

**Institut für Energetik und Umwelt**  
gemeinnützige GmbH

**Institute for Energy and Environment**



**Endbericht des IE in Zusammenarbeit mit KWS**

**Energie- und Klimaeffizienz ausgewählter Biomassekon-  
versionspfade zur Kraftstoffproduktion**

Geschäftsführer:  
Prof. Dr. Martin Kaltschmitt  
Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 8071  
Sitz und Gerichtsstand Leipzig

Deutsche Kreditbank AG  
(BLZ 120 30 000)  
Konto-Nr.: 1364280

Stadt- und Kreissparkasse Leipzig  
(BLZ 860 555 92)  
Konto Nr.: 1100564876      Zert.-Nr. 1210010564/1





**Auftraggeber:** KWS Saat AG  
Grimsehlstr. 31  
37555 Einbeck

**Auftragnehmer:** Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)  
Torgauer Str. 116  
04347 Leipzig  
☎: +49 (0) 341 / 24 34 - 112  
✉: [info@ie-leipzig.de](mailto:info@ie-leipzig.de)

**Ansprechpartner:** Dr.-Ing. Frank Scholwin  
☎: 03 41 - 24 34 – 438  
✉: [Frank.Scholwin@ie-leipzig.de](mailto:Frank.Scholwin@ie-leipzig.de)

**Bearbeiter:**  
  
Jaqueline Daniel  
Gerd Schröder  
Stefan Majer  
Franziska Müller-Langer

Leipzig, 18. April 2008



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Hintergrund und Zielstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau und Vorgehensweise.....</b>	<b>1</b>
2.1	Aufbau der Studie .....	1
2.2	Methodik der ökologischen Bewertung.....	2
<b>3</b>	<b>Ausgewählte Biokraftstoffpfade – Status quo .....</b>	<b>4</b>
3.1	Gasförmige Biokraftstoffe.....	6
3.1.1	Biomethan aus Biogas .....	6
3.1.2	Biomethan aus Bio-SNG .....	7
3.2	Flüssige Biokraftstoffe .....	8
3.2.1	Biodiesel .....	8
3.2.2	Bioethanol.....	8
3.2.3	BtL-Kraftstoffe .....	10
<b>4</b>	<b>Festlegung der betrachteten Kraftstoffpfade und Fruchtarten.....</b>	<b>11</b>
4.1	Anbau nachwachsender Rohstoffe .....	14
4.2	Bereitstellung der nachwachsenden Rohstoffe.....	14
4.3	Betrieb der Konversionsanlagen.....	15
4.4	Nebenprodukte und Rückstände.....	15
4.5	Transport/ Logistik .....	16
<b>5</b>	<b>Ergebnisvergleich ausgewählter Biokraftstoffpfade .....</b>	<b>17</b>
5.1	Energiebilanz.....	17
5.1.1	Flächenbezogener Kraftstoffenergieertrag .....	17
5.1.2	Kumulierter Energieaufwand (fossil) .....	21
5.2	Klimabilanz .....	23
5.2.1	Anbau der Energiepflanzen im Vergleich .....	24
5.2.2	Treibhausgasemissionen der ausgewählten Biokraftstoffpfade.....	25
5.2.3	Einordnung der Ergebnisse im Studienvergleich .....	29
5.2.4	Exkurs: THG-Emissionen für Beimischungen von Biokraftstoffen.....	31
5.3	Effekte für die Landwirtschaft.....	32
<b>6</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>35</b>



---

<b>Anhang .....</b>	<b>37</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>45</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>46</b>
<b>Anhang-Verzeichnis .....</b>	<b>47</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>48</b>



## **1 Hintergrund und Zielstellung**

Die Erhöhung des Anteils regenerativer Energien im Energiesystem ist ein zentrales Anliegen der Bundesregierung. Dabei nimmt die Nutzung der Biomasse einen sehr hohen Stellenwert ein. Da der Verkehrssektor zu einem der wesentlichen Klimagasemittenten gehört und somit zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt, wurden Mindestziele festgelegt, um in den EU-Mitgliedsstaaten und in Deutschland den Anteil an Biokraftstoffen am Gesamtkraftstoffmarkt zu steigern. So liegen die nationalen Zielvorgaben für den Biokraftstoffanteil für Deutschland bei 6,75 % bis zum Jahr 2010 und bei 17 % bis zum Jahr 2020 [1]. Zur Erreichung dieser Ziele sind derzeit eine Vielzahl von Kraftstoffen als Alternative zu den konventionellen Otto- und Dieselmotorkraftstoffen in der Diskussion, von denen man annimmt, dass ihre Nutzung im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen geringere Klimagasemissionen zur Folge hat. Aber auch bei der Vielzahl von Biokraftstoffen sind Unterschiede hinsichtlich der Energie-, Klima- und Flächeneffizienz erkennbar. Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieser Untersuchung, ausgewählte Biokraftstoffe im Hinblick auf ihre Energie- und Klimaeffizienz vergleichend zu bewerten. Neben den gegenwärtig verfügbaren, werden auch zukünftige Technologien – nach dem aktuellen Stand des Wissens – zur Kraftstoffproduktion auf Basis verschiedener Anbaubiomassen betrachtet.

## **2 Aufbau und Vorgehensweise**

### **2.1 Aufbau der Studie**

Die ausgewählten Optionen zur Herstellung gasförmiger und flüssiger Kraftstoffe auf der Basis von Anbaubiomasse werden im Hinblick auf folgende Hauptaspekte bewertet:

1. Energieeffizienz (flächenbezogener Kraftstoffenergieertrag, KEA)
2. Klimaeffizienz (CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen)
3. Effekte für die Landwirtschaft

Zuerst werden im Kap. 3 die betrachteten Biokraftstoffe einschließlich der möglichen Konversionsketten zur Kraftstoffproduktion sowie der gegenwärtige Nutzungsstand im Überblick dargestellt. Anschließend erfolgt im Kap. 4 die Festlegung der betrachteten



Kraftstoffpfade und Anbaukulturen, die im Rahmen der ökologischen Bewertung untersucht werden. Für die ökologische Bewertung der hier betrachteten Biokraftstoffpfade wird die Methodik der Ökobilanzierung in Anlehnung an EN ISO 14040 ff. herangezogen (vgl. Kap. 2.2). Die Darstellung der Ergebnisse im Rahmen der Betrachtung zur Energie- und Klimateffizienz erfolgt im Kap. 5. Hinsichtlich der bilanzierten Klimagasemissionen werden zu Beginn die Aufwendungen für den Anbau der verschiedenen Kulturarten dargestellt (Kap. 5.2.1). Anschließend erfolgt die Darstellung der gesamten Biokraftstoffpfade (Kap. 5.2.2) sowie eine Einordnung der Ergebnisse im Studienvergleich (Kap. 5.2.3). Exkursartig werden in Kap. 5.2.4 die Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen bei Beimischungen im Vergleich zur reinen Kraftstoffnutzung am Beispiel von Bioethanol diskutiert.

Bedingt durch den großen Nachfragezuwachs nach Energiepflanzen zur Strom- und Kraftstofferzeugung ist zudem der Einfluss der energetischen Biomassenutzung auf die Landwirtschaft zu analysieren und zu bewerten. In diesem Zusammenhang werden die mit der Biomassenutzung verbundenen Effekte (wie z. B. Monokulturen, gute fachliche Praxis der Landwirtschaft) im Kap. 5.3 diskutiert.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse im Kap. 6.

## **2.2 Methodik der ökologischen Bewertung**

Im Folgenden wird die Methodik zur Bilanzierung einer gesamten Lebenswegkette entsprechend einer Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz) und der Untersuchungsrahmen der Betrachtung erläutert.

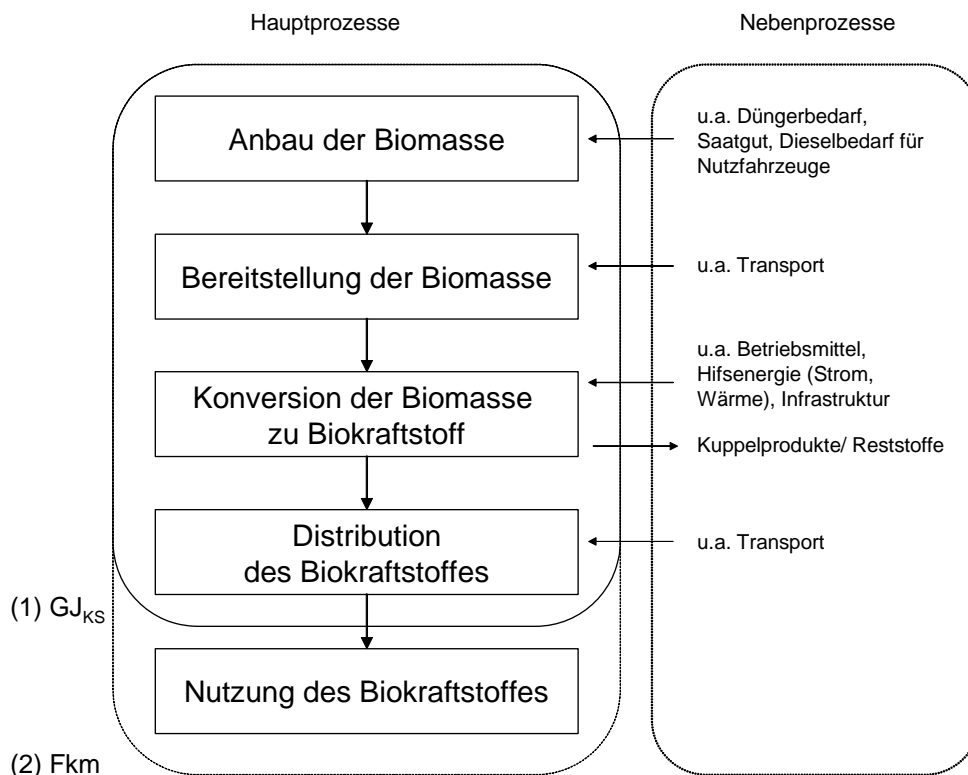
Mit Hilfe von Ökobilanzen können beliebige Produkte oder Dienstleistungen hinsichtlich potenzieller Wirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit ganzheitlich bewertet werden. Das Ziel einer Ökobilanz ist dabei eine vergleichende Bewertung der ökologischen Vor- und Nachteile verschiedener Alternativen, um auf diese Weise eine Entscheidungshilfe bereitzustellen.

Dazu wird der gesamte Lebenszyklus des untersuchten Produktes (hier: verschiedene Biokraftstoffe) von der Rohstofferschließung und -gewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert, um möglichst alle mit diesem Produkt verbundenen Effekte zu erfassen. Dies gilt ebenso für alle in diesem Lebensweg verwendeten anderen Produkte (Hilfs- und Betriebsstoffe, Kuppelprodukte und Reststoffe). Für die



Erstellung einer solchen Bilanz existieren die international gültigen Normen EN ISO 14040 und 14044 /2/, /3/.

In der vorliegenden Studie, die in Anlehnung an die gültigen Normen zur ökologischen Bewertung erstellt wird, wird als Bilanzierungsrahmen die Bereitstellung des Biokraftstoffes ausgehend vom Anbau der Biomasse über die Konversion in der jeweiligen Anlage bis zur Bereitstellung des Kraftstoffes einschließlich der Distribution/Logistik gewählt (vgl. Abbildung 1). Als funktionelle Einheit werden für die Biokraftstoffproduktion und -bereitstellung 1 GJ<sub>KS</sub> und für die Kraftstoffnutzung 1 Fahrzeugkilometer (Fkm) definiert.



**Abbildung 1** Darstellung des Untersuchungsrahmens entlang der Prozesskette

Als Ergebnis der ökologischen Betrachtung werden die ermittelten Umweltbelastungen zu unterschiedlichen Umweltindikatoren zusammengefasst. Übliche Indikatoren sind vor allem der Verbrauch von endlichen Energieressourcen (Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle, Uran) und luftgetragene Emissionen mit klimarelevanter, versauernder sowie human- und ökotoxischer Wirkung /4/. Im Rahmen der hier durchgeführten Betrachtung beschränken sich die Ausführungen ausschließlich auf die klimarelevanten Emissionen (Treibhausgas-



emissionen) sowie auf die Darstellung des kumulierten Energieaufwandes in Bezug auf den fossilen Energiebedarf.

Hinsichtlich der Bewertung der klimarelevanten Emissionen werden die verschiedenen wirksamen Klimagase erfasst, auf die Referenzsubstanz CO<sub>2</sub> bezogen und zu einem Indikator – dem CO<sub>2</sub>-Äquivalent – zusammenfasst. Die in dieser Studie untersuchten Klimagase und die zugehörigen CO<sub>2</sub>-Äquivalente sind in Tabelle aufgeführt.

**Tabelle 1 Klimagase und Klimagasfaktoren bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren nach IPCC 2001 /5/**

<b>Klimagas</b>	<b>Klimagasfaktoren als CO<sub>2</sub>-Äquivalent</b>
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	1
Methan (CH <sub>4</sub> )	23
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	296

Wie aus den dargestellten Klimagasemissionen erkennbar ist, besitzen die Klimagase Methan und Lachgas eine deutlich höhere Klimawirksamkeit als Kohlendioxid. Bezogen auf die vom Menschen verursachten Emissionen ist allerdings Kohlendioxid mengenmäßig das wichtigste Klimagas /4/.

### **3 Ausgewählte Biokraftstoffpfade – Status quo**

Für die Kraftstoffproduktion aus Biomasse sind verschiedene Konversionspfade denkbar, wobei – vor allem hinsichtlich infrastruktureller Aspekte – zwischen flüssigen und gasförmigen Biokraftstoffen unterschieden werden kann. Dabei erfolgt die Umwandlung der Biomasse über thermo-chemische, physikalisch-chemische oder bio-chemische Konversionsprozesse (vgl. Abbildung 2) durch die Prozessschritte der Vergasung, Pressung/Extraktion und Umesterung, der Alkoholischen Gärung oder der Anaeroben Fermentation.

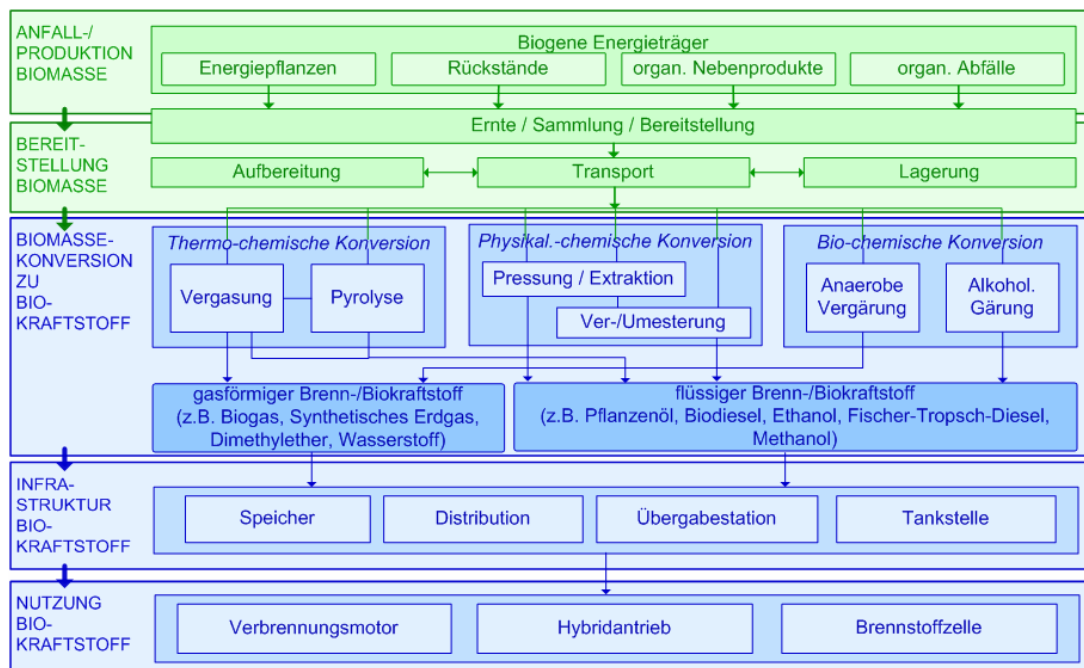


Abbildung 2 Darstellung der Konversionspfade zum ‘Bio-Kraftstoff’ /6/

Die Einteilung der Technologiepfade zur Biokraftstoffproduktion nach gegenwärtig existierenden sowie zukünftig verfügbaren Technologien wird in Abbildung 3 gezeigt.

