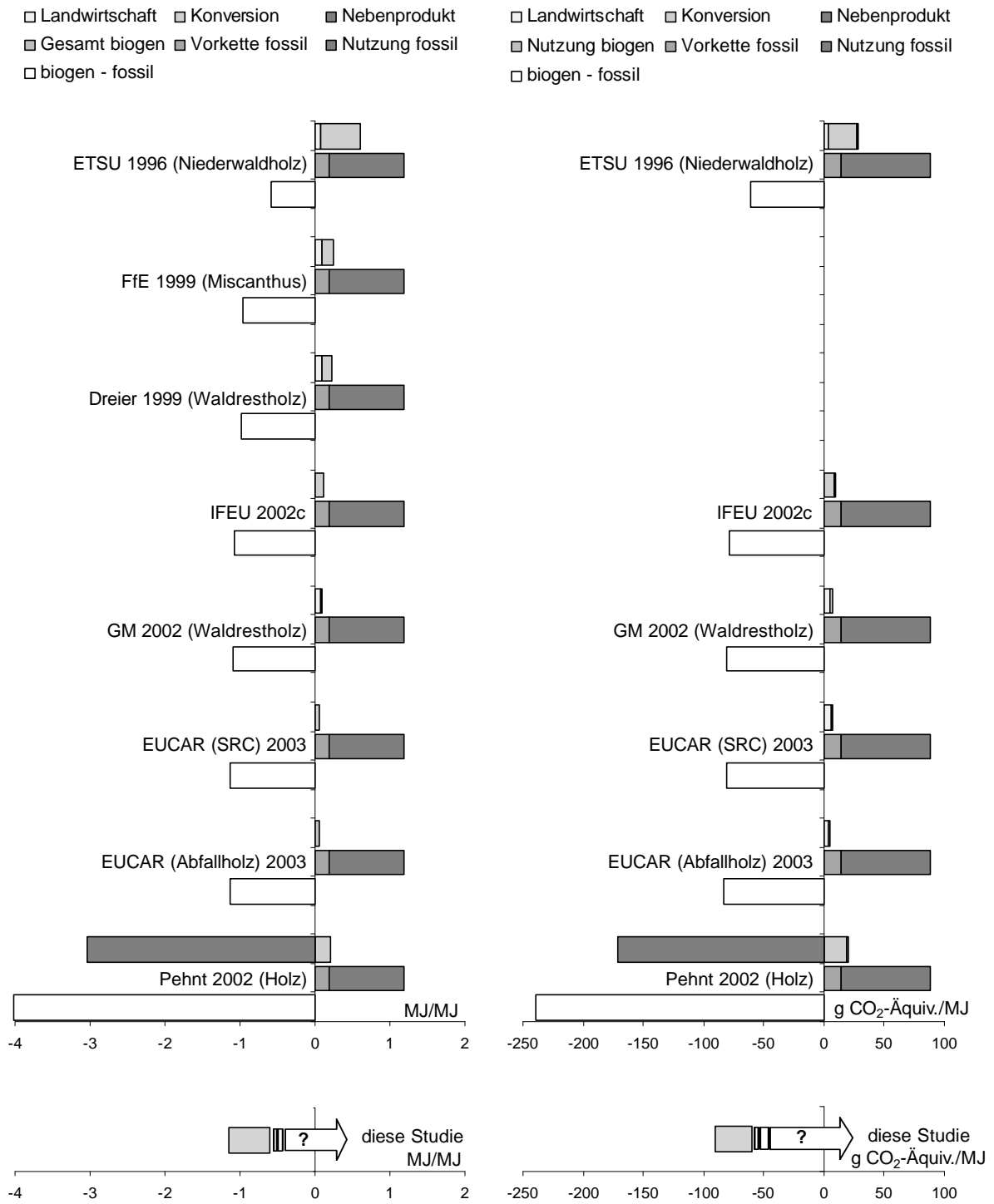


Abb. A-46: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biomethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

\* Neben Reststoffen wird hier auch Anbaubiomasse aufgeführt

### **A 2.3.5 MTBE**

#### **a) MTBE aus Lignocellulose**

Zu dem erschöpflichen Primärenergieaufwand und den Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von MTBE aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem MTBE liegt nur eine Studie vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

#### **Energieaufwand/-einsparung**

Die Energiebilanz von MTBE aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem MTBE fällt zugunsten des MTBE aus Lignocellulose aus.

Der fossile Anteil des MTBE aus Lignocellulose macht den größten Anteil des erschöpflichen Primärenergieaufwandes aus.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurden in Analogie zu Biomethanol aus Lignocellulose (A 2.3.4) mögliche Unterschiede in der Verfahrenstechnik berücksichtigt.

#### **Treibhauseffekt**

Die Treibhausgasbilanz fällt ebenfalls zugunsten von MTBE aus Lignocellulose aus. Auch hier wurden bei der Ableitung der Bandbreite in Analogie zu Biomethanol aus Lignocellulose (A 2.3.4) mögliche Unterschiede in der Verfahrenstechnik berücksichtigt.

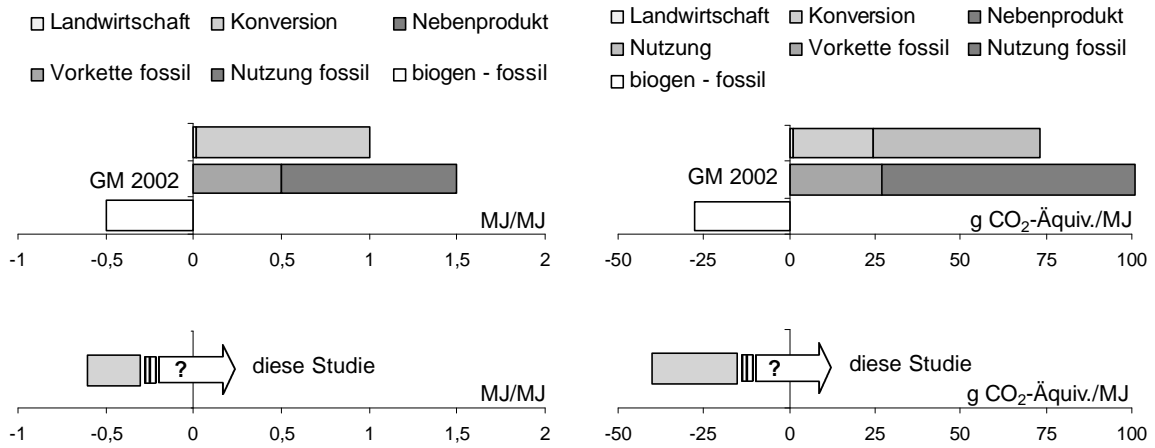


Abb. A-47: Energie- und Treibhausgasbilanzen von MTBE aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem MTBE in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

## A 2.3.6 BTL

### a) BTL aus Lignocellulose

Neben der BTL-Produktion aus lignocellulosehaltigen Reststoffen (Abfall- und Restholz) wird nachfolgend auch die BTL-Produktion aus lignocellulosehaltiger Anbaubiomasse (Niederwaldholz) betrachtet.

### Energieaufwand/-einsparung

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für BTL aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff.

Der erschöpfliche Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von BTL ist vor allem von der Verfahrenstechnik abhängig.

Hier spielt z.B. eine Rolle, wie gut die endotherme Synthesegasproduktion und die exotherme Fischer-Tropsch-Synthese aufeinander abgestimmt werden können.

Larson (1999) ermittelte den erschöpflichen Energieaufwand für zwei Optionen der BTL-Produktion: Einmal geht er davon aus, dass das Synthesegas weitgehend zur Kraftstoffproduktion genutzt wird, während er im anderen Fall davon ausgeht, dass ein Teil des Synthesegases in einem Blockheizkraftwerk verstromt wird. Im letzteren Fall entsteht durch die Verstromung zwar eine Gutschrift, der Primärenergieaufwand für die Konversion wird jedoch auch höher, da eine höhere Menge an Synthesegas erzeugt werden muss, um ein MJ Kraftstoff zu produzieren.

Die abgeleitete Bandbreite schließt die Ergebnisse aller Autoren mit ein, wobei die Schwankungsbreite vor allem von unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Verfahrenstechnik abhängig ist.

### Treibhauseffekt

Für BTL aus Lignocellulose ermittelten ebenfalls alle Autoren eine günstigere Treibhausgasbilanz im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff.

Auch hier schließt die abgeleitete Bandbreite die Ergebnisse aller Autoren mit ein. Neben der unterschiedlichen Verfahrenstechnik resultiert die Schwankungsbreite der Treibhausgasemissionen zusätzlich in Abhängigkeit der veranschlagten  $N_2O$ -Emissionen.

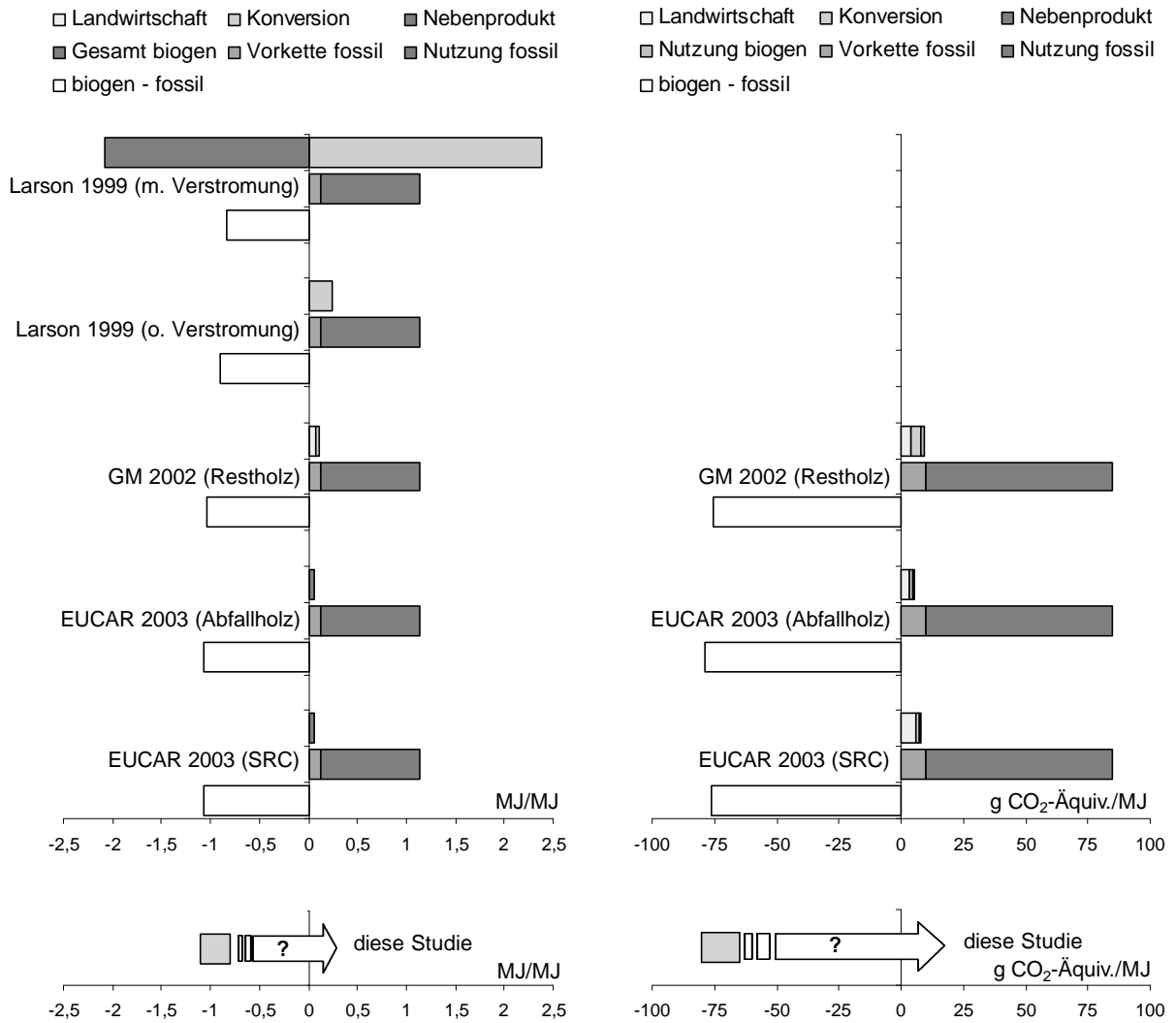


Abb. A-48: Energie- und Treibhausgasbilanzen von BTL aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

\* Neben Reststoffen wird hier auch Anbaubiomasse aufgeführt

## **A 2.3.7 Biogas**

### **a) Biogas aus organischen Reststoffen**

#### **Energieaufwand/-einsparung**

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für Biogas aus Reststoffen im Vergleich zu Ottokraftstoff.

Dabei ist der erschöpfliche Primärenergieaufwand für die Bereitstellung der Reststoffe in allen Studien vergleichsweise gering. Häufig wurde lediglich der Primärenergieaufwand für den Transport veranschlagt, während beispielweise bei Hausmüll noch der Primärenergieaufwand für die Sammlung hinzukam.

In erster Linie ist der Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von Biogas jedoch von den unterschiedlichen Annahmen im Bereich der Konversion abhängig. Im Gegensatz zur FfE-Studie (1999) wurde in der GM-Studie (2002) davon ausgegangen, dass die Strom- und Wärmebereitstellung für die Biogasanlage aus einem mit Biogas betriebenen BHKW erfolgt. Dadurch steigen die Vorteile von Biogas im Vergleich zu Ottokraftstoff an.

Des Weiteren ist der Primärenergieaufwand in der FfE-Studie (1999) höher, da – im Gegensatz zu den übrigen Studien – die Aufwendungen für die Anlagenherstellung mitberücksichtigt wurden.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurde der Primärenergieaufwand für die Anlagenherstellung, aufgrund der Vergleichbarkeit mit den übrigen Biokraftstoffen, nicht berücksichtigt. Die Schwankungsbreite ergibt sich vor allem aufgrund unterschiedlicher Annahmen bezüglich der Konversion.

#### **Treibhauseffekt**

Auch beim Treibhauseffekt ermittelten alle Autoren Vorteile für Biogas aus Reststoffen im Vergleich zu Ottokraftstoff.

Die Ableitung der Bandbreite erfolgte nach den gleichen Gesichtspunkten wie bei der Energiebilanz. Die hohe Gutschrift bei der Biogaserzeugung aus Gülle ergibt sich, da als Referenzsystem die herkömmliche Güllelagerung betrachtet wurde, bei der vergleichsweise hohe Methanemissionen anfallen.



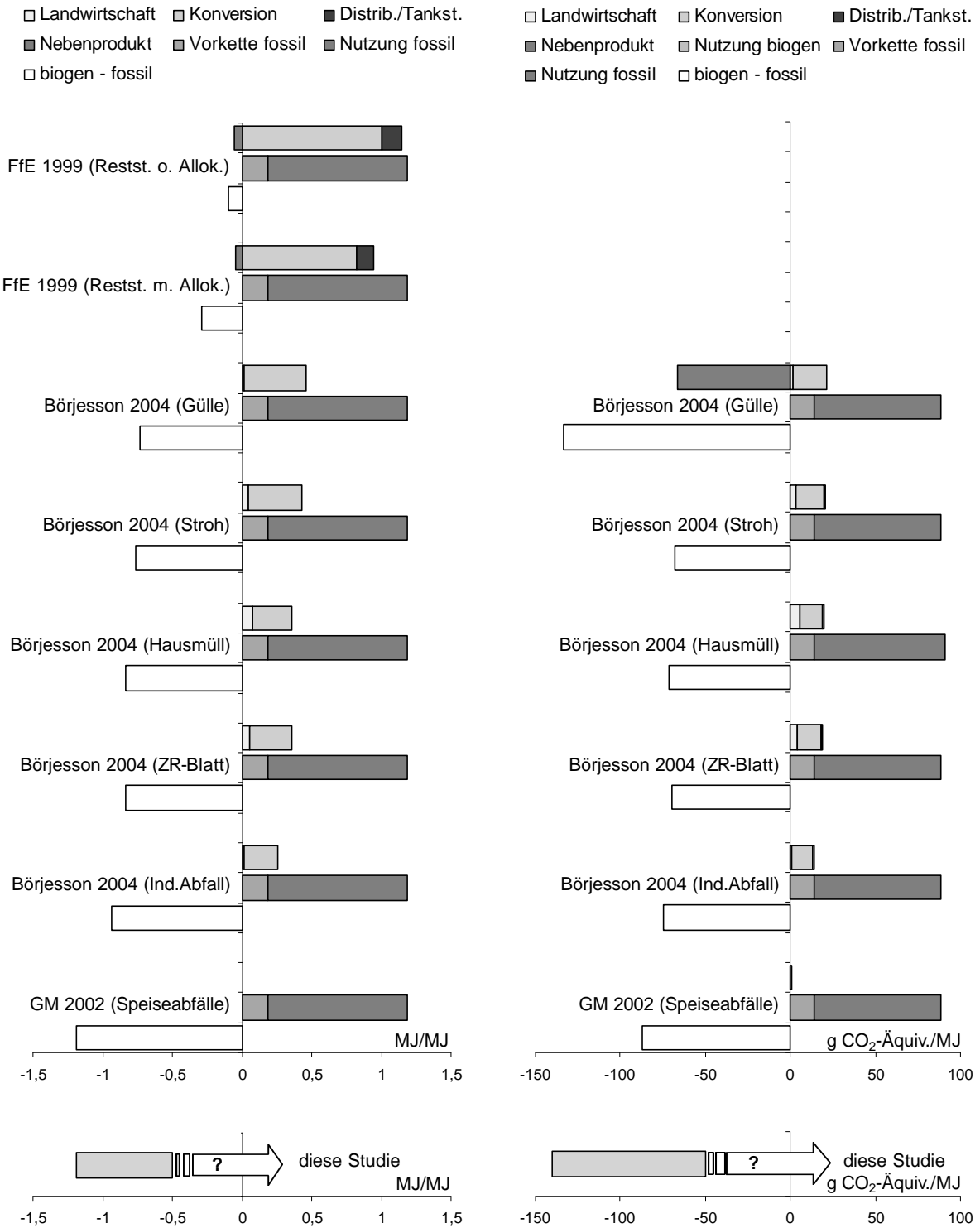


Abb. A-49: Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biogas aus organischen Reststoffen im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

### **A 2.3.8 Gasförmiger Wasserstoff**

#### **a) Gasförmiger Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose**

Neben lignocellulosehaltigen Reststoffen wird nachfolgend auch die Produktion von gasförmigem Wasserstoff durch die Vergasung lignocellulosehaltiger Anbaubiomasse betrachtet.

#### **Energieaufwand/-einsparung**

Alle Autoren ermittelten eine günstigere Energiebilanz für gasförmigen Wasserstoff durch die Vergasung von Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff.

Die Unterschiede zwischen den Autoren beruhen vor allem auf den unterschiedlichen Annahmen im Bereich der Konversion und Distribution. In der GM-Studie (2002) wurde davon ausgegangen, dass die Energie von dem bei der Wasserstoffaufbereitung freierwerdenden Tailgas genutzt wird. Die dadurch gewonnene Energie übersteigt den Energieaufwand für die Konversion.

Die abgeleitete Bandbreite schließt die Ergebnisse aller Autoren ein. Die Variabilität ist vor allem auf unterschiedliche Annahmen im Bereich der Konversion und Distribution zurückzuführen.

#### **Treibhauseffekt**

Im Vergleich zu Ottokraftstoff ermittelten ebenfalls alle Autoren eine günstigere Treibhausgasbilanz für gasförmigen Wasserstoff durch die Vergasung von Lignocellulose.

Die Ableitung der Bandbreite orientierte sich nach den gleichen Gesichtspunkten wie bei der Energiebilanz, wobei die Schwankungsbreite auch hier vor allem von der Konversion und Distribution abhängig ist.

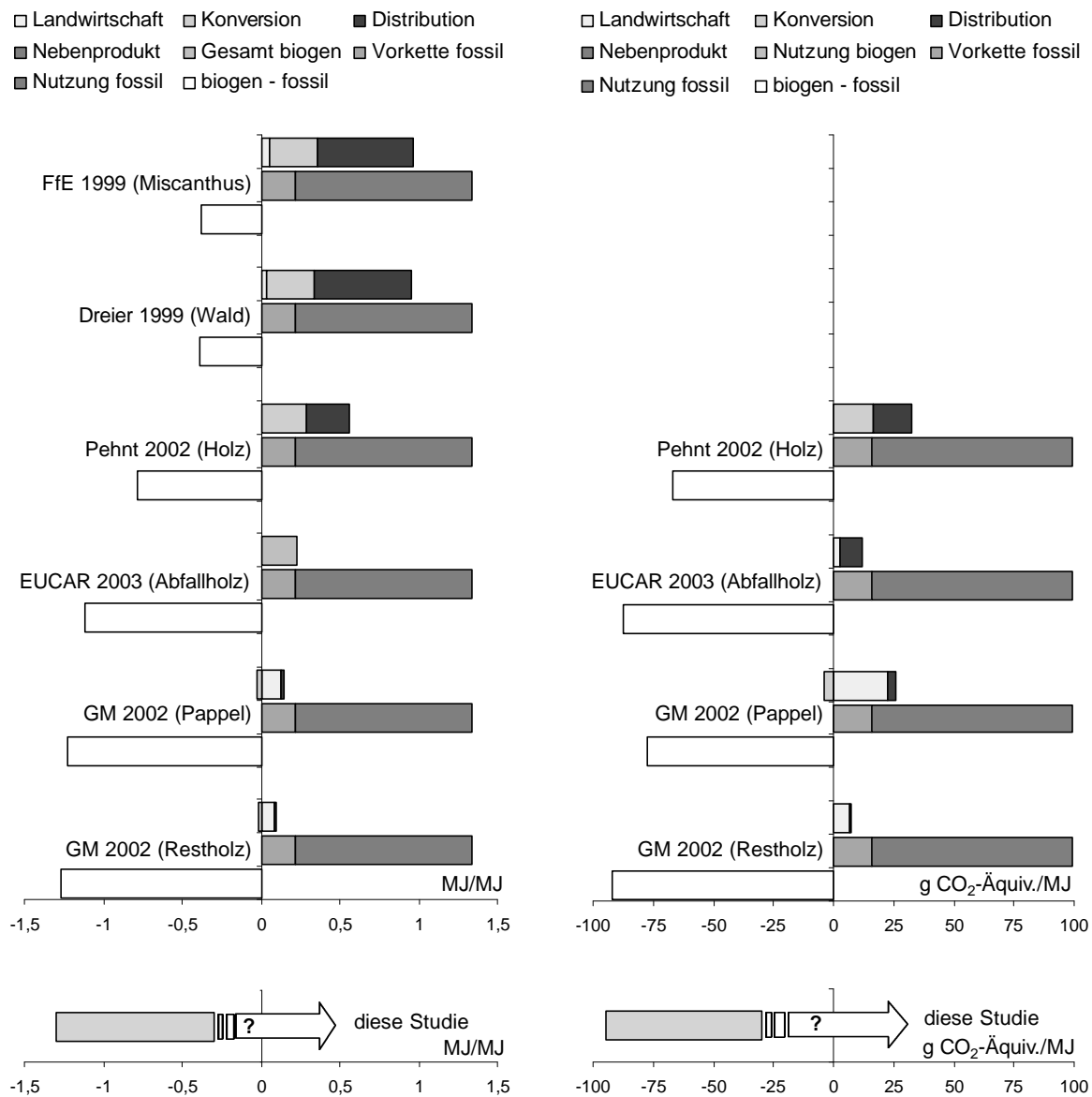


Abb. A-50: Energie- und Treibhausgasbilanzen von gasförmigem Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

**b) Gasförmiger Wasserstoff durch Vergärung organischer Reststoffe**

Zu dem erschöpflichen Primärenergieaufwand und den Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von gasförmigem Wasserstoff durch Vergärung organischer Reststoffe im Vergleich zu Ottokraftstoff liegt nur eine Studie vor, so dass hier keine Vergleiche zwischen mehreren Autoren möglich sind.

**Energieaufwand/-einsparung**

In der GM-Studie (2002) wurde eine günstigere Energiebilanz für gasförmigen Wasserstoff durch Vergärung organischer Reststoffe im Vergleich zu Ottokraftstoff ermittelt.

