

Heft R 523 (2004)

Informationstagung Motoren, Frühjahr 2004, Frankfurt

Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), Heidelberg

Leitung: Dr. U. Höpfner

Abschlußbericht über das Vorhaben Nr. 814

**Thema: CO₂-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe:
Eine Bestandsaufnahme**

Kennwort: CO₂-Studie

Laufzeit: 01.05.2003 - 30.04.2004

Obmann: Prof. Dr. Gruden

Bearbeiter: Dr. M. Quirin

Dr. G. A. Reinhardt

Dipl.-Phys.-Ing. S. O. Gärtner

Dr. M. Pehnt

Dr. U. Höpfner

Vortragender: Dr. G. A. Reinhardt

Summary

Different research groups in the whole world come to variable results or conclusions regarding biofuels for transportation. This concerns their environmental impacts as well as economic calculations and estimations of the potentials of biofuels.

The goals of this study is to get scientifically sound statements about energy and greenhouse gas balances as well as other environmental effects, estimates of the costs and the potentials of all biofuels for transportation and to identify the research needs. To attain these goals, international publications are analysed comparatively. Thereby publicly available publications are considered regarding biofuels currently available on the market (e.g. pure vegetable oil, biodiesel from rape seed, bioethanol and bio-ETBE) as well as future biofuels (e.g. BTL and hydrogen). Regarding the energy and greenhouse gas balances as well as estimates of the costs for the production of the biofuels, bandwidths have been deduced for all biofuels – subdivided after the respective raw material basis e.g. bioethanol from wheat. The bandwidths were determined by adjustment, new calculation or if necessary by a new estimation of the single results of the analysed studies.

In this report, the results of the energy and greenhouse gas balances as well as the estimates of the production costs of biofuels are presented. Regarding the results of the other environmental effects, the estimates of the potentials and the future development of biofuels as well as the research needs of all listed topics, we refer on the booklet. Therein a complete interpretation for all biofuels is given.

Zusammenfassung

Weltweit gibt es eine Vielzahl an Studien, in denen die Umweltwirkungen von Biokraftstoffen untersucht sowie Kosten- und Potenzialabschätzungen vorgenommen wurden. Hierbei differieren die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der einzelnen Forschungsgruppen bisweilen beträchtlich.

Ziel dieser Studie ist es, wissenschaftlich belastbare Aussagen über die Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie über die weiteren Umweltwirkungen, Kosten- und Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen zu erhalten und den Forschungsbedarf dieser Gebiete zu identifizieren. Hierzu werden internationale Publikationen zu den jeweiligen Themenfeldern analysiert und miteinander verglichen. Betrachtet werden sowohl alle öffentlich zugänglichen Publikationen zu den derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen wie z. B. Pflanzenöl und Biodiesel aus Raps, Bioethanol aus Zuckerrohr und Mais als auch zu Biokraftstoffen, die heute noch nicht großtechnisch hergestellt werden, wie beispielsweise BTL und Wasserstoff. Für die Energieaufwendungen, die Treibhausgasemissionen sowie die Kosten für die Bereitstel-

lung von Biokraftstoffen wurden in dieser Studie für alle Biokraftstoffe - untergliedert nach der jeweiligen Rohstoffbasis wie z. B. Bioethanol aus Weizen - entsprechende Bandbreiten abgeleitet. Diese ergaben sich durch Anpassung, Neuberechnung oder gegebenenfalls Neueinschätzung der Einzelergebnisse der analysierten Studien.

In dem vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse zu den Energie- und Treibhausgasbilanzen und den Kostenabschätzungen von Biokraftstoffen vorgestellt. Bezüglich der Ergebnisse der weiteren Umweltwirkungen, der Potenzialabschätzungen und der zukünftigen Entwicklung von Biokraftstoffen sowie des Forschungsbedarfs aller genannten Themenfelder verweisen wir auf das Forschungsheft. Darin findet sich dann auch eine Gesamteinschätzung zu den Biokraftstoffen, die erst nach der Zusammenführung aller Ergebnisse möglich ist.

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 CO₂-Emissionen, wovon wiederum ca. 90 % vom Straßenverkehr verursacht werden (UBA 2002). In diesem Bereich könnte durch die verstärkte Nutzung von Biokraftstoffen ein Beitrag geleistet werden, um CO₂-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. Im Grünbuch der Kommission „Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit“ wird als Ziel festgelegt, dass 20 % der konventionellen Kraftstoffe durch alternative Kraftstoffe bis 2020 substituiert werden sollen. Durch den verstärkten Einsatz von Biokraftstoffen sollen jedoch nicht nur CO₂-Emissionen reduziert und fossile Ressourcen geschont werden. Darüber hinaus stellt die Produktion von Biokraftstoffen auch Einkommensperspektiven für die Landwirtschaft dar und Europa würde unabhängiger von Öl-Importen werden.

Viele Studien zu Ökobilanzen von Biokraftstoffen kommen zu dem Ergebnis, dass Biokraftstoffe mehr oder weniger CO₂-neutral sind, da zumindest bei deren Verbrennung nur die Menge an CO₂ freigesetzt wird, die zuvor beim Anbau der energieliefernden Pflanzen der Atmosphäre entzogen wurde. Die Ergebnisse differieren bisweilen aber beträchtlich, nicht nur bei den Treibhausgasbilanzen, sondern auch bei den Energie- und Schadstoffbilanzen. Um die vorliegenden Publikationen zu Ökobilanzen von Biokraftstoffen einander gegenüber-

zustellen und einer kritischen Bewertung zu unterziehen, wurde das IFEU von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) beauftragt, eine entsprechende Studie anzufertigen. 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.

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 Publikationen, die schließlich in dieser Studie betrachtet werden, werden jedoch lediglich der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der biogenen Kraftstoffe bis in den Tank (Well-to-Tank Analyse) entnommen. Dagegen werden die Kraftstoffverbräuche und Treibhausgasemissionen der Fahrzeugnutzung (Tank-to-Wheel) sowie allgemeine Kraftstoffeigenschaften auf einheitliche Werte festgelegt. Diese Vorgehensweise dient der Vergleichbarkeit der betrachteten Studien. Für alle in dieser Studie betrachteten Kraftstoffvergleiche wird als Fahrzeug ein PKW mit Verbrennungsmotor ausgewählt. Im Forschungsheft ist bezüglich Wasserstoff und Methanol zusätzlich noch die Option „PKW mit Elektromotor/Brennstoffzelle“ dargestellt.

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 Bio-

kraftstoffen, wurde in dieser Studie für alle Biokraftstoffe (untergliedert nach der jeweiligen Rohstoffbasis; Bsp. Bioethanol aus Weizen) eine Bandbreite abgeleitet. Diese Bandbreite ergab sich durch Anpassung, Neuberechnung oder gegebenenfalls Neueinschätzung der Einzelergebnisse der analysierten Studien und war im Wesentlichen von den Erträgen, den Anrechnungsverfahren der Kuppelprodukte, den zugrundegelegten Technologien sowie der Anrechnung von N₂O-Emissionen im Bereich der Landwirtschaft abhängig. Die entsprechenden Zusammenstellungen finden sich im Abschlussbericht.