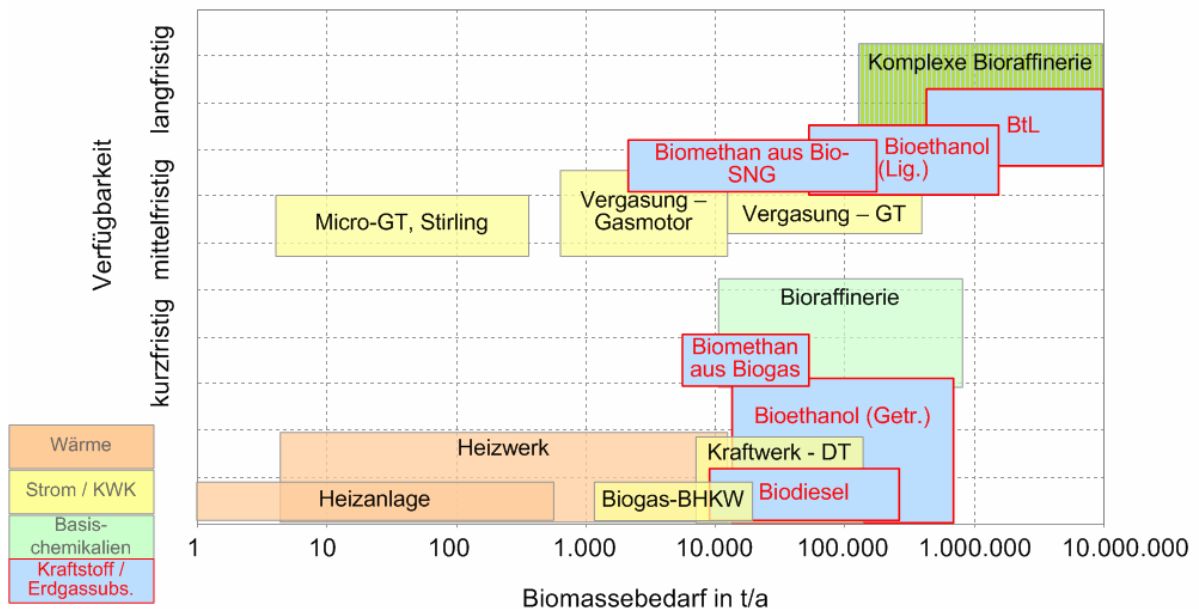


Abbildung 3 Überblick über die gegenwärtigen und zukünftigen Biokraftstofftechnologien im Vergleich zu anderen Optionen der energetischen Biomassenutzung (Quelle: IE, eigene Darstellung)

Während die flüssigen Biokraftstoffe z. T. bereits am Markt präsent sind (z. B. Biodiesel, Bioethanol auf Basis öl-, zucker- und stärkehaltiger Pflanzenteile und Reststoffe), wurden für zukünftige synthetische Kraftstoffe (z. B. Fischer-Tropsch-Diesel bzw. BtL sowie Bio-



SNG auf Basis von Lignozellulose) zunächst erste „Weichenstellungen“ (im Rahmen von Versuchs- und Pilotprojekten) vorgenommen. Biomethan in Form von aufbereitetem Biogas aus der bio-chemischen Biomasseumwandlung steht hingegen bereits prinzipiell zur Verfügung und kann – ergänzend zu Erdgas – kurzfristig und im großen Umfang dem Verkehrssektor zur Verfügung gestellt werden. Diese Vorteile gelten gleichermaßen für das o. g. Bio-SNG – d. h. Methanerzeugung aus Lignozellulose, mit der Einschränkung, dass sich derartige Verfahren gegenwärtig noch im Demonstrationsstadium befinden. Auch für die Automobilbranche gewinnt diese Option zunehmend an Bedeutung. Die Aufbereitung und Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz erlaubt es, den Ort der Gasnutzung vom Ort der Gasproduktion zu entkoppeln. Damit wird u. a. eine Versorgung von Gebieten mit hoher Nachfrage nach erneuerbaren Brenn- bzw. Treibstoffen und damit die zentrale und effiziente Nutzung dezentral anfallender Biomassen möglich. Als besonders vorteilhaft erweist sich bei den gasförmigen Kraftstoffen die Möglichkeit, auf ein sehr gut ausgebautes und leistungsfähiges Verteilnetz zugreifen zu können. Zudem kann der viel versprechende Bereitstellungspfad von Biomethan aus Biomasse als Brückentechnologie für die langfristig angestrebte Implementierung von Wasserstoff in der Energiewirtschaft gelten.

Im Folgenden werden die betrachteten gasförmigen und flüssigen Biokraftstoffe einschließlich der möglichen Konversionsketten zur Kraftstoffproduktion sowie der gegenwärtige Nutzungsstand im Überblick dargestellt.

### **3.1 Gasförmige Biokraftstoffe**

Die Produktion gasförmiger Biokraftstoffe kann zum einen über die bio-chemische Konversion (d. h. anaerobe Fermentation) von geeigneten Substraten zu methanreichem Biogas realisiert werden. Zum anderen kann über den thermo-chemischen Pfad der Vergasung von Lignozellulose und der anschließenden Methanisierung des entsprechend aufbereiteten Synthesegases die Erzeugung von Biomethan aus sog. Bio-SNG (Synthetic Natural Gas) erfolgen. Beide Optionen werden nachfolgend im Überblick dargestellt.

#### **3.1.1 Biomethan aus Biogas**

Die Erzeugung von Biomethan aus Biogas basiert auf der Vergärung organischer Substanz zu methanreichem Biogas. Die technische Umsetzung der Vergärung orientiert sich dabei zwangsläufig an den biologischen Grundlagen des anaeroben Fermentationsprozesses, so



dass sich der Verfahrensablauf der Biogasanlagen grundsätzlich ähnelt. Die Bereitstellung von Biomethan in Biogasanlagen ist in folgende Verfahrensschritte gegliedert:

- (1) Anlieferung, Lagerung, Aufbereitung und Einbringung der Substrate
- (2) Biogaserzeugung durch anaerobe Fermentation
- (3) Gärrestlagerung und evtl. -aufbereitung und Ausbringung sowie
- (4) Biogasspeicherung, -aufbereitung und -verwertung

Biogas besteht zu etwa 50 bis 70 % aus dem hochwertigen Energieträger Methan sowie aus Kohlenstoffdioxid und Spurengasen. Die Gaszusammensetzung und die erzielbare Gasausbeute hängen dabei im Wesentlichen von den Substrateigenschaften und vom Vergärungsprozess ab.

Die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität durch Steigerung des Methananteils auf etwa 96 % ist Stand der Technik. Hierfür stehen verschiedene bewährte Verfahren und Technologien zur Verfügung. Dazu zählen in erster Linie physikalisch-adsorptive Verfahren sowie chemisch-absorptive Verfahren, die eine Abtrennung des Kohlenstoffdioxids und der Spurengase wie Schwefelwasserstoff u. a. zur Bereitstellung von Biomethan ermöglichen. Im Anschluss kann das aufbereitete Biogas prinzipiell ins Erdgasnetz eingespeist oder direkt als Kraftstoff verwendet werden. Bei der Nutzung des Biomethans als Kraftstoff in Erdgasfahrzeugen ist eine Kompression des aufbereiteten Gases auf Tankstellendruckniveau erforderlich (250 bar), ansonsten müssen die Arbeitsdrücke des lokalen Gasverteilnetzes eingestellt werden.

### **3.1.2 Biomethan aus Bio-SNG**

Die Herstellung synthetischer Erdgassubstitute basiert auf der Vergasung lignozellulosehaltiger Substrate und der anschließenden Methanisierung des aufbereiteten Synthesegases zum sog. Bio-SNG. Bei der stark exothermen Methanisierung werden die H<sub>2</sub>- und CO-Anteile des bereits methanhaltigen Synthesegases über geeignete Katalysatoren in Methan, Wasserdampf und CO<sub>2</sub> umgesetzt. Im Anschluss an die Methanisierung erfolgt die abschließende Konditionierung (d. h. Entfernung von u. a. H<sub>2</sub>O sowie CO<sub>2</sub>) des Produktgases zu SNG mit einem Methangehalt von etwa 98 % /7/. Dabei können, in Abhängigkeit von der Prozessgestaltung, energetische Wirkungsgrade von bis zu 65 % /9/ erreicht werden.

Für die Konversion von Kohle zu SNG wurde die Verfügbarkeit der Anlagentechnik bereits demonstriert (z. B. in den USA) /8/. Nachdem SNG aus dem kommerziellen Interessensfeld



gerückt ist, kommt es gegenwärtig aufgrund steigender Gaspreise sowie zunehmend im Zusammenhang mit der Biomassevergasung in die Diskussion. Neben einer Reihe von Konzeptvorschlägen sind gegenwärtig Demonstrationsanlagen (u. a. in Güssing, Österreich) in der Planung bzw. Bau /9/.

## **3.2 Flüssige Biokraftstoffe**

### **3.2.1 Biodiesel**

Biodiesel wird aus pflanzlichen und tierischen Fetten durch eine schrittweise Umesterung gewonnen. Chemisch handelt es sich dabei um Fettsäuremethylester (FAME), das mit Hilfe eines Umesterungsmittels (d. h. Methanol) sowie eines Katalysators erzeugt wird. Als Rohstoff für die Biodieselproduktion wird i. d. R. Rapsöl eingesetzt, das in Ölmühlen aus Raps gewonnen wird. Dabei werden lediglich die Ölfrüchte verwendet, während der verbleibende Biomassenrest (Rapsstroh und Rapsschrot) nicht energetisch genutzt wird.

Bei der Produktion von Biodiesel entstehen große Mengen an Glycerin, die hauptsächlich in der chemischen Industrie weiterverwendet werden. Zum Teil ist auch eine energetische Nutzung z. B. in Biogasanlagen bekannt.

In Deutschland darf fossilem Diesel seit 2004 bis zu 5 % Biodiesel beigemischt werden. Damit ist Deutschland gegenwärtig der weltweit größte Markt für Biodieselproduktion und -absatz. Für das Jahr 2007 beträgt die Verarbeitungskapazität für Biodiesel 4,8 Millionen Tonnen /10/, wobei dieser als Reinkraftstoff verkauft oder dem konventionellen Diesel beigemischt wird. Für die Biodieselproduktion in Deutschland werden nach Abschätzungen der FNR e.V. im Jahr 2007 insgesamt 1,12 Millionen Hektar Raps angebaut /11/.

### **3.2.2 Bioethanol**

Von allen Biokraftstoffen weist Bioethanol gegenwärtig die weltweit größte Verbreitung auf, wobei die mit Abstand größten Produzenten Brasilien und die USA sind. Als Rohstoffe für die Ethanolproduktion kommen vor allem Zuckerrohr, Weizen und Roggen in Frage. In



den USA und im europäischen Ausland wird Ethanol vor allem aus Getreide<sup>1</sup> hergestellt, während Brasilien auf die Vergärung von Zucker aus Zuckerrohr setzt /12/.

Für die alkoholische Gärung können grundsätzlich zucker-, stärke- und lignozellulosehaltige Ausgangsstoffe wie z. B. Zuckerrüben, Weizen oder Triticale, Holz oder Stroh in Frage kommen. Je nach Einsatzstoff sind jedoch unterschiedliche Vorketten zur Glukoseerzeugung mit einem z. T. deutlich unterschiedlichen technischen Aufwand erforderlich. Wie herkömmlicher Trinkalkohol wird Bioethanol durch Fermentation (alkoholische Gärung) aus Zuckern mit Hilfe von Hefen erzeugt. Bei der gegenwärtig großtechnisch zum Einsatz kommenden Ethanolherstellung über die alkoholische Fermentation sind grundsätzlich folgende Verfahrensschritte zu unterscheiden:

- (1) Rohstoffaufbereitung wie z. B. Stärkeaufschluss,
- (2) Fermentation des aufgeschlossenen Zuckers (Mono- und Disaccharide),
- (3) Destillation bzw. Rektifikation sowie
- (4) Entwässerung und Reststoffaufarbeitung.

Während zuckerhaltige Pflanzen nach entsprechender Aufbereitung zur Maische direkt vergoren werden können, muss bei stärkehaltigen Pflanzen die Stärke zunächst enzymatisch (z. B. durch Amylasen) umgesetzt werden. Zellulosehaltige Rohstoffe (wie bspw. Stroh) müssen ebenfalls zunächst durch Säuren und/oder Enzyme aufgespaltet werden. Der nach Vergärung, Destillation bzw. Rektifikation sowie Absolutierung – und damit im Rahmen eines aufwändigen und teuren, da energieintensiven, Produktionsprozesses – letztlich erzeugte absolute Alkohol kann in Reinalkoholmotoren direkt oder in handelsüblichen Otto-Motoren als Zumischkomponente (nach DIN EN 228 bis zu 5 Vol.-%) problemlos eingesetzt werden.

Bei der Vergärung und Destillation entsteht als Nebenprodukt in großen Mengen Schlempe, die als Substrat für Biogasanlagen oder pelletiert und getrocknet in Form von sog. DDGS (Distillers Dried Grains with Solubles) als Futtermittel Verwendung finden kann.

Während Anlagen zur Ethanolerzeugung auf Basis von Zuckerrüben und Getreide Stand der Technik sind, befinden sich Konzepte auf der Basis von Lignozellulose (z. B. Stroh) bisher im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

---

<sup>1</sup> Während die Ethanolherstellung in den USA auf Mais basiert, wird in Europa überwiegend Weizen und Roggen eingesetzt.



### 3.2.3 BtL-Kraftstoffe

BtL-Kraftstoffe (Biomass to Liquid) zählen zu den synthetischen Kraftstoffen, die auf der Basis von Biomasse erzeugt werden. Unter den BtL-Kraftstoffen werden Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe (FT-KW) als vielversprechend angesehen, da flüssige Kraftstoffe mit definierten Eigenschaften bereitgestellt werden können.

Bei der eingesetzten Biomasse kommt in erster Linie feste Biomasse (z. B. Holz, Stroh, Ganzpflanzen) in Betracht. Ausgehend von der Trocknung der Biomasse erfolgt die Umsetzung zu Synthesegas, das anschließend verflüssigt wird.

