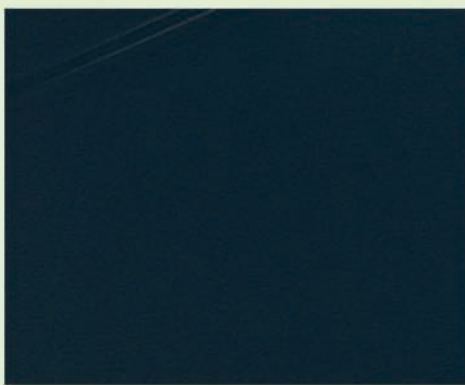


# Kosten und Ökobilanzen von Biokraftstoffen

Eine Studie im Auftrag der UFOP (Langfassung)



**Institut für Energetik und Umwelt**  
gemeinnützige GmbH

**Institute for Energy and  
Environment**



**Langfassung**

## **Kosten und Ökobilanzen von Biokraftstoffen**

Sebastian Brauer

Alexander Vogel

Franziska Müller-Langer

**Auftraggeber:** UFOP  
Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e. V.  
Haus der Land- und Ernährungswirtschaft  
Claire-Waldoffstraße 7  
10117 Berlin

**Auftragnehmer:** Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)  
Torgauer Str. 116  
04347 Leipzig  
Internet: [www.ie-leipzig.de](http://www.ie-leipzig.de)

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Sebastian Brauer  
☎: 03 41 - 24 34 – 420  
✉: [sebastian.brauer@ie-leipzig.de](mailto:sebastian.brauer@ie-leipzig.de)

Dr.-Ing. Alexander Vogel  
☎: 03 41 - 24 34 – 537  
✉: [alexander.vogel@ie-leipzig.de](mailto:alexander.vogel@ie-leipzig.de)

Dipl.-Ing. Franziska Müller-Langer  
☎: 03 41 - 24 34 – 423  
✉: [franziska.mueller-langer@ie-leipzig.de](mailto:franziska.mueller-langer@ie-leipzig.de)



## Inhaltsverzeichnis

<b><u>1</u></b>	<b><u>HINTERGRUND UND ZIELSTELLUNG</u></b> .....	<b>2</b>
<b><u>2</u></b>	<b><u>VORGEHENSWEISE</u></b> .....	<b>4</b>
<b><u>3</u></b>	<b><u>KRAFTSTOFFBEREITSTELLUNGSKOSTEN</u></b> .....	<b>6</b>
<b><u>3.1</u></b>	<b><u>Datengrundlage</u></b> .....	<b>6</b>
<b><u>3.2</u></b>	<b><u>Ergebnisse, Grafik und Diskussion</u></b> .....	<b>7</b>
<b><u>4</u></b>	<b><u>FLÄCHENBEZOGENER KRAFTSTOFFERTRAG</u></b> .....	<b>9</b>
<b><u>4.1</u></b>	<b><u>Datengrundlage</u></b> .....	<b>9</b>
<b><u>4.2</u></b>	<b><u>Ergebnisse, Grafik und Diskussion</u></b> .....	<b>9</b>
<b><u>5</u></b>	<b><u>FLÄCHENBEZOGENER GESAMTENERGIEERTRAG</u></b> .....	<b>11</b>
<b><u>5.1</u></b>	<b><u>Datengrundlage</u></b> .....	<b>11</b>
<b><u>5.2</u></b>	<b><u>Ergebnisse, Grafik und Diskussion</u></b> .....	<b>11</b>
<b><u>6</u></b>	<b><u>ENERGIEBEZOGENE TREIBHAUSGASMINDERUNG</u></b> .....	<b>14</b>
<b><u>6.1</u></b>	<b><u>Datengrundlage</u></b> .....	<b>14</b>
<b><u>6.2</u></b>	<b><u>Ergebnisse, Grafik und Diskussion</u></b> .....	<b>14</b>
<b><u>7</u></b>	<b><u>FLÄCHENBEZOGENE TREIBHAUSGASREDUKTION</u></b> .....	<b>16</b>
<b><u>7.1</u></b>	<b><u>Datengrundlage</u></b> .....	<b>16</b>
<b><u>7.2</u></b>	<b><u>Ergebnisse, Grafik und Diskussion</u></b> .....	<b>16</b>
<b><u>8</u></b>	<b><u>THG-VERMEIDUNGSKOSTEN</u></b> .....	<b>18</b>
<b><u>8.1</u></b>	<b><u>Datengrundlage</u></b> .....	<b>18</b>
<b><u>8.2</u></b>	<b><u>Ergebnisse, Grafik und Diskussion</u></b> .....	<b>18</b>



## **1 Hintergrund und Zielstellung**

Zur Reduktion der Abhängigkeit des heutigen Verkehrssektors von fossilen Ressourcen und zur Treibhausgasminderung wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Pfade zur Kraftstofferzeugung aus Biomasse entwickelt bzw. umgesetzt. So leisten die etablierten Biokraftstoffe wie Pflanzenöl, Biodiesel aus pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten (insbesondere Rapssaaten) oder Ethanol aus Getreide bereits einen erheblichen Beitrag am Markt. Zukünftig wird zusätzlich die verstärkte Erzeugung und Nutzung von synthetischen Biokraftstoffen (BTL und SNG) und Ethanol aus Lignocellulose sowie Biomethan erwartet.

Die als Ergebnisse der umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten heute verfügbaren Studien zeigen erhebliche Bandbreiten der Potenziale, Umweltwirkungen und Kosten von Biokraftstoffen auf und werden deshalb kontrovers diskutiert. Dies erschwert eine objektive Bewertung und damit letztlich die kontinuierliche Weiterentwicklung zielführender Biokraftstoffpfade.

Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend die wesentlichen Verfahren zur Biokraftstoffbereitstellung anhand ausgewählter Kriterien in einer Gesamtschau gegenübergestellt. Die in dieser Studie betrachteten Kraftstoffpfade mit eingehenden Rohstoffen sowie Kraftstoff- und Kuppelprodukten sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