Die Ergebnisse des erschöpflichen Primärenergieverbrauchs (Energiebilanzen) und der Treibhausgasemissionen können unterschiedlich dargestellt werden. Infrage kommt eine Vielzahl an Möglichkeiten wie 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 2.2 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 an deren Ende eine Gesamteinschätzung der Biokraftstoffe steht. Da die Ergebnisse zu den weiteren Umweltwirkungen und den Potenzialabschätzungen von Biokraftstoffen noch nicht vollständig erarbeitet sind, konnte die Zusammenführung bisher noch nicht erfolgen. Hierzu verweisen wir auf das Forschungsheft. Eine Zusammenführung der Ergebnisse zu den Energie- und Treibhausgasbilanzen mit den Kosten für die Bereitstellung der Biokraftstoffe findet sich in Kapitel 4.2.

2.1 Literaturzusammenstellung

Zunächst wurde auf der Basis von der IFEU-internen Datenbank, 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 ergänzt, indem Experten aus allen Großräumen der Erde eingebunden wurden, um die bis dahin gesammelte Literatur auf Vollständigkeit zu überprüfen und gegebenenfalls Ergänzungen vorzunehmen.

Die so zusammengetragenen Publikationen wurden auf die Parameter Energiebilanz, Treibhausgase (CO₂, CH₄ und N₂O), weitere Emissionen (NO_x, SO_x, 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 des Abschlussberichtes aufgeführt)

Aus den o.g. Kriterien wurden ca. 80 Publikationen ausgeschlossen. Diese sind im Abschlussbericht 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 wurden im Abschlussbericht nicht aufgeführt. In den Tabellen 1 und 2 sind die Publikationen aufgelistet, die in dieser Studie vergleichend gegenüber gestellt werden. In den Tabellen 1 und 2 wurde mit einem "x" kenntlich gemacht, zu welchen der Parameter Energiebilanz, Treibhausgase (CO₂, CH₄ und N₂O), weitere Emissionen (NO_x, SO_x, 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 werden 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 den Tabellen 1 und 2 angegeben. Insgesamt wurden 109 Biokraftstoffketten vergleichend betrachtet. Eine Detailaufschlüsselung, welche Studien für welche Biokraftstoffe in dieser Untersuchung berücksichtigt wurden, findet sich im Abschlussbericht.

Tabelle 1: In dieser Studie berücksichtigte Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen und den weiteren Emissionen

| Autor | Jahr | Bezug | Anzahl Kraftst. | Energiebilanz | Treibhausgase CO ₂ | CH ₄ | N ₂ 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 |
| CSIRO | 2001 | Australien | 6 | | x | x | x | 2 | | |
| 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 | | | |
| 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 | | | | | | |
| 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) |
| Larson | 1999 | USA | 1 | 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 | | | |
| 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 |
| (S&T) ² | 2003 | Kanada | 1 | x | (x) | (x) | (x) | | | |
| Tan | 2002a | Philippinen | 1 | x | x | x | 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 | | | |

Tabelle 2: In dieser Studie berücksichtigte Publikationen zu Potenzial- und Kostenabschätzungen

| Autor | Jahr | Bezug | Anzahl Kraftst. | Energiebilanz | Treibhausgase | | | weitere Emiss. | Poten- ziale | Kos- ten |
|-------------|-------|-------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|--------------|----------|
| | | | | | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | | | |
| 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 | |
| DfT | 2003 | weltweit | 7 | | | | | | | x |
| DLR et al. | 2003 | Europa | 8 | | | | | | | x |
| Dreier | 1999 | Deutschland | 5 | x | (x) | | | 4 | x | x |
| EUCAR | 2003 | EU | 8 | (x) | x | x | x | | | x |
| EUR | 2004 | Europa | 5 | | | | | | x | |
| EUR | 2003 | Europa | 6 | | | | | | x | |
| EUR | 2002a | Europa | 1 | (x) | (x) | | | | x | x |
| Fromentin | 2000 | Schweiz | 1 | x | x | x | x | 7 | | x |
| IEA | 2003 | Nordam./EU | 5 | (x) | (x) | (x) | (x) | | | x |
| IEA | 1999 | weltweit | 3 | (x) | (x) | | | (4) | x | |
| IFO | 2002 | Deutschland | 1 | | | | | | | x |
| Jungmeier | 2003 | Österreich | 9 | | (x) | (x) | (x) | | | x |
| Kaltschmitt | 2003 | Deutschland | 7 | | | | | | x | x |
| LBST | 2002 | Deutschland | 5 | (x) | (x) | | | | | x |
| Moreira | 2002 | Brasilien | 1 | | | | | | x | |
| Mutert | 1999 | Südostasien | 1 | | | | | | x | |
| NREL | 2002 | USA | 1 | x | x | x | x | 2 | | x |
| Pimentel | 2003 | USA | 1 | x | | | | | | x |
| Pimentel | 2001 | USA | 1 | (x) | | | | | x | |
| Raschka | 2002 | k.A. | 1 | | | | | | | x |
| Schmitz | 2003 | Deutschland | 4 | (x) | (x) | (x) | (x) | | | x |
| Schneider | 2001 | USA | 1 | | | | | | x | |
| Sims | 1996 | Neuseeland | 1 | | | | | | x | |
| Thuijl | 2003 | Europa | 9 | | | | | | | x |
| TU Münch. | 2003 | Deutschland | 3 | x | (x) | (x) | (x) | (4) | | x |
| Woods | 2003 | UK | 7 | | | | | | | x |

2.2 Bezüge der Kraftstoffvergleiche

Nachfolgend werden die Bezüge aufgeführt, mit denen die Ergebnisse des erschöpflichen Primärenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen dargestellt werden. Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer Bezüge, die im Abschlussbericht dokumentiert sind. Darin erfolgt auch die Darstellung einzelner Teilausschnitte der Gesamtbilanzen.

a) Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse

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

Da unbestritten der größte Engpass zur Bereitstellung von Biokraftstoffen die verfügbare Fläche zur Bereitstellung von Biomasserohstoffen darstellt, werden die Ergebnisse auf einen Hektar und ein durchschnittliches Ertragsjahr bezogen.

- Energiebilanz: Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergieträger in GJ/ha und Jahr.
- Treibhausgasbilanz: Summe eingesparter CO₂-Äquivalente in t/ha und Jahr.

b) 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.

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 im Forschungsheft aufgeführt.

- Energiebilanz: Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in MJ/km.
- Treibhausgasbilanz: Summe eingesparter CO₂-Äquivalente in g/km.

Darüber hinaus werden die Treibhausgasbilanzen zusätzlich in Relation zu den Energiebilanzen gesetzt. Hierdurch werden die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen als Effizienzkriterium dargestellt. Wie die beiden vorangestellten Bezüge, wird auch dieser Bezug gleichermaßen für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse wie für Biokraftstoffe aus Reststoffen dargestellt.

- Treibhausgasbilanz: Summe eingesparter CO₂-Äquivalente in kg / Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in MJ

In Kapitel 4.2 werden die Kosten für die Bereitstellung der Biokraftstoffe in €/GJ Kraftstoffinhalt dargestellt. Auf die Darstellung der Kosten in €/100 km wird in diesem Bericht verzichtet und auf das Forschungsheft verwiesen.