Die Produktion von BtL-Kraftstoffen befindet sich gegenwärtig im Pilot- bzw. Demonstrationsstadium; nennenswerte Mengen sind daher nicht im Kraftstoffmarkt verfügbar. Voraussetzung für eine Marktimplementierung ist – ausgehend von weiterführenden F&E-Aktivitäten – das Upscaling der gegenwärtig im Bau befindlichen ersten Demoanlage (mit 45 MW<sub>BWL</sub> bzw. 15.000 t/a der Firma Choren Industries in Freiberg) und die damit verbundene Überwindung der techno-ökonomischen Barrieren. Darüber hinaus müssen mit Bezug auf die Bereitstellung der erforderlichen Biomassemenigen geeignete Standorte gefunden werden /13/. Als mögliche Standorte für 500 MW<sub>BWL</sub>-Anlagen werden in Deutschland u. a. Lubmin und Dormagen diskutiert.

Für die Erzeugung von Synthesegas auf Basis von Lignozellulose über den Weg der Vergasung sind verschiedene Vergasungsverfahren mit nachgeschalteten Komponenten zur Gasaufbereitung (d. h. Rohgasreinigung, Gaskonditionierung) in der Entwicklung. Ungeachtet der Vielzahl an Verfahrenslösungen befinden sich nur wenige Anlagen zur Vergasung im Pilotbetrieb und die Kopplung mit Syntheseprozessen ist bisher kaum realisiert. Ein Hauptgrund dafür sind die hohen Reinheitsanforderungen von Syntheseprozessen, d. h. Störstoffe wie z. B. Teer, Stickstoff und Katalysatorgifte (insbes. Schwefel- und Chlorverbindungen) müssen in einer Gasreinigung auf wenige ppm entfernt werden. Die Rohgasreinigung kann mit nassen und/oder trockenen Verfahren erfolgen.

BtL-Kraftstoff ist frei von Schwefel und Aromaten. Durch die Steuerung des Syntheseprozesses kann der Treibstoff gezielt auf Anforderungen zukünftiger Motoren (combined combustions systems - CCS) zur Erreichung niedriger Stickoxid- und Rußemissionswerte eingestellt werden. Je nach Kombination der geeigneten Systemelemente können FT-Kraftstoffe mit energetischen (Biomasse-) Wandlungswirkungsgraden (BtL) von 20 bis 44 % erzeugt werden /14/.



BtL-Kraftstoff ist ohne technische Modifikation bereits in der heutigen Motorengeneration einsetzbar. Analog zu konventionellen Mineralölkraftstoffen kann ebenso die Kraftstoffverteilung über die bestehende Logistikinfrastruktur erfolgen.

#### 4 Festlegung der betrachteten Kraftstoffpfade und Fruchtarten

Die Auswirkungen in Bezug auf die Umweltbelastung hängen davon ab, welche Rohstoffe und Produktionstechnologien bei der Herstellung der Biokraftstoffe eingesetzt werden. Der größte Anteil der Umweltbelastung geht dabei auf den landwirtschaftlichen Anbau der jeweiligen Rohstoffe zurück. Für die diskutierten Konversionspfade stehen prinzipiell verschiedene Arten nachwachsender Rohstoffe als Anbaubiomasse zur Verfügung, die sich hinsichtlich der Hektarerträge sowie der Anbauaufwendungen (u. a. Nährstoffbedarf, Betriebsmittel) unterscheiden. Neben den verschiedenen Konversionstechnologien von Biomasse ist daher die Differenzierung der eingesetzten Fruchtarten für die vergleichende Darstellung in Bezug auf die Energieeffizienz und die Klimawirksamkeit von besonderer Bedeutung.

In Absprache mit dem Auftraggeber werden in der Studie die in der Tabelle 2 dargestellten Konversionspfade zur Herstellung gasförmiger und flüssiger Biokraftstoffe auf der Basis heimischer nachwachsender Rohstoffe betrachtet.

**Tabelle 2** Betrachtete Fruchtarten entsprechend der Biokraftstoffpfade

Fruchtart	Biomethan aus Biogas	Biomethan aus Bio-SNG	Bioethanol	Biodiesel	BtL-Kraftstoffe
Mais	x				
Energiemais	x				
Hirse (Sorghum)	x	x			x
Zuckerrüben	x		x		
Winterroggen GPS	x				
Winterweizen (Korn)			x		
Winterweizen (Stroh)			x		
KUP		x			x
Raps				x	

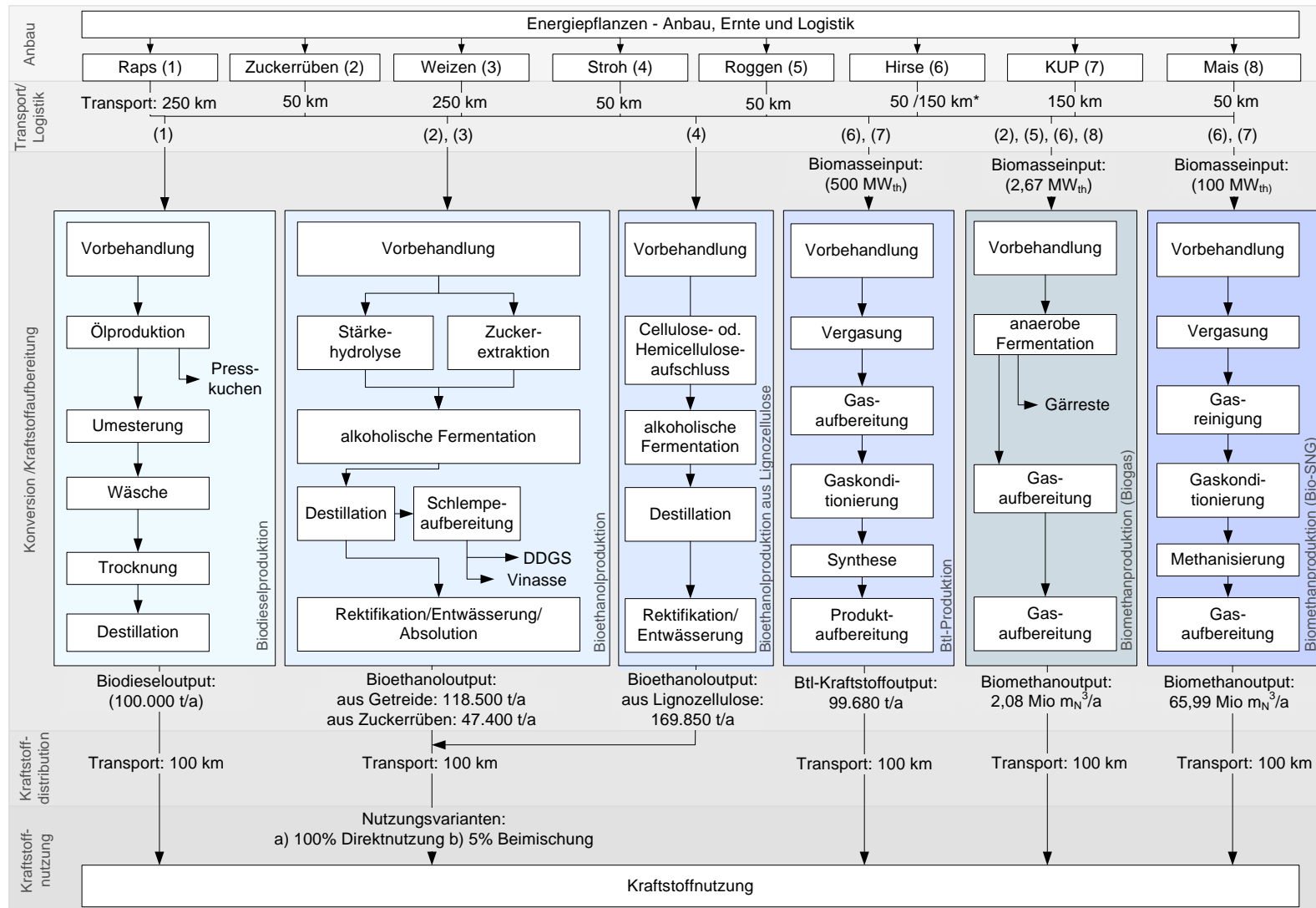
Für die Biogasbereitstellung wird zusätzlich exemplarisch ein Kraftstoffpfad abgebildet, der auf einer Substratkombination (massebezogen) von 70 % Energiemais und 30 % Rindergülle beruht. Im Hinblick auf die ökologischen Effekte der Biogaserzeugung und -nutzung wird



somit der Einfluss landwirtschaftlicher Reststoffe wie Exkremente verdeutlicht, da in der Praxis oft ein Substratmix für den Einsatz in Biogasanlagen erfolgt.

In der Abbildung 4 sind die betrachteten Konversionspfade zur Biokraftstoffproduktion aus Biomasse im Überblick dargestellt. Entsprechend der Zielstellung wird die gesamte Prozesskette vom Rohstoffanbau bzw. der Rohstoffbereitstellung über etwaige Konversionsschritte bis hin zur Bereitstellung der Biokraftstoffe untersucht. Im Folgenden werden die zu betrachtenden Aufwendungen und Grundannahmen entlang der Prozesskette dargestellt. Detaillierte Informationen zur Definition der Konversionsanlagen sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

Abbildung 4 Überblick über die betrachteten Biokraftstoffpfade (IE, eigene Darstellung)



\* Transport für Hirse zur Biogasanlage 50 km; Transport Hirse zur BtL-Anlage analog KUP 150 km



#### **4.1 Anbau nachwachsender Rohstoffe**

Zur besseren Vergleichbarkeit der Flächeneffizienzen wird angenommen, dass bei den betrachteten Optionen zur Produktion von Biokraftstoffen ein ausschließlicher Einsatz nachwachsender Rohstoffe erfolgt. Die betrachteten nachwachsenden Rohstoffe werden als landwirtschaftliche Produkte entsprechend notwendiger Feldarbeiten gemäß guter fachlicher Praxis konventionell produziert. Die Aufwendungen, die für den Anbau und die Ernte der Fruchtarten anfallen, müssen dabei Berücksichtigung finden. Dabei wurde entsprechend der Fruchtart nach dem Dieselbedarf der einzelnen Feldarbeitsgänge, der Aufwand für die mineralische Düngung (N, P, K), der Kalkeinsatz sowie die direkten Bodenemissionen (u. a.  $N_2O$ ), der Aufwand an Pflanzenschutzmittel und der Saatgutbedarf unterschieden. Folgende Feldarbeitsgänge sind für die Ermittlung des Kraftstoffbedarfs zu berücksichtigen:

- Grundbodenbearbeitung
- Saatbettbereitung
- Aussaat
- Pflanzenschutz
- Düngung
- Transporte, Siloentnahmen

Die Datenbasis für die Anbauaufwendungen der Energiepflanzen sowie die Ertragsdaten je Hektar beruhen dabei auf den Angaben des Auftraggebers (vgl. Anhang 2).

#### **4.2 Bereitstellung der nachwachsenden Rohstoffe**

Anschließend werden die nachwachsenden Rohstoffe zur Konversionsanlage transportiert und entsprechend des Konversionspfades in Kraftstoff umgesetzt. Die Annahmen der Transportaufwendungen wurden in Abhängigkeit der eingesetzten Substrate und Konversionspfade gewählt. Darüber hinaus werden spezifische Lager- bzw. Silageverluste berücksichtigt. So werden für die Biogassubstrate beispielsweise Lager- und Silierverluste von 5 % in Bezug auf die Frischmasse angenommen, wenngleich diese Verluste starken Schwankungsbreiten unterworfen sind und z. T. auch deutlich höher – bis etwa 20 % der Frischmasse – ausfallen können. Die angenommenen Verluste wurden durch eine Anhebung der erforderlichen Substratmenge zum Ausgleich des Energieverlustes berücksichtigt. Detaillierte Angaben sind der Abbildung 4 bzw. dem Anhang 1 zu entnehmen.



Für die Herstellung von BtL-Kraftstoff aus Hirse wird im Vergleich zu KUP ein geringerer Heizwert (16,5 statt 18,5 MJ/kg) angenommen. Daraus ergibt sich ein massenbezogener Mehrinput je t KS für Hirse im Vergleich zu KUP um den Faktor 1,2.

### **4.3 Betrieb der Konversionsanlagen**

Der Bau, Betrieb und Abriss der notwendigen Anlagen und Anlagenteile wird in die Untersuchung einbezogen. Bei der Bewertung der zu betrachtenden Konversionspfade werden Standardprozesse berücksichtigt, wobei für die Kraftstoffbereitstellung typische Anlagengrößen entsprechend des Konversionspfades gewählt werden. Das bedeutet, dass je nach Kraftstoffpfad eine typische Größenordnung hinsichtlich der Einsatzstoffe und Verfahrenskonzepte betrachtet wird. Für alle betrachteten Biokraftstoffpfade wird dabei eine industrielle Anlage unterstellt. Die gewählten Anlagengrößen sind im Anhang 1 dargestellt. Zudem sind die Anlagenkapazitäten der jeweiligen Kraftstoffoptionen in den Ergebnisgrafiken abgebildet.

Neben den Aufwendungen, die für den Bau und -abriss der Anlagen anzurechnen sind, sind auch der Energiebedarf der Konversionsanlagen sowie die einzusetzenden Betriebsmittel (z. B. Waschmittel) zu betrachten. Ebenso sind die zu erwartenden Emissionen, die bei dem Betrieb der Anlage entstehen, einzubeziehen. Dazu gehören z. B. die Methanemissionen, die bei dem Anlagenbetrieb der Biogasanlagen entstehen; ebenso die Methanemissionen, die der Aufbereitung zum Biomethan angerechnet werden können.

Im Fall der Aufbereitung zu Biomethan wird in der vorliegenden Studie jedoch angenommen, dass durch die Nachverbrennung des Schwachgases mit Hilfe eines Oxidationskatalysators die entstehenden Methanemissionen vollständig zu CO<sub>2</sub> umgesetzt werden und demnach für die Aufbereitung zu Biomethan sowohl bei dem Kraftstoffpfad Biogas als auch bei Bio-SNG keine Methanemissionen zu erwarten sind und lediglich die Kohlendioxid-Emissionen berücksichtigt werden.

### **4.4 Nebenprodukte und Rückstände**

Bei der Produktion von Biokraftstoffen fallen je nach Kraftstoffpfad Nebenprodukte an, die für die ökologische Betrachtung in Form von Gutschriften berücksichtigt werden müssen. Dabei können die Nebenprodukte (Kuppelprodukte) auf verschiedene Art allokiert bzw. gutgeschrieben werden. So werden neben der rein energetischen Verwertung (quantifizier-



bar über den Heizwert des Kuppelproduktes) auch die Einsparungen betrachtet, die durch eine alternative Verwendung entstehen (z. B. energetischer Aufwand des Herstellungsprozesses des Alternativproduktes). Bei der Produktion von Biomethan aus Biogas fallen als Nebenprodukte Gärreste an, die als Dünger Verwendung finden und demnach den Einsatz von Mineraldünger substituieren. Bei der Herstellung der BtL-Kraftstoffe wird angenommen, dass das als Nebenprodukt anfallende Naphtha als Kraftstoff verwendet werden kann und fossiles Naphtha ersetzt. Für die Biodieselproduktion wird als Nebenprodukt der Pressrückstand aus der Rapssaat (Presskuchen) als Futtermittel betrachtet. Ebenso wird bei der Bioethanolherstellung aus Zuckerrüben und Weizen der Rückstand aus der Schlempeaufbereitung in Form von DDGS und Vinasse als Futtermittel berücksichtigt. Bei der Bereitstellung von Bioethanol auf Basis von Lignozellulose wurde dagegen unterstellt, dass die notwendige Prozessenergie in Form von Strom und Dampf durch die Verbrennung von Lignin, das als Bestandteil des Stroh aus dem Prozess gewonnen wird, bereitgestellt wird und für die Überschussenergie eine Stromgutschrift erfolgt.