In der GM-Studie (2002) wurde kein erschöpflicher Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von gasförmigem Wasserstoff durch Vergärung organischer Reststoffe veranschlagt, da davon ausgegangen wurde, dass die Energiebereitstellung aus einem mit Biogas betriebenen BHKW erfolgt.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurde neben den Ergebnissen der GM-Studie (2002) auch berücksichtigt, dass der Primärenergieaufwand für die Konversion und Distribution aus erschöpflichen Primärenergieträgern erfolgen kann (vgl. A 2.3.7 a und A 2.3.8 a).

**Treibhauseffekt**

In der GM-Studie wurde ebenfalls eine günstigere Treibhausgasbilanz für gasförmigen Wasserstoff im Vergleich zu Ottokraftstoff ermittelt.

Die Ableitung der Bandbreite erfolgte analog zur Bandbreite der Energiebilanz.

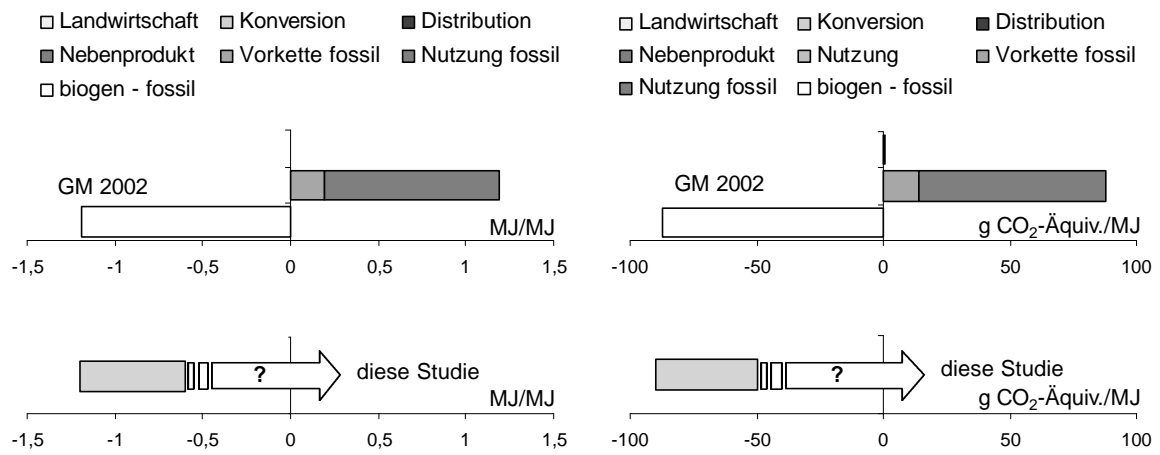


Abb. A-51: Energie- und Treibhausgasbilanzen von gasförmigem Wasserstoff durch Vergärung organischer Reststoffe im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie/MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt. Zum dargestellten Pfeil siehe die Erläuterung auf S. 26.

### **A 2.3.9 Flüssiger Wasserstoff**

#### **a) Flüssiger Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose**

Neben lignocellulosehaltigen Reststoffen wird nachfolgend auch die Produktion von flüssigem Wasserstoff durch die Vergasung lignocellulosehaltiger Anbaubiomasse betrachtet.

#### **Energieaufwand/-einsparung**

Die Energiebilanz von flüssigem Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff kann sowohl zugunsten des Biokraftstoffs wie auch zugunsten des fossilen Kraftstoffs ausfallen.

Die abgeleitete Bandbreite schließt die Ergebnisse beider betrachteten Studien ein. Die hohe Schwankungsbreite ergibt sich, da die Energieaufwendungen für die Produktion und insbesondere für die Verflüssigung von Wasserstoff einerseits durch erschöpfliche Primärenergieträger (Dreier 1999) und auf der anderen Seite durch das produzierte Produktgas gedeckt werden können (EUCAR-Studie 2003).

#### **Treibhauseffekt**

Analog zur Energiebilanz kann auch die Treibhausgasbilanz von flüssigem Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff sowohl zugunsten des Biokraftstoffs wie auch zugunsten des fossilen Kraftstoffs ausfallen.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurden die Ergebnisse der EUCAR-Studie (2003) berücksichtigt und von einer Korrelation zwischen dem Primärenergieaufwand und den Treibhausgasemissionen ausgegangen. Aus dieser Annahme heraus wurde von dem von Dreier (1999) ermittelten Primärenergieaufwand auf die Treibhausgasemissionen geschlossen.

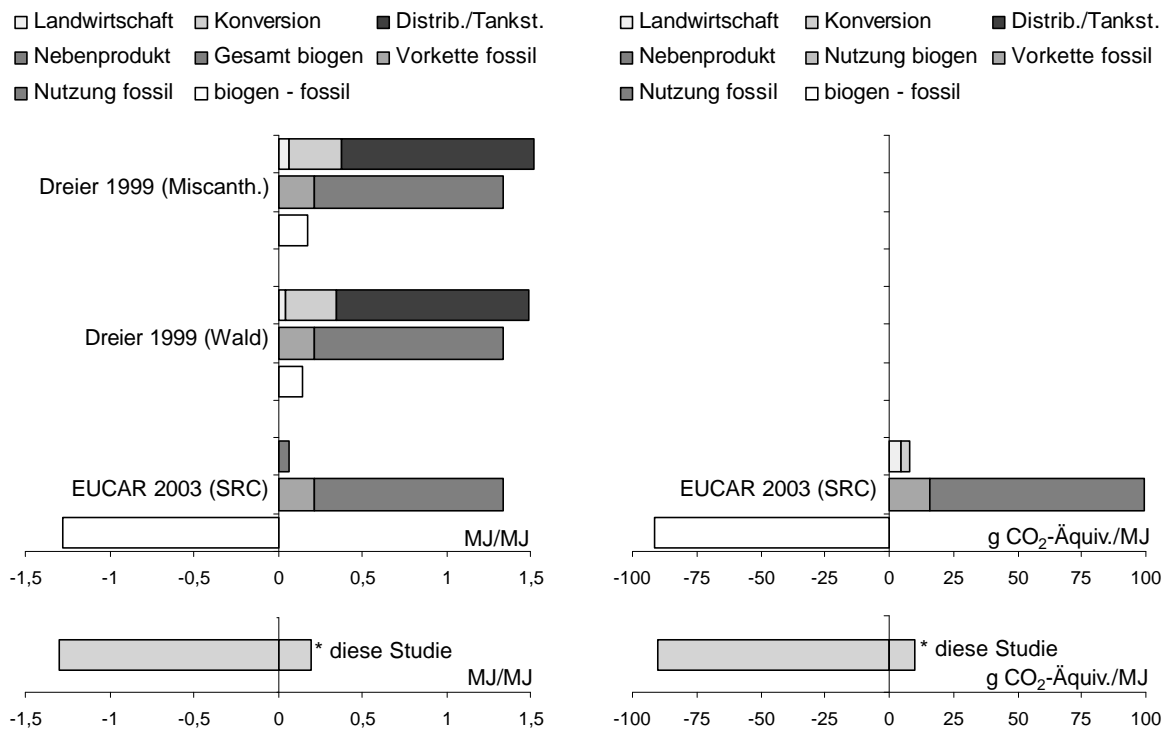


Abb. A-52: Energie- und Treibhausgasbilanzen von flüssigem Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff in MJ eingesparte Primärenergie / MJ Kraftstoffinhalt bzw. in g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt.

\*: Große Bandbreite, da die Energieaufwendungen für die Bereitstellung und Distribution entweder durch erschöpfliche Primärenergieträger oder durch das produzierte Produktgas gedeckt werden können (s. Text).

## A 2.4 Energie- und Treibhausgasbilanzen mit verschiedenen Bezügen

Zur vollständigen Dokumentation sind nachfolgend die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen zusammengestellt, die im Hauptbericht nicht dargestellt sind. Im einzelnen sind dies:

- Well-to-Tank Analyse von Biokraftstoffen (A 2.4.1).
- Well-to-Wheel Analyse von Biokraftstoffen (A 2.4.2).
- Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (je MJ Kraftstoffinhalt) (2.4.3).
- Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (je km). Im Gegensatz zu Abbildung 5 des Hauptberichts, in der der Vergleich von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen ebenfalls mit dem Bezug je km dargestellt ist, wurde in dieser Abbildung darauf verzichtet, durch Pfeile anzudeuten, dass sich die Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen aus Reststoffen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen durch Berücksichtigung des Alternativnutzens verändern können (A 2.4.4).
- Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (in kg eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ eingesparte Primärenergie) (A 2.4.5).
- Wasserstoff und Methanol aus Lignocellulose im Vergleich zu unterschiedlichen fossilen Kraftstoffpendants und Antriebstechnologien (je km) (A 2.4.6).



### A 2.4.1 Well-to-Tank Analyse von Biokraftstoffen

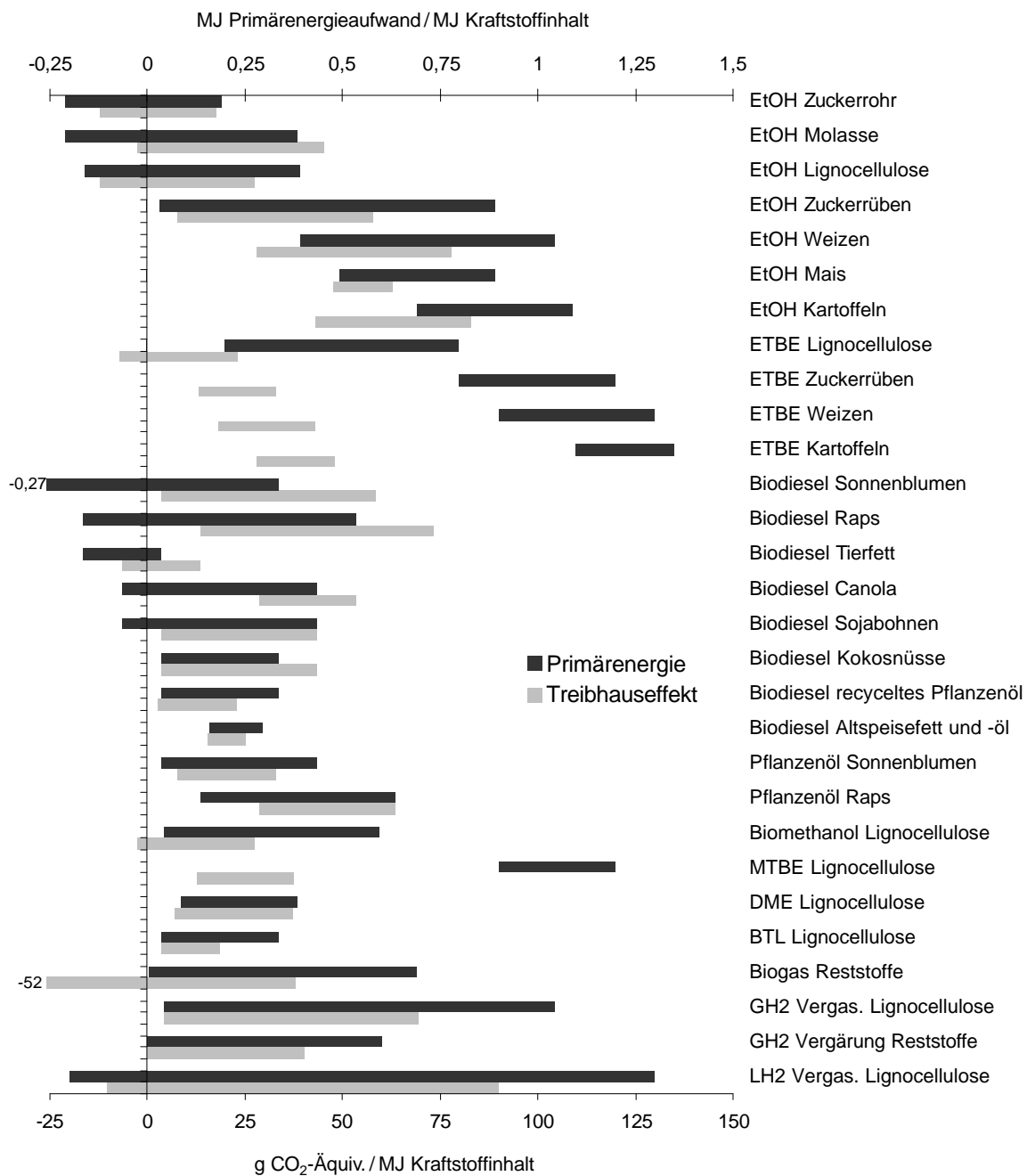


Abb. A-53: Ergebnisse der Well-to-Tank Analyse aller analysierten Biokraftstoffe in MJ Primärenergieaufwand bzw. in g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ Kraftstoffinhalt.

### A 2.4.2 Well-to-Wheel Analyse von Biokraftstoffen

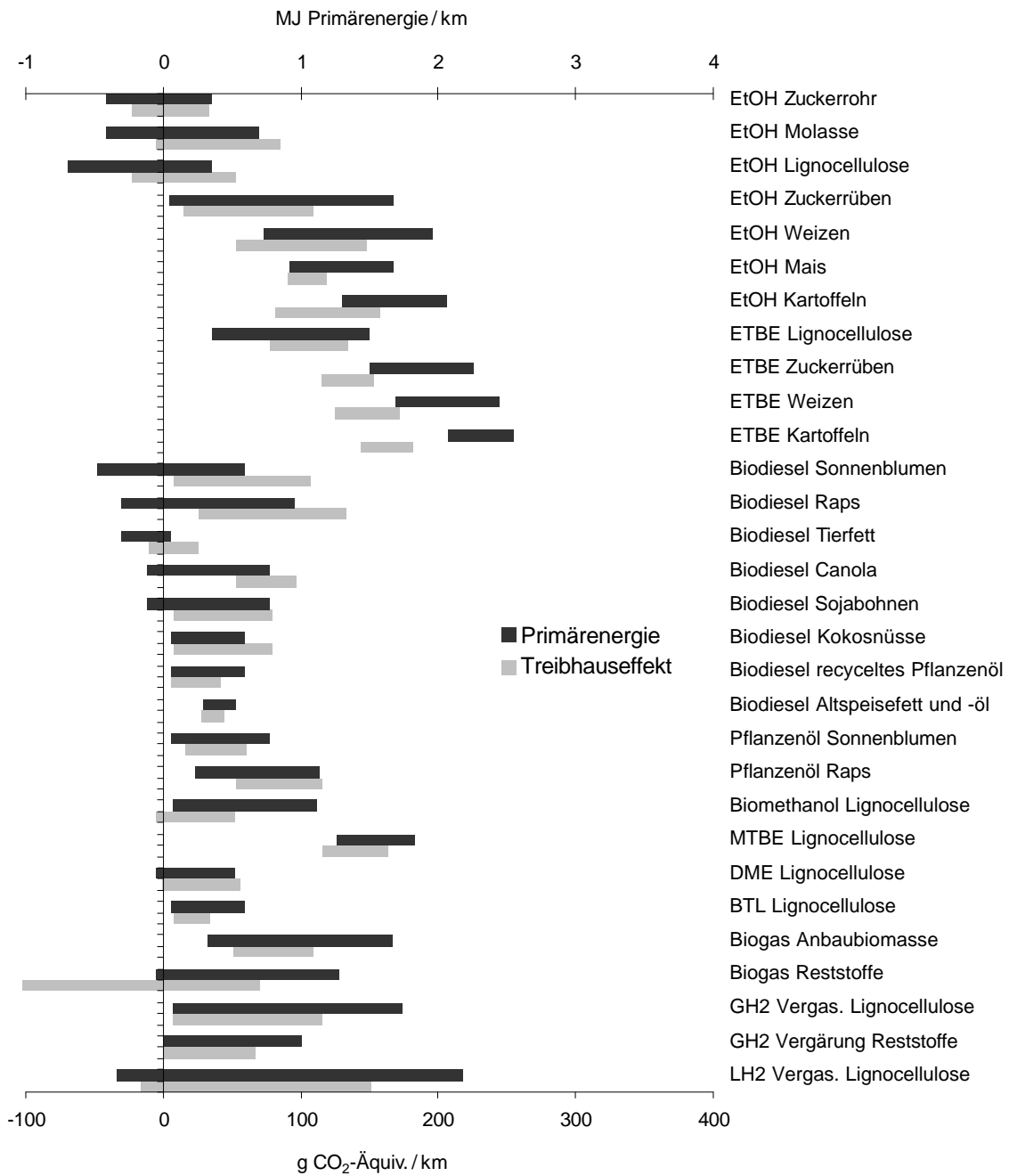


Abb. A-54: Ergebnisse der Well-to-Wheel Analyse aller analysierten Biokraftstoffe in MJ Primärenergie bzw. in g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro zurückgelegtem PKW-km.

### A 2.4.3 Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (je MJ Kraftstoffinhalt)

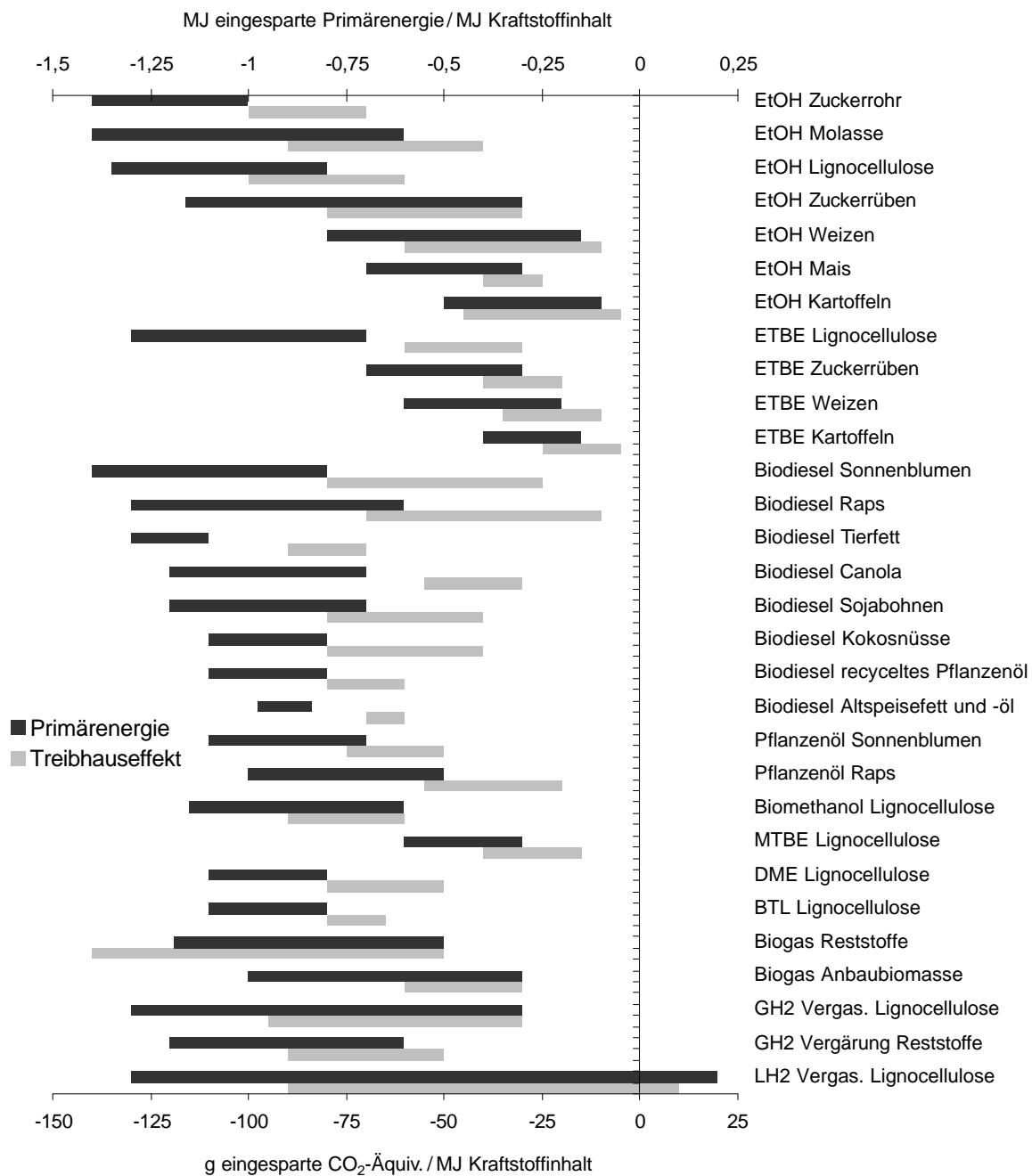


Abb. A-55: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen aller analysierten Biokraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants in MJ eingesparte Primärenergie bzw. g eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / MJ Kraftstoffinhalt. Die negativen Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe, da diesem Fall Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Äquiv.-Emissionen im Gesamtvergleich eingespart werden. Der Nullpunkt bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenswegvergleich „Biokraftstoff minus fossiler Kraftstoff“ ausgeglichen sind.

### A 2.4.4 Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen (je km)

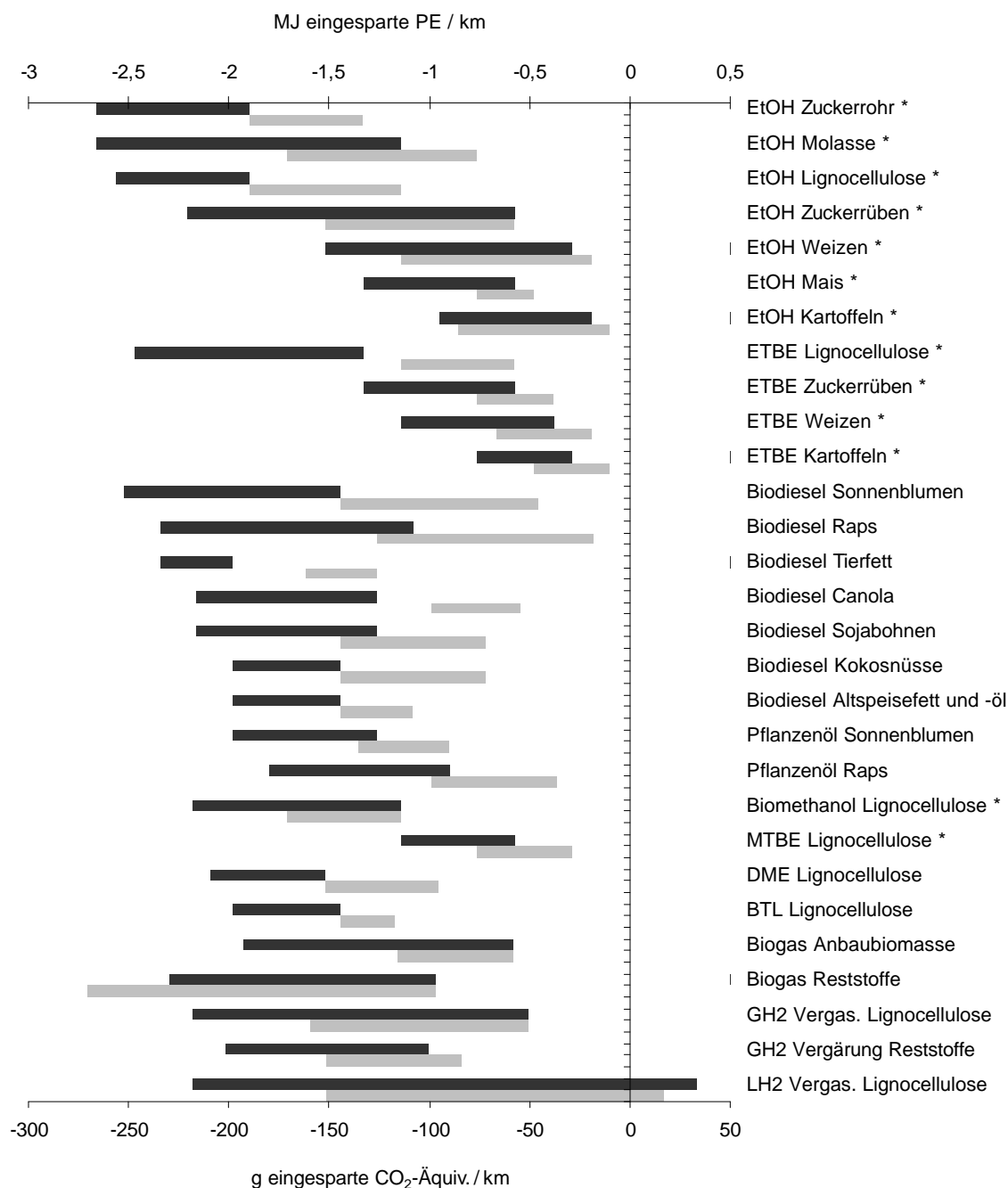


Abb. A-56: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen aller analysierten Biokraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants in MJ eingesparte Primärenergie bzw. g CO<sub>2</sub>-Äquivalente / km. Die negativen Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe, da diesem Fall Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Äquiv.-Emissionen im Gesamtvergleich eingespart werden. Der Nullpunkt bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Lebenswegvergleich „Biokraftstoff minus fossiler Kraftstoff“ ausgeglichen sind.