**Tabelle 1 - Betrachtete Bereitstellungspfade**

Kraftstoffpfad	Eingangsstoffe	Konversionsschritte	Haupt- und Kuppelprodukte
		Biomasse → <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Konversion</span> → Kraftstoff	
Pflanzenöl aus Raps	Rapssaat	Reinigung/Zerkleinerung, Heißpressung, Lösemittel-Extraktion, Ölaufbereitung	<b>Rapsöl</b> , Extraktionsschrot
	Rapssaat	Reinigung/Zerkleinerung, Kaltpressung, Ölreinigung	<b>Rapsöl</b> , Presskuchen
Biodiesel (RME) aus Raps	Rapssaat	Pflanzenölbereitstellung (s. o.), katalytische Umesterung mit Methanol	<b>RME</b> , Presskuchen, Rohglycerin
	Rapsöl	katalytische Umesterung mit Methanol	<b>RME</b> , Rohglycerin
Biomethan	Maissilage	Silage-Aufbereitung, anaerobe Vergärung, Gasreinigung	<b>Biomethan</b> , Gärreste
BTL aus Lignocellulose	Holzhackschnitzel (Weide aus KUP)	Biomasse-Aufbereitung, Vergasung, Gasreinigung und -konditionierung, FT-Synthese, Produktaufbereitung	<b>FT-Diesel</b> , <b>Naphtha</b> , Strom
	Stroh-Slurry	Biomasse-Aufbereitung, Vergasung, Gasreinigung und -konditionierung, FT-Synthese, Produktaufbereitung	<b>FT-Diesel</b> , <b>Naphtha</b> , Strom
Ethanol aus Lignocellulose	Stroh (Weizen)	Rohstoff-Aufbereitung, Hydrolyse, Vergärung, Destillation, Rektifikation	<b>Ethanol</b> , Strom, Dünger
Ethanol aus Weizen	Weizenkorn	Rohstoffaufbereitung, Zuckeraufschluss, Vergärung, Destillation, Rektifikation	<b>Ethanol</b> , Schlempe/DDGS
Bio-SNG	Holzhackschnitzel (Weide aus KUP)	Biomasse-Aufbereitung, Vergasung, Methanisierung, Konditionierung	<b>SNG</b> , Strom, Wärme

RME-Rapsmethylester, DDGS-Dried distillers grains with solubles (dt. Trockenschlempe), KUP-Kurzumtriebsanlage, SNG-Synthetic natural gas (synthetisches Erdgas-Substitut)

Die Gesamtschau umfasst Potenziale, Kosten und Umwelteffekte, welche auf Basis einheitlicher bzw. für die Pfade jeweils typischer Rahmenbedingungen erhoben wurden. Damit soll die vorliegende Untersuchung einen Beitrag zur Reduzierung der Bandbreite dieser Kriterien und damit zu einer Versachlichung der Diskussion leisten.



## 2 Vorgehensweise

Es werden zunächst vorliegende Untersuchungen zu den o. g. Kriterien ausgewertet. Ausgehend davon erfolgt eine Überprüfung und ggf. Reduzierung der Bandbreite dieser Referenzstudien; dies geschieht z. B. durch Aussparung offensichtlich nicht repräsentativer Werte oder Aktualisierung von Eingangswerten, wie etwa den Preisen für eingesetzte Rohstoffe (z. B. Rapssaaten, Weizen). Das Ergebnis ist ein begründbar eingeschränktes Spektrum von Literaturwerten.

Zusätzlich werden seitens des Instituts für Energetik und Umwelt gGmbH (IE) zu den einzelnen Kriterien eigene Berechnungen durchgeführt. Dies erfolgt – im Unterschied zur Gesamtheit der ausgewerteten Literaturangaben – anhand einheitlicher Rahmenbedingungen, um eine weitestgehend direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Es werden folgende Annahmen für die entsprechende Konversionsanlage festgelegt:

- 8.000 Volllaststunden pro Jahr,
- für die Kraftstoffbereitstellung typische Anlagenleistungen, z. B. etwa 10 GWh/a für eine landwirtschaftliche Biogasanlage, 100 GWh/a für eine industriell mit Getreide betriebene Biodieselanlage<sup>1</sup>,
- Nutzung anfallender Kuppelprodukte, wie z. B. Rapspresskuchen bei der Biodieselproduktion, nutzbarer Strom bei der BTL-Produktion in energieautarken Konzepten.

Neben den o. g. einheitlichen Rahmenbedingungen sind jedoch auch Eingangsgrößen relevant, für die je nach Anwendungsfall eine typische Größenordnung darzustellen ist. Hierzu zählen:

- unterschiedliche Einsatzstoffe, z. B. Stroh oder Holz für die BTL-Synthese,
- unterschiedliche Verfahrenskonzepte, z. B. Nutzung der bei der Ethanolherzeugung aus Getreide anfallenden Nutzenergie als Prozessenergie (industriell) bzw. zur Strom- und Wärmeeinspeisung (landwirtschaftlich); zentrales und dezentrales Konzept bei der Pflanzenölbereitstellung,

---

<sup>1</sup> Diese Zahlen geben den Energiegehalt der Netto-Kraftstoffherzeugung der betreffenden Anlage pro Jahr an.



- Rohstoffpreis (bei landwirtschaftlicher Einbindung der Lage ist in der Regel der Erzeugerpreis anzusetzen, bei industrieller Einbindung der Großhandelspreis).

Diese Varianten führen bei den Berechnungen zwangsweise zu einer gewissen Bandbreite der Werte. Durch die o. g. Vorgehensweise liegt der ermittelte Wertebereich in der Regel innerhalb der Bandbreite der Referenzliteratur und engt diese somit in geeigneter Weise ein. In Einzelfällen kommt es auch zu Abweichungen, diese sind an der entsprechenden Stelle näher erläutert.





### 3 Kraftstoffbereitstellungskosten

Nachfolgend werden die spezifischen Biokraftstoffbereitstellungskosten frei Produktionsanlage betrachtet. Die auf den Liter Kraftstoffäquivalent bezogenen Bereitstellungskosten sind die Kosten, die entstehen würden, um die Menge des Biokraftstoffs bereitzustellen, welche die gleiche Energiemenge enthält wie ein Liter des äquivalenten konventionellen Kraftstoffs (d. h. Diesel und Benzin). Die Zuordnung sowie die benutzten Heizwerte sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 2 - Biokraftstoffe mit zugeordneten äquivalenten Kraftstoffen und Heizwerten (nach /2/)**

<b><i>Biokraftstoff</i></b>			
Biodiesel	32,65 MJ/l	Bio-Ethanol	21,17 MJ/l
Rapsöl	34,59 MJ/l	Biomethan (SNG)	36,00 MJ/m <sub>3</sub>
BTL (FT-Diesel)	33,45 MJ/l		
<b><i>Zugeordneter äquivalenter Kraftstoff</i></b>			
Diesel	35,87 MJ/l	Benzin	32,45 MJ/l

Bei den unterschiedlichen Biokraftstoffproduktionskonzepten anfallende Kuppelprodukte (z. B. Rapspresskuchen, Rohglycerin, Strom, Naphtha) werden bei der Ermittlung der Bereitstellungskosten anhand aktueller Marktpreise mit berücksichtigt.