Die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen werden mit den Kosten für die Bereitstellung der Biokraftstoffe, abzüglich der Bereitstellungskosten für die fossilen Kraftstoffe, kombiniert und folgender Bezug dargestellt:

- Energiebilanz: Kosten in €/ Summe eingesparter erschöpflicher Primärenergie in GJ
- Treibhausgasbilanz: Kosten in €/ Summe eingesparter CO₂-Äquivalente in t

3 Betrachtete Kraftstoffe

In dieser Studie werden sowohl derzeit im Einsatz befindliche, als auch heute noch nicht großtechnisch hergestellte Biokraftstoffe betrachtet (Abb.1).

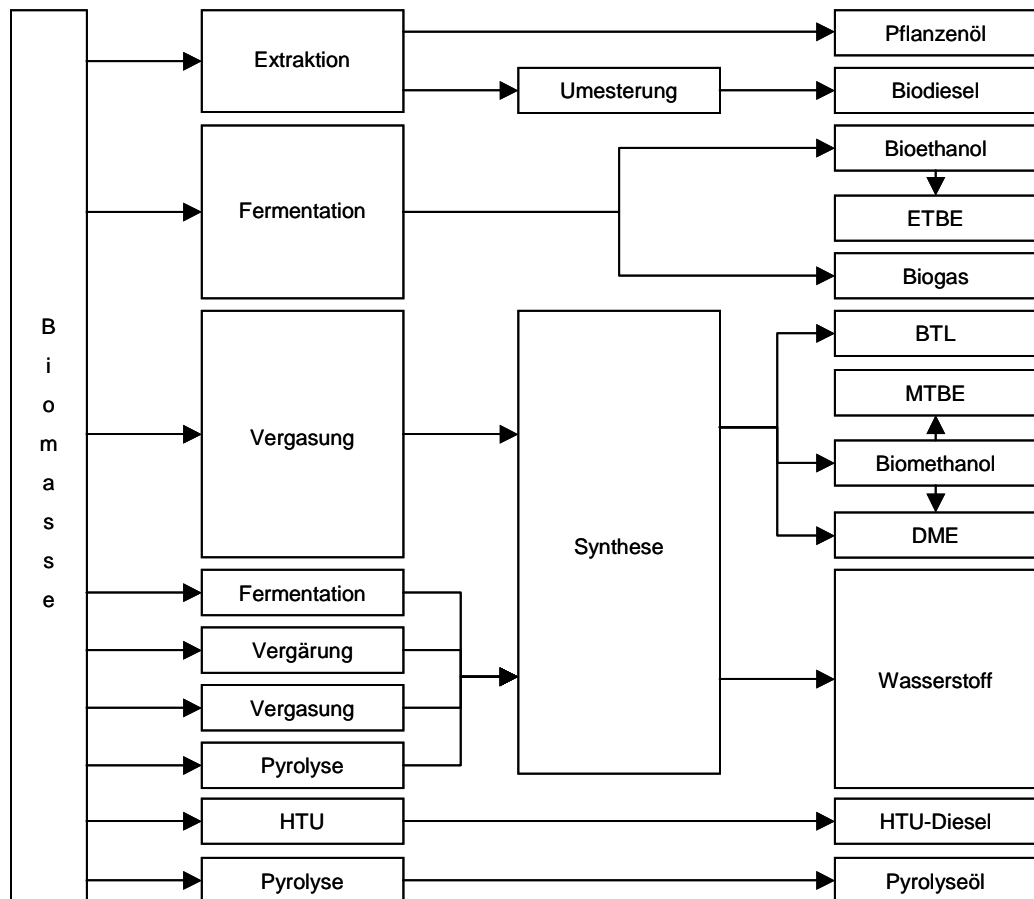


Abbildung. 1: Biokraftstoffpfade

Derzeit im Einsatz befindliche Biokraftstoffe

- **Bioethanol**

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 geringerem Umfang auch aus Sonnenblumen produziert. In Nordamerika wird Biodiesel vor allem aus Sojabohnen und in geringem Umfang auch 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 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, 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, Gras und Holz dar. Andere Biomasserohstoffe können zwar theoretisch auch vergast werden, jedoch ist das Verfahren dann nicht mehr so effizient wie bei der Vergasung von Lignocellulose.

- **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 lignocellulosehaltigen 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 Pyrolysekokeses.

In Tabelle 3 sind alle Biokraftstoffe aufgeführt, zu denen Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen vorliegen und die in dieser Studie analysiert werden.

Tabelle 3: In dieser Studie betrachtete Biokraftstoffe zu Energie- und Treibhausgasbilanzen und die entsprechenden Kraftstoffpendants

| Biokraftstoffe | Fossile Kraftstoffpendants |
|---|--|
| Bioethanol | |
| — 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 |
| ETBE | |
| — ETBE aus Mais | — Fossiles MTBE |
| — ETBE aus Weizen | — Fossiles MTBE |
| — ETBE aus Zuckerrüben | — Fossiles MTBE |
| — ETBE aus Lignocellulose | — Fossiles MTBE |
| — ETBE aus Kartoffeln | — Fossiles MTBE |
| Biodiesel | |
| — Biodiesel aus Raps | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Biodiesel aus Sonnenblumen | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Biodiesel aus Sojabohnen | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Biodiesel aus Canola | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Biodiesel aus Kokosnussöl | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Biodiesel aus recyceltem Pflanzenöl | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Biodiesel aus Tierfett | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Biodiesel aus Altspesiefetten | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| Pflanzenöl | |
| — Pflanzenöl aus Raps | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| — Pflanzenöl aus Sonnenblumen | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| Biomethanol | |
| — Biomethanol aus Lignocellulose | — Ottokraftstoff |
| MTBE | |
| — MTBE aus Lignocellulose | — Fossiles MTBE |
| DME | |
| — DME aus Lignocellulose | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| BTL | |
| — BTL aus Lignocellulose | — Fossiler Dieselkraftstoff |
| Biogas | |
| — Biogas aus organischen Reststoffen | — Erdgas / Ottokraftstoff |
| Wasserstoff | |
| — Wasserstoff aus Lignocellulose | — Wasserstoff aus Erdgas* / Ottokraftstoff |
| — Wasserstoff aus organischen Reststoffen | — Wasserstoff aus Erdgas* / Ottokraftstoff |

* wird in diesem Bericht nicht berücksichtigt

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen und Gegenüberstellungen der betrachteten Biokraftstoffvergleiche aufgeführt und diskutiert. Die jeweiligen Basisdaten, Detailangaben, Detailbeschreibungen und Detailinterpretationen, Teilzusammenführungen und alle Zwischenergebnisse sind im Abschlussbericht ausführlich dokumentiert.