\*: Bezug: 100 % Biokraftstoff (bei ETBE/MTBE auch der fossile Anteil des ETBE/MTBE); Als Kraftstoffverbrauch wurde der der Beimischung angesetzt.

**A 2.4.5 Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen  
(in kg eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ eingesparte Primärenergie)**

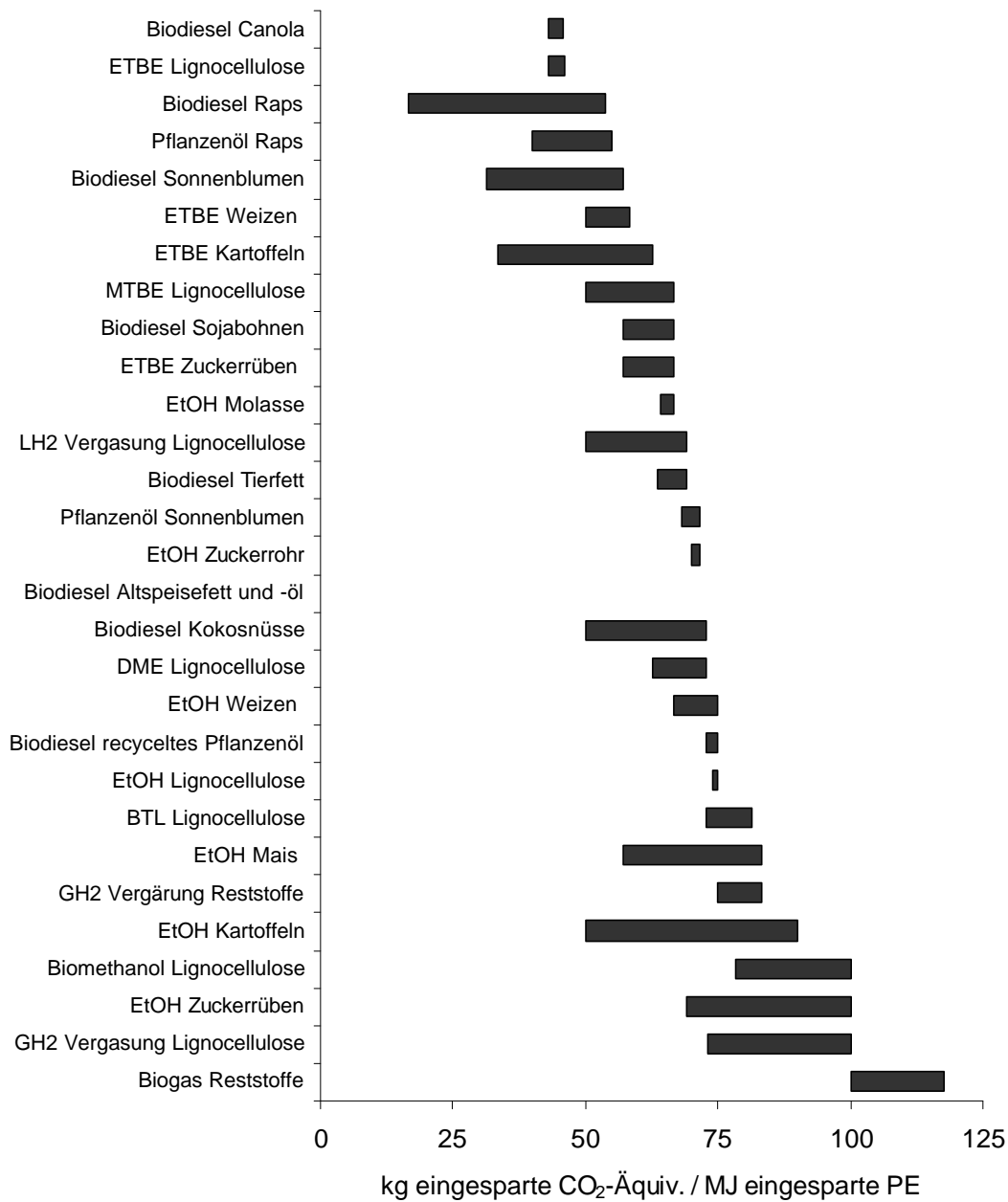


Abb. A-57: Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen der analysierten Biokraftstoffe aus Reststoffen und Anbaubiomasse in kg eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente/MJ eingesparte Primärenergie.

#### **A 2.4.6 Wasserstoff und Methanol aus Lignocellulose im Vergleich zu unterschiedlichen fossilen Kraftstoffpendants und Antriebstechnologien (je km)**

In Abbildung A-58 sind die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen von Bioethanol, gasförmigem und flüssigem Wasserstoff aus Lignocellulose im Vergleich zu fossilem Ottokraftstoff und zu fossilen Kraftstoffen auf Erdgasbasis dargestellt. Darüber hinaus werden die Unterschiede zwischen einem PKW mit Verbrennungsmotor (ICE) und einem PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle (FC) aufgezeigt.

Generell unterscheiden sich die Ergebnisse der betrachteten Varianten aufgrund der großen Bandbreiten nicht signifikant voneinander. Dennoch können einige eindeutige Ergebnisse festgehalten werden.

##### **Flüssiger Wasserstoff (LH2)**

Während die Energie- und Treibhausgasbilanzen von flüssigem Wasserstoff aus Lignocellulose bei der Gegenüberstellung mit Ottokraftstoff zugunsten des fossilen Kraftstoffs ausfallen können, fallen die Ergebnisse im Vergleich zu flüssigem Wasserstoff aus Erdgas in jedem Fall zugunsten des Biokraftstoffs aus. Dies erklärt sich durch die wesentlich höheren Aufwendungen für die Bereitstellung von flüssigem Wasserstoff aus Erdgas im Vergleich zu Ottokraftstoff.

Der Vergleich zwischen einem PKW mit Verbrennungsmotor und einem PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle zeigt in der Gesamtbilanz geringere Vorteile für den PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle auf, was durch den geringeren Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Verbrennungsmotor zu erklären ist. In der Well-to-Wheel Analyse von flüssigem Wasserstoff aus Lignocellulose (hier nicht dargestellt), liegen die Vorteile aus dem gleichen Grund bei dem PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle.

##### **Gasförmiger Wasserstoff (GH2)**

Die Gegenüberstellung von gasförmigem Wasserstoff aus Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff bzw. zu gasförmigem Wasserstoff aus Erdgas zeigt tendenziell günstigere Werte bei Energie für den Biokraftstoff wenn gasförmiger Wasserstoff aus Erdgas substituiert wird. Auch dies erklärt sich durch die höheren Energieaufwendungen für die Bereitstellung von gasförmigem Wasserstoff im Vergleich zu Ottokraftstoff.

Bezüglich der Treibhausgasemissionen tritt kein Unterschied auf, ob der biogene Wasserstoff fossilem Ottokraftstoff oder gasförmigem Wasserstoff aus Erdgas gegenübergestellt wird. Dies beruht darauf, dass die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen für die Bereitstellung von gasförmigem Wasserstoff aus Erdgas zwar wesentlich höher sind als die von Ottokraftstoff, dagegen treten infolge der Nutzung von gasförmigem Wasserstoff aber nahezu keine CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen auf, so dass hier ein Ausgleich erfolgt.

In Bezug auf die unterschiedlichen Antriebstechnologien ergeben sich die gleichen Zusammenhänge, wie bei flüssigem Wasserstoff.

##### **Methanol (MeOH)**

Aufgrund der hohen Bandbreite ergeben sich keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen der unterschiedlichen Optionen.

Der Energieaufwand und somit auch die Treibhausgasemissionen sind für die Bereitstellung von Methanol aus Erdgas höher als für Ottokraftstoff, während die Treibhausgasemissionen infolge der Nutzung in einem Verbrennungsmotor nahezu identisch sind.

Da der Methanolverbrauch in MJ / km in einem PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle geringer ist als der in einem PKW mit Verbrennungsmotor, gilt in Bezug auf die unterschiedlichen Fahrzeuge das zuvor Beschriebene.

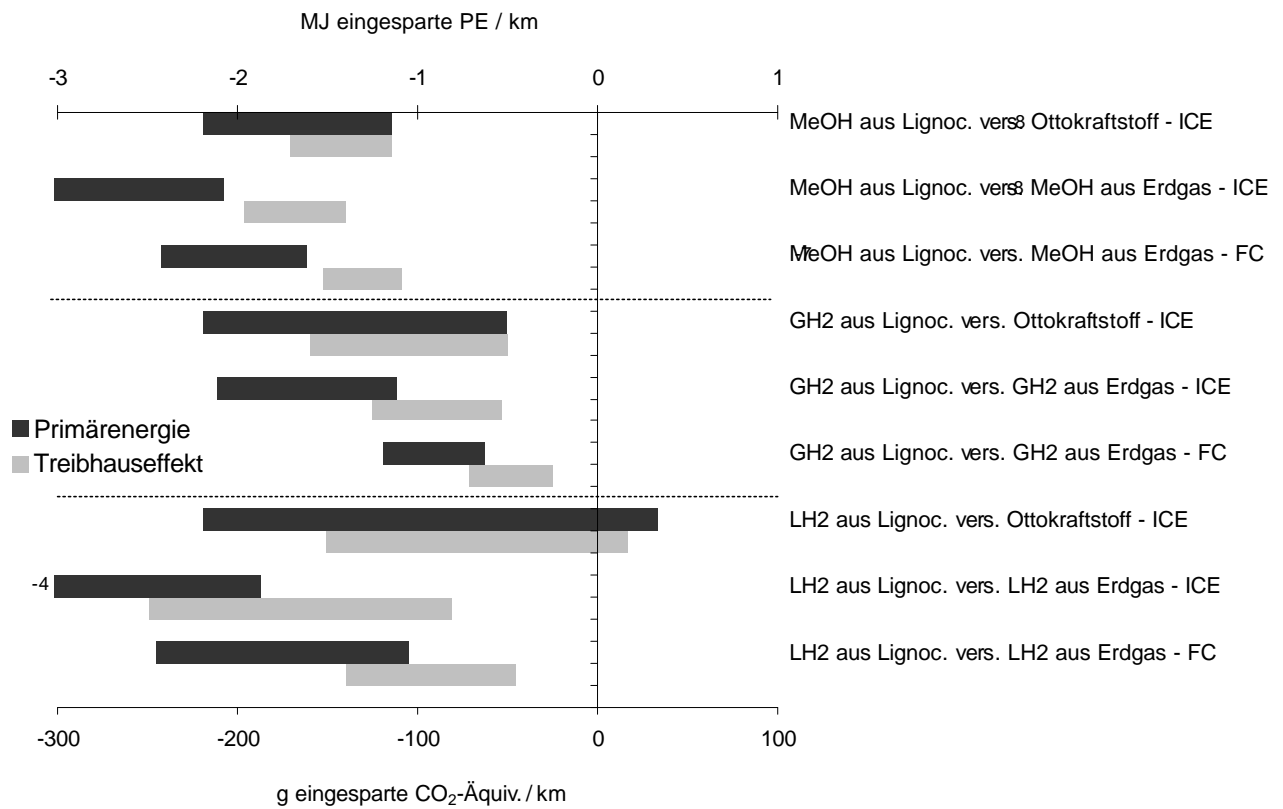


Abb. A-58: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen von MeOH, GH2 und LH2 aus Lignocellulose im Vergleich zu unterschiedlichen fossilen Kraftstoffpendants und Antriebstechnologien in MJ eingesparte Primärenergie / km bzw. in kg eingesparte CO<sub>2</sub>-Äquivalente / km. Die negativen Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe.

## A 3 Weitere Umweltwirkungen von Biokraftstoffen

Zur Analyse der weiteren Umweltwirkungen wurden die untersuchten Studien, aufgeteilt nach Biokraftstoffen, qualitativ bewertet. Die einzelnen Wirkungskategorien wurden mit einem Pluszeichen versehen, wenn sich nach der untersuchten Studie ein Vorteil für den Biokraftstoff in der jeweiligen Wirkungskategorie ergibt. Entsprechend sind die Nachteile von Biokraftstoffen mit einem Minuszeichen gekennzeichnet. Bei ähnlichen Ergebnissen eines Biokraftstoffs gegenüber dem fossilen Pendant wird ein "O" aufgeführt, während mehrdeutige Ergebnisse mit der Kombination "+/-" dargestellt sind.

### A 3.1 Bioethanol

Tab. A–1: Ökologische Vor- und Nachteile von Bioethanol im Vergleich zu Ottokraftstoff. Pluszeichen bedeuten Vorteile für Bioethanol.

	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Mais</b>				
Levelton 2000	(+) <sup>(1)</sup> (Tab. 5.16)	(-) <sup>(2)</sup> (Tab. 5.16)	+/- <sup>(3)</sup> (Tab. 5.16)	- (Tab. 5.13)
<b>Weizen</b>				
IFEU 2002a	-	-	+	-
Levington 2000				- (Tab. 15)
ETSU 1996	(-) <sup>(1)</sup> (S. 147)	(-) <sup>(2)</sup> (S. 147)	O <sup>(3)</sup> (S. 147)	
CSIRO 2001		(-) <sup>(2(4))</sup> (S. 211)	- <sup>(3(4))</sup> (S. 211)	
<b>Zuckerrüben</b>				
IFEU 2002a	-	-	+	-
FfE 1999	(-) <sup>(1)</sup> (S. 45)	(-) <sup>(2)</sup> (S. 45)	+ <sup>(3)</sup> (S. 45)	
Fromentin 2000	- <sup>(5)</sup> (S. 30)	- (S. 30)		
<b>Lignocellulose</b>				
Levelton 1999	(+) <sup>(1)</sup> (S. 38)	(-) <sup>(2)</sup> (S. 38)	+ <sup>(3)</sup> (S. 38)	- (S. 37)
NREL 2002	- (S. 308)	(-) <sup>(2)</sup> (S. 303)	+ (S. 309)	- (S. 292)
Fromentin 2000	- <sup>(5)</sup> (S. 30)	+/- (S. 30)		
CSIRO 2001		(+) <sup>(2(4))</sup> (S. 211)	- <sup>(3(4))</sup> (S. 211)	
<b>Kartoffeln</b>				
IFEU 2002a	-	-	+	-
<b>Molasse</b>				
CSIRO 2001		(+) <sup>(2(4))</sup> (S. 211)	+ <sup>(3(4))</sup> (S. 211)	

<sup>(1)</sup> es wurde nur SO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(2)</sup> es wurde nur NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(3)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

<sup>(4)</sup> nur bedingt vergleichbar, da im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff

<sup>(5)</sup> Berechnung der Umweltwirkungen durch IFEU



### **Versauerung**

Wenige Studien existieren, die vollständige  $\text{SO}_2$ -Äquivalente oder andere Aggregationen wie  $\text{H}^+$ -Bildung ausweisen, viele betrachten nur  $\text{SO}_2$  als Parameter. Die Ergebnisse sind in allen vollständig betrachteten Fällen negativ für Bioethanol, was sich grundsätzlich auch mit den anderen Biokraftstoffen deckt.

Im Regelfall sind die  $\text{SO}_2$ -Bilanzen vorteilhaft für Bioethanol, die  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Bilanzen nachteilig, was von allen Studien, falls sie diese Parameter betrachten, so ausgewiesen wird außer bei FfE (1999) und ETSU (1996). In der ersten Studie werden die Aufwendungen vollständig dem Bioethanol zugeschlagen und somit die entstehenden Kuppelprodukte außer Acht gelassen, während die andere Untersuchung einen erheblichen Aufwand für die Produktion des Bioethanol zugrunde legt, der primärenergiebezogen größer ist als die Menge produzierten Ethanol.

### **Eutrophierung**

Auch hier existieren nur zwei Studien, die  $\text{PO}_4$ -Äquivalente zusammenfassen oder in anderen Formen wie „Gesamt-N“ aggregieren, wobei bei IFEU (2002a) alle N-haltigen luftgetragenen Substanzen und bei Fromentin (2000) Phosphate und nicht näher spezifizierte N-Verbindungen betrachtet wurden. Deutlich wird, dass der Bereich der Landwirtschaft maßgeblich die Eutrophierung bestimmt, so dass im Fall der Anbaubiomasse unabhängig von den Bestimmungsmethoden die Eutrophierung für Bioethanol größer ausfällt als für den Ottokraftstoff. Werden dagegen Reststoffe für die Bioethanolproduktion herangezogen, kann das Ergebnis durchaus anders aussehen. Fromentin (2000) weist dementsprechend für den Rohstoff Lignocellulose je nach verwendetem Material (Gras oder Altpapier) eine negative oder positive Bilanz für Bioethanol aus. Beim Einsatz von Reststoffen spielt  $\text{NH}_3$  keine tragende Rolle und  $\text{SO}_2$  bzw.  $\text{NO}_x$  hängen in besonderem Maße von den eingesetzten Energieträgern ab. Darüber hinaus haben gerade bei  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  auch die betrachteten Lebenswege (Stichwort „Allokation“ gegenüber den Äquivalenzprozessen, s. Kap. 4.2 des Berichts) eine besonders große Bedeutung, so dass zusammenfassend unseres Erachtens die Ergebnisse je nach realem Einzelfall durchaus positiv oder negativ ausfallen können.

### **Photosmog**

Für die Ergebnisse zum Photosmog siehe Kapitel 4.2 im Hauptteil des Berichtes.

### **Ozonabbau**

Bioethanol zeigt für die Lachgasemissionen in allen Studien Nachteile gegenüber Ottokraftstoff. Dies entspricht insbesondere für Ethanol aus Anbaubiomasse den Erwartungen.

### A 3.2 ETBE

Tab. A-2: Ökologische Vor- und Nachteile von ETBE im Vergleich zu fossilem MTBE. Pluszeichen bedeuten Vorteile für ETBE.

ETBE	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Weizen</b>				
IFEU 2002a	-	-	+	-
<b>Zuckerrüben</b>				
IFEU et al. 2000 EU	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 BRD	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 F	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 NL	-	-	+	-
IFEU 2002a	-	-	+	-
Fromentin 2000 (*)	- (S. 30)	- (S. 30)		
<b>Lignocellulose</b>				
NREL 1999	<b>(+)</b> <sup>(1)</sup> (S. 116)	<b>(+)</b> <sup>(1)</sup> (S. 116)	<b>+</b> <sup>(2)</sup> (S. 116)	<b>+</b> (S. 116)
Fromentin 2000 (*)	- (S. 30)	<b>+/-</b> (S. 30)		
<b>Kartoffeln</b>				
IFEU 2002a	-	-	+	-

(\*) nicht im Bericht ausgewiesen, durch Analogieschlüsse und Berechnungen des IFEU (s. Tab. A-1) hier aufgeführt

<sup>(1)</sup> Berechnung der Umweltwirkungen durch IFEU

<sup>(2)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

Bei ETBE aus Anbaubiomasse zeigt sich das gleiche Bild wie bei Bioethanol: Die Studien zeigen Nachteile für den Biokraftstoff bei der Versauerung, der Eutrophierung und dem Ozonabbau.

Für ETBE aus Lignocellulose dagegen weist NREL (1999) in diesen Umweltwirkungen ausschließlich Vorteile für den Biokraftstoff aus. Dabei wird dort als Referenzsystem die direkte Verbrennung von Waldrestholz (ohne Rückgewinnung von Energie) angenommen. Dies führt zu entsprechend niedrigeren Emissionen für den Biokraftstoff. Auch bei Fromentin (2000) wird für den Rohstoff Lignocellulose, wenn er einen Reststoff darstellt, eine positive Bilanz für Bio-ETBE bescheinigt. Hier kommen die gleichen Argumente zum Tragen wie schon beim Bioethanol, so dass bei ETBE aus Reststoffen unseres Erachtens die Ergebnisse je nach betrachteten Rohstoffen Vor- oder Nachteile zeigen können.

Zusammengefasst lassen sich die Umweltwirkungen, die Ethanol aus Anbaubiomasse hat, auf das Folgeprodukt ETBE übertragen. ETBE aus holzartigen Reststoffen ist positiver zu bewerten und kann durchaus in allen Umweltwirkungen Vorteile gegenüber dem fossilen Äquivalent haben.

### A 3.3 Biodiesel

Tab. A-3: Ökologische Vor- und Nachteile von Biodiesel im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff. Pluszeichen bedeuten Vorteile für Biodiesel.

Biodiesel	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Raps</b>				
IFEU et al. 2000 EU	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 DK	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 BRD	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 F	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 A	-	+	+	-
IFEU et al. 2000 CH	-	+	+	-
IFEU 2003	-	-	+	-
FAT 2000	-	-	+( <sup>4</sup> )	-
FfE 1999	(+) <sup>(1)</sup> (S. 45)	-	+( <sup>4</sup> )	-
Levington 2000	-	-	-	- (Tab. 15)
CSIRO 2001	-	(-) <sup>(3)</sup> (S. 165)	- <sup>(4)</sup> (S. 165)	-
VITO 1997	- (Tab. A7.1)	- (Tab. A7.1)	+(Tab. A7.1)	-
<b>Sonnenblumen</b>				
IFEU et al. 2000 EU	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 F	-	+	+	-
IFEU et al. 2000 GR	-	-	+	-
IFEU et al. 2000 I	-	-	+	-
IFEU 2002b	-	-	+	-
<b>Sojabohnen</b>				
Levelton 2002	(+) <sup>(1)</sup> (S. 52)	-	+( <sup>4</sup> ) (S. 52)	- (S. 52)
NREL 1998	(+) <sup>(1)</sup> (S. 251)	(-) <sup>(2)</sup> (S. 251)	- <sup>(4)</sup> (S. 251)	-
CSIRO 2001	-	(-) <sup>(3)</sup> (S. 165)	- <sup>(4)</sup> (S. 165)	-
<b>Canola</b>				
Levelton 2002	(+) <sup>(1)</sup> (S. 52)	-	+( <sup>4</sup> ) (S. 52)	- (S. 52)
CSIRO 2001	-	(-) <sup>(3)</sup> (S. 165)	- <sup>(4)</sup> (S. 165)	-
<b>Tierfett</b>				
Levelton 2002	(+) <sup>(1)</sup> (S. 52)	-	+( <sup>4</sup> ) (S. 52)	+(S. 52)

<sup>(1)</sup> es wurde nur SO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(2)</sup> es wurde nur NH<sub>3</sub> betrachtet

<sup>(3)</sup> es wurde nur NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(4)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

#### Versauerung

Nur VITO (1997), FAT (2000) und IFEU (alle Studien) betrachten die Versauerung in aggregierter Form vollständig. Wie schon für Bioethanol, werden die Ergebnisse bei diesen Autoren durchweg negativ für Biodiesel eingestuft. Im Detail sind die SO<sub>2</sub>-Bilanzen vorteilhaft für Bioethanol, die NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Bilanzen nachteilig.

### **Eutrophierung**

Auch die Eutrophierung wird nur von den o. g. Autoren in aggregierter Form z. B. als  $\text{PO}_4$ -Äquivalente ausgewiesen. Auch hier bestimmt die Landwirtschaft maßgeblich das Ergebnis, so dass im Fall der Anbaubiomasse die Eutrophierung für Biodiesel in der Regel größer ausfällt als für fossilen Dieselkraftstoff. Die Vorteile, die von einigen Studien für Biodiesel ausgewiesen werden, resultieren bei IFEU et al. (2000) für Österreich aus unterschiedlichen etablierten Vorgehensweisen in den nationalen Nitratbilanzierungen, während dort für die Schweiz und für Frankreich deutlich höhere Aufwendungen für das Referenzsystem angesetzt werden.

### **Photosmog**

Für die Ergebnisse zum Photosmog siehe Kapitel 4.2 im Hauptteil des Berichtes.