#### 3.1 Datengrundlage

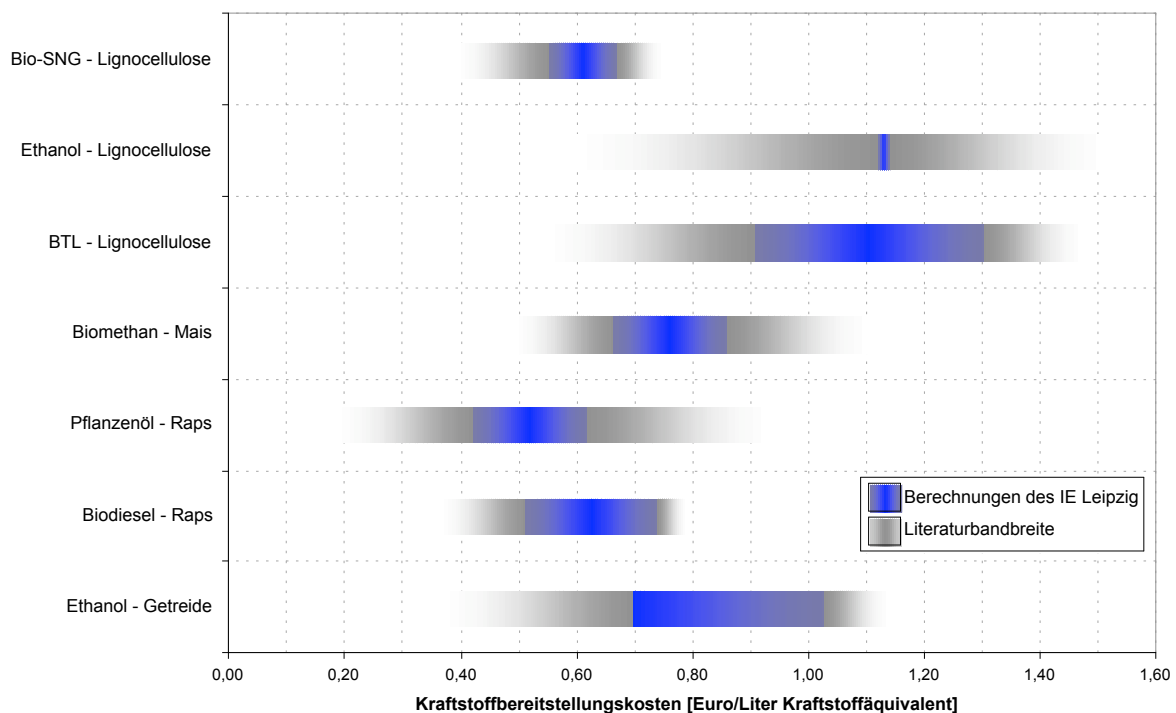
Es werden verschiedene die Thematik beinhaltende Studien /7/, /13/ ausgewertet. Ein Teil der genannten Studien /7/ hat die Auswertung weiterer Quellen zum Inhalt. Dabei werden Daten mit sehr hoch bzw. niedrig angenommene Rohstoffkosten bzw. Konversionskosten nicht weiter betrachtet und Abweichungen durch Nichtberücksichtigung der Kuppelprodukte sowie der Kraftstoffverteilung korrigiert. Dadurch kann eine reduzierte Bandbreite bestimmt werden, welche für die vorliegende Arbeit Berücksichtigung findet.

Seitens des IE werden für die betrachteten Biokraftstoffe eigene Berechnungen durchgeführt. Die erhaltenen Werte sind aufgrund der o. g. einheitlichen Rahmenbedingungen miteinander vergleichbar. Einige Eingangsparameter können jedoch von Verfahren zu Verfahren variiert werden: So kann beispielsweise bei der Rohstoffbeschaffung für die Biodieselproduktion Rapsöl oder Rapssaat importiert werden, bei der Biogasherstellung ist das Maissilage-Gülle-

Verhältnis variabel, und für BTL-Verfahren kann Wald(rest)holz oder Kurzumtriebsholz verwendet werden. Zum anderen ist die Verwendung prinzipiell unterschiedlicher Verfahrenskonzepte möglich; so kann exemplarisch die Pflanzenölbereitstellung zentral oder dezentral organisiert werden oder die Prozessenergieversorgung für die Ethanolgewinnung über das konventionelle Energienetz bzw. über eine KWK-Anlage erfolgen. Im Falle von Bio-SNG liegen beispielsweise Daten über verschiedene Anlagentechniken (z. B. Gasreinigungsverfahren) vor, die sich bezüglich der tatsächlich verursachten Kosten unterscheiden. Diese beschriebenen Varianten wurden wissenschaftlich analysiert, in den Berechnungen berücksichtigt und resultieren in der Bandbreite der berechneten Werte des IE.

### 3.2 Ergebnisse, Grafik und Diskussion

Ausgehend von der beschriebenen Datengrundlage sind in Abb. 1 die Kraftstoff-Bereitstellungskosten abgebildet. Die grau skizzierte Bandbreite gibt dabei die ausgewerteten Literaturwerte wieder, der vom IE berechnete Wertebereich ist blau dargestellt.



**Abb. 1 – Kraftstoffbereitstellungskosten frei Biokraftstoffproduktionsanlage**

Es ist festzustellen, dass Biokraftstoffe der zweiten Generation (d. h. synthetische Biokraftstoffe wie BTL und Bio-SNG sowie Bioethanol aus Lignocellulose) im Schnitt deutlich höhere Kosten aufweisen als Kraftstoffe der ersten Generation (d. h. Pflanzenöl und



Biodiesel sowie Bioethanol aus Weizen). Für das BTL-Verfahren ist dabei eine große Bandbreite der Berechnungen festzustellen. Diese liegt darin begründet, dass das neue, bisher nicht vollständig demonstrierte und sehr komplexe Verfahren mit vielen technischen Varianten, vor allem aber technisch-ökonomischen Unsicherheiten behaftet sind. Für die Ethanolbereitstellung aus Lignocellulose und das Bio-SNG-Verfahren liegen bisher wenige untersuchte Konzepte und Varianten vor, so dass hier nur auf wenige abgesicherte Daten zurückgegriffen werden kann und sich somit eine geringe Bandbreite ergibt.

Im Ergebnis der Bewertung der Kraftstoffkosten wird sich an den Mittelwerten der berechneten Bandbreiten orientiert.



## 4 Flächenbezogener Kraftstofftrag

Der flächenbezogene Kraftstofftrag ist die maximal erzeugbare Energiemenge des Kraftstoffs, wenn die auf einem Hektar Anbaufläche gewinnbaren Ausgangsprodukte über den jeweils betrachteten Pfad konvertiert werden. Als Besonderheit des BTL-Verfahrens wird das Kuppelprodukt Naphtha ebenfalls als Kraftstoff betrachtet, wenngleich diese Option gegenüber der stofflichen Nutzung aus technisch-ökonomischen Gesichtspunkten als sinnvoll nachzuweisen ist. Weitere energetisch nutzbare Kuppelprodukte, wie Strom oder Wärme, bleiben hier unberücksichtigt und werden erst im Kapitel 5 in die Bilanzierung eingeschlossen.