#### **4.5 Transport/ Logistik**

Die Variation der Transporte für Biokraftstoffe zeigen aufgrund des geringen Einflusses der Transportaufwendungen erfahrungsgemäß keine signifikanten Unterschiede. Daher wird für alle betrachteten Varianten der Biokraftstoffproduktion der Transport der Biokraftstoffe zur Nutzung mit 100 km angenommen, wenngleich für die Optionen von Biomethan z. T. geringere Transportentfernungen realistischer sind. Bei den gasförmigen Biokraftstoffen (Biomethan aus Biogas und Bio-SNG) sind zudem die energetischen Aufwendungen für die Kompression von Biomethan auf ein Tankstellendruckniveau von etwa 250 bar zu berücksichtigen. Der Energieaufwand für die Kompression des Biomethans auf 250 bar wird bei Bio-SNG und bei Biomethan aus Biogas in gleicher Größenordnung angenommen, da für den Konversionsprozess von Bio-SNG ein Prozess mit geringem Druckoutput unterstellt wird.



## **5 Ergebnisvergleich ausgewählter Biokraftstoffpfade**

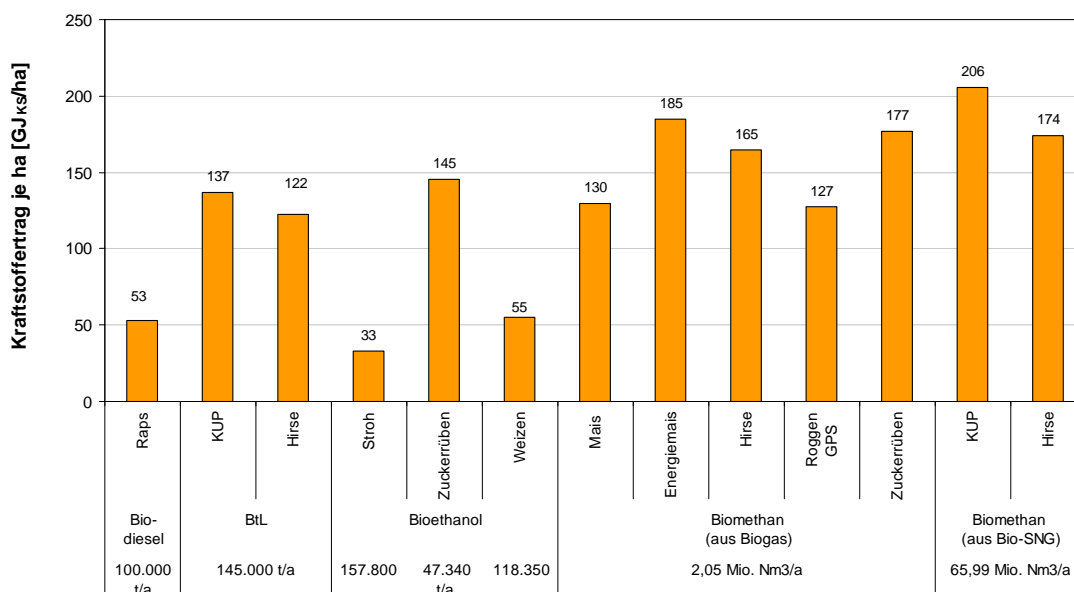
### **5.1 Energiebilanz**

Hinsichtlich der Bewertung der Energieeffizienz wird auf der Basis anerkannter, belastbarer Datengrundlagen aufgezeigt, welcher Energiebedarf für die ausgewählten Konversionspfade unter Einsatz der verschiedenen Anbauarten erforderlich ist. Dabei wird sowohl der Energiebedarf der Konversionstechnologien einschließlich der zu erwartenden Wirkungsgrade als auch der Energieaufwand bei der Bereitstellung der Anbaukulturen berücksichtigt. Im Ergebnis werden die Kraftstoffoptionen nach ihrer flächenspezifischen Energieeffizienz bzw. Flächenproduktivität beurteilt und dargestellt (Gesamtenergiebereitstellung pro Hektar).

#### **5.1.1 Flächenbezogener Kraftstoffenertrag**

Der flächenbezogene Kraftstoffenertrag stellt die reine Kraftstoffausbeute pro Hektar dar. Weitere energetisch nutzbare Kuppelprodukte, wie Strom oder Wärme, bleiben dabei unberücksichtigt. Als Ausnahme stellt sich das BtL-Verfahren dar, bei dem das Nebenprodukt Naphtha ebenfalls als Kraftstoff betrachtet wird, wenngleich diese Option gegenüber der stofflichen Nutzung aus technisch-ökonomischen Aspekten noch als sinnvoll nachzuweisen ist.

Unter Berücksichtigung der spezifischen Hektarerträge (vgl. Anhang 3) ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten flächenbezogenen Kraftstoffenerträge je Hektar.

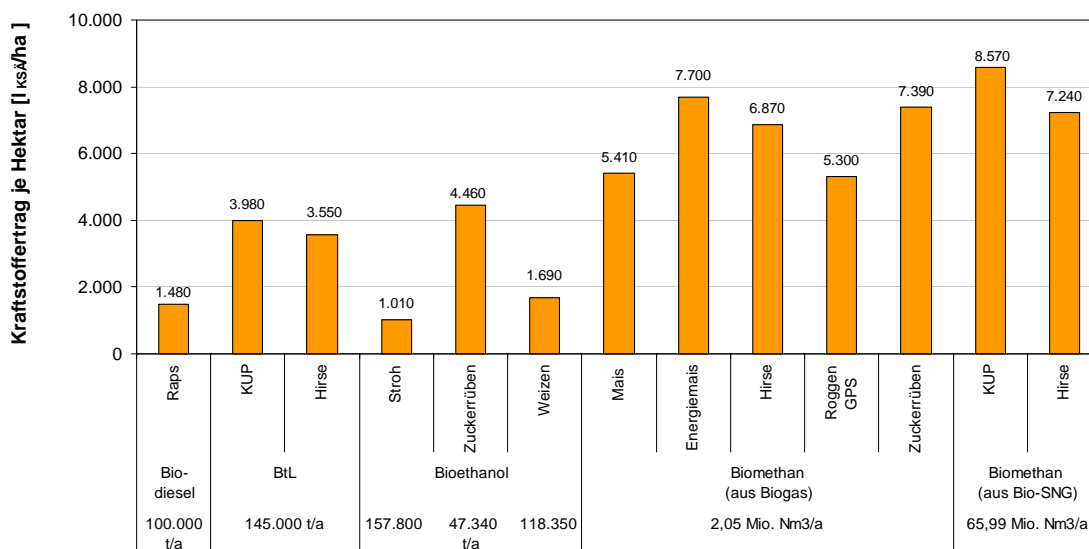


**Abbildung 5 Kraftstofftrag ausgewählter Biokraftstoffpfade je Hektar (GJ/ha)**

Es kann gezeigt werden, dass Biomethan aus Bio-SNG und Biogas die größten Kraftstoffausbeuten je Hektar liefern. Aufgrund der vergleichsweise hohen Hektarerträge von Zuckerrüben stellt sich die Kraftstoffausbeute für Ethanol aus Zuckerrüben ebenfalls vorteilhaft dar. Biodiesel sowie Ethanol aus Getreide und Lignozellulose (Stroh) weisen dagegen die geringsten Kraftstoffausbeuten je Hektar auf.

Die auf den Hektar bezogene Menge an Kraftstoffäquivalente ist in Abbildung 6 dargestellt. Dabei umfasst ein Liter Kraftstoffäquivalent die Menge des Biokraftstoffes, der die gleiche Energiemenge enthält wie ein Liter des äquivalenten konventionellen Kraftstoffs (d.h. Diesel, Benzin oder Erdgas). So wird bei Biodiesel und BtL-Kraftstoffen der Ersatz von Diesel, bei Bioethanol der Ersatz von Benzin und bei Biogas und Bio-SNG der Ersatz von Erdgas angenommen.

Analog zur Abbildung 5 ist der flächenbezogene Kraftstofftrag für Biomethan aus Bio-SNG und Biogas am größten, während insbesondere für Biodiesel und Ethanol aus Getreide und Lignozellulose (Stroh) die Kraftstoffausbeuten je Hektar das niedrigste Ertragsniveau aufweisen.

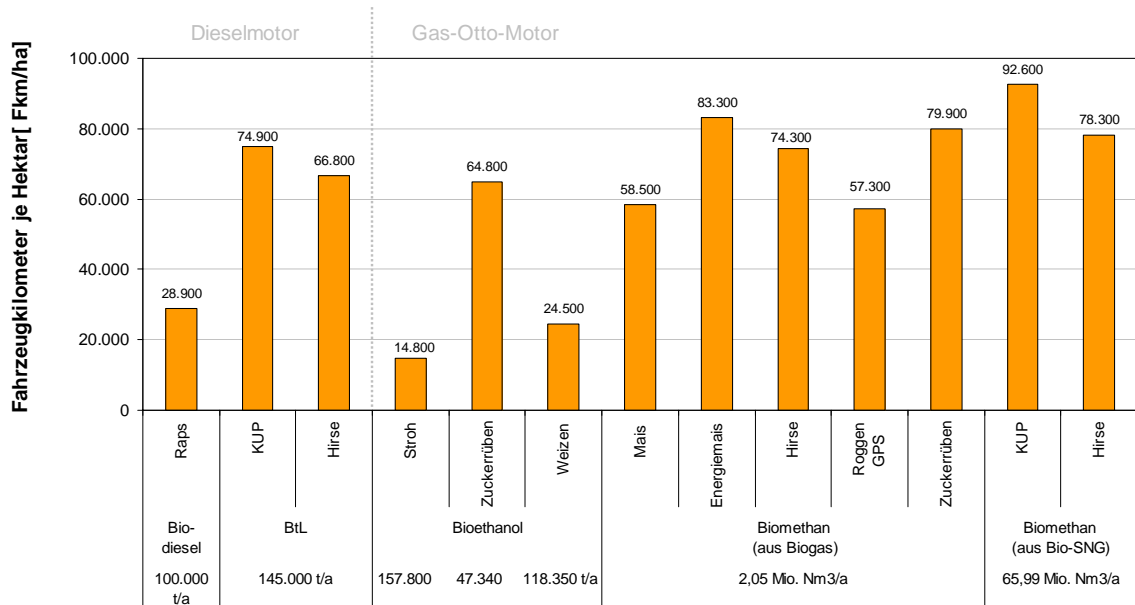


**Abbildung 6 Kraftstofftrag ausgewählter Biokraftstoffpfade je Hektar bezogen auf das Kraftstoffäquivalent**

Unter Berücksichtigung des Energieaufwandes in Form des einzusetzenden Kraftstoffes (vgl. Tabelle 3), der aufgebracht werden muss, um das Fahrzeug einen km zu bewegen, ergeben sich die in Abbildung 7 dargestellten Fahrzeugkilometer je Hektar.

**Tabelle 3 Energieaufwand je Fahrzeugkilometer in Abhängigkeit vom Kraftstoff /9/**

Fossiler Kraftstoff	Zugeordnete Biokraftstoffe	MJ/Fkm
Benzin	Bioethanol	2,24
Diesel	Biodiesel, BtL-Kraftstoffe	1,83
Erdgas	Biomethan aus Biogas und Bio-SNG	2,22



**Abbildung 7 Fahrzeugkilometer ausgewählter Biokraftstoffpfade je Hektar**

In Bezug auf die Fahrzeugkilometer je Hektar erweisen sich die Kraftstoffpfade BtL, Bio-SNG und Biogas am vorteilhaftesten. Im Vergleich zu der Abbildung 5 und Abbildung 6 wird bei der Darstellung in Fahrzeugkilometern die Effizienz des Kraftstoffeinsatzes im Fahrzeug berücksichtigt. Da Dieselmotoren im Vergleich zu Gas-Otto-Motoren den eingesetzten Kraftstoff effizienter umsetzen, ist der Kraftstoffverbrauch je Fahrzeugkilometer geringer. Folglich verbessern sich die Kraftstoffausbeuten für die Biokraftstoffpfade, die Diesel substituieren sowohl im Vergleich zu den gasförmigen Kraftstoffen als auch zu den Bioethanolfaden.

Unter Berücksichtigung der derzeit verfügbaren Kraftstoffoptionen stellt sich der Biokraftstoffpfad für Biogas aus Energiemais und Hirse hinsichtlich des Kraftstoffesertrages je Hektar bzw. der Fahrzeugkilometer je Hektar am vorteilhaftesten dar. Aufgrund des hohen Hektarertrages von Zuckerrüben, sind auch mit der Kraftstoffoption Ethanol auf Zuckerbasis vergleichsweise hohe flächenbezogene Kraftstoffeserträge verbunden.

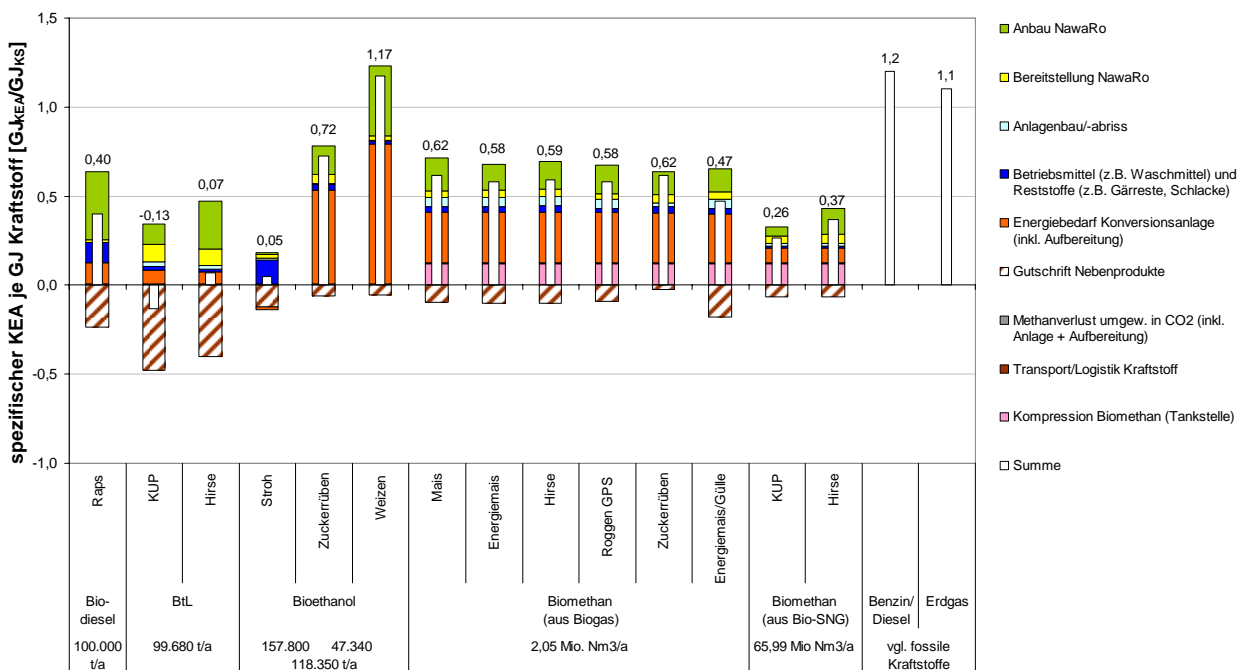


### 5.1.2 Kumulierter Energieaufwand (fossil)

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) bezeichnet die gesamten energetischen Aufwendungen (Primärenergieaufwand) zur Bereitstellung des Biokraftstoffes. In der vorliegenden Betrachtung werden dabei die gesamten fossilen Energieaufwendungen berücksichtigt.