### **Ozonabbau**

Die Ergebnisse bei den Lachgasemissionen zeigen für alle Arten von Anbaubiomasse Nachteile gegenüber fossilem Dieselkraftstoff.

Levelton (2002) zeigt für Biodiesel aus Tierfett Vorteile gegenüber dem fossilen Kraftstoff, die aus der Gutschrift von Sojamehl als äquivalentem Futtermittel gegenüber dem Kuppelprodukt Tiermehl sowie fehlendem Äquivalenzprozess (zu der alternativen Verwendung der Rohstoffe s. Kap. 4.2 im Hauptteil des Berichts, Ergebnis 2) stammen. Im übrigen sind die auftretenden Werte, wenn keine Anbaubiomasse betrachtet wird, um mehrere Größenordnungen niedriger, so dass die Unterschiede im Vergleich „biogener gegenüber fossiler Kraftstoff“ von untergeordneter Bedeutung sind.

### A 3.4 Pflanzenöl

Tab. A-4: Ökologische Vor- und Nachteile von Pflanzenöl im Vergleich zu fossilem Dieselmotorkraftstoff. Pluszeichen bedeuten Vorteile für Pflanzenöl.

Pflanzenöl	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Raps</b>				
IFEU 2001	-	-	+	-
FfE 1999	<b>(+)</b> <sup>(1)</sup> (S. 45)	<b>(-)</b> <sup>(2)</sup> (S. 45)	<b>+</b> <sup>(3)</sup> (S. 45)	

<sup>(1)</sup> es wurde nur SO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(2)</sup> es wurde nur NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(3)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

Bei Pflanzenöl liegt nur eine Quelle vor, die die Versauerung und Eutrophierung vollständig in aggregierter Form betrachtet. Die Ergebnisse decken sich alle mit den anderen Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse (vgl. Diskussion zu den Parametern bei Bioethanol und Biodiesel).

### A 3.5 Biomethanol

Tab. A–5: Ökologische Vor- und Nachteile von Biomethanol im Vergleich zu Ottokraftstoff. Pluszeichen bedeuten Vorteile für Biomethanol.

Biomethanol	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Lignocellulose</b>				
IFEU 2002c	O	-	+	-
<b>Miscanthus</b>				
FfE 1999	(+) <sup>(1)</sup> (S. 45)	(O) <sup>(2)</sup> (S. 45)	+ <sup>(4)</sup> (S. 45)	
Dreier 1999	(+) <sup>(1)</sup> (S. 112)	(O) <sup>(2)</sup> (S. 112)	+ <sup>(4)</sup> (S. 111)	
<b>Waldrestholz</b>				
Dreier 1999	(+) <sup>(1)</sup> (S. 112)	(+) <sup>(2)</sup> (S. 112)	+ <sup>(4)</sup> (S. 111)	
<b>Kurzumtriebsholz</b>				
ETSU 1996	(-) <sup>(3)</sup> (S. 127)	(-) <sup>(2)</sup> (S. 127)	O <sup>(4)</sup> (S. 127)	
<b>Abfallholz</b>				
Pehnt 2002	-	-	+	-

<sup>(1)</sup> es wurde nur SO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(2)</sup> es wurde nur NO<sub>x</sub> betrachtet, NH<sub>3</sub> fehlt

<sup>(3)</sup> es wurden nur SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(4)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

Für Biomethanol existieren zwei Quellen, die die Umweltwirkungen mit allen relevanten Parametern analysieren: Beide Untersuchungen betrachten Methanol aus Reststoffen.

Die Ergebnisse stimmen weitgehend mit den schon beschriebenen Biokraftstoffen überein. Hier kann die zugrunde gelegte alternative Verwendung der Rohstoffe ausschlaggebend für das Ergebnis bei der Versauerung und der Eutrophierung sein. Auch hat der Energieeinsatz für die Aufbereitung zum fertigen Kraftstoff je nach angenommenem Energieträger unterschiedlich hohe Emissionen, was besonders die Versauerung und Eutrophierung beeinflussen kann.

Die Ergebnisse werden vor allem dadurch bestimmt, ob das Synthesegas als Energiequelle oder ausschließlich zur Kraftstoffproduktion genutzt wird. Dabei wirkt sich die Nutzung des Synthesegases als Energiequelle positiv auf die weiteren Umweltkategorien aus. Auch kann die Art und Weise der Bilanzierung (Gutschriftenerteilung oder Allokation) das Ergebnis drastisch beeinflussen.

### A 3.6 DME aus Lignocellulose

Tab. A–6: Ökologische Vor- und Nachteile von DME aus Lignocellulose im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Pluszeichen bedeuten Vorteile für DME.

DME	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Lignocellulose</b>				
IFEU 2002c	O	-	+	-
Atrax 2002 <sup>(*)</sup>	(O) <sup>(1)</sup> (S. 22)	(-) <sup>(2)</sup> (S. 22)	+ <sup>(3)</sup> (S. 22)	

<sup>(1)</sup> es wurden nur SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> betrachtet, NH<sub>3</sub> fehlt

<sup>(2)</sup> es wurde nur NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(3)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

<sup>(\*)</sup> Rohstoffquelle nicht genannt

Für DME gibt es nur eine Studie, die eine umfassende Analyse der Umweltwirkungen vornimmt. Es wird nur DME aus Reststoffen betrachtet.

Wie schon bei Methanol aus Resthölzern können bei DME aus Reststoffen die Versauerung und Eutrophierung zugunsten oder zuungunsten des Biokraftstoffs ausfallen, je nach betrachtetem Äquivalenzsystem, den angenommenen Energieträgern bei der Kraftstoffaufbereitung, möglichen Unterschieden bei der Nutzung im Motor sowie dem bilanztechnischen Umgang mit den anfallenden Kuppelprodukten. Zur Diskussion siehe die Darstellung zu Biomethanol auf der vorherigen Seite.

### A 3.7 Biogas

Tab. A–7: Ökologische Vor- und Nachteile von Biogas aus organischen Reststoffen im Vergleich zu Ottokraftstoff. Pluszeichen bedeuten Vorteile für Biogas.

Biogas	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Organische Reststoffe</b>				
Dreier 1999	+ <sup>(1)</sup> (S. 112)	+ <sup>(2)</sup> (S. 112)	- <sup>(3)</sup> (S. 111)	
<b>Stroh</b>				
Börjesson 2003	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	
<b>Zuckerrübenblatt</b>				
Börjesson 2003	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	
<b>Gülle</b>				
Börjesson 2003	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	
<b>Industrieabfälle</b>				
Börjesson 2003	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	
<b>Haushaltsabfälle</b>				
Börjesson 2003	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	
<b>Klee / Gras</b>				
Börjesson 2003	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	(+) <sup>(4)</sup>	

<sup>(1)</sup> es wurden nur SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(2)</sup> es wurde nur NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(3)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

<sup>(4)</sup> Berechnung der Umweltwirkungen durch IFEU

Im Fall des Kraftstoffs Biogas existieren keine Untersuchungen, die die Umweltwirkungen vollständig diskutieren. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichtes lagen von Börjesson (2003) noch keine Daten vor. Im übrigen wird überwiegend Biogas aus Reststoffen, nur in einem Fall Biogas aus Anbaubiomasse betrachtet.

Börjesson (2003) weist für die Biogaserzeugung und -nutzung durchweg Vorteile aus. Beim landwirtschaftlich produzierten Rohstoff liegt das daran, dass dafür keine Veränderungen in den luftgetragenen Emissionen – speziell NH<sub>3</sub> – angenommen werden, sondern lediglich in den Nitratauswaschungen vom Feld bzw. Brachland, die in dieser Analyse unberücksichtigt bleiben.

In der Studie, in der organische Reststoffe betrachtet werden, zeigen sich Vorteile für den Biokraftstoff bei den betrachteten Versauerungs- und Eutrophierungsgasen. Auch hier kann es allerdings in Abhängigkeit der betrachteten alternativen Nutzungen der Biomasse, der zugrunde gelegten Energieträger zur Biogaserzeugung, der Annahme von möglichen Unterschieden bei der motorischen Nutzung sowie der Art der Berücksichtigung anfallender Kuppelprodukte allerdings auch zu Nachteilen für den Biokraftstoff kommen.

Zusammengefasst kann Biogas je nach eingesetztem Rohstoff und den oben beschriebenen anderen Randbedingungen durchaus in allen Umweltwirkungen Vorteile gegenüber fossilem Ottokraftstoff haben.



### A 3.8 Wasserstoff durch Vergasung von Lignocellulose

Tab. A–8: Ökologische Vor- und Nachteile von gasförmigem Wasserstoff (GH2) im Vergleich zu Ottokraftstoff. Pluszeichen bedeuten Vorteile für GH2.

Wasserstoff	Versauerung SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Eutrophierung PO <sub>4</sub> -Äquiv.	Photosmog C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv.	Ozonabbau N <sub>2</sub> O
<b>Lignocellulose</b>				
FfE 1999	<b>(+)</b> <sup>(1)</sup> (S. 45)	<b>(-)</b> <sup>(2)</sup> (S. 45)	<b>(+)</b> <sup>(3)</sup> (S. 45)	
Pehnt/Gärtner 2003 <sup>(*)</sup>	- ?	- ?	+ ?	

<sup>(1)</sup> es wurde nur SO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(2)</sup> es wurde nur NO<sub>x</sub> betrachtet

<sup>(3)</sup> es wurden nur Kohlenwasserstoffe betrachtet

<sup>(\*)</sup> nicht vergleichbar, da nicht alle Lebenswegabschnitte berücksichtigt wurden

Für gasförmigen Wasserstoff als Kraftstoff liegt keine umfassende Analyse der Umweltwirkungen vor. Während bei FfE (1999) nur einige Parameter betrachtet werden, werden bei Pehnt (2003) nicht alle Lebenswegabschnitte betrachtet. Beide Quellen listen also keine belastbaren Ergebnisse. Die FfE-Daten zeigen lediglich für die SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen die bekannten Vor- und Nachteile, während die Ergebnisse von Pehnt (2003) nicht vergleichbar sind.

## A 4 Kosten von fossilen Kraftstoffen und Biokraftstoffen

In Kapitel 4.3 werden die Kosten für die Bereitstellung von Biokraftstoffen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen dargestellt und erläutert. In diesem Kapitel werden die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Autoren zu den unterschiedlichen Kraftstoffen – getrennt nach Rohstoffbasis – dargestellt, die Ursachen für die Unterschiede aufgezeigt und die Ableitung der Bandbreite erläutert.

Im Gegensatz zu den Energie- und Treibhausgasbilanzen wird hinsichtlich der Kosten keine Bilanz erstellt, indem der fossile Lebensweg von dem biogenen Lebensweg subtrahiert wird. Bezüglich der Kosten werden die einzelnen Lebenswege separat dargestellt, wobei die einzelnen Bereiche wie folgt aufgeteilt sind:

- Rohstoffkosten
- Kosten für den Transport der Rohstoffe: Sie werden nicht separat aufgeführt, sondern den Rohstoffkosten zugeordnet.
- Konversionskosten: Hier werden die Kapital- und Betriebskosten für die Konversion aufgeführt. Zu den Betriebskosten gehören an sich auch die Rohstoffkosten. Da die Rohstoffkosten in der Regel jedoch einen erheblichen Anteil an den gesamten Bereitstellungskosten aufweisen, werden diese hier gesondert aufgeführt.
- Einnahmen durch Nebenprodukte
- Distributionskosten

Steuern und Gewinnaufschläge werden nicht berücksichtigt, da sie den Vergleich zwischen konventionellen und Biokraftstoffen verfälschen würden.

In einigen Studien können die Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen nicht nach den o.g. Bereichen aufgeteilt werden. Zu Vergleichszwecken bzw. wenn keine anderen Studien zur Verfügung stehen, werden die Ergebnisse dieser Studien dennoch aufgeführt, obwohl ihre Aussagekraft sehr eingeschränkt ist.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurde als Minimum häufig der kleinste in der Literatur gefundene Wert herangezogen – plus den Aufwendungen für die Bereiche, die in diesem Wert nicht berücksichtigt wurden. Der höchste in der Literatur gefundene Wert wurde häufig nicht berücksichtigt. Es wird zwar nicht bestritten, dass die Biokraftstoffproduktion unter bestimmten Voraussetzungen extrem hohe Kosten verursachen kann, jedoch werden solchen Optionen langfristig keine Realisationschancen eingeräumt.

#### A 4.1 Fossile Kraftstoffe

Die Bereitstellungskosten von fossilen Kraftstoffen sind vor allem von den Rohölkosten abhängig. Diese sind erheblichen Schwankungen unterlegen und belaufen sich derzeit im weltweiten Mittel auf ca. 29 Dollar / Barrel, was 4 Euro / GJ entspricht (EIA 2004). In der EU-CAR-Studie (2003) wird von einem Rohölpreis von 4,6 Euro / GJ ausgegangen (EUCAR 2004). Neben den Rohölkosten setzen sich die Bereitstellungskosten noch aus den Kosten für den Rohöltransport, für die Raffination und die Distribution der Kraftstoffe zusammen. In der DLR-Studie (2003) werden die Bereitstellungskosten von fossilen Kraftstoffen auf Rohölbasis – ohne Verteilungskosten – mit 6 Euro / GJ angesetzt.

Die ermittelte Bandbreite der Bereitstellungskosten von fossilen Kraftstoffen ergibt sich aus der Variabilität der Rohöl-, Konversions- und Distributionskosten.

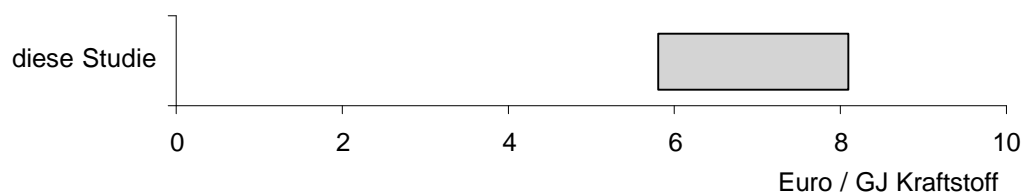


Abb. A-59: Bereitstellungskosten fossiler Kraftstoffe in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

## A 4.2 Biokraftstoffe

### A 4.2.1 Bioethanol

#### a) Bioethanol aus Zuckerrohr

Zu den Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Zuckerrohr liegt uns nur eine Studie vor und in dieser erfolgte keine Aufteilung der Kosten auf die o.g. Bereiche.

Die abgeleitete Bandbreite basiert auf den Bereitstellungskosten, die für Brasilien erhoben wurden. In Ländern, in denen kein Zuckerrohr angebaut werden kann wie beispielsweise in Großbritannien, sind die Bereitstellungskosten von Ethanol – aus importiertem Zuckerrohr – bis zu drei mal höher als in Brasilien (vgl. Abb. A–60). Diese Option wurde bei der Ableitung der Bandbreite nicht berücksichtigt. Allerdings wurde durchaus berücksichtigt, dass Bioethanol aus Zuckerrohr auch in Ländern produziert werden kann, in denen die Bedingungen nicht ganz so günstig sind wie in Brasilien.

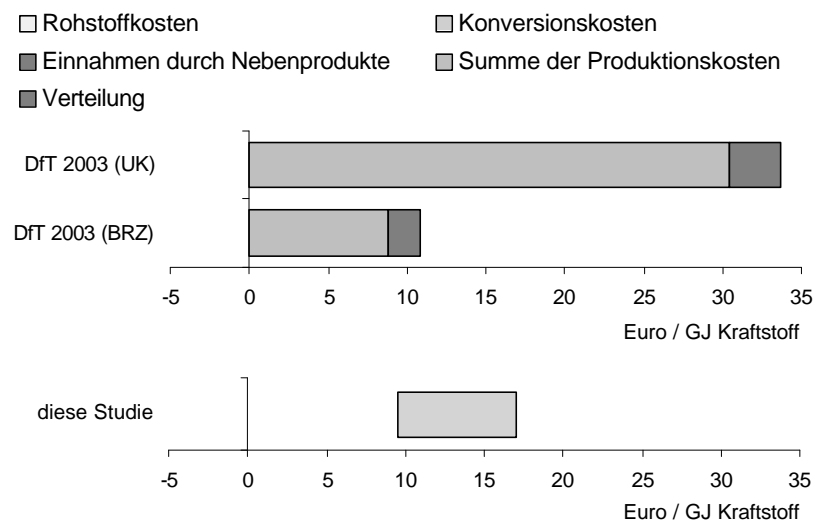


Abb. A–60: Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Zuckerrohr in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### b) Bioethanol aus Mais

In den uns vorliegenden Studien zu den Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Mais, wurden Einnahmen durch Nebenprodukte und Distributionskosten nicht immer berücksichtigt und in manchen Studien wurde keine Aufteilung auf die Einzelbereiche vorgenommen.

Das Minimum der ermittelten Bandbreite orientiert sich an der Studie der IEA (2003), wobei hier noch zusätzlich die Verteilung berücksichtigt wurde. Das Maximum orientiert sich an den Studien von Jungmeier (2003) und der TU München (2003). In diesen Studien sind die gesamten Bereitstellungskosten nahezu identisch, die Kosten der Einzelbereiche variieren jedoch sehr stark. Die DLR-Studie (2003) wurde nicht berücksichtigt, da hier keine Angaben zu den Einnahmen durch Nebenprodukte gemacht wurden und da die gesamten Produktionskosten nicht auf die Einzelbereiche aufgeteilt sind, wodurch die Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses eingeschränkt ist.

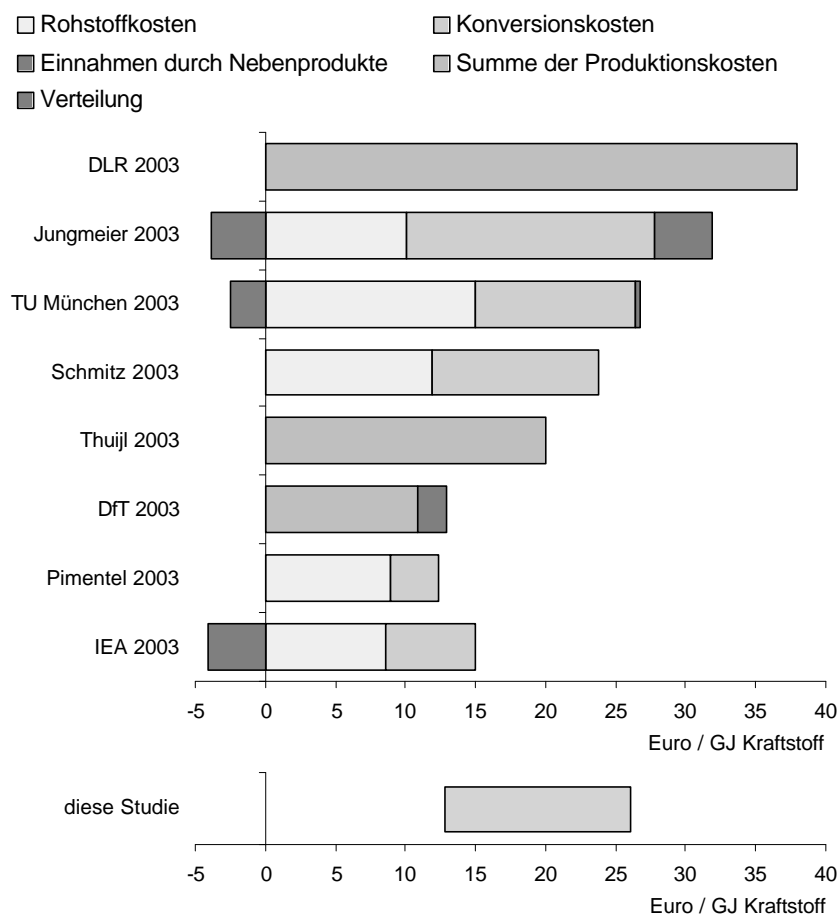


Abb. A-61: Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Mais in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### c) Bioethanol aus Weizen

Auch in den Studien zu den Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Weizen wurden nicht immer alle Kosten berücksichtigt.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurden alle Einzelbereiche sowie die hohe Variabilität der Rohstoff- und Konversionskosten berücksichtigt. Allerdings blieben extrem hohe Rohstoffkosten (vgl. Jungmeier 2003) und extrem hohe Konversionskosten (vgl. EUCAR 2003) unberücksichtigt, da die übrigen Studien zeigen, dass die Produktion auch mit niedrigeren Kosten möglich ist.

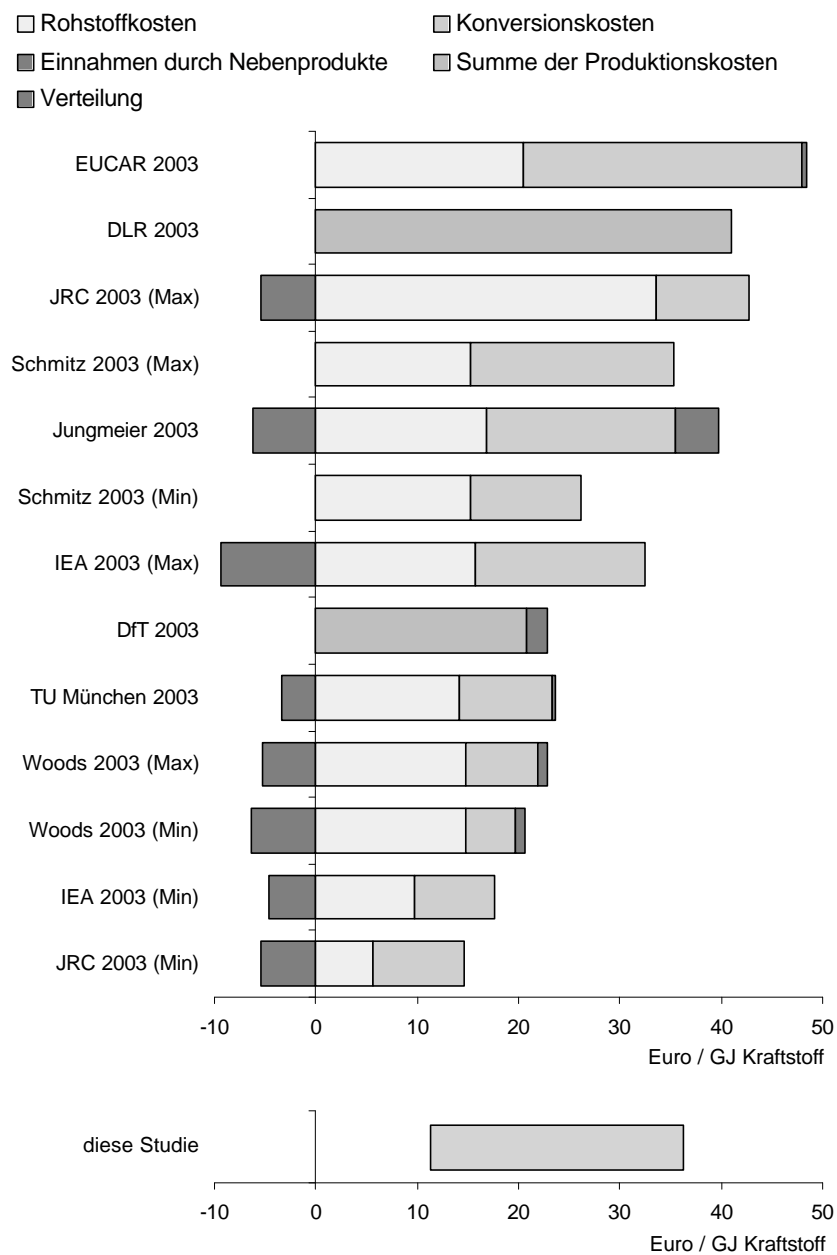


Abb. A-62: Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Weizen in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### d) Bioethanol aus Zuckerrüben

Bezüglich der Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Zuckerrüben fallen die vergleichsweise hohen Rohstoffkosten auf. Sie sind häufig doppelt so hoch wie die Konversionskosten, unterliegen jedoch einer sehr hohen Variabilität.

Die hohe Variabilität der Rohstoffkosten kommt in der Bandbreite zum Ausdruck, wobei auch hier extrem hohe Rohstoffkosten (vgl. Fromentin 2000, Jungmeier 2003) nicht berücksichtigt wurden, da die übrigen Studien zeigen, dass die Kosten für Zuckerrüben auch durchaus geringer sein können.