4.1 Energie- und Treibhausgasbilanzen von Biokraftstoffen

Die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen werden hier – entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2 – diskutiert:

In Abbildung 2 sind die entsprechenden Ergebnisse für die Biokraftstoffe aus Anbaubiomas dargestellt. Die Bandbreiten stellen Unterschiede in den Erträgen, in der Bewertung der Kuppelprodukte und bisweilen auch Unsicherheiten bei den verwendeten Basisdaten dar. In der Regel gilt, dass die Werte umso günstiger, also weiter links liegen, je höher die Hektarerträge sind. Da sämtliche Bandbreiten deutlich zugunsten der Biokraftstoffe ausschlagen, kann als Hauptergebnis der Zusammenstellung festgehalten werden:

- Die Energie- und Treibhausgasbilanzen der betrachteten Biokraftstoffe aus Anbaubiomas im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants fallen alle zugunsten der Biokraftstoffe aus. Das gilt in unseren Augen uneingeschränkt, obwohl vereinzelte Studien zum entgegengesetzten Schluss kamen (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 – auch hier, solange ETBE fossiles MTBE ersetzt. 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, solange durch ETBE das fossile MTBE substituiert wird. Dies kommt dadurch zustande, dass 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. Die Vorteile von Biodiesel sind damit zu erklären, dass bei der Umesterung das Nebenprodukt Glycerin anfällt. Diese hochwertige Chemikalie verschafft Biodiesel eine höhere Gutschrift im Vergleich zu dem Mehraufwand durch die Umesterung.

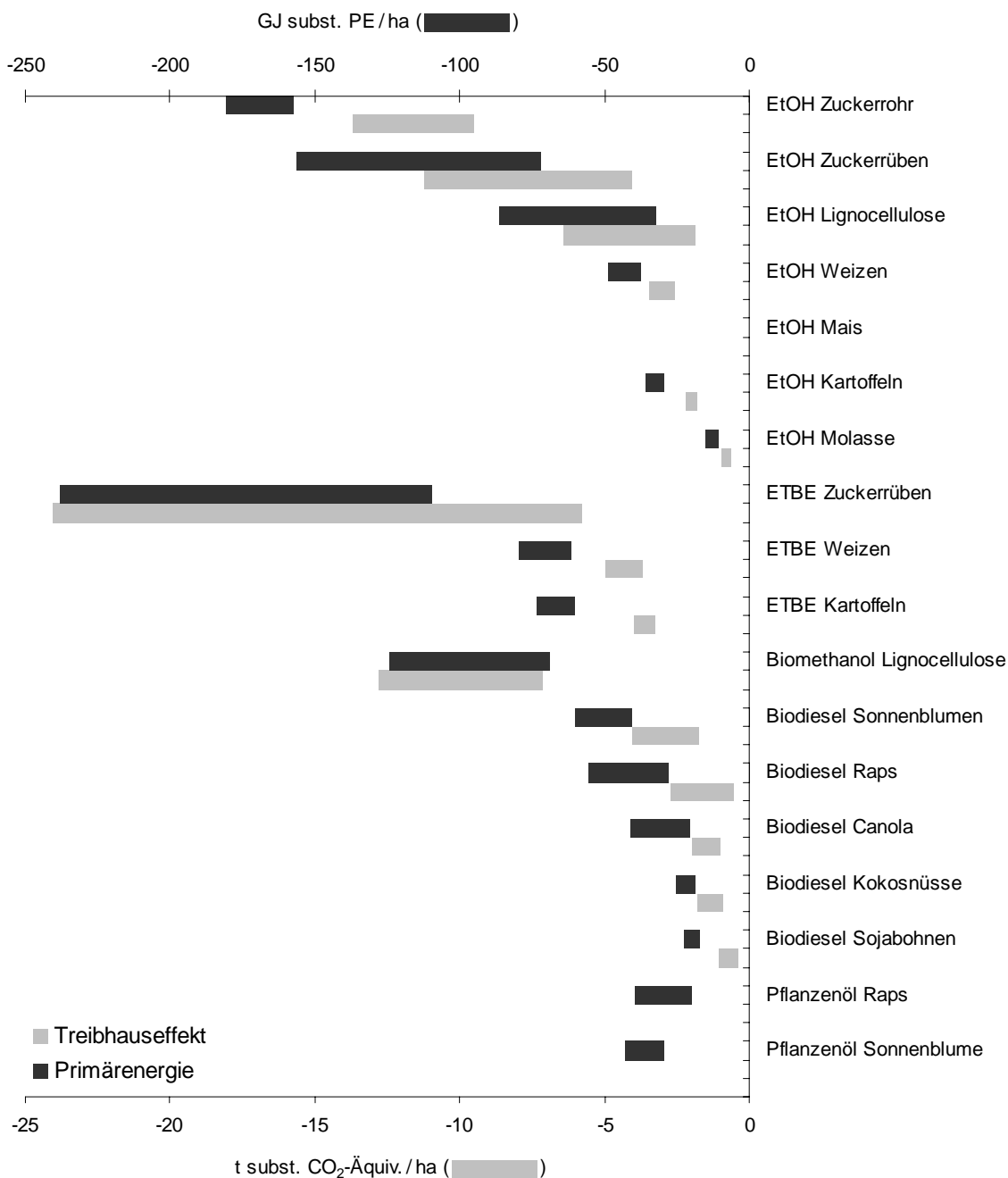


Abbildung 2: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen der analysierten Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants in GJ subst. Primärenergie / ha * a bzw. in t subst. CO₂-Äquivalente / ha * a. Die negativen Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe.

Die Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen der einzelnen Biokraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants, bezogen auf einen gefahrenen PKW-km, variieren sehr stark und unterscheiden sich somit nicht immer deutlich voneinander. Dennoch können einige Unterschiede aufgezeigt werden (Abb. 3).

- Mit Ausnahme von flüssigem Wasserstoff, der durch Vergasung von Lignocellulose hergestellt wird und hier dem Ottokraftstoff gegenübergestellt wird, fallen die Energie- und Treibhausgasbilanzen von allen Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse und Reststoffen im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants bezogen auf einen gefahrenen PKW-km alle zugunsten der Biokraftstoffe aus.
- Die Energie- und Treibhausgasbilanzen von flüssigem Wasserstoff weisen eine große Bandbreite auf und reichen in den positiven Bereich hinein, was Vorteile für den fossilen Kraftstoff anzeigt. Diese hohe Bandbreite ergibt sich aus unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Produktion von flüssigem Wasserstoff. Die Energieaufwendungen für die Speicherung und Verteilung von flüssigem Wasserstoff sind höher als die von gasförmigem Wasserstoff (vgl. Dreier 1999). Diese Energieaufwendungen können aus erschöpflichen Primärenergieträgern oder aus erneuerbaren Energieträgern erfolgen, was sich entsprechend auf die Bilanzen auswirkt.
- Ebenso wie die hohe Bandbreite bezüglich der Energie- und Treibhausgasbilanzen von flüssigem Wasserstoff, ist auch die hohe Bandbreite von Biomethanol aus Lignocellulose im Vergleich zu Ottokraftstoff produktionsspezifisch. Einerseits kann das produzierte Produktgas ausschließlich zur Biomethanolproduktion verwendet werden, während es auf der anderen Seite in einem Blockheizkraftwerk verstromt werden kann und somit konventionell produzierte Energie und Wärme ersetzt.
- Im Gegensatz zur flächenbezogenen Betrachtung weist Ethanol bei allen untersuchten Biomasserohstoffen bezogen auf einen km Vorteile gegenüber ETBE auf. Dies erklärt sich durch den höheren energiebezogenen Hektarertrag von ETBE im Vergleich zu Ethanol.
- Analog zu den geringeren Vorteilen von ETBE im Vergleich zu Bioethanol, fallen auch die Vorteile von MTBE im Vergleich zu Bioethanol geringer aus.
- Die Biodieseloptionen aus Reststoffen, dessen Ergebnisse nicht flächenbezogen dargestellt werden können, unterscheiden sich nicht signifikant von den Biodieseloptionen aus Anbaubiomasse.