So beanspruchen der Anbau der eingesetzten Biomasse, der Bau und Abriss sowie der Betrieb der Konversionsanlagen erschöpfliche Energieressourcen (u. a. Erdöl, Kohle). Bereitgestellte Nebenprodukte werden dagegen als Gutschrift ausgewiesen.

In der Abbildung 8 ist der spezifische Energieaufwand (KEA) je GJ Kraftstoffinhalt der betrachteten Biokraftstoffe vergleichend mit den fossilen Kraftstoffen dargestellt. Die Gesamtbilanz von Aufwendungen und Gutschriften ist in der Abbildung als Summenbalken in weiß zusammengefasst.



**Abbildung 8 Bereitstellung verschiedener Biokraftstoffe: Spezifischer Energieaufwand (KEA fossil) je GJ Kraftstoffinhalt im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen**

Die Ergebnisse zeigen, dass der spezifische Energieaufwand (KEA fossil) für die Bereitstellung von Bioethanol aus Getreide und Zuckerrüben im Vergleich zu den biogenen Kraftstoffen am höchsten ist. Für Bioethanol aus Getreide (Weizenkorn) ist der Energieaufwand sogar so groß, dass mehr Energie eingesetzt werden muss, als an Energie aus dem bereitgestellten Kraftstoff zur Verfügung gestellt wird. Der Energieaufwand für den Betrieb



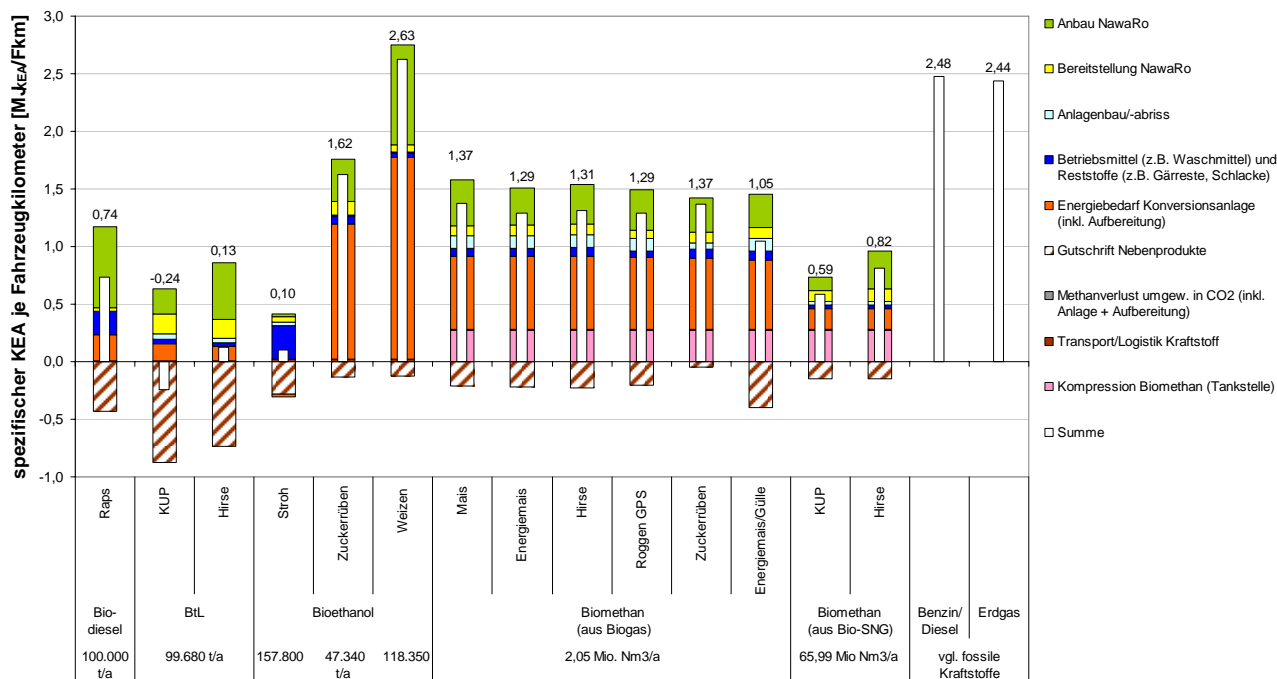
der Konversionsanlage stellt hierbei den wesentlichen Einflussfaktor für das negative Energieoutput dar.

Bei den energieeffizienten Konversionsprozessen zukünftiger Kraftstofftechnologien Bio-SNG und BtL-Kraftstoffe ist der Energieaufwand fossiler Energieträger dagegen vergleichsweise gering. Für den BtL-Kraftstoffpfad aus KUP fällt der Energieaufwand je GJ Kraftstoff sogar negativ aus, sofern für das Nebenprodukt Naphtha Gutschriften als Kraftstoff angerechnet werden.

Der vergleichsweise hohe spezifische Energieaufwand der Kraftstoffoptionen Biomethan aus Biogas resultiert in erster Linie aus den Energieaufwendungen der Biogasanlage einschließlich der Aufbereitung zu Biomethan und den Aufwendungen für fossile Energieträger, die mit dem Anbau der Biogassubstrate verbunden sind. Darüber hinaus ist auch der Energieaufwand für die Kompression des Biomethans auf Druckniveau der Tankstelle (250 bar) nicht zu vernachlässigen. Werden dagegen Reststoffe (z.B. landwirtschaftliche Reststoffe, Bioabfall) als Substrate eingesetzt, sind die Aufwendungen aus dem Anbau geringer.

Für die Kraftstoffoption Bioethanol aus Stroh stellt sich der Primärenergieaufwand je GJ Kraftstoff sehr niedrig dar, da es sich hierbei um einen Reststoff handelt. So sind für Stroh – bis auf die Transportaufwendungen zur Anlage sowie die anfallenden Aufwendungen für den Betrieb der Konversionsanlage – kaum weitere Aufwendungen für den Anbau des Reststoffes zu berücksichtigen. Würde Stroh gezielt für die Kraftstoffproduktion produziert werden, wären die Energieaufwendungen bedeutend größer.

Wird der Energieaufwand in Bezug zum Fahrzeugkilometer betrachtet (vgl. Abbildung 9), führt die bessere Kraftstoffausnutzung der Dieselmotor-Varianten (BtL, Biodiesel) zur Reduktion des spezifischen Energieaufwandes im Vergleich zu den Kraftstoffoptionen mit Gas-Otto-Motoren (d.h. Bioethanol, Biomethan aus Biogas und Bio-SNG). Die getroffenen Kernaussagen analog der Abbildung 8 hinsichtlich der Einordnung der Biokraftstoffpfade in Bezug zum Energieaufwand bleiben jedoch erhalten.



**Abbildung 9** Spezifischer Energieaufwand (KEA fossil) je Fahrzeugkilometer verschiedener Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen

Im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen zeigt der Einsatz der biogenen Kraftstoffe – bis auf Bioethanol aus Getreide – Einsparungen an Primärenergie (KEA-Aufwendungen) bezogen auf den Fahrzeugkilometer.

## 5.2 Klimabilanz

Sowohl bei der Nutzung fossiler als auch biogener Energieträger werden klimawirksame Emissionen (u. a. CO<sub>2</sub>) freigesetzt. Allerdings kann bei der energetischen Nutzung von Biomasse weitestgehend von einer CO<sub>2</sub>-neutralen Energiegewinnung ausgegangen werden, da die emittierten Mengen an Kohlenstoffdioxid zuvor der Atmosphäre für das Pflanzenwachstum entzogen und in der Biomasse chemisch gebunden wurden. Klimaneutral ist dennoch auch eine derartige Biomassenutzung nicht, da für Anbau, Bereitstellung und Nutzung der Biomasse fossile Energieträger verwendet werden und beim Anbau selbst klimarelevante Gase frei werden (z.B. Lachgas). So werden fossile Energieträger zum Beispiel bei der Produktion der Düngemittel, bei der Ernte und Transport der Biomasse oder für den Energiebedarf der Konversionsanlage benötigt. Die ökologischen Auswirkungen der Nutzenergiebereitstellung auf der Basis von Biomasse hängen daher maßgeblich von der eingesetzten Biomasse selbst, den verwendeten Konversionstechnologien zur Produktion



und Verwendung der hier betrachteten Biokraftstoffkonzepte sowie der jeweiligen Betriebsweise der Konversionsanlage ab. Die ökologische Betrachtung beinhaltet demzufolge die gesamte Bereitstellungskette, d.h. die Kraftstoffproduktion einschließlich Anbau der Biomasse und Einsatz in der Konversionsanlage sowie die Kraftstoffverteilung und -nutzung.

### **5.2.1 Anbau der Energiepflanzen im Vergleich**

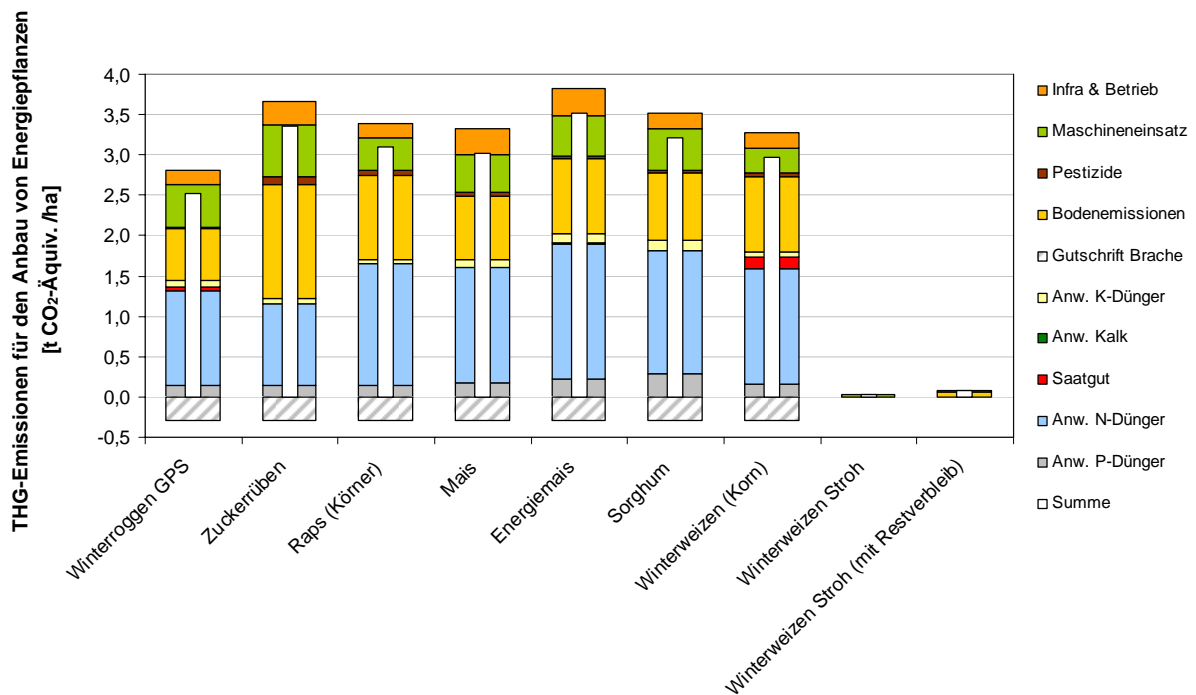
Im Folgenden werden die Treibhausgas-Emissionen, die mit dem Anbau der Energiepflanzen verbunden sind, für die betrachteten Anbaukulturen im Vergleich dargestellt.

Darüber hinaus werden für die energetische Nutzung des Strohs aus Winterweizen zwei Optionen betrachtet.

- (1) Das gesamte anfallende Stroh aus dem Anbau von Winterweizen wird zur energetischen Nutzung verwendet.
- (2) Nicht das gesamte anfallende Stroh kann energetisch genutzt werden. Es wird angenommen, dass ein Teil des Strohs zur Erhaltung des Bodengefüges (Humusbilanz) auf dem Acker verbleibt. Für das verbleibende Stroh (hier: 30 % bezogen auf die anfallende Strohmenge) werden jedoch die mit dem Unterpflügen des Strohs verbundenen direkten Bodenemissionen berücksichtigt.

Da Stroh als Reststoff betrachtet wird, ergeben sich für den Anbau kaum Treibhausgas-Emissionen. Lediglich der Transport der Strohmenge sowie die entstehenden Bodenemissionen im Fall eines Restverbleibes auf dem Feld werden der Bereitstellung von Stroh angerechnet.

In Abbildung 10 sind die Treibhausgasemissionen, die sich aus dem Anbau für die verschiedenen Energiepflanzen ergeben, in Bezug auf 1 Hektar dargestellt.

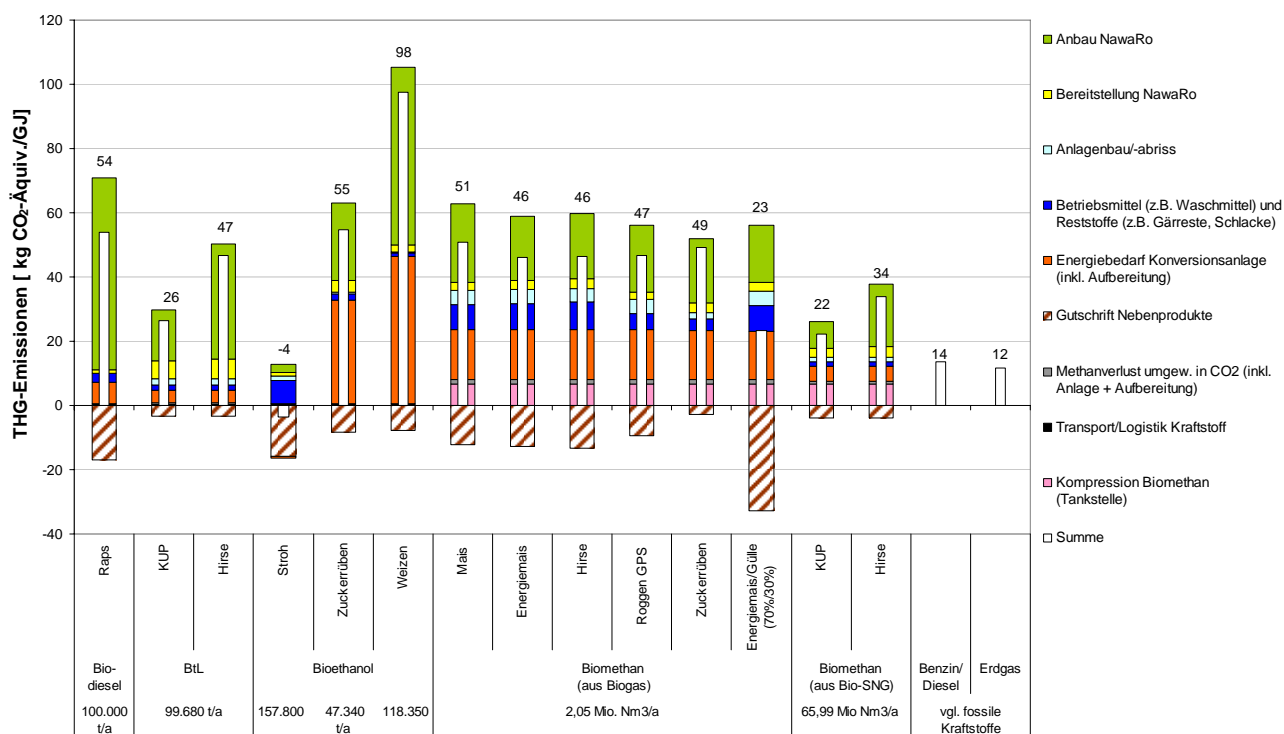


**Abbildung 10 THG-Emissionen für den Anbau verschiedener Energiepflanzen je Hektar**

Bei allen Anbaukulturen – ausgenommen der Stroh-Optionen – haben die Stickstoffdüngung und die direkten Bodenemissionen den größten Anteil an den Klimagasemissionen, die dem Anbau der Energiepflanzen zugeordnet werden können. Für eine Brache, welche bei Nichtbewirtschaftung sonst auf dem Feld zu berücksichtigen wäre, wird eine Gutschrift gewährt, um die die entstehenden Klimagasemissionen gemindert werden. Für Winterroggen GPS stellen sich die Treibhausgasemissionen geringfügig besser dar, da im Vergleich zu den anderen Anbauarten ein höherer Methangehalt (54 % anstatt 53 %) unterstellt wurde. Somit ist für Winterroggen GPS eine geringfügig kleinere Substratmenge bei gleichem Kraftstoffoutput je Hektar von Nöten.