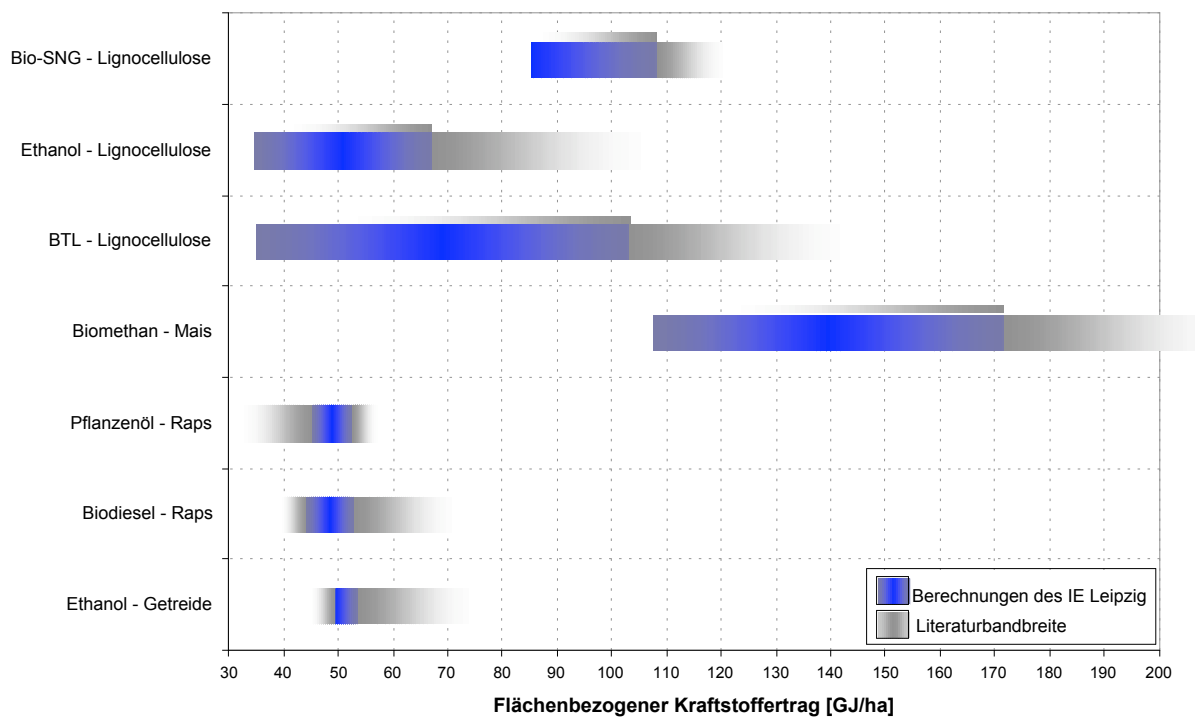
### 4.1 Datengrundlage

Zur Bestimmung der Literaturbandbreite werden verschiedene Quellen, darunter die von der UFOP zur Verfügung gestellten BEE-Werte /1/ (reiner Kraftstofftrag, d. h. ohne energetische Nutzung der Kuppelprodukte) sowie /5/, /6/, /9/, genutzt.

Den Berechnungen des IE liegen die durchschnittlichen Hektarerträge der Ausgangsprodukte (Raps, Körner- bzw. Silomais, Getreide, Getreidestroh /10/ sowie Holz aus Kurzumtriebsplantagen /12/) und die Konversionsgrade bestehender Biokraftstoff-Bereitstellungsanlagen zugrunde. Letztere variieren je nach Kontext der Anlage (z. B. landwirtschaftliche bzw. industrielle Nutzung), der Anlagengröße und dem eingesetztem Rohstoff (u. a. Zusammensetzung des Maissilage-Biogassubstrats, Weizen oder Triticale zur Ethanolproduktion). Daraus resultiert die Bandbreite der IE-Werte.

### 4.2 Ergebnisse, Grafik und Diskussion

Aus der beschriebenen Datengrundlage abgeleitet sind in Abb. 2 die flächenbezogenen Erträge der betrachteten Biokraftstoffe abgebildet. Die grau dargestellte Bandbreite gibt dabei die ausgewerteten Literaturwerte wieder, der vom IE berechnete Wertebereich ist blau dargestellt.



**Abb. 2 - Flächenbezogener Kraftstofffertrag**

Die vom IE berechneten Werte können die betrachteten Literaturwerte der etablierten Kraftstoffe bestätigen und eingrenzen. Für die Kraftstoffe der zweiten Generation liegen sie teils deutlich unter den Literaturwerten. Ursache dafür ist, dass die für die Rechnung erforderlichen Hektarerträge je nach Saison und regionaler Lage stark schwanken können. Um möglichst allgemeingültig zutreffende Werte zu erhalten, werden für die Berechnungen des IE Ertragszahlen genutzt, die nach den Literaturangaben in langjährigen Jahresmitteln sicher erreicht werden können. Konversionsanlagen mit optimalem Standort werden aufgrund höherer lokaler Erträge die errechneten Werte überschreiten.



## 5 Flächenbezogener Gesamtenergieertrag

Bestimmt wird die maximal erzeugbare Energiemenge des Kraftstoffes, wenn die auf einem Hektar Anbaufläche gewinnbaren Ausgangsprodukte über den jeweils betrachteten Pfad konvertiert werden. Dabei werden auch energetisch nutzbare Kuppelprodukte berücksichtigt. Stofflich nutzbare Kuppelprodukte werden zusätzlich angegeben.

### 5.1 Datengrundlage

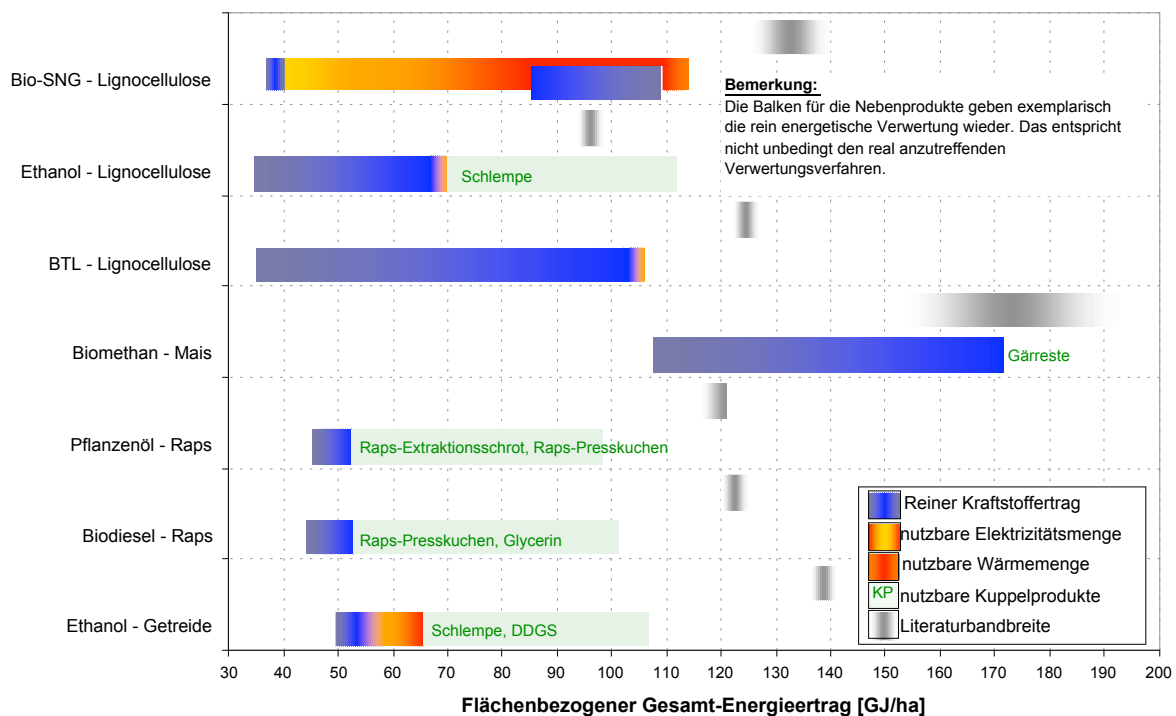
Der Gesamtenergieertrag setzt sich zusammen aus:

- dem in Punkt 4 bestimmten Kraftstofftrag,
- bei der Kraftstoffherzeugung anfallenden energetisch nutzbaren Kuppelprodukten, und
- bei der Kraftstoffherzeugung bereitgestellter Wärme bzw. Elektrizität.

Als Literaturquellen werden die BEE-Werte /1/, hier mit Berücksichtigung der Kuppelprodukte, sowie /5/ für Bio-SNG eingesetzt.

### 5.2 Ergebnisse, Grafik und Diskussion

In Abb. 3 dargestellt ist die vom IE bestimmte Bandbreite für den reinen Kraftstofftrag (blau), beim Prozess auskoppelbare Strommengen (gelb) und Wärmemengen (rot) sowie eventuell bei der Konversion anfallende, nutzbare Kuppelprodukte (grün). Letztere werden – aufgrund des hier geführten flächenbezogenen Effizienzvergleiches – nur exemplarisch über ihren Heizwert quantifiziert, es erfolgt zusätzlich eine Benennung im Diagramm. Die Gründe für diese Vorgehensweise werden nachfolgend erläutert. Das Spektrum der ausgewerteten Literatur ist in der Grafik wiederum grau skizziert.



**Abb. 3 - Flächenbezogener Gesamt-Energieertrag**

Die berechneten Werte stellen eine interessante Zusatzaussage zum flächenbezogenen Kraftstoff'ertrag dar, da bestimmte Konzepte aus technisch-ökonomischer Sicht z. T. erheblich von ihren Kuppelprodukten geprägt sind. Ein Vergleich verschiedener Endenergien wie Wärme, Strom und Kraftstoff ist jedoch immer sehr kritisch zu bewerten. So ist elektrische Energie aus exergetischer Sicht deutlich höher zu bewerten als ausgekoppelte Wärmeenergie. Eine einfache Addition, wie sie in Abb. 3 vorgenommen wird, führt somit zu einer Überbewertung von Verfahren mit exergetisch minderwertigen Energieformen.

Je nach Standortbedingung kann jedoch eine erhöhte Strom- und Wärmeauskopplung – die bei BTL- und SNG-Anlagen zu Lasten des Kraftstoff'ertrages geht (siehe Abb. 3) – aus Sicht der Brennstoffausnutzung sinnvoll sein. Daher wurde der Energieertrag sowohl für die reine Kraftstoff'erzeugung als auch für die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom berechnet. Für die kombinierte Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoff (in so genannten Polygenerationsanlagen) ergibt sich damit eine deutlich niedrigere bereitgestellte Kraftstoff'menge, gleichzeitig steigt die Brennstoffausnutzung.

Für die neben Strom und Wärme anfallenden Kuppelprodukte ist eine Zuordnung eines Energieertrages noch schwieriger. Das liegt zum einen darin begründet, dass die Kuppelprodukte unterschiedlich verwendet werden können, einige Beispiele sind in Tabelle 3 zusammengestellt:


**Tabelle 3 - Verwertungsmöglichkeiten von Kuppelprodukten bei der Biokraftstoffbereitstellung**

<i><b>Kuppelprodukt</b></i>	<i><b>Verwendungsmöglichkeiten</b></i>
Raps-Extraktionsschrot	Verbrennung, Tierfutter
Raps-Presskuchen	Verbrennung, Tierfutter
Schlempe	Verbrennung, Biogassubstrat, Düngemittel
Glycerin	energetische Verwertung, Chemieindustrie
Gärreste	Düngemittel, Nachvergärung, energetische Verwertung

Des Weiteren können die Kuppelprodukte auf verschiedene Arten allokiert bzw. gutgeschrieben werden. So können neben der rein energetischen Verwertung (quantifizierbar über den Heizwert des Kuppelproduktes) auch die Einsparungen betrachtet werden, die durch eine alternative Verwendung entstehen. Möglich ist dabei die energetische (Herstellungsprozess des Alternativproduktes) oder die monetäre Betrachtungsweise (Beschaffungskosten des Alternativproduktes). Je nach durchgeführter Bewertungsmethode ergeben sich Energiewerte für die Kuppelprodukte, die sich signifikant unterscheiden können. Um einen Vergleich der ermittelten IE-Daten mit der BEE-Referenz (im Diagramm grau skizziert) durchführen zu können, ist deshalb die Kenntnis der verwendeten Bewertungsmethoden vonnöten. Diese geht nicht aus den vorliegenden Daten hervor. Für weitere Betrachtungen ist daher die Festlegung einheitlicher Kriterien zur energetischen Bewertung von elektrischem Strom, Wärme und anfallenden Kuppelprodukten als sinnvolles Ziel zu formulieren. Exemplarisch werden im Diagramm Kuppelprodukte über ihren Heizwert (vgl. Tabelle 4) quantifiziert. Das entspricht nicht unbedingt den real anzutreffenden Verwertungswegen, so wird z. B. Glycerin eher als chemischer Grundstoff denn als Brennstoff verwertet werden.