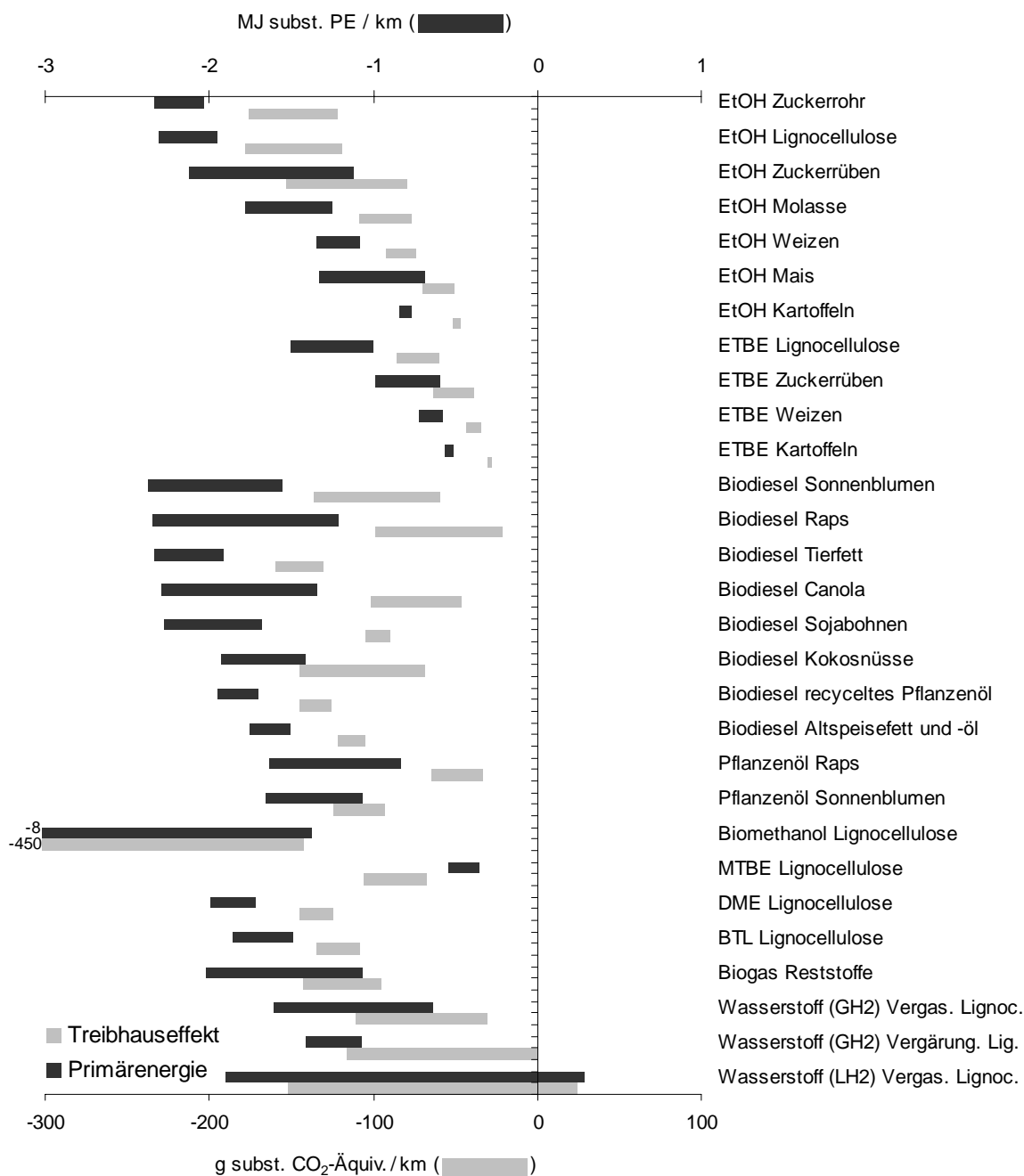


Abbildung 3: Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen der analysierten Biokraftstoffe aus Reststoffen und Anbaubiomasse im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants in MJ substituierte Primärenergie / km bzw. in g substituierte CO₂-Äquivalente / km. Die negativen Werte bedeuten Vorteile für die Biokraftstoffe.

In Abbildung 4 ist die Effizienz der Biokraftstoffe bezogen auf die Treibhausgase in kg substituierte CO₂-Äquivalente / GJ substituierte Primärenergie dargestellt. Insgesamt unterscheidet sich die CO₂-Effizienz zwischen den einzelnen Biokraftstoffen nicht signifikant voneinander. Hierbei spielen die auftretenden N₂O-Emissionen infolge der landwirtschaftlichen Produktion

von Anbaubiomasse, die bei der Bereitstellung der Biokraftstoffe aus Reststoffen nicht auftreten eine untergeordnete Rolle.