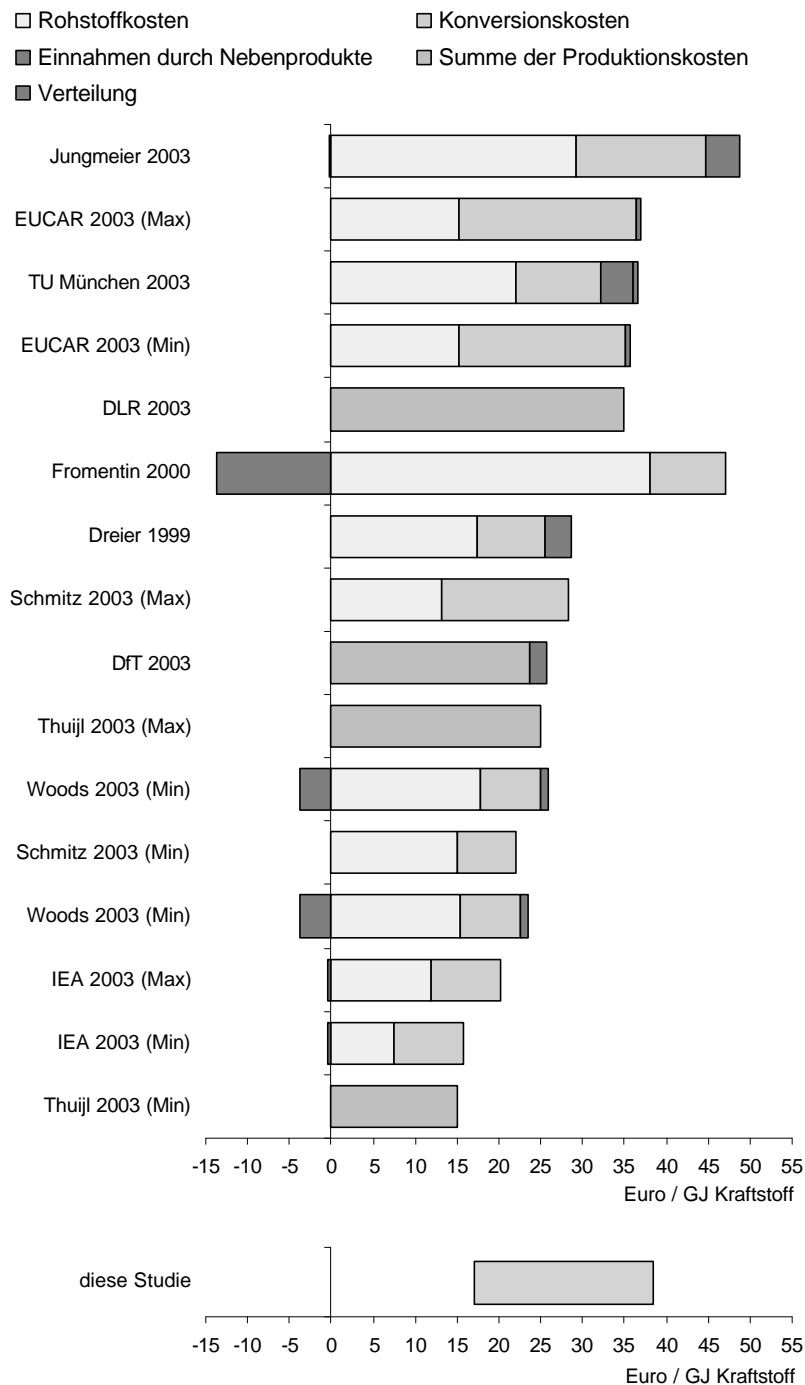


Abb. A-63: Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Zuckerrüben in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### e) Bioethanol aus Lignocellulose

Derzeit spielt die Produktion von Bioethanol aus Lignocellulose noch keine Rolle, was neben technischen Schwierigkeiten auch mit den hohen Kosten für die Produktion zusammenhängt. In den vorliegenden Studien variieren sowohl die Konversionskosten wie auch die Rohstoffkosten beträchtlich. Die Rohstoffkosten sind in erster Linie davon abhängig, ob es sich um Anbaubiomasse oder Reststoffe handelt. Die Konversionskosten variieren vor allem in Abhängigkeit derzeitiger und zukünftiger Technologie.

In der ermittelten Bandbreite wurden die beschriebenen Unterschiede berücksichtigt.

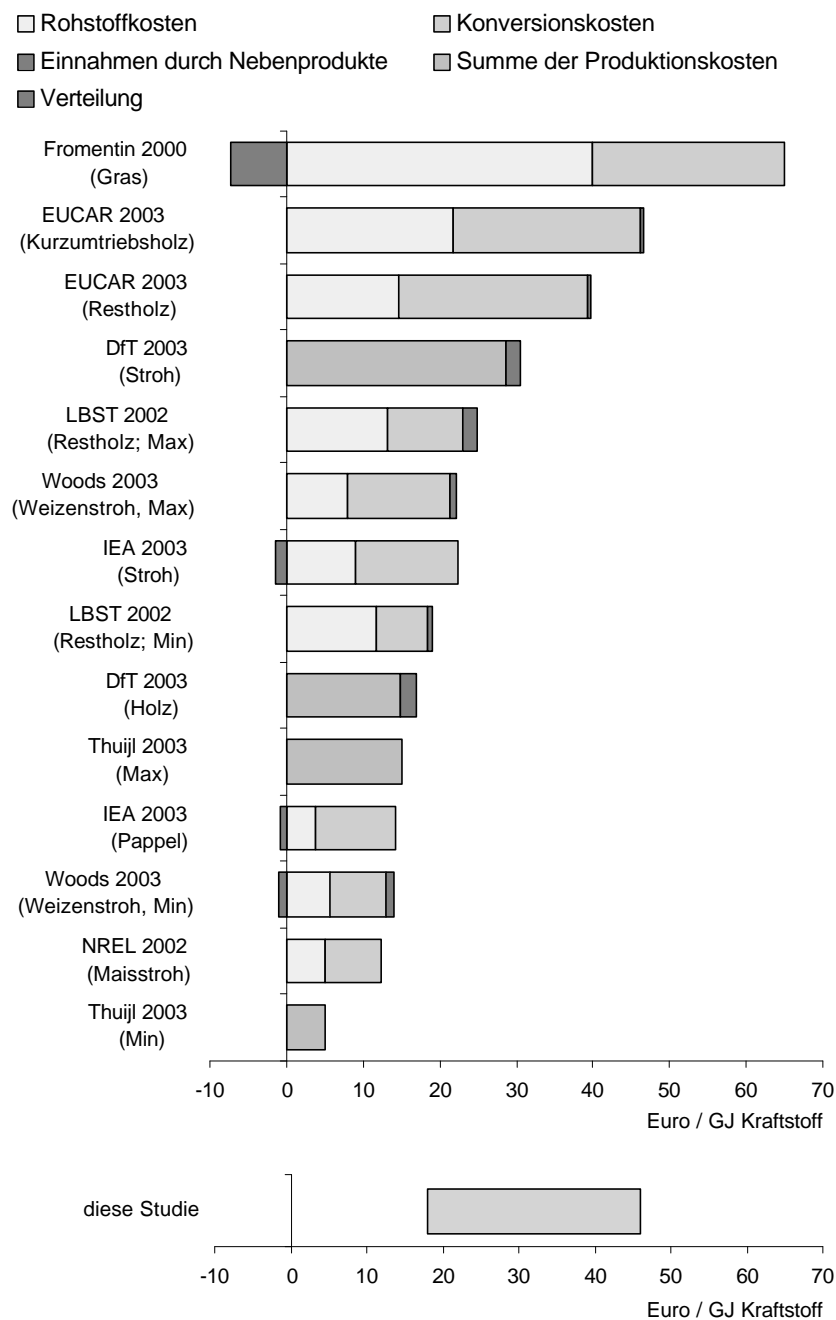


Abb. A–64: Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Lignocellulose in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.



**f) Bioethanol aus Kartoffeln**

Bezüglich der Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Kartoffeln liegen nur zwei Studien vor. Nach Schmitz (2003) sind sowohl die Rohstoffkosten wie auch die Konversionskosten bei der Bioethanolproduktion aus Kartoffeln höher als bei der aus Zuckerrüben.

Die Ableitung der Bandbreite für die Bereitstellungskosten der Bioethanolproduktion aus Kartoffeln orientiert sich an den von Schmitz (2003) ermittelten Werten – für Kartoffeln und Zuckerrüben – und der zuvor ermittelten Bandbreite für die Bioethanolproduktion aus Zuckerrüben.

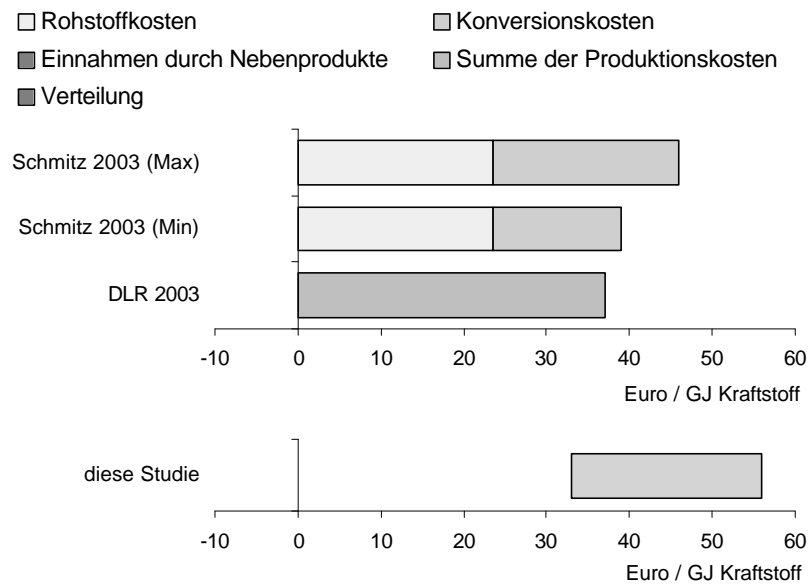


Abb. A–65: Bereitstellungskosten von Bioethanol aus Kartoffeln in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

## A 4.2.2 Biodiesel

### a) Biodiesel aus Raps

In den betrachteten Studien zu den Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Raps wurden die Einnahmen durch Nebenprodukte nicht immer berücksichtigt. Die Bereitstellungskosten unterscheiden sich vor allem aufgrund der hohen Variabilität der Rohstoffkosten.

Die abgeleitete Bandbreite orientiert sich an mittleren Verhältnissen, wobei vor allem extrem hohe Rohstoffkosten nicht in die Bandbreite eingeflossen sind.

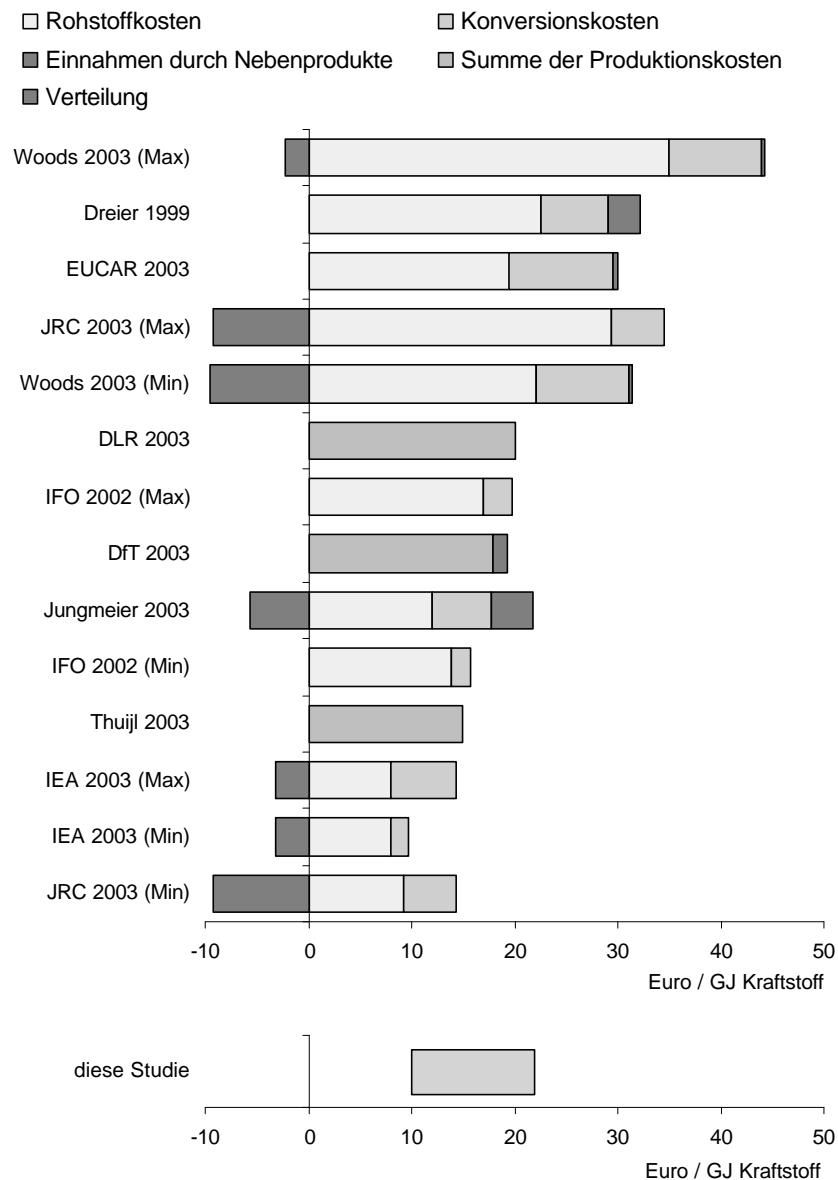


Abb. A-66: Bereitstellungskosten von Biodiesel aus Raps in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### b) Biodiesel aus Sonnenblumen

Im Vergleich zu den Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Raps liegen zu den Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Sonnenblumen nicht so viele Studien vor. Die Einnahmen durch Nebenprodukte wurden nur in einer Studie berücksichtigt. Danach liegen sie in der gleichen Größenordnung, wie die von Biodiesel aus Raps. Die Rohstoffkosten übersteigen die Konversionskosten um das 1,4- bis 4,5-fache.

Die abgeleitete Bandbreite der Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Sonnenblumen ist größer als die für Biodiesel aus Raps, da die Kosten für Sonnenblumen geringer (EUCAR 2003) oder höher (Jungmeier 2003) sein können als die für Raps.

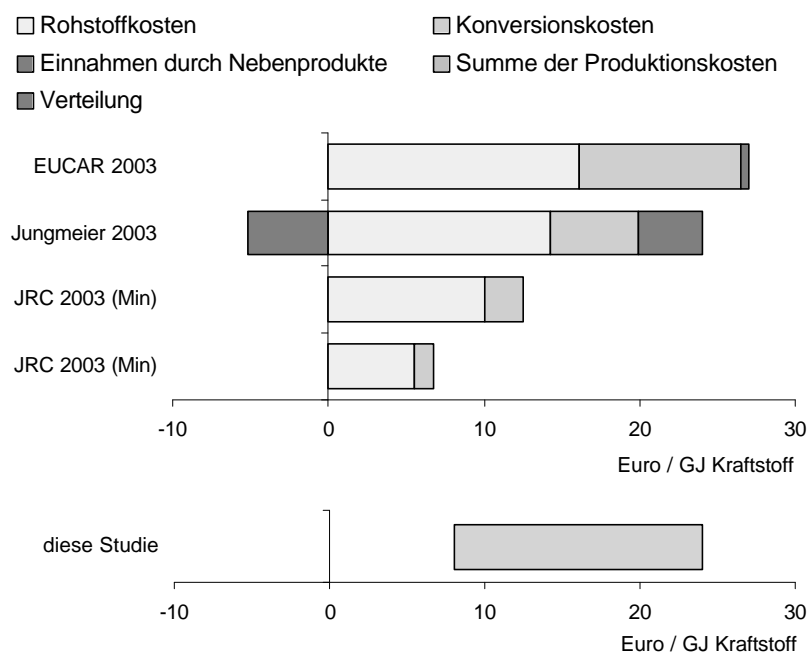


Abb. A-67: Bereitstellungskosten von Biodiesel aus Sonnenblumen in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### c) Biodiesel aus Sojabohnen

Zu den Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Sojabohnen liegt uns nur eine Studie vor. In dieser wurde keine Aufteilung der Bereitstellungskosten auf die Einzelbereiche vorgenommen.

Die Bandbreite der Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Sojabohnen orientiert sich an den Ergebnissen des DfT (2003) und der Bandbreite für Biodiesel aus Raps. Die ermittelten Bereitstellungskosten des DfT waren für Biodiesel aus Sojabohnen um 3,4 Euro / GJ geringer als die für Biodiesel aus Raps, so dass davon ausgegangen wurde, dass die Bandbreite für Biodiesel aus Sojabohnen um diesen Betrag geringer ist, als die für Biodiesel aus Raps.

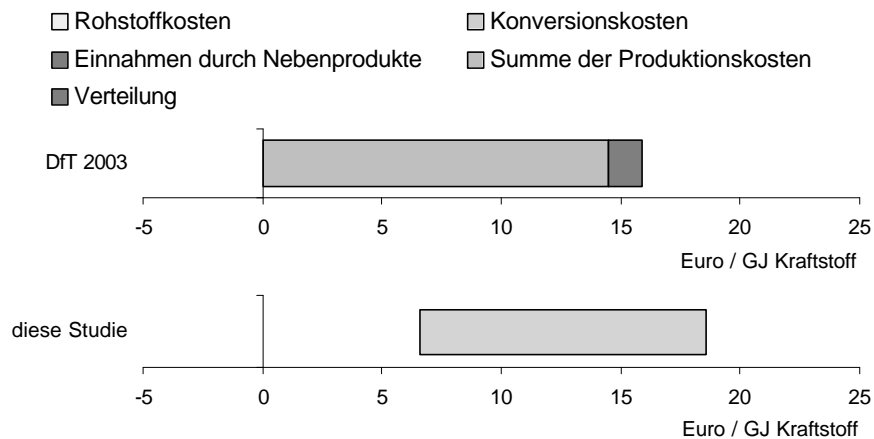


Abb. A-68: Bereitstellungskosten von Biodiesel aus Sojabohnen in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

**d) Biodiesel aus Altspisefetten und -ölen**

Die Bereitstellungskosten von Biodiesel aus Altspisefetten und -ölen sind in erster Linie davon abhängig, ob Rohstoffkosten anfallen (Woods 2003) oder nicht (Jungmeier 2003). Als Nebenprodukt fällt bei der Biodieselproduktion aus Altspisefetten und -ölen lediglich Glycerin an, so dass die Einnahmen durch Nebenprodukte hier geringer ausfallen als bei der Biodieselproduktion aus angebauten Ölf Früchten, wo neben Glycerin auch noch Schrot anfällt. Entgangene Alternativverwendungserlöse der Altspisefette wurden in den analysierten Studien ebenso wenig berücksichtigt wie vermiedene Entsorgungskosten.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurde von geringeren Kosten für die Verteilung ausgegangen als bei Jungmeier (2003). Die Schwankungsbreite ergibt sich vor allem durch die Variabilität der Rohstoffkosten.

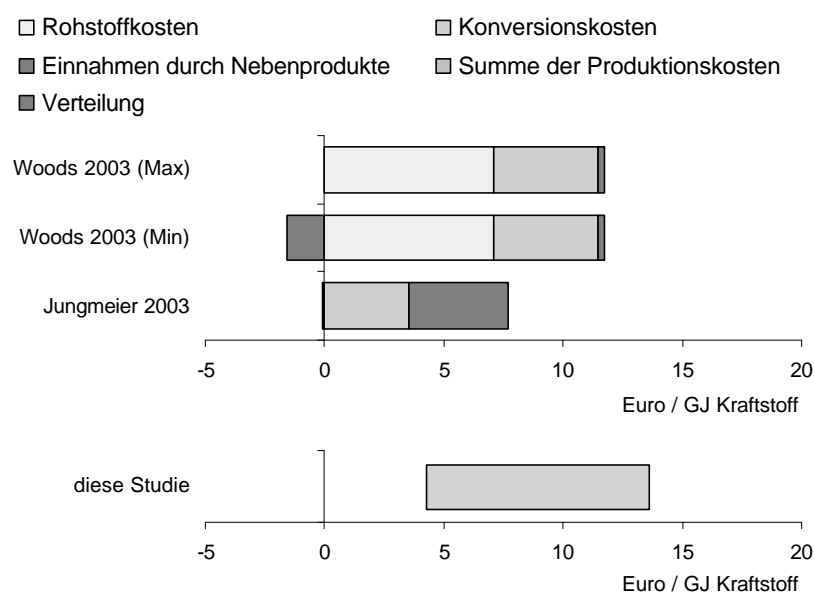


Abb. A-69: Bereitstellungskosten von Biodiesel aus Altspisefetten- und ölen in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### e) Biodiesel aus Tierfett

Auch bezüglich der Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Tierfett liegt uns nur eine Studie vor. Hier erfolgte eine Aufteilung auf Rohstoff- und Konversionskosten und Einnahmen durch Nebenprodukte, während für die Distributionskosten keine Angaben gemacht wurden. Entgangene Alternativverwendungserlöse sowie vermiedene Entsorgungskosten der Tierfette wurden in der Studie von Duncan (2003) nicht berücksichtigt.

In der abgeleiteten Bandbreite wurden, neben den von Duncan (2003) aufgeführten Kosten, zusätzlich noch die Distributionskosten berücksichtigt und es wurde davon ausgegangen, dass die Kosten für die Rohstoffe und die Konversion variieren können. Die abgeleitete Bandbreite der Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Tierfett liegt in der gleichen Größenordnung wie die für Biodiesel aus Altspeisefetten und -ölen.

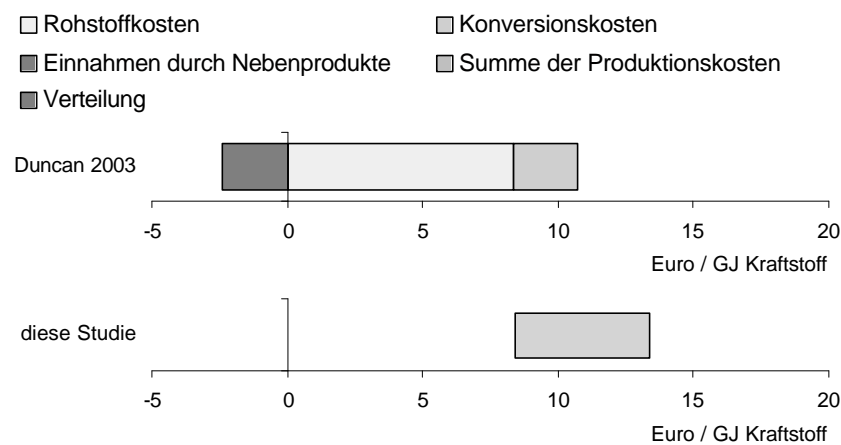


Abb. A-70: Bereitstellungskosten von Biodiesel aus Tierfett in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### A 4.2.3 Pflanzenöl

#### a) Pflanzenöl aus Raps

Die Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Raps unterliegen einer großen Schwankungsbreite.

Die Ableitung der Bandbreite für die Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Raps basiert auf den Bereitstellungskosten von Biodiesel aus Raps. Dabei wurde zugrundegelegt, dass die Rohstoffkosten zur Produktion von Pflanzenöl mit denen von Biodiesel identisch sind, dass die Konversionskosten der Pflanzenölproduktion – aufgrund des fehlenden Prozessschrittes für die Umesterung – geringer sind und dass die Einnahmen durch Nebenprodukte bei Pflanzenöl geringer sind als bei Biodiesel, da bei der Pflanzenölproduktion kein Glycerin anfällt. Von den erzielten Erlösen des Glycerins ist es abhängig, ob die Bereitstellungskosten von Pflanzenöl über oder unter denen von Biodiesel liegen. Unter der Voraussetzung, dass aufbereitetes Glycerin produziert wird, das am Markt einen guten Absatz findet, liegen die Bereitstellungskosten von Biodiesel unter denen von Pflanzenöl. Kann Glycerin dagegen am Markt nicht abgesetzt werden, sind die Bereitstellungskosten von Pflanzenöl niedriger als die von Biodiesel. Hieraus ergibt sich bei den Bereitstellungskosten von Pflanzenöl eine höhere Bandbreite als bei Biodiesel. In deutlich geringerem Maße wirkt sich noch aus, dass die Kosten für die Verteilung von Pflanzenöl höher oder niedriger sein können als die für die Verteilung von Biodiesel.