## 5.2.2 Treibhausgasemissionen der ausgewählten Biokraftstoffpfade

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Kraftstoffproduktion und -nutzung hinsichtlich der Klimagasemissionen dargestellt, wobei die Emissionen der betrachteten Kraftstoffpfade sowohl je Energieeinheit (GJ) Kraftstoff (Abbildung 11) als auch mit Bezug zum Fahrzeugkilometer (Abbildung 12) abgebildet werden.



**Abbildung 11 Bereitstellung verschiedener Biokraftstoffe: THG-Emissionen je GJ Kraftstoffinhalt im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen**

Die Herstellung von Biokraftstoffen ist in der Regel mit deutlich höheren Klimagasemissionen verbunden als die Bereitstellung fossiler Kraftstoffe (Diesel, Benzin oder Erdgas). Einen wesentlichen Anteil an den THG-Emissionen aus der biogenen Kraftstoffbereitstellung hat neben dem Anbau der Biomasse – analog zu den KEA-Darstellungen (vgl. Kap. 5.1) – der Betrieb der Konversionsanlage einschließlich der erforderlichen Betriebsmittel, die mit Emissionen bzw. Aufwendungen verbunden sind.

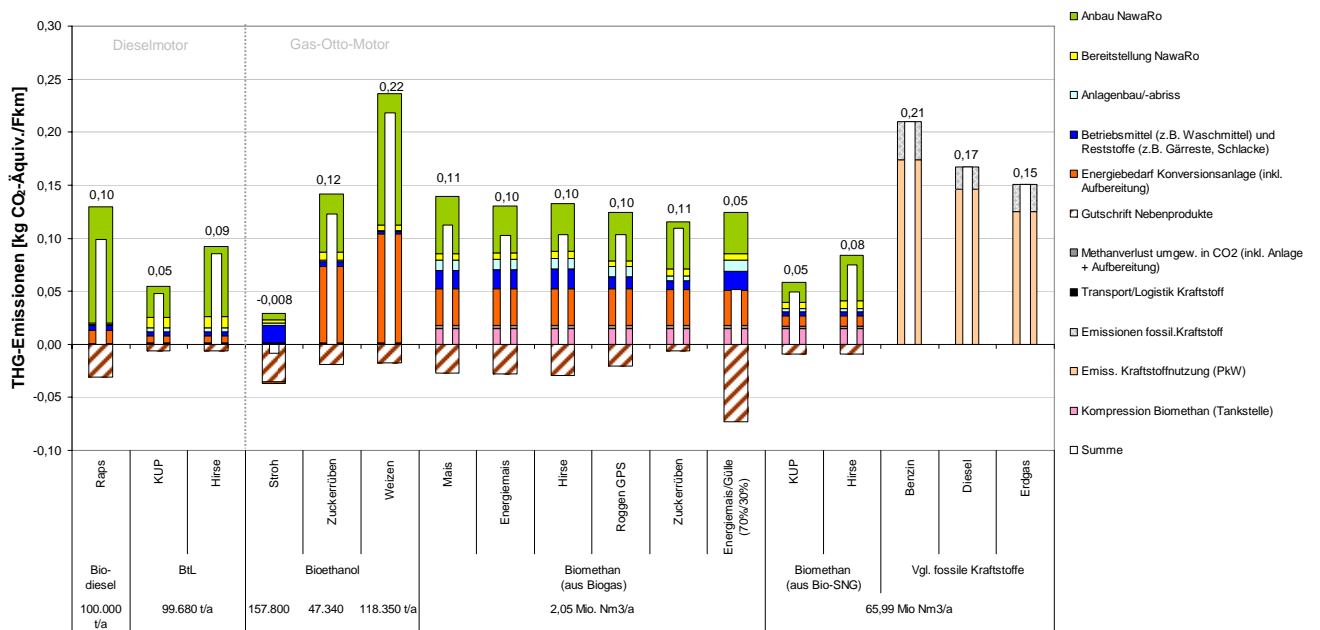
Demnach weist Bioethanol auf Stärkebasis (Weizenkorn), gefolgt von Bioethanol auf Zuckerbasis, die höchsten Treibhausgas-Emissionen im Vergleich der ausgewählten Biokraftstoffoptionen auf. Auch der Anbau von Raps für die Biodieselproduktion ist mit vergleichsweise hohen Anbauemissionen verbunden. Aufgrund der Gutschrift für das Kuppelprodukt Glycerin kann die Gesamtbilanz an Klimagasemissionen jedoch reduziert werden.

Im Falle der Verwendung von Reststoffen (z. B. landwirtschaftliche Reststoffe wie Stroh) zur Kraftstoffbereitstellung sind dagegen deutliche geringere Klimagasemissionen zu verzeichnen. Bei der Bereitstellung von Bioethanol aus Lignozellulose (Stroh) werden sogar Einsparungen von Klimagasemissionen erzielt, da die Gesamtbilanz aufgrund der Stromgut-



schrift aus dem Überschuss an Prozessenergie und der geringen Anbauaufwendungen für den Reststoff negativ ausfällt. Auch bei den Biogasoptionen ist es möglich, durch die Kombination von Energiepflanzen mit Reststoffen (wie Gülle, Festmist) als Biogassubstrate, die mit der Bereitstellung des Biokraftstoffes verbundenen Klimagasemissionen deutlich zu reduzieren. So zeigt der betrachtete Kraftstoffpfad für Biogas auf Basis von 70 % Energiemais mit 30 % Gülle im Vergleich zur Biokraftstoffbereitstellung aus 100 % Energiemais eine Minderung der Treibhausgasemissionen um etwa 50 %. Neben den eingesparten Aufwendungen aus dem Anbau der Biomasse kann für den Einsatz von Gülle als Reststoff zudem eine Gutschrift für die vermiedenen Emissionen, die bei der herkömmlichen Güllelagerung und -ausbringung auftreten, erfolgen. Durch eine Erhöhung des Anteils tierischer Exkremate am Substratmix kann dieser Effekt verstärkt werden. Die bilanzierten Klimagasemissionen der betrachteten Biogasoptionen, die ausschließlich auf den Einsatz von Anbaubiomasse basieren, stellen daher eher den oberen Bereich der Klimagasemissionen aus Biogas dar.

In welchem Umfang klimawirksamen Emissionen bezogen auf einen Fahrzeugkilometer für Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Energieträgern auftreten, ist in Abbildung 12 dargestellt.



\*ohne Kraftstoffnutzung der Biokraftstoffe im PKW

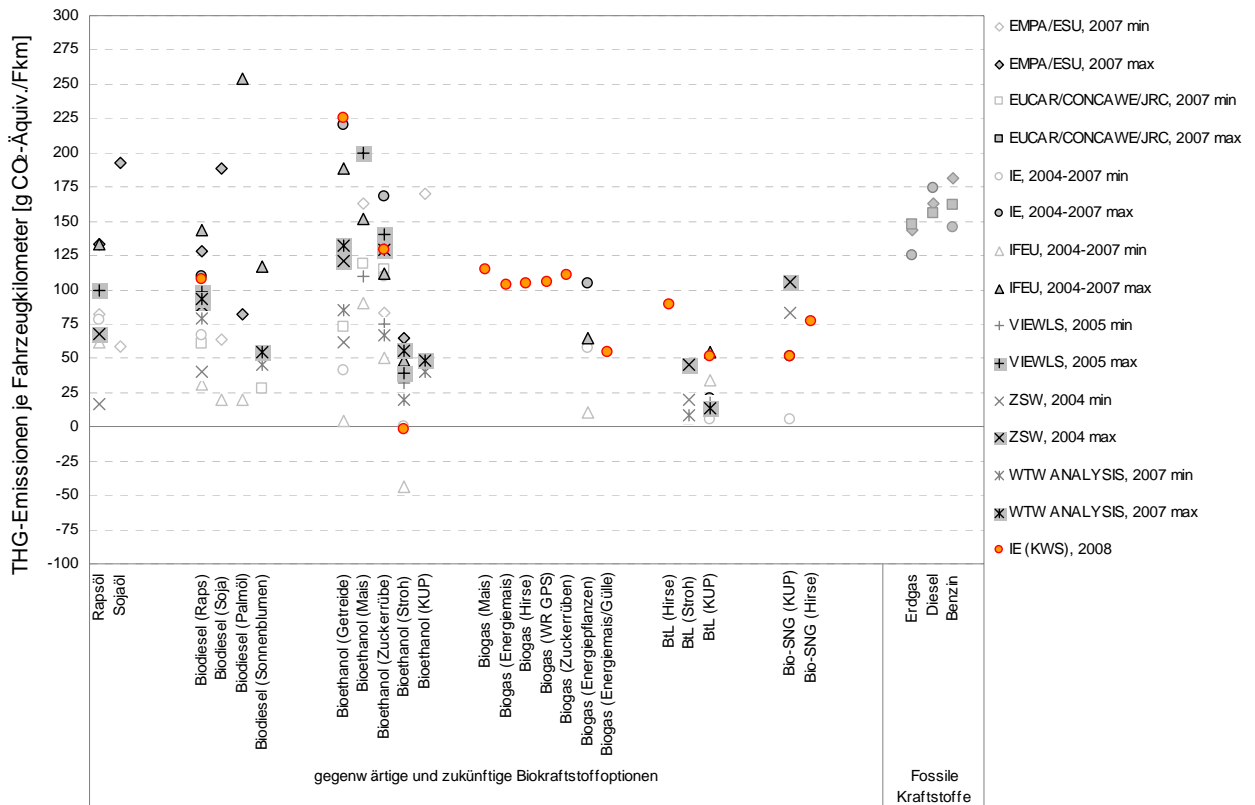
**Abbildung 12 THG-Emissionen verschiedener Biokraftstoffpfade je Fahrzeugkilometer im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen**

Die Grafik zeigt für die dargestellten Biokraftstoffe lediglich die Emissionen der Kraftstoffbereitstellung mit Bezug zum Fahrzeugkilometer. Die Emissionen der Kraftstoffnutzung der Biokraftstoffe im Fahrzeug sind hier nicht berücksichtigt. Da die wesentlichen Emissionen bei biogenen Kraftstoffen jedoch auf die Kraftstoffbereitstellung zurückgeführt werden können, ist die Nutzung des Biokraftstoffes im Pkw im Vergleich zu Benzin, Diesel oder Erdgas vernachlässigbar gering. Bei den fossilen Kraftstoffen dagegen werden die Emissionen sehr wesentlich durch die Nutzung im Fahrzeug bestimmt. Auch hier zeigen die zukünftigen Kraftstoffoptionen wie Bio-SNG und BtL neben Bioethanol aus Lignozellulose die deutlichsten Treibhausgasminderungspotenziale im Vergleich zum fossilen Energieträger. Während die Kraftstoffoption Bioethanol aus Lignozellulose im dargestellten Vergleich das größte Minderungspotenzial aufweist, liegen die Treibhausgasemissionen für Bioethanol auf Getreidebasis sogar über den Aufwendungen der fossilen Kraftstoffe. Folglich können alle betrachteten Biokraftstoffe – bis auf Bioethanol aus Getreide – im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten deutliche Treibhausgasminderungen je Fahrzeugkilometer erreichen.



### 5.2.3 Einordnung der Ergebnisse im Studienvergleich

Zur besseren Einordnung der bilanzierten Klimagasemissionen, werden die Ergebnisse der betrachteten Biokraftstoffpfade vergleichend externen und internen Studienergebnissen gegenübergestellt (Abbildung 13).



**Abbildung 13** THG-Emissionen der Biokraftstoffpfade je Fkm – Studienvergleich /9/, /15/, /16/, /17/, /18/, /19/, /24/

Zur Darstellung der Bandbreite der Studienergebnisse ist – sofern vorhanden - sowohl der Minimal- als auch der Maximal-Wert der jeweiligen Studien angegeben.

Die Ergebnisse für Biodiesel, Bioethanol aus Stroh und Zuckerrübe sowie Bio-SNG und BtL liegen in der Bandbreite der zum Vergleich herangezogenen Studien. Der Einsatz von Hirse für Bio-SNG und BtL-Kraftstoff stellt sich im Vergleich zur Verwendung von KUP aufgrund der Mehraufwendungen für den Anbau der Biomasse ungünstiger dar. Darüber hinaus ist anzumerken, dass der Einsatz halmgutartiger Substrate wie Hirse im Vergleich zu holzartigen Substraten höhere technische Anforderungen an den Verfahrensprozess für die Bereitstellung von Bio-SNG und BtL-Kraftstoffe stellt (u. a. Verschlackungsgefahr infolge niedriger Ascheschmelzpunkte).