**Tabelle 4 - Für die Quantifizierung der Kuppelprodukte verwendete Heizwerte**

<i><b>Kuppelprodukt</b></i>	<i><b>Verwendeter Heizwert</b></i>
Raps-Extraktionsschrot	18,40 MJ/kg
Raps-Presskuchen	20,25 MJ/kg
Schlempe	19,00 MJ/kg
Glycerin	18,00 MJ/kg
Gärreste	kaum bestimmbar, stark abhängig von Wassergehalt





## 6 Energiebezogene Treibhausgaseinsparung

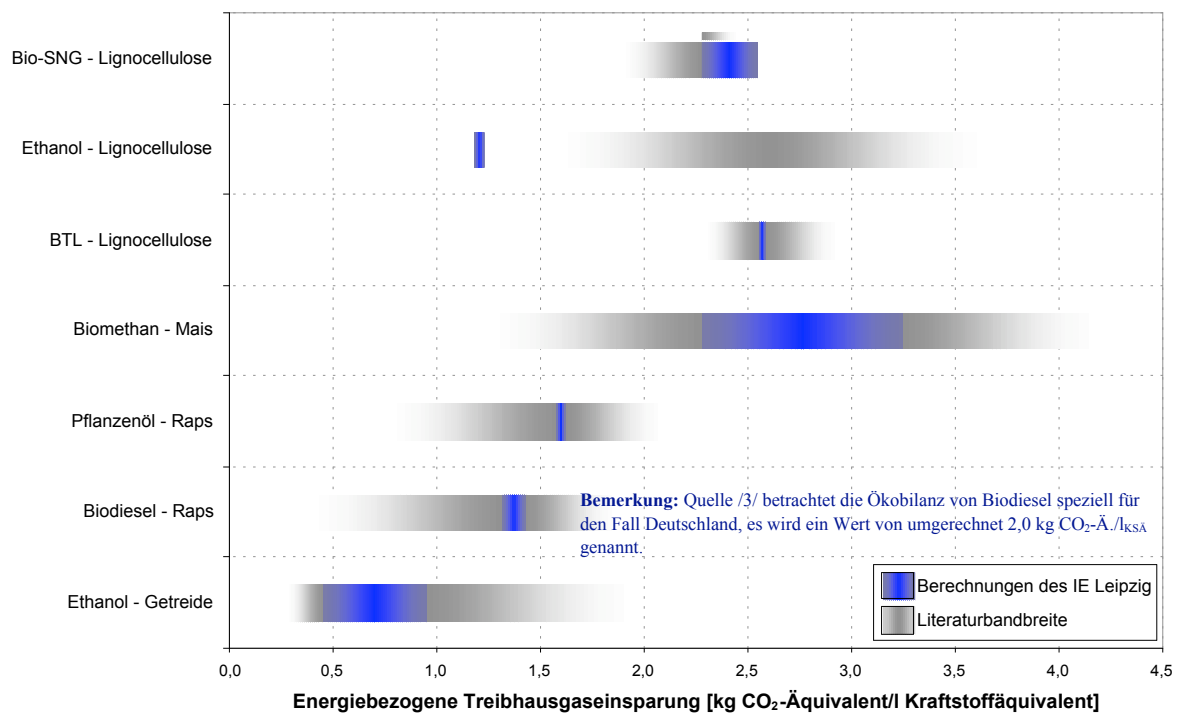
Ermittelt werden die eingesparten Treibhausgasemissionen, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (-im Wesentlichen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), das bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entsteht, ferner u. a. Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O), die über sog. Äquivalenzfaktoren Berücksichtigung finden), im Vergleich zum äquivalenten fossilen Kraftstoff (vgl. Tabelle 2). Als Bezug dient der Energiegehalt eines Liters des Äquivalentkraftstoffs. Die Zuordnung erfolgt wie bei den Kraftstoffbereitstellungskosten. Kuppelprodukte werden mit berücksichtigt.

### 6.1 Datengrundlage

Seitens des IE werden Angaben zur Minderung von Treibhausgasen bei der Verwendung von Biokraftstoffen berechnet, zur Verwendung kommt die Methodik der Ökobilanzierung. Von Relevanz sind ökologische Auswirkungen, welche auf die Bereitstellung des biogenen Energieträgers zurückzuführen sind. Bei der Verbrennung ist zu beachten, dass CO<sub>2</sub>-Emissionen der biogenen Energieträger im Gegensatz zum fossilen Äquivalentkraftstoff gleich Null gesetzt werden, da diese Menge während des Wachstums der Pflanze aus der Atmosphäre gebunden wurde. CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche aus dem Anbau, der Pflege, der Weiterverarbeitung oder der Konversion herrühren, werden dagegen berücksichtigt. Die errechneten Bandbreiten resultieren aus den verschiedenen Varianten der Kraftstoffnutzung. Als Referenzliteratur werden verschiedene Studien und Vorträge /3/, /7/, /8/, /9/ genutzt.

### 6.2 Ergebnisse, Grafik und Diskussion

Aus der beschriebenen Datengrundlage abgeleitet sind in Abb. 4 die energiebezogenen Treibhausgas-Einsparungen der betrachteten Biokraftstoffe abgebildet. Die grau dargestellte Bandbreite gibt dabei die ausgewerteten Literaturwerte wieder, der vom IE berechnete Wertebereich ist blau dargestellt.



**Abb. 4 - Energiebezogene Treibhausgaseinsparung**

Die Bandbreite der Referenzliteratur kann durch die vom IE berechneten Werte für fast alle betrachteten Biokraftstoffe sinnvoll eingeschränkt werden. Eine Ausnahme bildet die Ethanolbereitstellung aus Lignocellulose (Stroh). Die Ursache für diese Abweichung ist darin zu sehen, dass die ausgewertete Literatur bei Biokraftstoffen aus Reststoffen einen eventuellen Alternativnutzen dieser Reststoffe unberücksichtigt lässt. Tatsächlich kann Stroh zur Düngung und zur Bodenverbesserung verwendet werden. Wird es dagegen der Kraftstoffbereitstellung zugeführt, sind zur Kompensation Zusatzaufwendungen, z. B. die Herstellung von Mineraldünger, notwendig. Diese Kompensationsmaßnahmen werden in den IE-Berechnungen für Ethanol aus Stroh mit berücksichtigt, deshalb liegen der berechnete Wert deutlich unterhalb der in den betrachteten Studien genannten Zahlen. Auf BTL-Kraftstoff und Bio-SNG hat der beschriebene Sachverhalt keinen Einfluss, da hier lediglich Kurzumtriebsholz als Eingangsstoff betrachtet wird und hier kein entsprechender landwirtschaftlich relevanter Alternativnutzen besteht.



## 7 Flächenbezogene Treibhausgasreduktion

Bestimmt werden die eingesparten Treibhausgasemissionen, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Als Bezugsgröße dient dabei ein Hektar Anbaufläche für den relevanten Ausgangsstoff.

### 7.1 Datengrundlage

Es stehen die von der UFOP bereitgestellten BEE-Daten /1/ und weitere Literaturreferenzen /7/ zur Verfügung.

Die verwendeten IE-Zahlen berechnen sich aus den schon oben ermittelten Werten für die energiebezogenen Treibhauseinsparungen und den flächenbezogenen Kraftstofftrag.