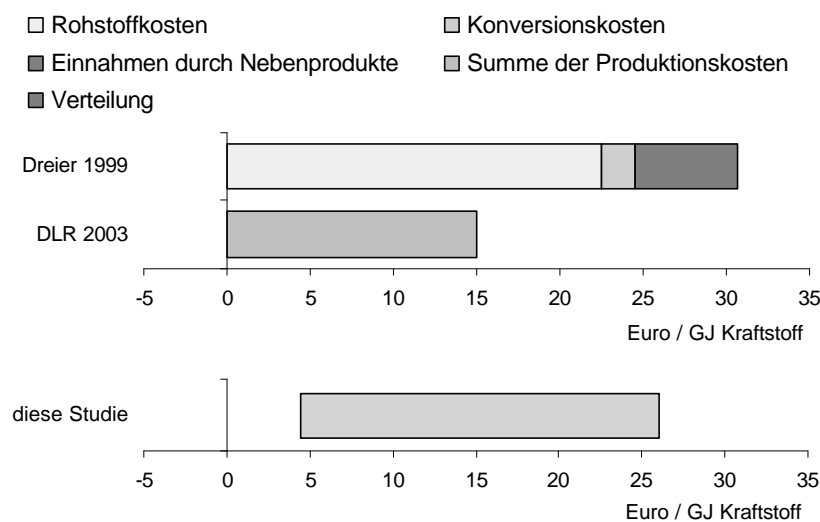


Abb. A–71: Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Raps in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

## b) Pflanzenöl aus Sonnenblumen

Zu den Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Sonnenblumen liegt uns keine Studie vor.

Aus den Studien zu den Bereitstellungskosten für Biodiesel aus Sonnenblumen geht hervor, dass die Kosten für Sonnenblumen geringer (EUCAR 2003) oder höher (Jungmeier 2003) sein können als die für Raps. Für die Einnahmen durch Nebenprodukte und die Kosten für die Konversion und Verteilung gilt für die Pflanzenölproduktion aus Sonnenblumen das, was für die Pflanzenölproduktion aus Raps gesagt wurde.

Die ermittelte Bandbreite für die Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Sonnenblumen ergibt sich aus den Annahmen, die bezüglich der Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Raps und der von Biodiesel aus Sonnenblumen getroffen wurden.

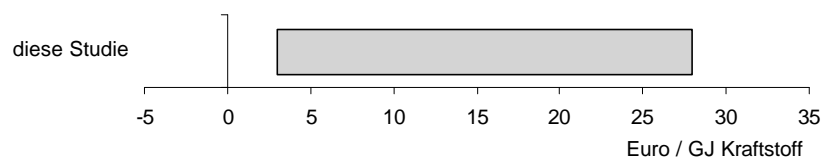


Abb. A-72: Bereitstellungskosten von Pflanzenöl aus Sonnenblumen in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.



### A 4.2.4 Biomethanol

#### a) Biomethanol aus Lignocellulose

Die Bereitstellungskosten von Biomethanol aus Lignocellulose variieren aufgrund der unterschiedlichen Produktionsverfahren sehr stark. Ob Restholz oder Anbaubiomasse als Rohstoff verwendet wird, wirkt sich dagegen vergleichsweise gering aus. Bezüglich der Reststoffe wurden entgangene Alternativverwendungserlöse in den analysierten Studien ebenso wenig berücksichtigt wie vermiedene Entsorgungskosten.

Die ermittelte Bandbreite der Bereitstellungskosten von Biomethanol aus Lignocellulose ergibt sich vor allem aufgrund der hohen Variabilität der Konversionskosten.

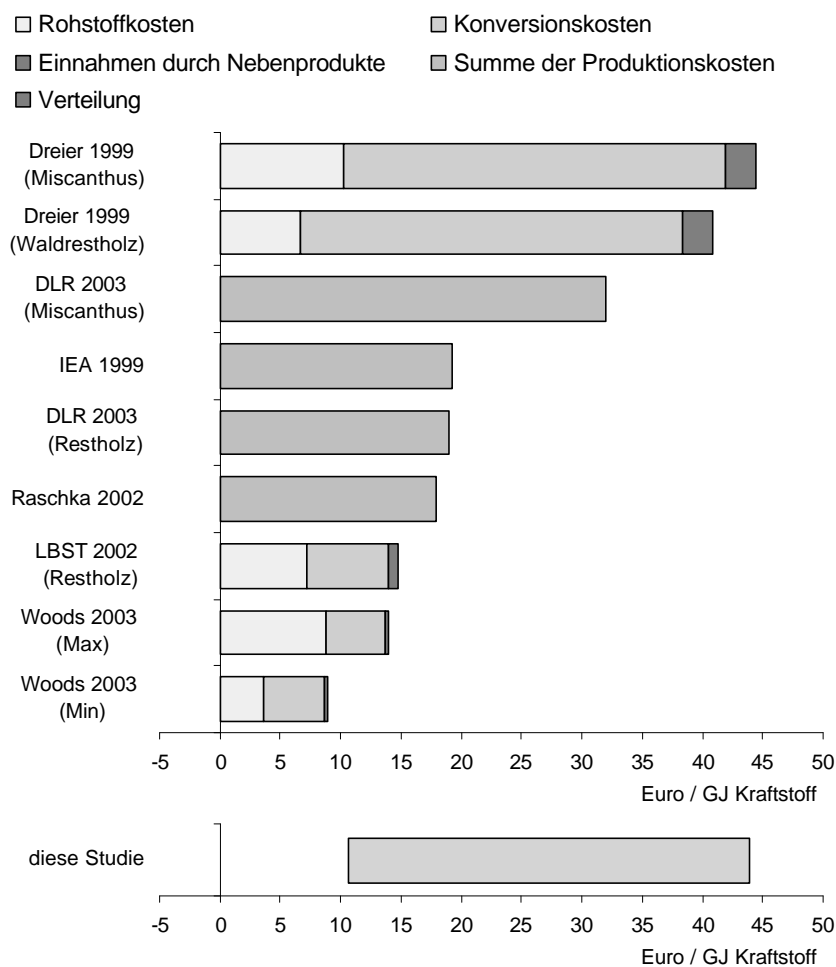


Abb. A-73: Bereitstellungskosten von Biomethanol aus Lignocellulose in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

## A 4.2.5 DME

### a) DME aus Lignocellulose

Zu den Bereitstellungskosten für DME aus Lignocellulose liegen uns drei Studien vor, wobei in zwei Studien keine Aufteilung auf die Einzelbereiche vorgenommen wurde. Bei Atrax (2002) waren die Konversionskosten nahezu drei mal so hoch wie die Rohstoffkosten. Die Kosten für die Verteilung wurden nicht berücksichtigt. Ebenso wie entgangene Alternativverwendungserlöse und vermiedene Entsorgungskosten.

Die ermittelte Bandbreite orientiert sich an den Ergebnissen von Atrax (2002). Dabei wurden zusätzlich noch die Kosten für die Verteilung berücksichtigt und davon ausgegangen, dass die Konversionskosten eine höhere Variabilität aufweisen können. Auch bezüglich der Rohstoffkosten wurde von einer höheren Variabilität ausgegangen, da sowohl Lignocellulose in Form von Reststoffen wie auch in Form von Anbaubiomasse eingesetzt werden kann.

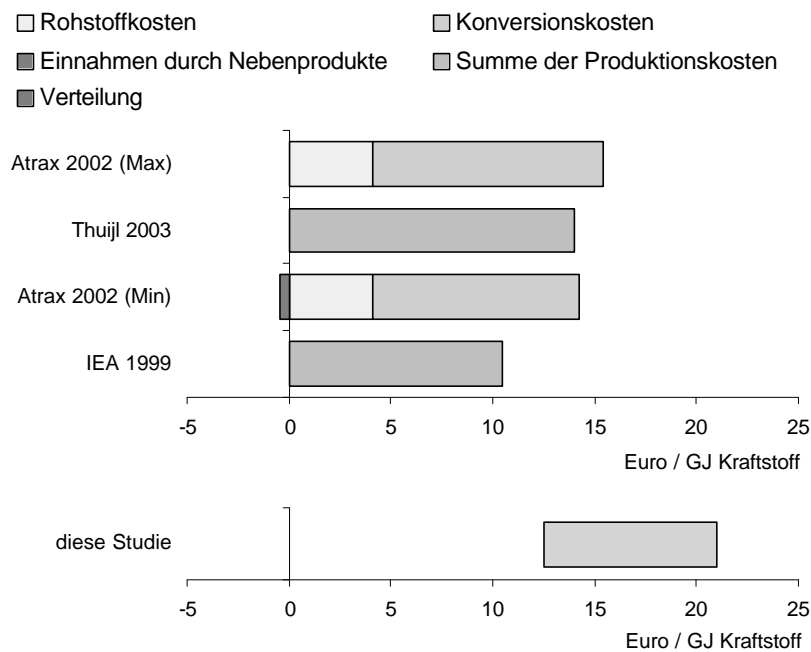


Abb. A-74: Bereitstellungskosten von DME aus Lignocellulose in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### A 4.2.6 BTL

#### a) BTL aus Lignocellulose

In den Studien zu den Bereitstellungskosten für BTL aus Lignocellulose variieren sowohl die Rohstoff- und Konversionskosten, wie auch die Einnahmen durch Nebenprodukte sehr stark. Entgangene Alternativverwendungserlöse sowie vermiedene Entsorgungskosten der Reststoffe wurden in den analysierten Studien nicht berücksichtigt.

In der ermittelten Bandbreite für die Bereitstellungskosten von BTL aus Lignocellulose wurde die hohe Variabilität der Einzelbereiche berücksichtigt.

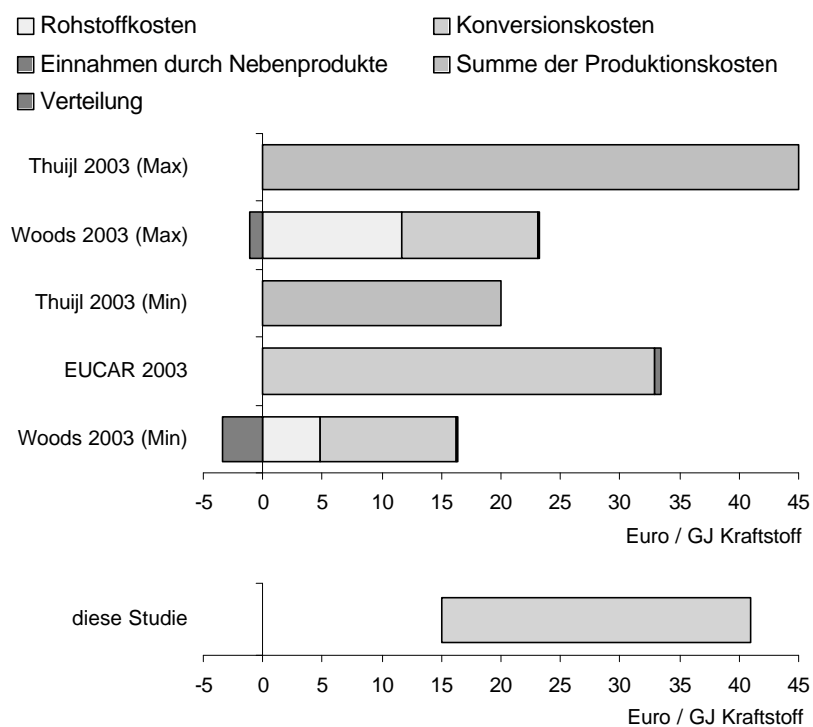


Abb. A-75: Bereitstellungskosten von BTL aus Lignocellulose in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

## A 4.2.7 Biogas

### a) Biogas aus Reststoffen

Die Bereitstellungskosten für Biogas aus Reststoffen wurden nur in zwei Studien auf die Einzelbereiche aufgeteilt. Dabei fallen vor allem die großen Kostenunterschiede für die Verteilung auf. Die Konversionskosten sind in den Studien, in denen eine Aufteilung auf die Einzelbereiche erfolgt, nahezu identisch. Da bei der Biogasproduktion aus Reststoffen generell keine Rohstoffkosten anfallen und die Distribution in der DLR-Studie (2003) unberücksichtigt blieb, handelt es sich bei den vom DLR angegebenen Kosten überwiegend um Konversionskosten. Entgangene Alternativverwendungserlöse und vermiedene Entsorgungskosten blieben in den analysierten Studien unberücksichtigt.

In der abgeleiteten Bandbreite der Bereitstellungskosten von Biogas aus Reststoffen wurden die Ergebnisse von allen drei vorliegenden Studien berücksichtigt. Dabei setzt sich die abgeleitete Bandbreite überwiegend aus den Kosten für die Konversion und in deutlich geringerem Maße aus den Kosten für die Verteilung zusammen.

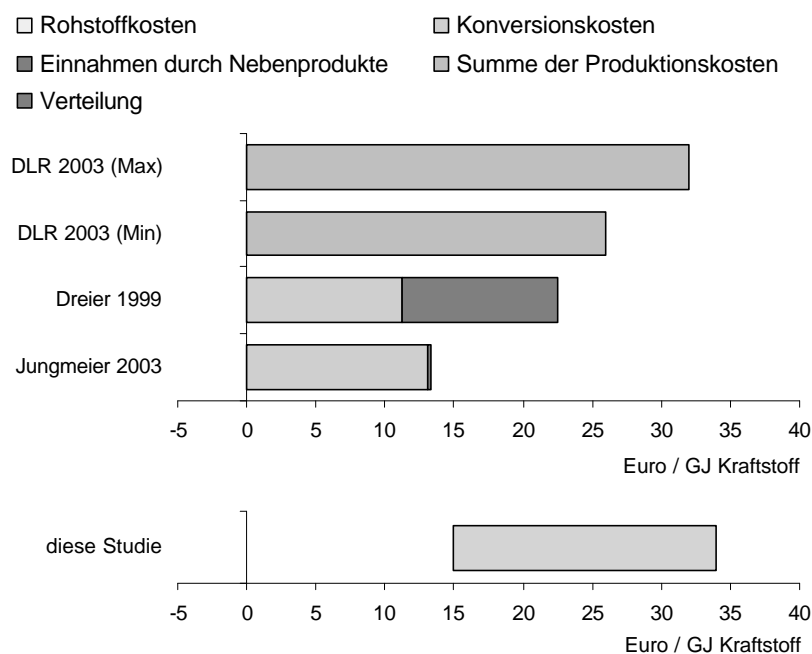


Abb. A-76: Bereitstellungskosten von Biogas aus Reststoffen in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

### A 4.2.8 Gasförmiger Wasserstoff (GH<sub>2</sub>)

#### a) Gasförmiger Wasserstoff (GH<sub>2</sub>) aus Lignocellulose

In den vorliegenden Studien der Bereitstellungskosten von gasförmigem Wasserstoff aus Lignocellulose variieren die Kosten für die Rohstoffe, die Konversion und die Verteilung sehr stark. Im Falle von lignocellulosehaltigen Reststoffen wurden entgangene Alternativverwendungserlöse und vermiedene Entsorgungskosten in den analysierten Studien nicht berücksichtigt.

Die abgeleitete Bandbreite setzt sich aus der Summe der in den einzelnen Studien aufgeführten minimalen bzw. maximalen Kosten für die Rohstoffe, die Konversion und die Verteilung zusammen.

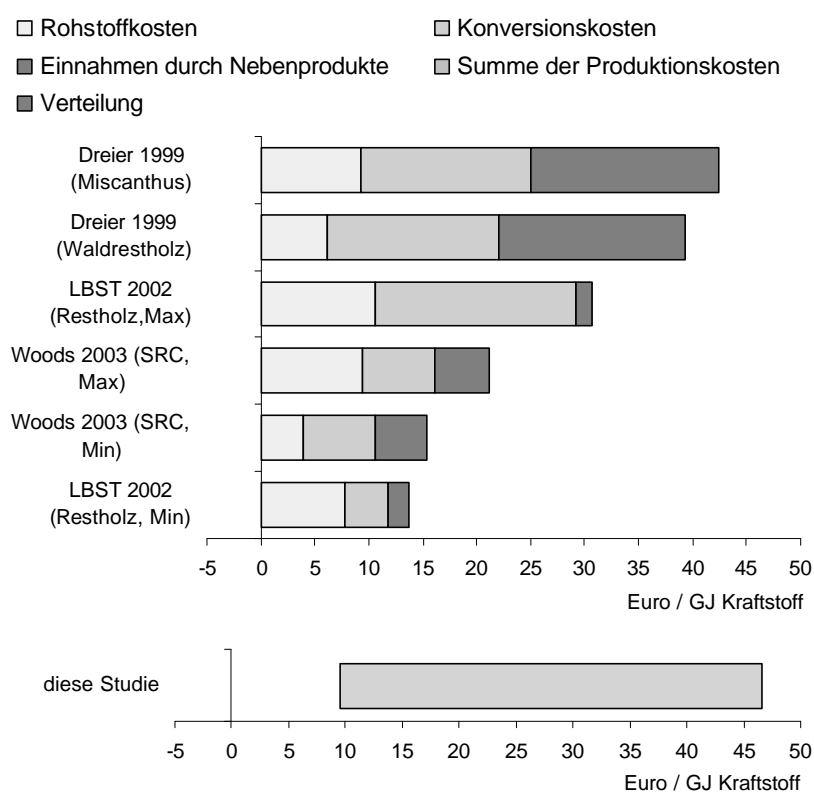


Abb. A-77: Bereitstellungskosten von gasförmigem Wasserstoff aus Lignocellulose in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

## A 4.2.9 Flüssiger Wasserstoff (LH2)

### a) Flüssiger Wasserstoff (LH2) aus Lignocellulose

Die Bereitstellungskosten von flüssigem Wasserstoff liegen aufgrund der höheren Kosten für die Verteilung über denen von gasförmigem Wasserstoff. Entgangene Alternativverwendungserlöse und vermiedene Entsorgungskosten von Reststoffen wurden in den analysierten Studien nicht berücksichtigt.

Bei der Ableitung der Bandbreite wurden die höheren Bereitstellungskosten für die Verteilung von flüssigem gegenüber gasförmigem Wasserstoff berücksichtigt.

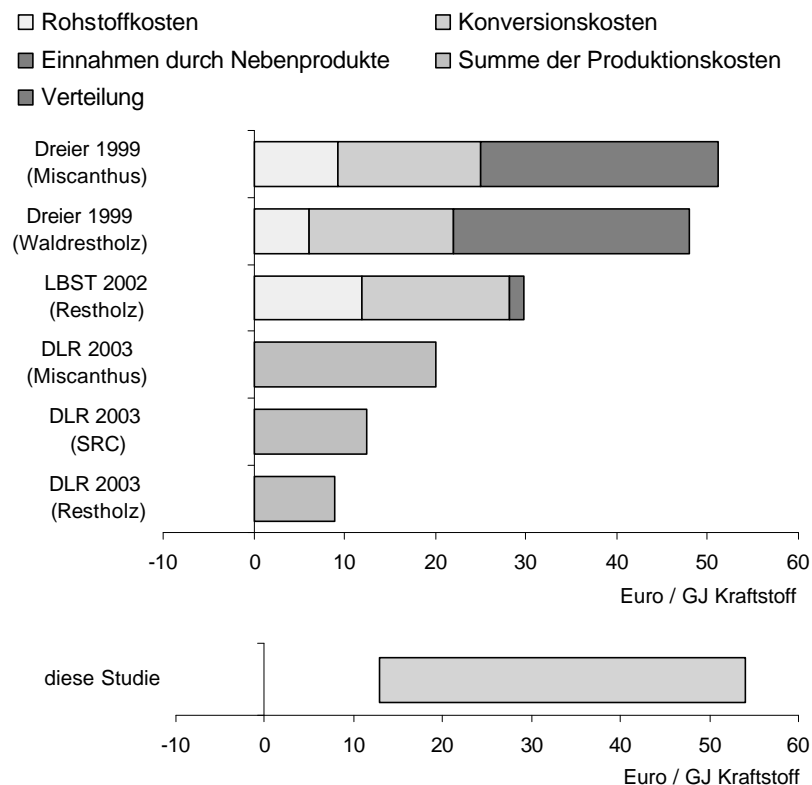


Abb. A-78: Bereitstellungskosten von flüssigem Wasserstoff aus Lignocellulose in Euro / GJ Kraftstoffinhalt.

## A 5 Publikationen, die in der Studie nicht analysiert werden, weil

### a) keine Primärdaten aufgeführt werden. Die Ergebnisse basieren auf einer Detailstudie, die jedoch berücksichtigt wird (in Klammern aufgeführt).

Lave L, MacLean H, Hendrickson C & Lankey R. (2000): Life-Cycle Analysis of Alternative Automobile Fuel/Propulsion Technologies. *Environ Sci Technol* 2000, 34 (17), S. 3598–3605. (MacLean & Lave 2002)

Macedo, I.C. (1997): Emissão de Gases de Efeito Estufa e a Produção/Utilização de Etanol da Cana-de-Açúcar no Brasil. Centro de Tecnologia Copersucar, Brasil. (Macedo 1997)

Macedo, I.C. (1998): Greenhouse Gas Emissions and Energy Balances in Bio-Ethanol Production and Utilization in Brazil (1996). *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14.1, S. 77-81. (Macedo 1997)

MacLean, H.L., Lave, L.B., Lankey, R. & Joshi, S. (2000): A Life-Cycle Comparison of Alternative Automobile Fuels, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50, 1769-1779. (MacLean & Lave 2002)

Horne, R.E., Mortimer, N.D. & Elsayed, M.A. (2003): Energy and Carbon Balances of Biofuels Production: Biodiesel and Bioethanol. Paper presented to The International Fertilizer Society at a Meeting in London, on 3<sup>rd</sup> April 2003. (Mortimer 2003/ Mortimer, N.D., Cormack, P., Elsayed, M.A. & Horne, R.E. 2003)

O'Connor, D.V., Esteghlalian, A.R., Gregg, D.J. & Saddler, J.N. (2000): Full Fuel Cycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Biomass-derived Ethanol Fuel in Canada. In: *Proceedings of an IEA Bioenergy Task 25 Workshop*, 27-30 September 1999 Gatlinburg, Tennessee USA. (Levelton & (S&T)<sup>2</sup> 2000)

Pehnt, M. (2002): Life Cycle Assessment of Fuel Cell Systems. In: A. Lamm (Hrsg.), *Fuel Cell Handbook*. Volume 3 – Fuel Cell Technology and Applications, J. Wiley, Chichester 2002. (Pehnt 2002a)

Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., Shapouri, H. (1998): An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles. NREL, Golden, Colorado. (NREL 1998)

Wang, M., Saricks, C. & Santini, D (1998): Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Corn Ethanol. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Bio-Energy Conference, Madison, Wisconsin, October 5-8, 1998. (Wang et al. 1999)

**b) aktuellere Publikationen der gleichen Autoren vorliegen**

- Blackburn, B., MacDonald, T., McCormack, M., Perez, P., Scharff, M. & Unnasch, St. (1999): Evaluation of Fuel Potential in California. A Report from the California Energy Commission to the Governor and the Agency Secretary, California Environmental Protection (CEC 2001/ California Energy Commission 2001)
- Ecobilan SA (1999): Analyse de Cycle de Vie du Diester, Evaluation Comparée des Filières Gazole et Diester, octobre 1999. (Ademe 2002)
- Ecobilan SA (1999): Actualisation de l'Ecobilan du Diester, mars 1999. (Ademe 2002)
- Ecobilan SA (1996): Ecobilan de l'ETBE de Betteraves – Comparaison avec le MTBE, Confédération Générale des Planteurs de Betteraves – Syndicat National des Producteurs d'Alcools Agricoles, mars 1996. (Ademe 2002)
- ECOTEC Research and Consulting Ltd. (1999): Financial and Environmental Impact of Biodiesel as an Alternative to Fossil Diesel in the UK. Birmingham. (ECOTEC 2000/ ECOTEC Research and Consulting Ltd. 2000)
- Hartmann, H. & Kaltschmitt, M. (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 3. (Thrän 2004/ Thrän & Kaltschmitt 2004)
- Kaltschmitt, M., Zander, F. & Nill, M. (2003): Potenziale biogener Kraftstoffe in Deutschland. ZfE – Zeitschrift für Energiewirtschaft 27 (2003) 3, S. 1-11. (Thrän 2004/ Thrän & Kaltschmitt 2004)
- Patyk A. & Höpfner U. (1999): Ökologischer Vergleich von Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsenergien unter besonderer Berücksichtigung der Brennstoffzelle, Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung, 1999. (IFEU 2001/2002b/ 2003/ Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. 2001/2002/2003 & IFEU 2002a/ Patyk, A. & Reinhardt, G.A. 2002)
- Reinhardt, G.A. (1999): Aktuelle Bewertung des Einsatzes von Rapsöl/RME im Vergleich zu Dieselmotoren. UBA-Texte 79/99. ISSN 0722-186X (IFEU2001/2003/ Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. 2001/2003)
- Reinhardt, G. A. & Zemanek, G. (2000): Ökobilanz Bioenergieträger – Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. (IFEU 2001/2002b/2003/ Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. 2001/2002/2003 & IFEU 2002a/ Patyk, A. & Reinhardt, G.A. 2002)
- Sundqvist, J.-O., Baky, A., Björklund, A., Carlsson, M., Eriksson, O., Frostell, B., Granath, J., Thyselius, L. (1999): Systemanalys av Energiutnyttjande från avfall– Utvärdering av Energi, miljö och Ekonomi IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Report No. 1380, 1999. (Sundqvist 2003)



Wang, M., Saricks, C. & Wu, M. (1997): Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced from U.S. Midwest Corn, prepared for Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., Dec. (Wang 1999/ Wang et al. 1999)

**c) keine Primärdaten, sondern ausschließlich Daten anderer Autoren betrachtet werden**

Bockey, D. (2002): Biodiesel Production and Marketing in Germany. The Situation and Perspective.