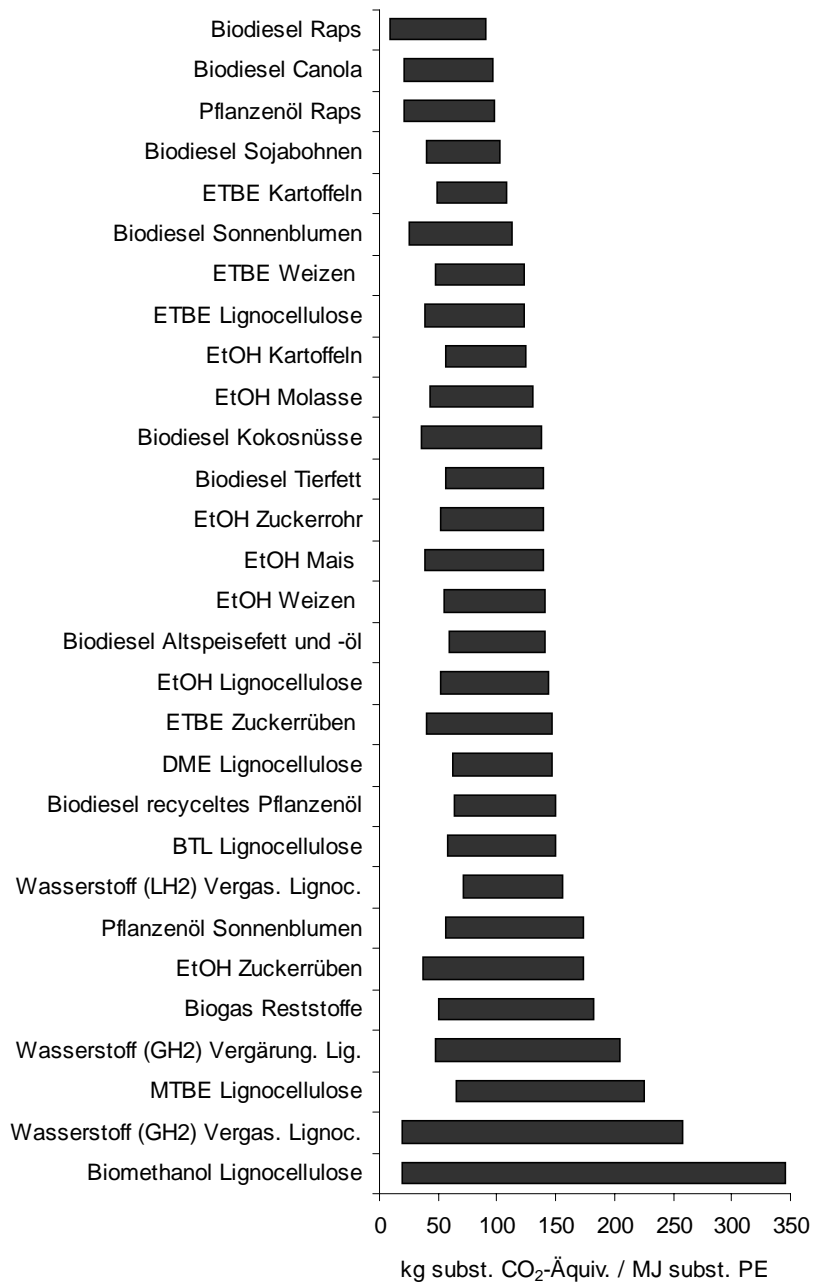


Abbildung 4: Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen der analysierten Biokraftstoffe aus Reststoffen und Anbaubiomasse in kg substituierte CO₂-Äquivalente / MJ substituierte Primärenergie.

4.2 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 werden nicht berücksichtigt, da sie den Vergleich verfälschen würden.

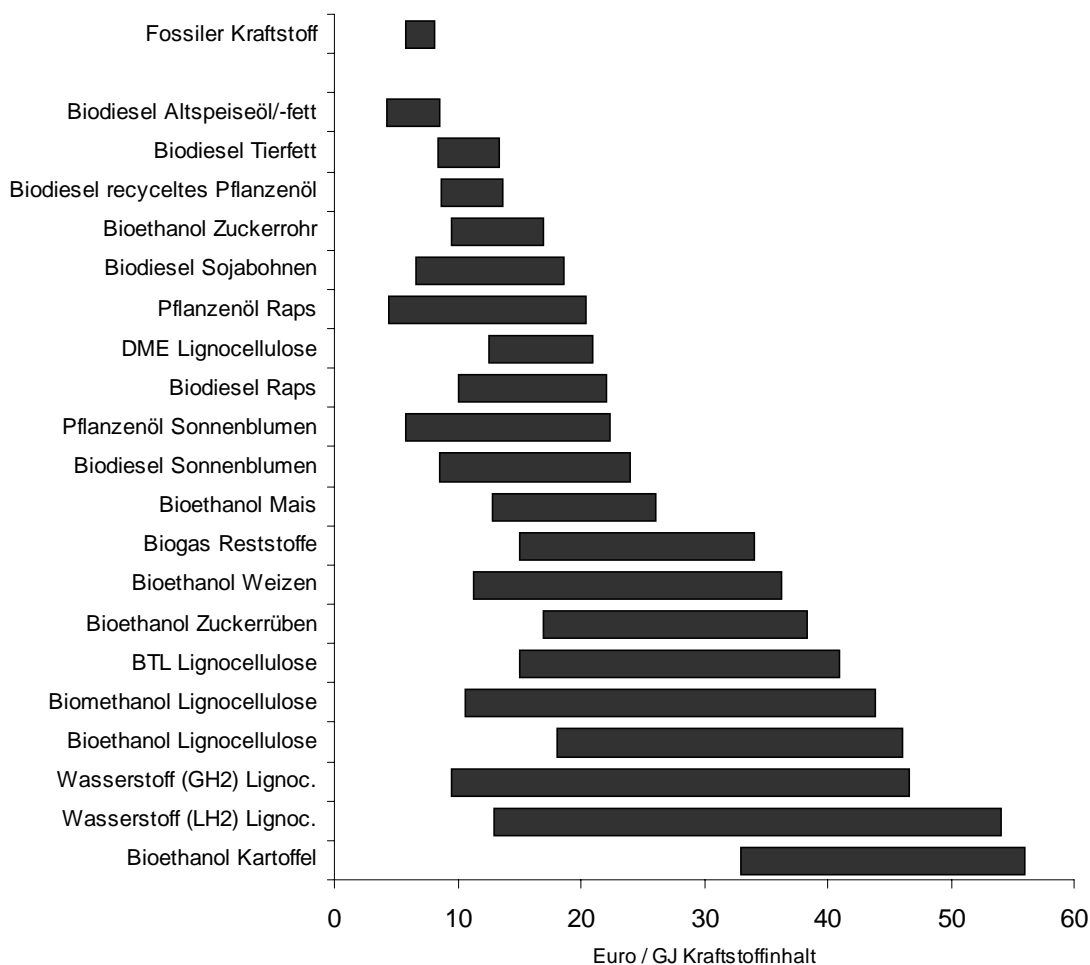


Abbildung 5: Bereitstellungskosten von Biokraftstoffen aus unterschiedlichen Anbaubio-massenerohstoffen und Reststoffen im Vergleich zu den Bereitstellungskosten von fossilem Kraftstoff in Euro/GJ Kraftstoffinhalt.

Der Vergleich der Bereitstellungskosten zeigt, dass fossile Kraftstoffe meist kostengünstiger produziert werden können als Biokraftstoffe (Abb. 5). In einigen Fällen lassen sich Biokraftstoffe durchaus auch zu den Kosten von fossilen Kraftstoffen produzieren. Dies gilt unter günstigen Bedingungen für Biodiesel aus Altspeiseölen, Biodiesel aus Sojabohnen, sowie

Pflanzenöl aus Raps und Sonnenblumen. Generell ist die Produktion von Biokraftstoffen aus Reststoffen kostengünstiger als die aus Anbaubiomasse. Die Bereitstellungskosten sind bei Betrachtung der minimalen Kosten, mit denen die unterschiedlichen Biokraftstoffe produziert werden können, bei Bioethanol aus Kartoffeln am höchsten.