Es gilt:

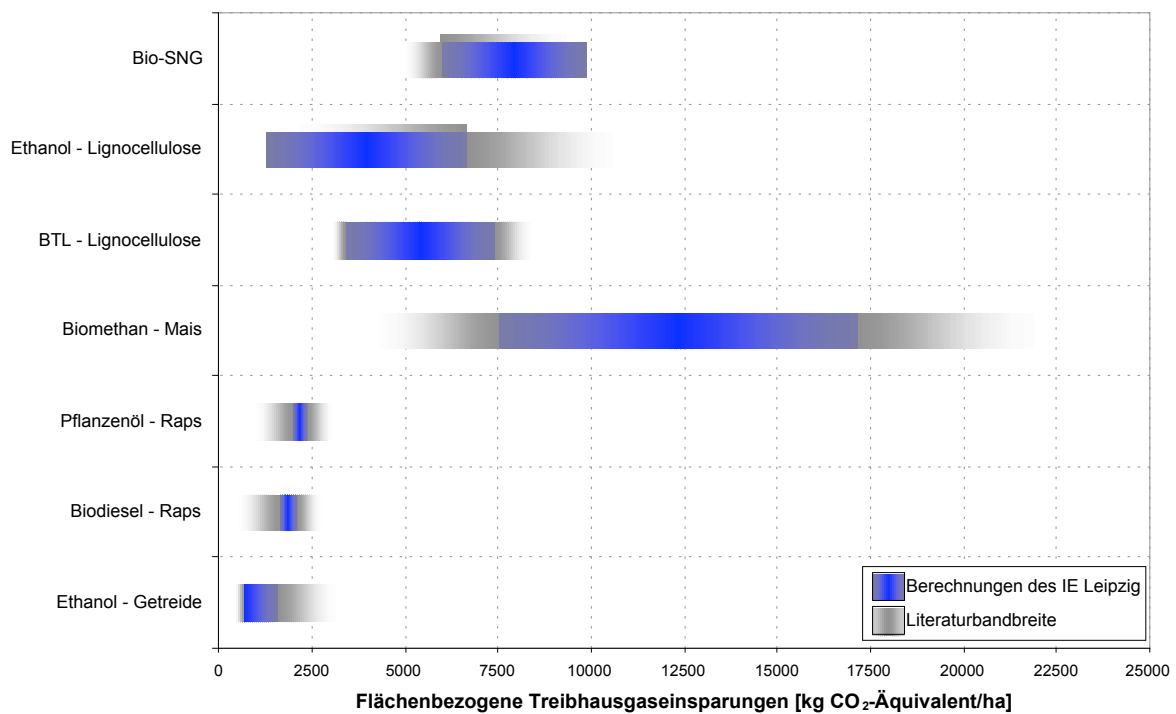
$$\frac{THGR_{Liter} \left[ \frac{kg_{CO_2}}{l_{KS\bar{A}}} \right]}{H_{U,KS\bar{A}} \left[ \frac{GJ}{l_{KS\bar{A}}} \right]} \cdot HA \left[ \frac{GJ}{ha} \right] = THGR_{ha} \left[ \frac{kg_{CO_2}}{ha} \right] \quad (1)$$

THGR <sub>Liter</sub>	energiebezogene Treibhausgaseinsparungen
H <sub>U,KS<math>\bar{A}</math></sub>	Heizwert des äquivalenten Kraftstoffs
HA	flächenbezogener Kraftstofftrag
THGR <sub>ha</sub>	flächenbezogene Treibhausgaseinsparungen

Die Bandbreiten der bereits bestimmten Eingangswerte finden Eingang in die o. g. Gleichung, daraus ergibt sich die Bandbreite für die flächenbezogenen Treibhausgaseinsparungen.

### 7.2 Ergebnisse, Grafik und Diskussion

Aus der beschriebenen Datengrundlage abgeleitet sind in Abb. 5 die flächenbezogenen Treibhausgasreduktion für die betrachteten Biokraftstoffe abgebildet. Die grau dargestellte Bandbreite gibt dabei die ausgewerteten Literaturwerte wieder, der vom IE berechnete Wertebereich ist blau dargestellt.



**Abb. 5 - Flächenbezogene Treibhausgaseinsparungen**

Die vom IE bestimmten Werte können die in der ausgewerteten Literatur genannten Zahlen für fast alle betrachteten Biokraftstoffe sinnvoll einschränken. Lediglich bei Ethanol aus Lignocellulose und Bio-SNG kommt es zu Abweichungen. Hier sei auf die Hintergründe zu den energiebezogenen Treibhausgaseinsparungen und den Kraftstofftertrag verwiesen.



## 8 THG-Vermeidungskosten

Die THG-Vermeidungskosten stellen einen Vergleich der Kosten und der Treibhausgasemissionen von zwei unterschiedlichen Biokraftstoff-Bereitstellungspfaden (hier: Anlagen zur Bereitstellung des Biokraftstoffs bzw. des äquivalenten fossilen Kraftstoffs) dar. Sie können somit als Kosten interpretiert werden, die aufgebracht werden müssen, um eine Einheit Treibhausgasemissionen, gemessen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, zu vermeiden.

### 8.1 Datengrundlage

Literaturwerte liefert die bereits genannte Quelle /7/, wiederum mit einer angepassten Bandbreite, ergänzt bezüglich Bio-SNG-Anlagen durch /9/.

Seitens des IE werden eigene Berechnungen, ausgehend von den bereits oben bestimmten Bereitstellungskosten und Treibhausgasreduktionen, durchgeführt. Die THG-Vermeidungskosten berechnen sich daraus wie folgt, jeweils für einen betrachteten Biokraftstoff:

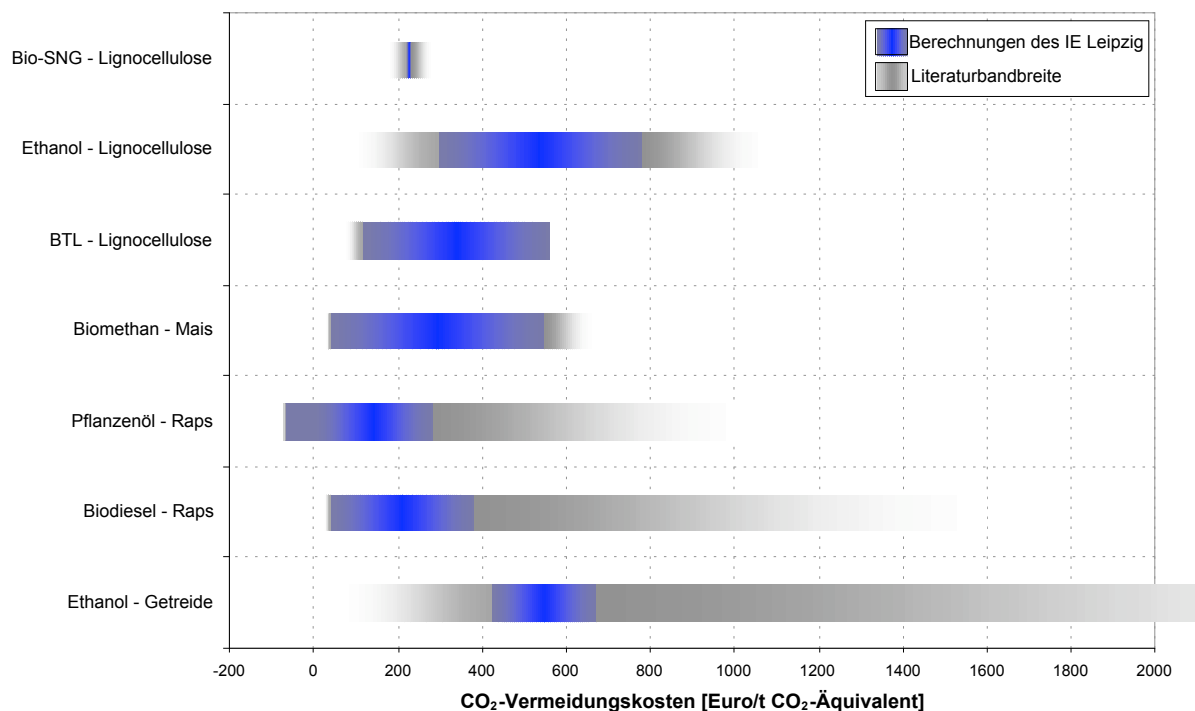
$$\frac{BK \left[ \frac{\text{€}}{l_{KS\ddot{A}}} \right] - BK_{KS\ddot{A}} \left[ \frac{\text{€}}{l_{KS\ddot{A}}} \right]}{THGR_{Liter} \left[ \frac{kg_{CO_2}}{l_{KS\ddot{A}}} \right]} = VK \left[ \frac{\text{€}}{kg_{CO_2}} \right] \quad (2)$$