Bückmann, M. & van Malsen, A. (1997): Biodiesel: A Climate-friendly Auto Fuel? Greenhouse Issues, (31).

Calais, P. & Sims, R. (2000): A Comparison of Life-Cycle Emissions of Liquid Biofuels and Liquid and Gaseous Fossil Fuels in the Transport Sector. Proceedings of Solar 2000, Brisbane.

Canadian Renewable Fuels Association (CRFA) (1999): Emissions Impact of Ethanol. Ontario, Canada.

Delucci, M. & Lipmann, T. (2003): Appendix A: Energy use and Emissions from the Lifecycle of Diesel-like Fuels derived from Biomass. An Appendix to the Report, "A Lifecycle Emissions Model (LEM): Lifecycle Emissions From Transportation Fuels, Motor Vehicles, Transportation Modes, Electricity Use, Heating and Cooking Fuels, and Materials".

ECOTEC Research and Consulting Ltd. (2000): Emissions from Liquid Biofuels. Birmingham.

MacLean, H.L. & Lave, L.B. (2003): Evaluating Automobile Fuel/Propulsion Systems Technologies. Progress in Energy and Combustion Science 29 (2003) S. 1-69.

Woods, J. & Bauen, A. (2003): Technology Status Review and Carbon Abatement Potential of Renewable Transport Fuels in the UK.

**d) sie nicht mehr auf dem aktuellen Stand sind (1995 und älter)**

Ahouissoussi, N.B.C. & Wetzstein M.E. (1995): Life-cycle Costs of Alternative Fuels: Is Biodiesel Cost competitive for Urban Buses? Washington, DC. U.S. Dept. of Agriculture, Economic Research Service.

Bain, R.L. (1992): Material and Energy Balances for Methanol from Biomass Using Biomass Gasifiers. Report NREL.

Bartus, D. (1989): Effects of Fuel Ethanol Production and Use on CO<sub>2</sub> Production and Global Warming, United States Environmental Protection Agency, Washington D.C.

- Culshaw, F. & Butler, C. (1992): A Review of the Potential of Biodiesel as a Transport Fuel. Final Report ETSU-R-71, United Kingdom Department of Trade & Industry, London.
- Ecobilan SA (1993): Ecobilan du Diester et Eléments d'analyse de la filière Gazole, Tome 1, Résultats, Rapport final ONIDOL, janvier 1993. Tome 2, annexe, rapport final ONIDOL, janvier 1993.
- Graef, M., Vellguth, G., Krahl, J. & Munack, A. (1995): Fuel from Sugar Beet and Rape Seed Oil - Mass and Energy Balances for Evaluation. In: Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry, S. 1159-1164, Elsevier Science Ltd., Oxford, 1995.
- Le Cornu, J. (1990): Greenhouse Gas Emissions from the Production and use of alternative Transport Fuels. In: Swaine, D. J. (1990): Greenhouse and Energy. CSIRO Australia. S. 293-303.
- Lorenze, D. & Morris, D. (1995): How much Energy does it take to make a Gallon of Ethanol? Institute for Local Self-Reliance, August, 1995.
- Marland, G. & Turhollow A.F. (1990): CO<sub>2</sub> Emissions from the Production and Combustion of Fuel Ethanol from Corn. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. Environmental Sciences Division, No. 3301. U.S. Department of Energy.
- Minnesota Ethanol Commission (1991): Corn to Ethanol from a Net Energy Perspective. Minnesota Department of Agriculture, St. Paul.
- National Renewable Energy Laboratory & Pacific Northwest Laboratory (1991): A comparative Analysis of the environmental Outputs of future Biomass-Ethanol Production Cycles and Crude Oil/Reformulated Gasoline Production Cycles. Prepared for U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies and Office of Planning and Assessment.
- Scharmer, K., Gosse, G. et al. (1995): Energy balance, Ecological impact and Economics of vegetable Oil Methylene Production in Europe as substitute for fossil Diesel. EU-Studie ALTENER 4.1030/E/94-002-1, Dezember 1995.
- Tyson, K.S., Riley C.J. & Humphreys K.K. (National Renewable Energy Laboratory) (1993): Fuel Cycle Evaluations of Biomass-Ethanol and Reformulated Gasoline, Golden, CO, Report No. NREL/TP-463-4950, DE94000227, November 1993.
- Wagner, U., Geiger, B., Frey H. & Schedl T. (1995): Untersuchung von Prozeßketten einer Wasserstoff-Energiewirtschaft. München, TU München.
- Williams, R. H., Larson, E. D., Katofsky, R. E. & Chen J. (1995): Methanol and Hydrogen from Biomass for Transportation, with Comparisons to Methanol and Hydrogen from Natural Gas and Coal. Princeton, Princeton University.
- Wood, B.J. & Corley, R.H.V. (1991) The Energy Balance of Oil Palm Cultivation. In: Basiron, Y., Sukaimi, J., Chang, K.C., Cheah, S.C., Henson, I.E., Kamaruddin, N., Paranjothy, K., Rajanaidu, N., Dolmat, T.H.T. & Arrifin, D. (1991): Proceedings of the International Oil Palm Conference. PORIM (Palm Oil Research Institute of Malaysia), Kuala Lumpur, S. 130-143.

Zabel, M. (1994): Analyse und Bewertung der Ethanolherstellung aus Biomasse - Kosten und Schadstoffemissionen: Dargestellt am Beispiel des Bundesstaates São Paulo, Brasilien. Berlin Techn. Univ., Diss.

**e) sonstige Begründungen vorliegen**

<b>Publikationen</b>	<b>Begründung</b>
Ahlvik, P. & Brandberg, Å. (2001): Well-to-Wheel Efficiency for Alternative Fuels from Natural Gas or Biomass. Publication No. 2001:85. Borlänge: Swedish National Road Administration.	Energiedaten sind nicht aufgeschlüsselt; Es wurde lediglich ein Quotient aus Input und Output gebildet.
Aurélio dos Santos, M.: Energy Analysis of Crops used for Producing Ethanol and CO <sub>2</sub> Emissions. Proceedings of the third Biomass Conference of the Americas, Montreal, 24. – 29. August 1997.	keine Primärdaten, basiert auf einer Publikation von 1992
Benemann J. R. (1998): Process Analysis and Economics of Biophotolysis of Water. Report for the IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen. Walnut Creek (USA).	behandelt Biophotolyse; keine LCA, vorläufige Kostenangaben
Berglin, N., Lindblom, M. & Ekbohm, T. (2002): Efficient Production of Methanol from Biomass via Black Liquor Gasification. Prepared for the 2002 Tappi Engineering Conference, San Diego, California, September 8 – 12, 2002.	keine Aufteilung zwischen regenerativem und erschöpflichem Energieaufwand
Betz, M., Faltenbacher, M. & Eyerer, P. (2001): Environmental Analysis of Hydrogen for Fuel Cell Powered Buses, VDI Proceedings 2001.	nur Elektrolyse
Biedermann, P., Dienhart, H., Dreier, T., Grube, T., Höhle, B., Menzer, R., Nitsch, J., Pehnt M. & Wagner U. (1998): Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen. Abschlußbericht des Forschungszentrum Jülich, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und der Technischen Universität München. Frankfurt, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.	nur fossile Energieketten
Bossel, U. Eliasson B. & Taylor G. (2003): The Future of Hydrogen: Bright or bleak?	keine LCA
California Energy Commission (2001): Costs and Benefits of a Biomass-to-Ethanol Production Industry in California. Commission Report.	Ergebnisse nicht nachvollziehbar

- Dante, R. C., Güereca, L. P., Neri, L., Escamilla, J. L., Aquino, L. & Celis, J. (2002): Life Cycle Analysis of Hydrogen Fuel: A Methodology for a Strategic Approach of Decision Making. *Int. J. Hydrogen Energy* 27, S. 131-133. nur Dampfreformierung von Erdgas und Elektrolyse
- Ecotrafic (2001): Well-to-Wheel Efficiency. For alternative Fuels from Natural Gas or Biomass. nur Wirkungsgrade
- Ericson, M. & Odehn, G. (1999): A Life-Cycle Assessment on Ethanol Fuel from Wine – A Study on present Ethanol Fuel for Buses including comparisons to Diesel, Natural Gas and Ethanol from Wheat or Wood, Master of Science Thesis, Chemical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Ethanol aus Wein wird nicht betrachtet und für Weizen und Lignocellulose wurden Daten anderer Autoren betrachtet
- ETH Lausanne (2002): Etude comparative de Carburants au Bioéthanol par Analyse de leur Cycle de Vie. Die Langfassung ist nicht erhältlich, „da sie einer Überarbeitung bedarf.“
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2003): Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung alternativer Antriebssysteme im Vergleich zu konventionellen Systemen für den Pkw-Bereich. Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, Projektleitung: Dipl.-Phys. Roger Corradini. keine Werte zum KEA (nur Abb.) und keine Basisdaten enthalten
- Finkenwirth, O. (1999): Ganzheitliche Bilanzierung innovativer Wasserstoffverfahren. Betreuung: Martin Pehnt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, und Torsten Marheineke, Universität Stuttgart. Studienarbeit Universität Stuttgart. Studienarbeit für Pehnt 2002
- Graboski, M.S., McCormick, R.L., Alleman T.L. & Herring A.M. (2003): The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine. NREL. Keine Emissionsdaten über den gesamten Lebensweg hinweg; Abgasmessungen von Biodiesel aus Altöl.
- Methanex & (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. (2000): Assessment of Emissions of Greenhouse Gases from Fuel Cell Vehicles. Prepared for Methanex Corporation. Delta BC (Canada). nur Elektrolyse
- Mortimer, N.D., Cormack, P., Elsayed, M.A. & Horne, R.E. (2003): Evaluation of the Comparative Energy, Global Warming and Socio-Economic Costs and Benefits of Biodiesel. Final Report. gleiche Daten wie in Elsayed 2003

- |   |   |
|---|---|
| <p>Mutert, E.W. &amp; Fairhurst, T.H. (1999): Oil Palm – The Great Crop of South East Asia: Potential, Nutrition and Management. Paper presented at the IFA Regional Conference for Asia and the Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia, 14-17 November 1999.</p>                                  | <p>keine umfassenden Potenzialabschätzungen für Palmöl bzw. Biodiesel aus Palmöl</p>  |
| <p>Kadam, K. L. (2000): Environmental Life Cycle Implications of Using Bagasse- Derived Ethanol as a Gasoline Oxygenate in Mumbai (Bombay). NREL.</p>   | <p>keine Aufteilung auf die einzelnen Bereiche, Bezüge nicht eindeutig zur Umrechnung von MJ/t Bagasse auf MJ/MJ</p>                          |
| <p>Pembina (2000): Climate-Friendly Hydrogen Fuel: A Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions for selected Fuel Cell Vehicle Hydrogen Production Systems. Drayton Valley (Canada), Pembina Institute.</p>  | <p>nur Elektrolyse</p>  |
| <p>Röder A. (2001): Life-Cycle Inventory and Costs of Different Car Power Trains, PSI-Bericht 01-16. Villigen, Paul-Scherrer-Institut.</p>  | <p>verwendet bei den Biokraftstoffen vorwiegend bereits veröffentlichte Literatur und liefert diesbezüglich somit keinen Erkenntnisgewinn</p> |
| <p>Sims, R. (1996): The Potential for Biodiesel in New Zealand. Proceedings of Conference, Applications of Bioenergy Technologies™ Rotarua, S. 139-148 EECA.</p>  | <p>keine Angaben über Potenziale</p>  |
| <p>Schneider 2001/ Schneider, U.A. &amp; McCarl, B.A. (2001): Economic Potential of Biomass based Fuels for Greenhouse Gas Emission Mitigation.</p>   | <p>keine Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen</p>   |
| <p>Spath, P. L. &amp; Mann, M. K. (2003): Using LCAs to find improvements for Hydrogen Production from Wind Electrolysis. Proc. Of DETC '03, Chicago September 2003.</p>  | <p>nur Elektrolyse</p>  |
| <p>Stelzer, T. (1999): Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen: Lebensweganalysen von Umweltwirkungen. Stuttgart Univ., Diss., 1999.</p>  | <p>Daten wurden in IFEU 2000a aktualisiert</p>  |
| <p>Sundqvist, J.-O. (2003): System Analysis of organic Waste Management Schemes - Experiences of the ORWARE model. In the Proceedings of EU Summer School: Biotechnology in organic waste management: from solid waste disposal to resource recovery, Wageningen 29 June - 4 July 2003.</p> | <p>Primärenergieaufwendungen der Bereitstellung, Nutzung und der gesamten Abfallbeseitigung zu einem Wert aggregiert</p>                      |

- 
- |  |   |
|--|---|
| Tan, R.R. & Culaba, A.B. (2002b): Life-Cycle Assessment of Conventional and Alternative Fuels for Road Vehicles.   | für Bioethanol aus Lignocellulose keine Primärdaten, sondern ausschließlich Daten anderer Autoren, Daten für Biodiesel aus Kokosnüssen wurden Tan 2002a entnommen |
| Weiss, M.A., Heywood, J.B., Drake, E.M., Schafer, A., AuYeung, F.F. (2000): On the Road in 2020. A Life-Cycle Analysis of new Automobile Technologies. Energy Laboratory Report MIT EL 00-003. Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology; October 2000. | LCA von neuen Technologien, nicht aber von regenerativen Kraftstoffen.  |
| Yusoff, S. & Sulaiman, N. (2000): Life Cycle Study on Palm Oil - A Renewable Raw Material. Proceedings of the International Conference & Exhibition on Life Cycle Assessment: Tools for Sustainability. 25. – 27.04.2000 Virginia.                                     | kein Detailbericht verfügbar  |
-

## **A 6 Gesamtes Literaturverzeichnis (alphabetisch nach Autoren sortiert)**

- ADEME (Direction of Agriculture and Bioenergies of the French Environment and Energy Management Agency) & (DIREM) French Direction of the Energy and Mineral Resources (2002): Bilans Énergétiques et gaz à effet de serre des filières de Production de Biocarburants en France.
- AFCG 2003/ Alternative Fuels Contact Group (2003): Market Development of Alternative Fuels.
- Ahlvik, P. & Brandberg, Å. (2001): Well-to-Wheel Efficiency for alternative Fuels from Natural Gas or Biomass. Publication No. 2001: 85. Borlänge: Swedish National Road Administration.
- Ahouissoussi, N.B.C. & Wetzstein M.E. (1995): Life-Cycle Costs of alternative Fuels: Is Biodiesel Cost competitive for urban Buses? Washington, DC. U.S. Dept. of Agriculture, Economic Research Service.
- Altmann, M., Blandow, V., Niebauer, P., Schindler, J., Schurig, V., Weindorf, W. Wurster, R. & Zittel, W. (2002): Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung. Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- Armstrong, A.P., Baro, J., Dartoy, J., Groves, A.P., Nikkonen, J. & Rickeard D.J. (2002): Energy and Greenhouse Gas Balance of Biofuels for Europe - An Update.
- Atrax Energi AB et al. (2002): The Bio-DME Project, Phase 1. Report to Swedish National Energy Administration (STEM).
- Aurélio dos Santos, M. (1997): Energy Analysis of Crops used for Producing Ethanol and CO<sub>2</sub> Emissions. Proceedings of the third Biomass Conference of the Americas, Montreal, 24. – 29. August 1997.
- Bartus, D. (1989): Effects of Fuel Ethanol Production and Use on CO<sub>2</sub> Production and Global Warming, United States Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- Beer, T., Morgan, G., Lepszewicz, J., Anyon, P., Edwards, J., Nelson, P., Watson, H. & Williams, D. (2001): Comparison of Transport Fuels. Life-Cycle Emission Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles. CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), Australia.
- Benemann J. R. (1998): Process Analysis and Economics of Biophotolysis of Water. Report for the IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen. Walnut Creek (USA).
- Berglin, N., Lindblom, M. & Ekblom, T. (2002): Efficient Production of Methanol from Biomass via Black Liquor Gasification. Prepared for the 2002 Tappi Engineering Conference, San Diego, California, September 8-12, 2002.
- Betz, M., Faltenbacher, M. & Eyerer, P. (2001): Environmental Analysis of Hydrogen for Fuel Cell Powered Buses, VDI Proceedings 2001.

- Biedermann, P., Dienhart, H., Dreier, T., Grube, T., Höhle, B., Menzer, R., Nitsch, J., Pehnt M. & Wagner U. (1998): Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen. Abschlußbericht des Forschungszentrum Jülich, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und der Technischen Universität München. Frankfurt, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V.
- Blackburn, B., MacDonald, T., McCormack, M., Perez, P., Scharff, M. & Unnasch, St. (1999): Evaluation of Fuel Potential in California. A Report from the California Energy Commission to the Governor and the Agency Secretary, California Environmental Protection.
- Bockey, D. (2002): Biodiesel Production and Marketing in Germany. The Situation and Perspective.
- Börjesson, P. & Berglund, M. (2004): Environmental Analysis of Biogas Systems – Part I: Fuel Cycle Emissions; Part II: Environmental Impact when replacing various Reference Systems. Manuskripte zur 2<sup>nd</sup> World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection 10 – 14 May 2004 Rome, Italy.
- Bossel, U. Eliasson B. & Taylor G. (2003): The future of Hydrogen: Bright or bleak?
- Bückmann, M. & van Malsen, A. (1997): Biodiesel: A climate-friendly auto Fuel? Greenhouse Issues, (31).
- Calais, P. & Sims, R. (2000): A Comparison of Life-Cycle Emissions of Liquid Biofuels and Liquid and Gaseous Fossil Fuels in the Transport Sector. Proceedings of Solar 2000, Brisbane.
- California Energy Commission (2001): Costs and Benefits of a Biomass-to-Ethanol Production Industry in California. Commission Report.
- Canadian Renewable Fuels Association (CRFA) (1999): Emissions Impact of Ethanol. Ontario, Canada.
- Ceuterick, D. & Spirinckx C. (1999): Comparative LCA of Biodiesel and Fossil Diesel Fuel, VITO, Belgium.
- CONCAWE (2002) siehe Armstrong, A.P. et al.
- CSIRO (2001) siehe Beer, T. et al.
- Culshaw, F. & Butler, C. (1992): A Review of the Potential of Biodiesel as a Transport Fuel. Final Report ETSU-R-71, United Kingdom Department of Trade & Industry, London.
- Dante, R. C., Güereca, L. P., Neri, L., Escamilla, J. L., Aquino, L. & Celis, J. (2002): Life Cycle Analysis of Hydrogen Fuel: A Methodology for a Strategic Approach of Decision Making. Int. J. Hydrogen Energy 27. S. 131-133.



- Delucci, M. & Lipmann, T. (2003): Appendix A: Energy use and Emissions from the lifecycle of Diesel-like Fuels derived from biomass. An Appendix to the Report, "A Lifecycle Emissions Model (LEM): Lifecycle Emissions From Transportation Fuels, Motor Vehicles, Transportation Modes, Electricity Use, Heating and Cooking Fuels, and Materials".
- DfT (2003): International resource Costs of Biodiesel and Bioethanol.
- DLR, IfE & ISVS (2003): Renewable Fuels for Cross Border Transportation. Final Report to the European Commission.
- DLR, IFEU, & WI (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.
- Dreier, T. (1999): Biogene Kraftstoffe – Energetische, ökologische und ökonomische Analyse. IfE Schriftenreihe Heft 38.
- Dreier, T. (1999b): Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil V Biogene Kraftstoffe. Auftraggeber: Bayerische Forschungstiftung/Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Bearbeitet am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München.
- Dreier, T. (2000): Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe. IfE Schriftenreihe Heft 42.
- Duncan, J. (2003): Costs of Biodiesel Production. Prepared for: Energy Efficiency and Conservation Authority.
- Ecobilan SA (1993): Ecobilan du Diester et éléments d'analyse de la filière Gazole, Tome 1, Résultats, Rapport final ONIDOL, janvier 1993. Tome 2, annexe, rapport final ONIDOL, janvier 1993.
- Ecobilan SA (1996): Ecobilan de l'ETBE de Betteraves – Comparaison avec le MTBE, Confédération Générale des planteurs de Betteraves – Syndicat National des Producteurs d'Alcools Agricoles, mars 1996.
- Ecobilan SA (1999): Actualisation de L'écobilan du Diester, mars 1999.
- Ecobilan SA (1999): Analyse de Cycle de vie du Diester, Evaluation comparée des filières Gazole et Diester, octobre 1999.
- ECOTEC Research and Consulting Ltd. (2000): Emissions from Liquid Biofuels. Birmingham.
- ECOTEC Research and Consulting Ltd. (1999): Financial and Environmental Impact of Biodiesel as an Alternative to Fossil Diesel in the UK. Birmingham.
- Ecotraffic (2001): Well-to-Wheel Efficiency. For alternative Fuels from Natural Gas or Biomass, Ecotraffic.
- EEA (2003): Greenhouse Gas Emission Trends and Projections in Europe 2003 – Tracking Progress by the EU and Acceding and Candidate Countries towards achieving their Kyoto Protocol Targets. Final Draft Environmental Issue Report 36.

- EIA (2004): World Crude Oil Prices 02/20/2004 unter <http://www.eia.doe.gov/> (zuletzt geöffnet am 27.02.2004).
- Elsayed, M.A., Matthews, R. & Mortimer, N.D. (2003): Carbon and Energy Balances for a Range of Biofuels Options.
- Enerstrat (2003): CSR Fuel Ethanol Lifecycle Analysis. Prepared for CSR Sugar in association with APACE Research.
- Enguïdanos, M., Soria, A., Kavalov, B., Jensen, P. (2002a): Techno-economic Analysis of Bio-diesel Production in the EU: A short Summary for Decision-Makers. Report EUR 20279 EN.
- Enguïdanos, M., Soria, A., Kavalov, B., Jensen, P. (2002b): Techno-economic Analysis of Bio-alcohol Production in the EU: A short Summary for Decision-Makers. Report EUR 20280 EN.
- ETH Lausanne (2002): Etude comparative de Carburants au Bioéthanol par analyse de leur Cycle de Vie.
- Ericson, M. & Odehn, G. (1999): A Life-Cycle Assessment on Ethanol Fuel from Wine – A Study on present Ethanol Fuel for Buses including comparisons to Diesel, Natural Gas and Ethanol from Wheat or Wood, Master of Science Thesis, Chemical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- EST (2002) siehe Eyre, N. et al.
- ETSU (1996) siehe Gover, M.P. et al.
- EU 2003/ Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor. Amtsblatt L-123/42 vom 17. Mai 2003.
- EUCAR, CONCAWE & JRC (2003): Well-to-Wheels Analysis of future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context.
- Europäische Kommission (2001): Grünbuch – Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit. Luxemburg: Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften.
- Eyre, N. (EST), Fergusson, M. (IEEP), Mills, R. (NSCA) (2002): Fuelling Road Transport – Implications for Energy Policy.
- FAT (2000) siehe Heinzer, L. et al.
- FfE (1999) siehe Dreier, T. (1999b)
- Fromentin A., Biollay F., Dauriat A., Lucas-Porta H., Marchand J. D., Sarlos G., (2000): Caractérisation de filières de Production de Bioéthanol dans le contexte Helvétique. Programme de recherche Biomasse, Annexes au Rapport, Office Fédéral de l'Énergie.