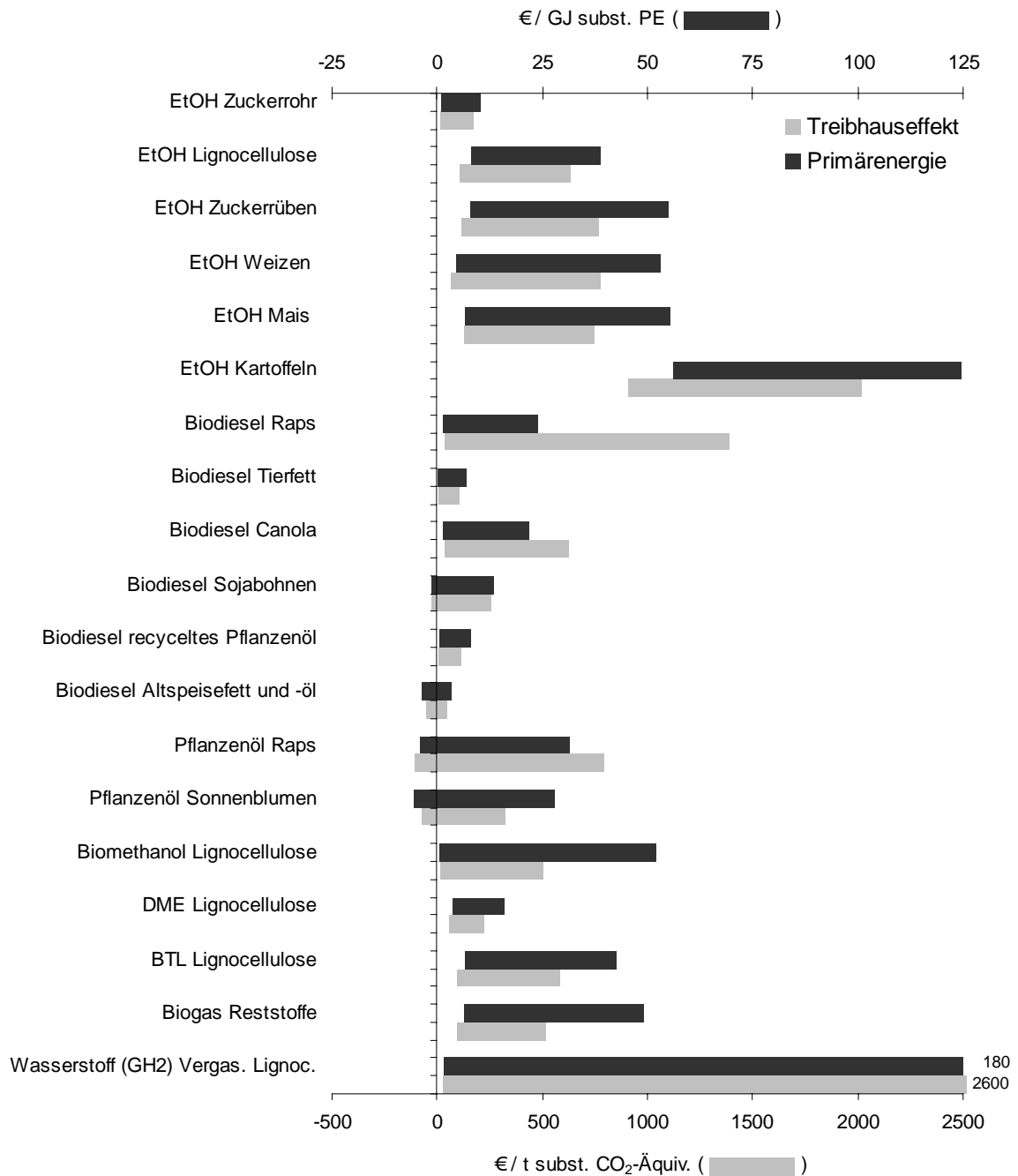


Abbildung 6: Kosten eingesparter Primärenergie und eingesparter Treibhausgasemissionen in Euro/GJ substituierte erschöpfliche Primärenergie bzw. Euro/t substituierter CO₂-Äquivalente.

Durch die Kombination der Bereitstellungskosten und der Ergebnisse der Energie- und Treibhausgasbilanzen lassen sich die Gesamtkosten (Bereitstellungskosten des Biokraftstoffs abzüglich der Kosten für den fossilen Kraftstoff) bezogen auf die eingesparte Energie bzw. die eingesparten CO₂-Äquivalente darstellen (Abb. 6). Hierbei resultieren bei Biokraftstoffen, dessen Bereitstellungskosten unter denen der fossilen Kraftstoffe liegen (z. B. Biodiesel aus Altspeiseölen), keine Kosten, sondern ein Gewinn pro eingesparte Primärenergie bzw. eingesparte Treibhausgasemissionen. Im Gegensatz dazu sind die Kosten pro eingesparte Primärenergie bzw. eingesparten Treibhausgasemissionen bei den Biokraftstoffen am höchsten, dessen Bereitstellungskosten hoch und dessen eingesparte Primärenergie bzw. Treibhausgasemissionen gering sind. Dies ist vor allem bei Bioethanol aus Kartoffeln der Fall.

5 Schlussfolgerungen

Bei Betrachtung der weltweit vorliegenden Publikationen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie Kostenabschätzungen 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 oder die Konversion. Für einen direkten Vergleich zwischen unterschiedlichen Biokraftstoffoptionen müssen die Systemgrenzen genau festgelegt werden. Folgende Einzelergebnisse konnten bisher bereits abgeleitet werden:

- Die Energie- und Treibhausgasbilanzen der betrachteten Biokraftstoffe im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffpendants fallen praktisch durchgängig zugunsten der Biokraftstoffe aus. Ausnahmen können dann auftreten, wenn mit sehr hohem Aufwand Biomasse zu Biokraftstoffen umgewandelt wird wie beim durch Vergasung von Lignocellulose hergestellten flüssigen Wasserstoff, wenn er Ottokraftstoff gegenübergestellt wird.
- Der Vergleich der Bereitstellungskosten zeigt, dass sich einige Biokraftstoffe unter günstigen Bedingungen auch zu den Kosten von fossilen Kraftstoffen produzieren lassen. Das trifft für Biodiesel aus Altspeiseölen, Biodiesel aus Sojabohnen sowie für Pflanzenöl aus Raps und Sonnenblumen zu. Generell ist die Produktion von Biokraftstoffen jedoch kostenintensiver als die von fossilen Kraftstoffen.
- Die Vorteile einiger Biokraftstoffe lassen sich nicht in allen geographischen Räumen nutzen. So ist die Bioethanolproduktion aus Zuckerrohr auf tropische Klimabedingungen beschränkt und der Zuckerrübenanbau an Regionen der mittleren Breiten mit besonders guten Böden gebunden.

Eine Gesamtschätzung zu den betrachteten Biokraftstoffen ist nach dem derzeitigen Stand der Projektarbeiten noch nicht möglich, da die Ergebnisse zu den weiteren Umweltwirkungen, den Potenzialabschätzungen und der zukünftigen Entwicklung von Biokraftstoffen noch nicht vollständig erarbeitet sind. Erst die Zusammenführung dieser Ergebnisse mit den hier dargestellten Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie den Kostenabschätzungen wird eine Gesamtschätzung zu den Biokraftstoffen möglich machen. Hierzu verweisen wir auf das Forschungsheft.

6 Forschungsbedarf

Es wurde aufgezeigt, dass für viele Biokraftstoffe eine Vielzahl an Studien zu Energie- und Treibhausgasbilanzen vorliegen. Zu diesen Biokraftstoffen konnte eine große Bandbreite abgeleitet werden, in der viele unterschiedliche Optionen der Biokraftstoffproduktion berücksichtigt sind. Es zeigte sich jedoch auch, dass für einige Biokraftstoffe nur wenige bzw. keine entsprechenden Studien vorliegen. Wenn nur wenige Studien – oder gar nur eine – vorlagen, war die abgeleitete Bandbreite mit größeren Unsicherheiten behaftet:

- Von den derzeit im Einsatz befindlichen Biokraftstoffen liegen zu Biodiesel aus Palmöl keine und für Biodiesel aus Kokosnussöl, Biodiesel aus Reststoffen, Bioethanol aus Zuckerrohr und Bioethanol aus Kartoffeln nur eine geringe Anzahl an Energie- und Treibhausgasbilanzen vor. Für diese müssten zur besseren Absicherung der Bandbreite noch entsprechende Analysen durchgeführt werden.
- Von den heute noch nicht großtechnisch hergestellten Biokraftstoffen liegen für Biodiesel aus Jatropha, Pyrolyseöl und HTU-Diesel keine Ökobilanzen vor. Für MTBE, DME und BTL liegen nur wenige entsprechende Studien vor. Für diese Kraftstoffe müssten ebenfalls zur besseren Absicherung der Bandbreite noch entsprechende Analysen durchgeführt werden.

Der Forschungsbedarf zu den übrigen Themenfeldern wird im Forschungsheft aufgeführt.

7 Literaturverzeichnis

ADEME 2002/ Direction of Agriculture and Bioenergies of the French Environmental 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.

Atrax 2002/ Atrax Energi AB et al. (2002): The Bio-DME Project, Phase 1. Report to Swedish National Energy Administration (STEM). 61 S.

- Börjesson 2004/ Börjesson, P. & Berglund, M. (2004): Environmental analysis of biogas systems – Part I: Fuel Cycle Emissions. Manuskript zur 2nd 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. CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), Australia
- DfT 2003/ Department for Transport (2003): International resource costs of biodiesel and bioethanol.
- DLR 2003/ Institute of Transport Research at the German Aerospace Centre in Berlin, Institute for Energy and Environment in Leipzig and Department of Transportation Planning and Traffic Engineering at the University of Stuttgart (2003) : Renewable Fuels for Cross Border Transportation. Final Report to the European Commission, Directorate-General for Environment, ENV.C1/ETU/2002/0092
- Dreier 1999/ Dreier, Th. (1999): Biogene Kraftstoffe – Energetische, ökologische und ökonomische Analyse. IfE Schriftenreihe Heft 38.
- Duncan 2003/ Duncan, J. (2003): Costs of Biodiesel Production. Prepared for: Energy Efficiency and Conservation Authority.
- Elsayed 2003/ Elsayed, M.A., Matthews, R. & Mortimer, N.D. (2003): Carbon and Energy Balances for a Range of Biofuels Options.
- Enerstrat 2003/ Energy Strategies (2003): CSR Fuel Ethanol Lifecycle Analysis. Prepared for CSR Sugar in association with APACE Research.
- 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.
- EUCAR 2003/ EUCAR, CONCAWE & JRC (2003): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context.

-
- EUR 2002a/ Enguídanos, 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
- EUR 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
- EUR 2004/ Kavalov, B. (2004): Biofuel Potentials in the EU. Report EUR 21012 EN.
- 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. (1999): 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. IEA-AFIS, Paris.
- IEA 2003/ International Energy Agency (IEA) (2003): Analysis of Biofuels.

- IFEU 2000/ IFEU Heidelberg (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: G. A. Reinhardt: 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 Öl- und Proteinpflanzen e.V.
- IFO 2002/ Schöpe, M. & Brischkat, G. (2002): Gesamtwirtschaftliche Bewertung des Rapsanbaus zur Biodieselproduktion in Deutschland. ifo Schnelldienst 6/2002, S. 3-10.
- 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.
- Kaltschmitt 2003/ Kaltschmitt, M., Zander, F. & Nill, M. (2003): Potenziale biogener Kraftstoffe in Deutschland. ZfE – Zeitschrift für Energiewirtschaft 27 (2003) 3, S. 1 – 11.

- Larson 1999/ Larson, E.D. & Haiming, J. (1999): Biomass Conversion to Fischer-Tropsch Liquids: Preliminary Energy Balances. Proceeding of the 4th 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.
- 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)² Consulting Inc. (2000): Assessment of Net Emissions of Greenhouse Gases From Ethanol-Gasoline Blends in Southern Ontario.
- Levelton 2002/ Levelton Engineering Ltd. & (S&T)² 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). Ipswich: Levington Agriculture Ltd
- 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
- Mutert 1999/ 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

- 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. NREL/SR-580-24089, National Renewable Energy Laboratory, 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.
- Pehnt 2002a/ Pehnt, M. (2002a): Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. Fortschritt-Berichte, Reihe 6, Nr. 476, ISBN 3-18-347606-1. VDI Verlag, Düsseldorf 2002, ergänzt um interne Berechnungen (CO-Shift, PSA des Synthesegases)
- 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, ISBN 3-18-347606-1. VDI Verlag, Düsseldorf 2002, ergänzt um interne Berechnungen (CO-Shift, PSA des Synthesegases)
- Pimentel 2001/ Pimentel, D. (2001): The Limits of Biomass Utilization. In Encyclopedia of Physical Science and Technology Third Edition. Vol 2: pp. 159-171.
- Pimentel 2003/ Pimentel, D. (2003): Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics and Environmental Impacts are Negative. Natural Resources Research, Vol. 12, No. 2, pp. 127-134.
- Raschka 2002/ Raschka, M. (2002): Methanol als Energieträger in einem nachhaltigen Energiesystem? Fachgebiet Energiesysteme, Veranstaltung „Neue Entwicklung auf den Energiemärkten“ 2002.
- (S&T)² 2003/ (S&T)² 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.
- Schneider 2001/ Schneider, U.A. & McCarl, B.A. (2001): Economic Potential of Biomass Based Fuels for Greenhouse Gas Emission Mitigation
- Sims 1996/ Sims, R. (1996): The Potential for Biodiesel in New Zealand. Proceedings of Conference, Applications of Bioenergy Technologies™ Rotarua, 139 - 148 EECA.
- Sundqvist 2003/ 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 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
- Thuijl 2003/ Thuijl, van E., Roos, C.J. & Beurskens, L.W.M. (2003): An Overview of Biofuel Technologies, Markets and Policies in Europe. 61 S.
- TU Münch. 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. www.umweltdaten.de/luft/ed-2000.pdf; zuletzt geöffnet am 16.02.2004.
- USDA 2002/ Shapouri, H., Duffield, J.A. & Wang, M. (2002) (U.S. Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses) Agricultural (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 (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek), Mol, Belgium. 73 p.
- Wang 1999/ Wang, M., Saricks, C. & Santini D. (1999): Effects of Fuel Ethanol Use on Fuel-Cycle Energy and Greenhouse Gas Emissions. U.S. Department of Energy, Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, Argonne, IL, 1999.

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

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Forschungsaufgabe, die von der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt) gestellt und am Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg unter der Leitung von Herrn Dr. G. A. Reinhardt bearbeitet wurde. Die Arbeit wurde durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen und die Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. finanziell gefördert. Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen dankt Dr. G. A. Reinhardt, Dr. M. Quirin, Dipl.-Phys.-Ing. S. O. Gärtner, Dr. M. Pehnt und Dr. U. Höpfner für die Durchführung des Vorhabens. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Gruden begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die große Unterstützung.