BK	Bereitstellungskosten Biokraftstoff
BK <sub>KS<math>\ddot{A}</math></sub>	Bereitstellungskosten des äquivalenten Kraftstoffs
THGR <sub>Liter</sub>	flächenbezogene Treibhausgaseinsparung
VK	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten

Das Spektrum der bereits bestimmten Eingangswerte findet Eingang in die o. g. Gleichung, daraus ergibt sich die Bandbreite für die THG-Vermeidungskosten.

### 8.2 Ergebnisse, Grafik und Diskussion

Ausgehend von obiger Rechnung sind in Abb. 6 die THG-Vermeidungskosten für die betrachteten Biokraftstoffe zusammengestellt. Die grau gezeichnete Bandbreite gibt dabei die ausgewerteten Literaturwerte wieder, der vom IE berechnete Wertebereich ist blau skizziert.



**Abb. 6 - THG-Vermeidungskosten**

Die vom IE berechneten Werte können die Bandbreite der ausgewerteten Literatur sinnvoll eingrenzen. Für BTL und Biomethan sind die abgedeckten Bereiche fast identisch, für die restlichen Kraftstoffe geben die Werte des IE den unteren Kostenbereich der Referenzliteratur wieder. Rapsöl weist bei Betrachtung günstiger Rahmenbedingungen (niedrige Bereitstellungskosten, hohe flächenbezogene Treibhausgasreduktionen) negative CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten auf. Es kann sich also neben der Reduktion von Treibhausgas-Emissionen zusätzlich ein wirtschaftlicher Vorteil bei der Bereitstellung von Rapsöl an Stelle fossilen Diesels ergeben.

Als Ursache für die enorm große Literaturbandbreite (vor allem bei Ethanol aus Getreide) kann der Umstand genannt werden, dass die dargestellten Kosten eine Art „Momentaufnahme“ darstellen /7/. Sie sind stark abhängig von Personal- und Transportkosten und schwankenden Rohstoffpreisen. Den verwendeten Studien liegen die Daten von verschiedenen Zeitpunkten und Standorten zugrunde, die IE-Berechnung fußt auf deutschlandsspezifischen Annahmen zum aktuellen Zeitpunkt (2007).



## Literaturverzeichnis

- /1/ Bundesverband Erneuerbare Energie e. V. BEE: „Vergleich der Umweltbilanzen der Biokraftstoffe der ersten und zweiten Generation“. [http://www.bee-ev.de/uploads/Umweltbilanzen\\_Biokraftstoffe\\_Vergleich\\_BEE.pdf](http://www.bee-ev.de/uploads/Umweltbilanzen_Biokraftstoffe_Vergleich_BEE.pdf), Zugriff: Juni 2007.
- /2/ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. FNR: „Basisdaten Biokraftstoffe“. Flyer, Stand August 2005.
- /3/ Gärtner, S.; Reinhardt, G.: „Erweiterung der Ökobilanz von RME“. Ifeu-Gutachten im Auftrag der UFOP. Heidelberg, 2003.
- /4/ Hofbauer, Prof.-Dr. H.: „Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, SNG und flüssige Kraftstoffe“. Ein Projekt der „Energiesysteme der Zukunft“ (Projekt-Nummer 807763 ). Vortrag, undatiert.
- /5/ Krewitt, W.: „Biomasse-Kraftstoffe im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen - Einordnung in eine Biomassestrategie“. DLR Stuttgart. Vortrag zum FVS-Workshop Biomasse. Garching. Juni 2006.
- /6/ KTBL-Datensammlung „Energiepflanzen“. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Darmstadt, 2006.
- /7/ Quirin, Dr. M. et al.: „CO<sub>2</sub>-Studie – CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe – eine Bestandsaufnahme“. Ifeu GmbH, FVV e. V., UFOP e. V., FAT e. V. Frankfurt am Main, 2004.
- /8/ Schmitz, Dr. N.: Vorstellung der Ergebnisse der Studie „Innovationen bei der Bioethanolerzeugung“. Kongress „Bioethanol als Kraftstoff“. Bonn. Mai 2005.
- /9/ Specht, M.; Zuberbühler, U.; Bandi, A.: „Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Potentiale, Herstellung, Perspektiven“. Nova Acta Leopoldina NF 91, Nr. 339, S. 239 – 263. 2004
- /10/ Stock, H.; Diepenbrock, W.: „Agronomische Artenpässe landwirtschaftlicher Nutzpflanzen – Bedeutung und Anbauverfahren wichtiger landwirtschaftlicher Fruchtarten in Kurzfassung“. Shaker Verlag. Aachen. 1999.
- /11/ Stucki, S. et al.: „Treibstoff der Zukunft: Methan aus Holz – ein Projekt mit zwei KMU“. Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI; CTU Conzepte Technik Umwelt AG, Winterthur. Vortrag zum 7. Thurgauer Technologietag. Thurgau. Dezember 2006.
- /12/ TU Dresden, Professur für Forst- und Holzwirtschaft Osteuropas: „Anbau, Ernte und Verwertung schnellwachsender Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen“. <http://www.agrowood.de>, Zugriff: Juni 2007.
- /13/ Van Thuijl et al.: “An overview of biofuel technologies, markets and policies in Europe”. ECN-C-03-008. Januar 2003.



**Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)**  
Torgauer Straße 116  
04347 Leipzig  
[info@ie-leipzig.de](mailto:info@ie-leipzig.de)



**UNION ZUR FÖRDERUNG  
VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E. V.**  
Claire-Waldoff-Straße 7 • 10117 Berlin  
[info@ufop.de](mailto:info@ufop.de) • [www.ufop.de](http://www.ufop.de)

Stand: 2007