- Finkenwirth, O. (1999): Ganzheitliche Bilanzierung innovativer Wasserstoffverfahren. Betreuung: Martin Pehnt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart, und Torsten Marheineke, Universität Stuttgart. Studienarbeit Universität Stuttgart.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2003): Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung alternativer Antriebssysteme im Vergleich zu konventionellen Systemen für den Pkw-Bereich. Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, Projektleitung: Dipl.-Phys. Roger Corradini.
- Fritsche, U., Jenseit, W., Hünecke, K., Rausch, L. & Wiegmann, K. (Öko-Institut, Darmstadt), Heinz, A. (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik – UM-SICHT), Thrän, D. (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig – IE), Gärtner, S., Patyk, A. & Reinhardt, G. (Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH Heidelberg – IFEU), Baur, F., Bemmann, U., Groß, B., Heib, M. & Ziegler, C. (Institut für Zukunfts-Energie-Systeme, Saarbrücken – IZES), Flake, M. & Schmehl, M. (TU Braunschweig, Institut für Geoökologie, Abt. Umweltsystemanalyse), Simon, S. (TU München, Lehrstuhl f. Wirtschaftslehre d. Landbaues) (2004): Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Endbericht des Verbundprojekts, gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Projektträger: FZ Jülich.
- Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. (2001): Ökologischer Vergleich von RME und Rapsöl. Projekt im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, finanziert durch das Ministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft.
- Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. (2002b): Ökobilanz von Sonnenblumenölmethylester (SME). Interner Bericht des IFEU. Auszugsweise veröffentlicht in: Reinhardt, G. A. & Uihlein, A. (2002): Bioethanol and ETBE versus other Biofuels for Transportation. An Ecological Comparison. In International Organizing Committee of ISAF (ed.): Proceedings of the 14th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XIV), 12 - 15 November 2002, Phuket (Thailand) 2002.
- Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A. (2003): Erweiterung der Ökobilanz von RME. Projekt im Auftrag der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V.
- GM (2001): Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of advanced Fuel/Vehicle Systems - North American Analysis.
- GM (2002): Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of advanced Fuel/Vehicle Systems – A European study. Annex “Full Background Report” – Methodology, Assumptions, Descriptions, Calculations, Results- to the Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study.
- Gover, M.P., Collings, S.A., Hitchcock, G.S., Moon, D.P. & Wilkins, G.T. (1996): Alternative Road Transport Fuels -- A Preliminary Life-Cycle Study for the UK. Energy Technology Support Unit, Oxford.
- Graboski M.S. (2002). Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Ethanol. Prepared for the National Corn Growers Association.

- Graboski, M.S., McCormick, R.L., Alleman T.L. & Herring A.M. (2003): The Effect of Biodiesel Composition on Engine Emissions from a DDC Series 60 Diesel Engine National Renewable Energy Laboratory, Colorado, NREL is a U.S. Department of Energy Laboratory.
- Graef, M., Vellguth, G., Krahl, J. & Munack, A. (1995): Fuel from Sugar Beet and Rape Seed Oil - Mass and Energy Balances for Evaluation. In: Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry, S. 1159-1164, Elsevier Science Ltd., Oxford, 1995.
- Hartmann, H. & Kaltschmitt, M. (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 3.
- Horne, R.E., Mortimer, N.D. & Elsayed, M.A. (2003): Energy and Carbon Balances of Biofuels Production: Biodiesel and Bioethanol. Paper presented to The International Fertiliser Society at a Meeting in London, on 3<sup>rd</sup> April 2003.
- Heinzer, L., Gaillard, G., Dux, D., Stettler, C. (2000): Ökologische und ökonomische Bewertung von Bioenergieträgern. Vergleichende Untersuchungen von Stückholzheizung, Rapsmethylester und Fernwärme aus Heu. FAT-Schriftenreihe 52.
- IEA (1999): Automotive Fuels for the Future: The search for Alternatives. IEA-AFIS, Paris.
- IEA (2003): Analysis of Biofuels.
- Igelspacher, R. (2003): Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol im Verkehrssektor. Gefördert durch: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik im Institut für Energietechnik, TU München Prof. Dr.-Ing. U. Wagner, München im Juni 2003.
- IFEU (Hrsg.) (2000): Bioenergy for Europe: Which Ones Fit Best? A Comparative Analysis for the Community. Final Report. Under support of DG XII, in collaboration with BLT, CLM, CRES, CTI, FAT, INRA, and TUD, Heidelberg 2000.
- IFEU (2001) siehe Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A.
- IFEU (2002a) siehe Patyk, A. & Reinhardt, G.A.
- IFEU (2002b) siehe Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A.
- IFEU (2002c) siehe Patyk, A. & Reinhardt, G.A.
- IFEU (2003) siehe Gärtner, S.O. & Reinhardt, G.A.
- IFEU (2004) siehe Reinhardt, G.A. et al.
- IFO (2002) siehe Schöpe, M. & Brischkat, G.
- IPCC 2000: Summary for Policymakers – Land use, Land-use change, and Forestry. A Special Report of the IPCC.

- IPCC (2001): Climate Change 2001 – Third Assessment Report. Cambridge UK.
- JRC (2002a) siehe Enguídanos, M. et al.
- JRC (2002b) siehe Enguídanos, M. et al.
- JRC (2003) siehe Kavalov, B. et al.
- JRC (2004) siehe Kavalov, B.
- Jungmeier, G., Hausberger, S. & Canella L. (2003): Treibhausgas-Emissionen und Kosten von Transportsystemen – Vergleich von biogenen mit fossilen Treibstoffen. Projekt Nr.: IEF.2000.GF.013, Projektkoordination: Joanneum Research, Institut für Energieforschung.
- Kadam, K.L., Camobreco, V.J., Glazebrook, B.E., Forrest, L.H., Jacobson, W.A., Simeroth, D.C., Blackburn, W.J. & Nehoda K.C. (1999): Environmental Life Cycle Implications of Fuel Oxygenate Production from California Biomass - Technical Report Section 1: Project Overview – References.
- Kadam, K. L. (2000): Environmental Life Cycle Implications of using Bagasse-Derived Ethanol as a Gasoline Oxygenate in Mumbai (Bombay). NREL.
- Kaltschmitt, M., Zander, F. & Nill, M. (2003): Potenziale biogener Kraftstoffe in Deutschland. ZfE – Zeitschrift für Energiewirtschaft 27 (2003) 3, S. 1-11.
- Kavalov, B., Jensen, P., Papageorgiou, D., Schwensen, C., Olsson, J.-P. (2003): Biofuel Production Potential of EU-Candidate Countries. Final EUR 20835 EN. Addendum to the Final Report EUR 20836 EN.
- Kavalov, B. (2004): Biofuel Potentials in the EU. Report EUR 21012 EN.
- Kohlmaier & Rohner 1998/ Kohlmaier, G. & Rohner, M. (1998): CO<sub>2</sub>-Senke der Wälder und Klimaschutz. Studie im Rahmen des Forschungsprojektes „Biosphäre, Klima und Ökonomie im globalen Kohlenstoffkreislauf“.
- Larson, E.D. & Haiming, J. (1999): Biomass Conversion to Fischer-Tropsch Liquids: Preliminary Energy Balances. Proceeding of the 4<sup>th</sup> Biomass Conference of the Americas, Oakland, California, 29 Aug.– 2 Sept. 1999.
- Lave L, MacLean H, Hendrickson C & Lankey R. (2000): Life-Cycle Analysis of alternative Automobile Fuel/Propulsion Technologies. Environ Sci Technol 2000; 34 (17): 3598 – 3605.
- LBST (2002) siehe Altmann, M. et al.
- LBST (2003) siehe Schindler, J. & Weindorf, W.
- Le Cornu, J. (1990): Greenhouse Gas Emissions from the Production and use of alternative Transport Fuels. In: Swaine, D. J. (1990): Greenhouse and Energy. CSIRO Australia. S. 293-303.

- Levelton Engineering Ltd. (1999): Assessment of Net Emissions of Greenhouse Gases from Ethanol-Blended Gasolines in Canada: Lignocellulosic Feedstocks.
- Levelton Engineering Ltd. & (S&T)<sup>2</sup> Consulting Inc. (2000): Assessment of Net Emissions of Greenhouse Gases From Ethanol-Gasoline Blends in Southern Ontario.
- Levelton Engineering Ltd. & (S&T)<sup>2</sup> Consulting Inc. (2002): Assessment of Biodiesel and Ethanol Diesel blends, Greenhouse Gas Emissions, Exhaust Emissions, and Policy Issues.
- Levington (2000) siehe Richards, I.R.
- Lorenze, D. & Morris, D. (1995): How much Energy does it take to make a Gallon of Ethanol? Institute for Local Self-Reliance, August, 1995.
- Macedo, I.C., (1997): Greenhouse Gas Emissions and Bio-Ethanol Production/Utilization in Brazil. Centro de Tecnologia Copersucar, Internal Report CTC-05/97.
- Macedo, I.C. (1997): Emissão de Gases de Efeito Estufa e a Produção/Utilização de Etanol da Cana-de-Açúcar no Brasil. Centro de Tecnologia Copersucar, Brasil.
- Macedo, I.C. (1998): Greenhouse Gas Emissions and Energy Balances in Bio-Ethanol Production and Utilization in Brazil (1996). Biomass and Bioenergy, 1998, 14.1, S. 77-81.
- MacLean, H.L. & Lave, L.B. (2003): Evaluating Automobile Fuel/Propulsion Systems Technologies. Progress in Energy and Combustion Science 29 (2003), S. 1-69.
- MacLean, H.L., Lave, L.B., Lankey, R. & Joshi, S. (2000): A Life-Cycle Comparison of Alternative Automobile Fuels, Journal of the Air and Waste Management Association, 50, S. 1769-1779.
- Marano, J.J. & Ciferno, J.P. (2001): Life-Cycle Greenhouse-Gas Emissions Inventory for Fischer-Tropsch Fuels. Prepared for U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory.
- Marland, G. & Turhollow A.F. (1990): CO<sub>2</sub> Emissions From the Production and Combustion of Fuel Ethanol From Corn. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. Environmental Sciences Division, No. 3301. U.S. Department of Energy.
- Methanex & (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. (2000): Assessment of Emissions of Greenhouse Gases from Fuel Cell Vehicles. Prepared for Methanex Corporation. Delta BC (Canada).
- Minnesota Ethanol Commission (1991): Corn to Ethanol from a Net Energy Perspective. Minnesota Department of Agriculture, St. Paul.
- Moreira, J.R. (2002). The Brazilian Energy Initiative - Biomass Contribute. Prepared for the Biotrade Workshop, Amsterdam, The Netherlands, September 9-10, 2002.
- Mortimer, N.D., Cormack, P., Elsayed, M.A. & Horne, R.E. (2003): Evaluation of the Comparative Energy, Global Warming and Socio-Economic Costs and Benefits of Biodiesel. Final Report.

- Mutert, E.W. & Fairhurst, T.H. (1999): Oil Palm – The Great Crop of South East Asia: Potential, Nutrition and Management. Paper presented at the IFA Regional Conference for Asia and the Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia, 14-17 November 1999.
- National Renewable Energy Laboratory & Pacific Northwest Laboratory (1991): A comparative Analysis of the environmental Outputs of future Biomass-Ethanol Production Cycles and Crude Oil/Reformulated Gasoline Production Cycles. Prepared for U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies and Office of Planning and Assessment.
- Nieder et al. 1993/ Nieder, R., Kersebaum, K.C., Widmer, P. & Richter, J. (1993): Untersuchungen zur Stickstoff-Immobilisation in mineralisch gedüngten Ackerböden aus Löß während der Vegetationszeit von Winter-Weizen. In: Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 156, S. 293-300.
- NREL (1998) siehe Sheehan J. et al.
- NREL (1999) siehe Kadam, K.L. et al.
- NREL (2002) siehe Sheehan, J. et al.
- O'Connor, D.V., Esteghlalian, A.R., Gregg, D.J. & Saddler, J.N. (2000): Full Fuel Cycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Biomass-derived Ethanol Fuel in Canada. In: Proceedings of an IEA Bioenergy Task 25 Workshop, 27-30 September 1999 Gatlinburg, Tennessee USA.
- Ökoinstitut (2004) siehe Fritsche, U. et al.
- Parkhomenko, S., Möller, C., Deblitz, C. & Riedel, J. (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft – FAL) (2003): Ein Vergleich der weltweit wichtigsten Anbauregionen für Ölsaaten. Endbericht für die Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V.
- Patyk A. & Höpfner U. (1999): Ökologischer Vergleich von Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsenergien unter besonderer Berücksichtigung der Brennstoffzelle, Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg 1999.
- Patyk, A. & Reinhardt, G.A. (2002a): Ökobilanz von Bioethanol und Bio-Ethyl-Tertiär-Butylether (ETBE). Interner Bericht des IFEU. Auszugsweise veröffentlicht in: Reinhardt, G. A. & Uihlein, A. (2002): Bioethanol and ETBE versus other Biofuels for Transportation. An Ecological Comparison. In International Organizing Committee of ISAF (ed.): Proceedings of the 14th International Symposium on Alcohol Fuels (ISAF XIV), 12 - 15 November 2002, Phuket (Thailand) 2002.
- Patyk, A. & Reinhardt, G.A. (2002c): Ökobilanz von Bio-MeOH und Bio-DME. Interner Bericht des IFEU. Auszugsweise veröffentlicht in: Reinhardt G. A. (2003): Ökologische Bewertung erneuerbarer Kraftstoffe. Proceedings of the Symposium "Zukünftige Kraftstoffe für moderne Antriebe", Köln, 24 - 25 Juni 2003.

- Pehnt, M. (2002): Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 476. VDI Verlag, Düsseldorf 2002, ergänzt um interne Berechnungen (CO-Shift, PSA des Synthesegases).
- Pehnt, M. & Gärtner, S.O. (2002b): Ökobilanz von gasförmigem Wasserstoff aus Holzvergasung. Interner Bericht des IFEU, basiert auf: Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 476, VDI Verlag, Düsseldorf 2002.
- Pembina (2000): Climate-Friendly Hydrogen Fuel: A Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions for selected Fuel Cell Vehicle Hydrogen Production Systems. Drayton Valley (Canada), Pembina Institute.
- Pimentel, D. (2001): The Limits of Biomass Utilization. In Encyclopedia of Physical Science and Technology Third Edition. Vol 2, S. 159-171.
- Pimentel, D. (2003): Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics and Environmental Impacts are Negative. Natural Resources Research, Vol. 12, No. 2, S. 127-134.
- Raschka, M. (2002): Methanol als Energieträger in einem nachhaltigen Energiesystem? Fachgebiet Energiesysteme, Veranstaltung „Neue Entwicklung auf den Energiemärkten“ 2002.
- Reinhardt, G. A. (1999): Ressourcen- und Emissionsbilanzen: Rapsöl und RME im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Texte 79/99, Umweltbundesamt Berlin.
- Reinhardt, G. A. & Zemanek, G. (2000): Ökobilanz Bioenergieträger – Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- Reinhardt, G.A., Gärtner, S.O. (IFEU) & Scheurlen (IUS) (2004): Teilbericht „Energie aus Biomasse und Naturschutz“. In: DLR, IFEU, & WI (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland.
- Richards, I.R. (2000): Energy Balances in the growth of Oilseed Rape for Biodiesel and of Wheat for Bioethanol. Report for the British Association of Bio Fuels and Oils (BABFO). Ipswich: Levington Agriculture Ltd.
- Rogasik, J., Schnug, E. & Rogasik, H. (2000): Landbau und Treibhauseffekt: Quellen und Senken für CO<sub>2</sub> bei unterschiedlicher Landbewirtschaftung. Arch. Acker-Pfl. Boden., 2000 Vol. 45, S. 105-121. Malaysia.
- Röder A. (2001): Life-Cycle Inventory and Costs of Different Car Power Trains, PSI-Bericht 01-16. Villigen, Paul-Scherrer-Institut.
- (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. (2003): The Addition of Ethanol from Wheat to GHGenius.
- Scharmer, K., Gosse, G. et al. (1995): Energy Balance, Ecological impact and Economics of vegetable Oil Methyl ester Production in Europe as Substitute for Fossil Diesel. EU-Studie ALTENER 4.1030/E/94-002-1, Dezember 1995.



- Schindler, J. & Weindorf, W. (2003): "Well-to-Wheel" – Ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkraftstoffen und -antrieben. Präsentation vom 12. April 2003 in Nürnberg.
- Schmitz, N. (Hrsg.) (2003): Bioethanol in Deutschland. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 21.
- Schneider, U.A. & McCarl, B.A. (2001): Economic Potential of Biomass based Fuels for Greenhouse Gas Emission Mitigation.
- Schöpe, M. & Brischkat, G. (2002): Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Rapsanbaus zur Biodieselproduktion in Deutschland. ifo Schnelldienst 6/2002, S. 3-10.
- Shapouri, H., Duffield, J.A. & Wang, M. (2002): The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update. Economic Report No. 813.
- Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., Shapouri, H. (1998): An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles. NREL, Colorado, USA.
- Sheehan J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M. & Shapouri, H. (1998): Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. NREL/SR-580-24089, NREL, Colorado, USA.
- Sheehan, J., Aden, A., Riley, C., Paustian, K., Killian, K., Brenner, J., Lighthle, D., Nelson, R. Walsh, M. & Cushman, J. (2002): Is Ethanol from Corn Stover Sustainable? Adventures in Cyber-Farming. A Life-Cycle-Assessment of the Production of Ethanol from Corn Stover for Use in a Flexible Fuel Vehicle. Draft Report for Peer Review, December 23, 2002.
- Sims, R. (1996): The Potential for Biodiesel in New Zealand. Proceedings of Conference, Applications of Bioenergy Technologies™ Rotarua, S. 139-148 EECA.
- Spath, P. L. & Mann, M. K. (2003): Using LCAs to find Improvements for Hydrogen Production from Wind Electrolysis. Proc. Of DETC '03, Chicago September 2003.
- Stelzer, T. (1999): Biokraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen: Lebensweganalysen von Umweltwirkungen. Stuttgart Univ., Diss.
- Sundqvist, J.-O., Baky, A., Björklund, A., Carlsson, M., Eriksson, O., Frostell, B., Granath, J., Thyselius, L. (1999): Systemanalys av Energiutnyttjande från avfall - Utvärdering av Energi, miljö och ekonomi IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Report no. 1380.
- Sundqvist, J.-O. (2003): System Analysis of organic Waste Management Schemes - Experiences of the ORWARE model. In the Proceedings of EU Summer School: Biotechnology in organic Waste Management: From solid Waste Disposal to Resource Recovery, Wageningen 29 June – 4 July 2003.
- Tan, R.R., Culaba, A.B. & Purvis, M.R.I. (2002a): Carbon Balance Implications of Coconut Biodiesel Utilization in the Philippine Automotive Transport Sector.
- Tan, R.R. & Culaba, A.B. (2002b): Life-Cycle Assessment of Conventional and Alternative Fuels for Road Vehicles.

- Thrän, D. & Kaltschmitt, M. (2004): Status Quo und Potenziale der energetischen Biomasse-nutzung in Deutschland – Wozu sollen welche Biomassepotenziale genutzt werden? In: Bundesverband BioEnergie e. V. und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2004): Tagungsband: Ausbau der Bioenergie – im Einklang mit dem Natur- und Umweltschutz?! Eine Standortbestimmung. 10. Februar 2004, Berlin. S. 45-66.
- Thuijl, van E., Roos, C.J. & Beurskens, L.W.M. (2003): An Overview of Biofuel Technologies, Markets and Policies in Europe.
- TU München (2003) siehe Igelspacher, R.
- Tyson, K.S., Riley C.J. & Humphreys K.K. (National Renewable Energy Laboratory) (1993): Fuel Cycle Evaluations of Biomass-Ethanol and Reformulated Gasoline. Golden, CO, Report No. NREL/TP-463-4950, DE94000227, November 1993.
- Umweltbundesamt (2002): Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland 1990 – 2000. Stand Juli 2002. [www.umweltdaten.de/luft/ed-2000.pdf](http://www.umweltdaten.de/luft/ed-2000.pdf); zuletzt geöffnet am 16.02.2004.
- USDA (2002) siehe Shapouri, H. et al.
- VITO (1999) siehe Ceuterick, D. & Spirinckx C.
- Wang, M., Saricks, C. & Santini D. (1999): Effects of Fuel Ethanol Use on Fuel-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emissions.
- Wang, M., Saricks, C. & Santini, D (1998): Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Corn Ethanol. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Bio-Energy Conference, Madison, Wisconsin, October 5-8, 1998.
- Wang, M., Saricks, C. & Wu, M. (1997): Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced from U.S. Midwest Corn. Prepared for Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., Dec.
- WBGU 2004/ WBGU (2004): Politikpapier 3 – Erneuerbare Energien für eine nachhaltige Entwicklung: Impulse für die renewables 2004.
- Weiss, M.A., Heywood, J.B., Drake, E.M., Schafer, A., AuYeung, F.F. (2000): On the road in 2020. A Life-Cycle Analysis of new Automobile Technologies. Energy Laboratory Report MIT EL 00-003. Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology; October 2000.
- Williams, R. H., Larson, E. D., Katofsky, R. E. & Chen J. (1995): Methanol and Hydrogen from Biomass for Transportation, with Comparisons to Methanol and Hydrogen from Natural Gas and Coal. Princeton, Princeton University.
- Wood, B.J. & Corley, R.H.V. (1991) The Energy Balance of Oil Palm Cultivation. In: Basiron, Y., Sukaimi, J., Chang, K.C., Cheah, S.C., Henson, I.E., Kamaruddin, N., Paranjothy, K., Rajanaidu, N., Dolmat, T.H.T. & Arrifin, D. (1991): Proceedings of the International Oil Palm Conference. PORIM (Palm Oil Research Institute of Malaysia), Kuala Lumpur, S. 130-143.

- 
- Woods, J. & Bauen, A. (2003): Technology Status Review and Carbon Abatement Potential of Renewable Transport Fuels in the UK.
- Yusoff, S. & Sulaiman, N. (2000): Life Cycle Study on Palm Oil - A Renewable Raw Material. Proceedings of the International Conference & Exhibition on Life Cycle Assessment: Tools for Sustainability. 25. – 27.04.2000 Virginia.
- Zabel, M. (1994): Analyse und Bewertung der Ethanolherstellung aus Biomasse - Kosten und Schadstoffemissionen: Dargestellt am Beispiel des Bundesstaates São Paulo, Brasilien. TU Berlin., Diss.

## Abkürzungsverzeichnis

ADEME	French Environment and Energy Management Agency
BTL	Biomass-To-Liquid
CNG	Compressed Natural Gas
CONCAWE	Conservation of Clean Air and Water in Europe
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DfT	Department for Transport
DIREM	French Direction of the Energy and Mineral Resources
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DME	Dimethylether
DPF	Dieselpartikelfilter
EEA	European Environmental Agency
EIA	Energy Information Administration
Enerstrat	Energy Strategies
EST	Energy Saving Trust
ETBE	Ethyltertiärbutylether
EtOH	Ethanol
ETSU	Energy Technological Support Unit
EUCAR	European Council for Automotive R&D
FAT	Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik
FC	Fuel Cell
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
FfE	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
GH2	Gaseous hydrogen
GJ	Gigajoule
GM	General Motors
GWP	Global-Warming-Potential
ha	Hektar
HTU	Hydro Thermal Upgrading
ICE	Internal Combustion Engine
IEA	International Energy Agency
IEEP	Institute for European Environmental Policy
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
IfE	Institut für Energetik und Umwelt
IFO	Institut für Wirtschaftsforschung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISVS	Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart
JRC	Joint Research Centre
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
LH2	Liquid hydrogen
MJ	Megajoule
Mrd.	Milliarden
MTBE	Methyltertiärbutylether
MeOH	Methanol
NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NSCA	National Society for Clean Air and Environmental Protection
RME	Rapsölmethylester
TTW	Tank-to-Wheel
UBA	Umweltbundesamt
USDA	U.S. Department of Agriculture
VITO	Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel