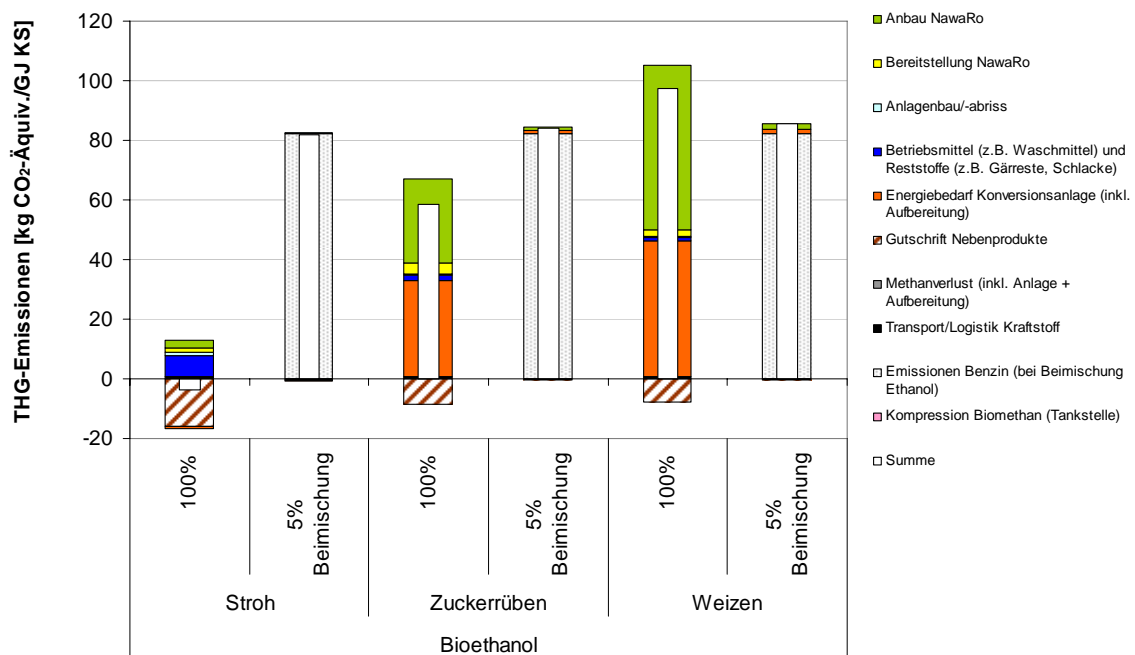


Die Treibhausgasemissionen für die Kraftstoffpfade Biomethan aus Biogas liegen – bis auf den Kraftstoffpfad aus Energiemais in Kombination mit Gülle – über den dargestellten Literaturwerten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für diese Kraftstoffpfade ausschließlich Anbaubiomasse als Rohstoff verwendet wird und für den Einsatz von Gülle weder eine Güllegutschrift noch Einsparungen aufgrund von Reststoffen berücksichtigt werden können. D.h. die bilanzierten Werte für Biomethan aus Biogas bei ausschließlichem Einsatz nachwachsender Rohstoffe stellen die obere Grenze der möglichen Treibhausgasemissionen dar. Zudem sind für den Anbau der Energiepflanzen im Vergleich zu den Default-Werten gemäß der Erläuterung zur BioNachV /20/ höhere Aufwendungen (z.B. für den Dieselbedarf, Düngung) (vgl. Anhang 2) entsprechend den Angaben des Auftraggebers berücksichtigt worden.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Option Bioethanol aus Getreide im Falle einer energetischen Nutzung der Reststoffe (Schlempe zur Biogasproduktion) hinsichtlich der Treibhausgasemissionen besser dargestellt werden kann. Da in der Praxis jedoch die Verfütterung der Reststoffe die Regel ist, wurde der praxisnähere Fall unterstellt. Zukünftige Anlagenkonzepte zur Erzeugung von Bioethanol, die z. B. durch die Vergärung der Schlempe die Synergieeffekte mit der Biogasproduktion nutzen und zudem den Energiebedarf z.B. aus regenerativen Energien decken, sind mit deutlich geringeren Klimagasemissionen verbunden. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand befinden sich derartige Anlagenkonzepte in der Planungs- bzw. Umsetzungsphase.

### 5.2.4 Exkurs: THG-Emissionen für Beimischungen von Biokraftstoffen

Derzeit wird Bioethanol in Deutschland nicht als reiner Kraftstoff eingesetzt, sondern als Zumischung zum fossilen Kraftstoff (Benzin) verwendet. Im Folgenden Exkurs werden daher die Klimagasemissionen für die Beimischung von Bioethanol im Vergleich zur 100%-igen Biokraftstoffnutzung dargestellt.



**Abbildung 14** Unterschiede bei den THG-Emissionen für Bioethanol im Vergleich der Beimischung zum Direktkraftstoff

Betrachtet man die Klimagasemissionen der dargestellten Bioethanolfpade als reine Kraftstoffnutzung, so ergeben sich bei Verwendung von Zuckerrüben geringere Treibhausgas-Emissionen als bei stärkebasierten Grundstoffen. Dies ist insbesondere auf die niedrigeren Belastungen aus der Kraftstoffvorkette der Zuckerrüben (Anbau und Energiebedarf des Bioethanolprozesses) zurückzuführen. Bioethanol auf Basis von Lignozellulose (Stroh) zeigt dagegen sogar negative Gesamtemissionen (Einsparungen), da es sich bei Stroh um einen Reststoff handelt, dessen Anbauaufwendungen vergleichsweise gering zu bewerten sind. Darüber hinaus wird bei der Herstellung von Bioethanol aus Stroh, neben der Düngergutschrift für das Nebenprodukt (Schlempe), ein Stromüberschuss erwirtschaftet, der ebenfalls als Gutschrift berücksichtigt wird.

Bei einem Beimischungsanteil von 5 % Bioethanol im Benzin ergeben sich dagegen nur relativ geringe Einsparpotenziale. Für alle drei betrachteten Anbaukulturen befinden sich die



Treibhausgas-Emissionen im Fall der Beimischung in etwa gleicher Größenordnung, da das Zumischen von 5 Vol.-% Ethanol energetisch nur etwa 3,4 % ausmacht /4/. Mit zunehmendem Biokraftstoffanteil reduzieren sich die Klimagasemissionen bei den Biokraftstoffoptionen aus Zuckerrüben und Stroh – jedoch nicht für die betrachtete Biokraftstoffoption aus Weizen.

### 5.3 Effekte für die Landwirtschaft

Mit dem Ausbau der energetischen Nutzung von Biomasse nimmt der Bedarf an Anbauflächen für Energiepflanzen deutlich zu. Nach Angaben der FNR e.V. werden in Deutschland im Jahr 2007 etwa 1,77 Mio. ha Ackerfläche zur Erzeugung von Biomasse für die energetische Nutzung in Anspruch genommen. Davon werden etwa 1,12 Mio. ha für die Produktion von Biodiesel aus Raps benötigt, etwa 250.000 ha für Ethanolproduktion aus zucker- und stärkehaltigen Biomassen und rd. 400.000 ha für den Anbau von Biogassubstraten /11/. Da die bundesstatistischen Zahlen nur die Stilllegungsflächen und Flächen mit Energiepflanzenprämie umfassen, dürften die tatsächlichen Anbauflächen für Energiepflanzen deutlich größer sein. Zumindest für die Anbaufläche für Biogassubstrate wird auf der Basis einer Abschätzung des IE ausgehend vom Anlagenbestand und der Einsatzsubstrate davon ausgegangen, dass Ende 2007 eine Fläche von rund 600.000 ha mit Energiepflanzen für die Biogasproduktion belegt ist.

Mit dem Anbau von Energiepflanzen ergibt sich für die Landwirtschaft eine neue Ausrichtung. Insbesondere Qualitätsaspekte, die bei der Nahrungs- oder Futtermittelproduktion von Bedeutung sind, besitzen im Energiepflanzenanbau geringere Bedeutung. Dagegen sind hohe Massenerträge, d. h. hohe Trockenmasseerträge je ha, die wichtigste Zielvorgabe des Energiepflanzenanbaus. Grundsätzlich steht für den Anbau von Pflanzen für die energetische Nutzung eine Vielzahl von ertragreichen Kulturpflanzen zur Verfügung. Gegenwärtig erfolgt der Energiepflanzenanbau in bereits etablierten Anbausystemen vorrangig mit annualen Kulturen. Dabei wird für die Biodieselproduktion in Deutschland Raps angebaut, während für den Einsatz in Biogasanlagen wegen seiner hohen Flächen- und Gaserträge bevorzugt Mais als Biogassubstrat eingesetzt wird. Neben Mais wird zur energetischen Nutzung auch Getreide und Gras angebaut.

Durch eine Ausweitung der Anbauflächen von Mais zur energetischen Nutzung kann es lokal und regional zu einer Verengung der Fruchtfolgen kommen. In diesem Zusammen-



hang werden gegenwärtig nachfolgende Kriterien in Bezug auf einen intensiveren Maisanbau diskutiert:

- Erosion
- Bodenverdichtung
- Erhöhte Pflanzenschutzmittelanwendung
- Verringerung der Biodiversität
- Nährstoffeinträge in Grundwasser und Gewässer
- Erhöhter Wasserverbrauch

Weiterhin kann es in ausgewählten Regionen Deutschlands (vor allem Regionen in Nord- und Süddeutschland mit ausgeprägter Viehhaltung) durch die zunehmende Attraktivität des Energiepflanzenanbaus dazu kommen, dass Landwirte bestehendes Grünland in Ackerland umwandeln, wodurch Konflikte mit den Zielen des Naturschutzes auftreten können. Eine solche Flächenumwandlung ist im Zuge der neuen BioNachV mit Hilfe der direkten Landnutzungsänderung zu berücksichtigen. D.h. durch die Flächenumwandlung ändert sich ggf. die Menge der in Boden und Vegetation gespeicherten Kohlenstoffmenge. Diese muss zukünftig in THG-Bilanzen berücksichtigt werden.

Da eine zu starke Ausrichtung auf Mais als Energiepflanze zu Fruchtfolgeproblemen führen kann und darüber hinaus mit mangelnder Akzeptanz in der Öffentlichkeit einhergeht, wird an alternativen Energiepflanzen mit ähnlich günstigen Eigenschaften geforscht. Dabei stellt die Hirse als Energiepflanze eine sehr viel versprechende Alternative zu Mais dar, da sie ebenso wie Mais zu den C4-Pflanzen gehört und damit eine sehr effiziente Photosyntheseleistung mit hohem Biomassertrag liefert /21/. Als Alternative zu Mais sind zudem Sudangras und Sonnenblumen in der Diskussion. Vorteilhaft beim Anbau der Alternativkulturen sind die späten Saattermine, die eine Zweitfruchtkultur ermöglichen. So kann z. B. eine Roggen-GPS zu Beginn der Saison als Vorfrucht und Mais, Hirse, Sudangras und Sonnenblumen als Nachfrucht angebaut werden /22/.

In Bezug auf den Rapsanbau wird insbesondere der hohe Pestizidbedarf diskutiert. Darüber hinaus ist bei dem Anbau von Raps zu beachten, dass die Fruchtfolge aus pflanzenbautechnischer Sicht nicht zu eng gestaltet werden sollte. Die Verengung des Rapsanbaues innerhalb der Fruchtfolge kann zu einer Zunahme des Schädlingsbefalls führen. Daher sind beim Rapsanbau Anbaupausen von mindestens drei Jahren einzuhalten /23/.

Beim Anbau von Energiepflanzen sind folglich die Einhaltung der Fruchtfolge sowie Flächenvorhaltungen von besonderer Bedeutung. Wird dies beachtet, so ist eine nennens-



werte Etablierung von Monokulturen – wie sie derzeit diskutiert wird – nicht zu erwarten. Zudem werden seitens der Agrarpolitik (z. B. Cross-compliance-Regelungen der EU) durch Forderungen nach einer ausgeglichenen Humusbilanz, sowie einer mindestens dreigliedrigen Fruchtfolge der Entwicklung von Monokulturen entgegengewirkt. Damit der erhöhte Flächenbedarf für Energiepflanzen neben den Ansprüchen der guten fachlichen Praxis der Landwirtschaft auch den Anforderungen einer nachhaltigen Bewirtschaftung entspricht, sollte der Biomasseanbau zudem an Nachhaltigkeitskriterien geknüpft werden.



## 6 Fazit

Für die Bereitstellung biogener Kraftstoffe steht eine Vielzahl von Optionen zur Verfügung, wobei deutliche Unterschiede hinsichtlich der Energie-, Klima- und Flächeneffizienz aufgezeigt werden können.

Betrachtet man ausschließlich die Bereitstellung der Biokraftstoffe, so sind mit der Produktion des Kraftstoffes in der Regel deutlich höhere Klimagasemissionen im Vergleich zur Bereitstellung fossiler Kraftstoffe verbunden.

Im Gesamtergebnis der ökologischen Betrachtung zeigt sich jedoch, dass durch die Bereitstellung und -nutzung von Biokraftstoffen in Fahrzeugen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen teilweise deutliche Einsparungen an Primärenergie (KEA fossil) und Treibhausgasemissionen je Fahrzeugkilometer erreicht werden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die fossilen Kraftstoffe einen Großteil ihrer Emissionen erst durch den Einsatz in Fahrzeugen, sprich mit der Kraftstoffnutzung erzeugen. So zeigt sich, dass die dargestellten Biokraftstoffpfade durch den Einsatz von Energiepflanzen zur Kraftstoffherstellung und -nutzung durchaus zum Klimaschutz beitragen können. Dabei besitzen Technologien, die neben Anbaubiomasse auch landwirtschaftliche Reststoffe verarbeiten können, ein erhebliches zusätzliches Potenzial zur Minderung des Bereitstellungsaufwandes und der Treibhausgasemissionen.

Im Vergleich der derzeit verfügbaren Kraftstofftechnologien erreicht Biomethan aus Biogas hinsichtlich der Fahrzeugkilometer je ha Anbaufläche die besten Ergebnisse. Betrachtet man auch zukünftige Optionen, führt BioSNG die Rangliste an. Dagegen ist der Kraftstoffpfad Bioethanol aus Getreide sowohl mit einer geringen Flächeneffizienz, wie auch mit deutlichen Mehraufwendungen an Primärenergie und hohen klimarelevanten Emissionen verbunden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass zukünftige Anlagenkonzepte für Bioethanol deutlich bessere Ergebnisse aufweisen können, wenn z.B. die energetische Reststoffnutzung und der Energiebedarf aus regenerativen Energien gedeckt werden. Grundsätzlich haben sowohl der Anbau der Rohstoffe, als auch der Betrieb der Konversionsanlagen bei fast allen betrachteten Kraftstoffoptionen wesentlichen Anteil am Energiebedarf (KEA fossil) und an den Treibhausgasemissionen, die mit der Bereitstellung und -nutzung des Biokraftstoffes verbunden sind.



Der Einsatz von Bioethanol aus Lignozellulose zeigt die geringsten Energieaufwendungen und Klimagasemissionen. Da Stroh als Reststoff betrachtet wurde, fällt der Anbau des Rohstoffes kaum ins Gewicht. Allerdings ist diese Kraftstoffoption noch nicht verfügbar und die Aussagen daher mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Auch die dargestellten Kraftstoffpfade BtL und Bio-SNG sind als zukünftige Kraftstofftechnologien zu betrachten, da sich diese Technologien erst im Demonstrationsstadium befinden. Zudem werden an die zukünftigen Technologien hohe Erwartungen hinsichtlich der gesteigerten Effizienz und somit verbesserten Energie- und Klimabilanzen geknüpft. Sofern die hier diskutierten Technologien im erwarteten Maße den Anforderungen gerecht werden, sind sie den derzeit verbreiteten Biokraftstoffoptionen – insbesondere Ethanol aus Getreide – klar vorzuziehen. Damit die Kraftstoffproduktion aus Biomasse einen spürbaren Marktanteil erreicht, bedarf es jedoch neben einer funktionierenden und effizienten Technik sowie den verfügbaren Biomassepotenzialen auch der erforderlichen politischen Zielsetzungen. So wird der zukünftige Ausbau der Biokraftstoffe entscheidend durch die zukünftigen politischen Rahmenbedingungen geprägt sein, die den Kraftstoffmix maßgeblich beeinflussen.

## Anhang

### Anhang 1 Annahmen der betrachteten Biokraftstoffpfade im Überblick

Annahmen	Biomethan aus Biogas	Biomethan aus Bio-SNG	Bioethanol			Biodiesel	BtL-Kraftstoffe
			Getreide (Weizenkorn)	Zuckerrüben	Lignozellulose (Stroh)		
Anlagengröße MW (Brennstoffleistung)	2,67 (~ 500 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /h Biogas zur Aufbereitung zu Biomethan nach Abzug des Eigenbedarfs für Fermenterbeheizung)	100					455
Kraftstoff Output	2,05 Mio. m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /a	65,99 m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /a	118.500 t/a	47.400 t/a	169.850 t/a	100.000 t/a	99.860 t/a
Transport der Anbaubiomasse	50 km (LKW)	150 km (LKW)	250 km (200 km Frachtschiff, 50 km LKW)	50 km (LKW)	50 km (LKW)	250 km (200 km Frachtschiff, 50 km LKW)	150 km (LKW)
Lagerverluste (bezog. auf FM)	5 % als Lager- und Silageverluste	8,3%	2,0%	5,0%	5,0%	2,0%	8,3%
Anmerkungen zur Konversionsanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ~8300 Bh/a</li> <li>• Laufzeit 20 Jahre</li> <li>• industrielle Anlage</li> <li>• Nassfermentation</li> <li>• Gärrestendlager abgedeckt und mit Gaserfassung</li> <li>• Biogasaufbereitung zu Biomethan (DWW)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8000 Bh/a</li> <li>• Laufzeit 20 Jahre</li> <li>• industrielle Anlage (FICFB-Vergasung),</li> <li>• Nickelkatalysator für Methanisierung</li> <li>• Methanaufbereitung durch Trocknung und CO<sub>2</sub>- Wäsche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8000 Bh/a,</li> <li>• Laufzeit 20 Jahre</li> <li>• industrielle Anlage</li> <li>• Prozessinterne Abwasseraufbereitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8000 Bh/a</li> <li>• Laufzeit 20 Jahre</li> <li>• industrielle Anlage</li> <li>• Prozessinterne Abwasseraufbereitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8300 Bh/a</li> <li>• Laufzeit 20 Jahre</li> <li>• industrielle Anlage</li> <li>• Prozessinterne Abwasseraufbereitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 7500 Bh/a</li> <li>• Laufzeit 20 Jahre</li> <li>• industrielle Anlage</li> <li>• Umesterungsmittel Methanol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8000 Bh/a</li> <li>• Laufzeit 20 Jahre</li> <li>• industrielle Anlage</li> <li>• Flugstromvergasung</li> <li>• Gaskonditionierung, synthese und KS-Konditionierung;</li> <li>• Prozessinterne Abwasseraufbereitung;</li> </ul>
Energiebedarf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10% der Biogasmenge zur Deckung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlage;</li> <li>• Stromeigenbedarf der Biogasanlage 6%;</li> <li>• Aufbereitungsanlage 0,3 kWh<sub>e</sub>/m<sup>3</sup> Biogas;</li> </ul>	Strom	Strom	Strom	Prozessenergie in Form von Strom und Dampf wird durch die Verbrennung von Lignin, das als Bestandteil des Stroh aus dem Prozess gewonnen wird, bereitgestellt; für den Überschuss an Energie erfolgt eine Stromgut-schrift	Strom Dampf	Dampfbereitstellung intern; Strom

Annahmen	Biomethan aus Biogas	Biomethan aus Bio-SNG	Bioethanol			Biodiesel	BtL-Kraftstoffe
			Getreide (Weizenkorn)	Zuckerrüben	Lignozellulose (Stroh)		
Betriebsmitteleinsatz		<ul style="list-style-type: none"> <li>Natriumhydroxid,</li> <li>RME</li> <li>Dolomit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>anorg. Chemikalien</li> <li>Natriumhydroxid,</li> <li>Phosphorsäure,</li> <li>Schwefelsäure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>anorg. Chemikalien</li> <li>Natriumhydroxid,</li> <li>Phosphorsäure,</li> <li>Schwefelsäure,</li> <li>Dampf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>anorg. Chemikalien,</li> <li>Schwefelsäure,</li> <li>Ammoniak</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Chlorwasserstoff,</li> <li>Calciumhydroxid,</li> <li>Natriumcarbonat,</li> <li>Bleicherde,</li> <li>Stickstoff</li> </ul>	
Reststoffe und Kuppelprodukte (Gutschrift)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gärreste als Düngereinsatz (Düngergutschrift)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>N- und P-Dünger (Ammoniumnitratphosphat)</li> <li>K-Dünger (Kaliumchlorid)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transportaufwendungen für Schlacke als Rückstand</li> <li>Wärmegutschrift (Einspeisung der Wärmeleistung mit 3000 h/a in ein Wärmenetz)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Futtermittelgutschrift für DDGS und Vinasse (Ersatz von Soja-schrot)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Futtermittelgutschrift für Rückstände Vinasse + Rübenschnitzel (Ersatz von Gerste)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Düngergutschrift für Nebenprodukt Schlempe (N, K)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>N-Dünger (Ammoniumnitratphosphat)</li> <li>K-Dünger (Kaliumchlorid)</li> </ul> </li> <li>Stromgutschrift</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Futtermittelgutschrift für Rückstände Rapspresskuchen, Fettphase und Filterkuchen (Ersatz von Gerste);</li> <li>Gutschrift für Rohglycerin (Ersatz von Ethylenoxid für Chemische Industrie)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gutschrift für das Nebenprodukt Naphtha als Kraftstoff (Ersatz foss. Naphtha 1:1);</li> <li>Transportaufwendungen für Schlacke als Rückstand</li> <li>Abwasser</li> <li>Filterstaub</li> </ul>
Emissionen beim Anlagenbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> <li>Methanverlust 1% der produzierten Biogasmenge Betrieb der BGA /</li> <li>Methanemissionen bei der Biogasaufbereitung zu Biomethan über Nachverbrennung im Oxikat zu CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig umgesetzt;</li> <li>Emissionen für die Ausbringung der Gärreste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Methanschlupf 1,5%/ m<sup>3</sup> Methan</li> <li>Methanemissionen bei der Gasaufbereitung zu Biomethan über Nachverbrennung im Oxikat zu CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig umgesetzt</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>Methanverlust 4 % des im Synthesegas enthaltenen Methananteils; entspricht 1,62% Methananteil (massenbezogen)</li> </ul>
Transport/Logistik des Kraftstoffes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transport des aufbereiteten Biomethans 100 km;</li> <li>Kompression auf 250 bar (Tankstelle)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transport des aufbereiteten Biomethans 100 km;</li> <li>Kompression auf 250 bar (Tankstelle)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transport des Kraftstoff 100 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transport des Kraftstoff 100 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transport des Kraftstoff 100 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transport des Kraftstoff 100 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transport des Kraftstoff 100 km</li> </ul>


**Anhang 2 Aufwendungen für den Anbau der betrachteten Energiepflanzen**

Parameter	Einheit	Mais	Energie- mais	Sorghum (Hirse)	Zucker- rüben	Winter- roggen GPS	Raps (Korn)	Winter- weizen (Korn)	Winter- weizen Stroh
Kraftstoffbedarf aller Feldarbeitsgänge	l/ha	147,17	158,42	159,67	205,82	168,57	126,30	97,50	5,00
Saatgut	kg/ha	10,20	13,60	8,00		59,50	3,00	170,00	
N - Düngung nach Entzug	kg/ha	170,00	200,00	180,00	120,00	140,00	180,00	170,00	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - Düngung nach Entzug	kg/ha	86,00	110,00	150,00	70,00	70,00	70,00	80,00	
K <sub>2</sub> O - Düngung nach Entzug	kg/ha	190,00	220,00	250,00	150,00	140,00	100,00	140,00	
CaO - Düngung nach Entzug	kg/ha	70,00	96,00	60,00	65,00	50,00	80,00	38,50	
Pflanzenschutzmittel inkl. Beize	l/ha	5,26	5,26	5,26	11,94	2,18	8,95	6,47	

**Anhang 3 Hektarerträge in Abhängigkeit von der Anbaukultur**

Fruchtart	Ertrag in t FM/ha
Raps (Korn)	3,6
Winterweizen Stroh (mit Restverbleib)*	5,6
Winterweizen (Korn)	7,0
Winterweizen Stroh	8,0
Hirse (für Bio-SNG / BtL)**	24,0
KUP	24,0
Winterroggen GPS	35,0
Mais	43,3
Hirse (für Biogas)	60,0
Energiemais	64,7
Zuckerrüben	65,0

(Quelle: KWS, Annahmen IE\*\*/\*\*)

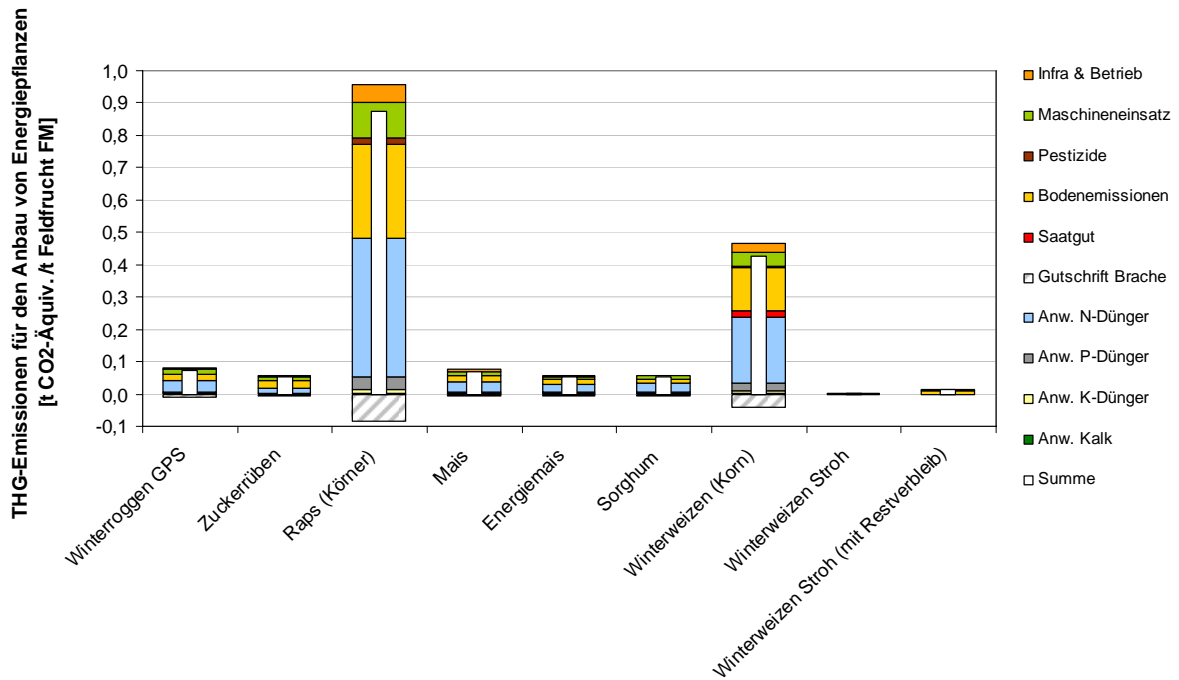
\* Annahme: 30 % des Strohs verbleibt auf dem Feld zur Erhaltung des Bodengefüges/ Humusbilanz

\*\* Für die Bio-SNG und BtL-Produktion ist der Einsatz trockener Substrate mit hohen TS-Gehalten (ca. 70 %) erforderlich. Der Hektarertrag von Hirse (60 t/ha) bezieht sich jedoch auf einen TS-Gehalt von rd. 28 % TS je Frischmasse und gilt für Hirse, die z. B. für die Biogasproduktion als Ganzpflanzensilage eingesetzt wird. Für den Einsatz von Hirse für die Konversionsprozesse Bio-SNG und BtL wird daher ein geringerer Hektarertrag bezogen auf die FM (analog KUP) unterstellt.



#### Anhang 4 Ertragsbezogene Klimagasemissionen je t Frucht (Frischmasse)

In der Folgenden Abbildung sind die ertragsbezogenen Klimagasemissionen für den Anbau verschiedener Energiepflanzen je t Frucht (Frischmasse) dargestellt.



**Abbildung 15 THG-Emissionen für den Anbau verschiedener Energiepflanzen je t Frischmasse**

Der Anbau von Raps und Winterweizen zeigt die höchsten Treibhausgas-Emissionen je t Frucht, da sich die Ausbeute lediglich auf die Körner bezieht, während die anderen Energiepflanzen die gesamte Pflanze (Ganzpflanze) beinhalten. Aufgrund des geringen Hektarertrages ( $t_{FM}/ha$ ) bezogen auf die Frischmasse relativieren sich die Treibhausgas-Emissionen für Raps und Winterweizen (Korn) im Vergleich zu den anderen Anbaukulturen (vgl. Abbildung 10).



### Anhang 5 Energieinput-/Output-Verhältnisse

In der folgenden Tabelle sind die Input-Outputverhältnisse als direkte Effizienz des betrachteten Systems dargestellt. Für die Interpretation des KEA ist neben der Darstellung der Input-Output-Verhältnisse häufig auch die Bezugnahme auf die Nettoenergiegewinne in der Diskussion /25/.

Dargestellt sind in der folgenden Tabelle die Energieaufwendungen aus fossilen Energieträgern (KEA fossil). Zu berücksichtigen ist, dass als Bilanzierungsverfahren die Gutschriftenmethode herangezogen wurde.

Kraftstoffpfad	Fruchtart	Anlagenkapazität	Input-/Output-Verhältnis (KEA)	
<b>Biokraftstoffe</b>	Bio-diesel	Raps	100.000 t/a 1 : 2,5	
	BtL	KUP	99.680 t/a 1 : -7,6	
		Hirse		1 : 14,4
	Bioethanol	Stroh	157.800 t/a 1 : 21,7	
		Zuckerrüben	47.340 t/a 1 : 1,4	
		Weizen	118.350 t/a 1 : 0,9	
	Biomethan (aus Biogas)	Mais	2,05 Mio. Nm <sup>3</sup> /a 1 : 1,6	
		Energiemais		1 : 1,7
		Hirse		1 : 1,7
		Winterroggen GPS		1 : 1,7
Zuckerrüben		1 : 1,6		
Biomethan (aus Bio-SNG)	Energiemais/Gülle	1 : 2,1		
	KUP	65,99 Mio. Nm <sup>3</sup> /a 1 : 3,8		
			Hirse	1 : 2,7
<b>fossile Kraftstoffe</b>	Benzin/ Diesel		1 : 0,8	
	Erdgas		1 : 0,9	

Da für den BtL-Prozess hohe Gutschriften für das Kuppelprodukt Naphtha angerechnet wurde, ergibt sich ein hoher Kraftstoffoutput je Energieinput. Für BtL-Kraftstoff aus KUP ist aufgrund der Gutschriften und des angenommen effizienten Prozesses sogar ein negativer Energieaufwand dargestellt. Da für Stroh als Reststoff kaum Aufwendungen für den Anbau angerechnet wurden, ergibt sich für die Kraftstoffoption Bioethanol aus Stroh ebenfalls ein hoher Kraftstoffenergieertrag im Vergleich zum Primärenergieaufwand (fossile Energieträger).

**Abkürzungsverzeichnis**

a	Jahr
Bh	Betriebsstunden
BioNachV	Biomassenachhaltigkeitsverordnung
BtL	Biomass to liquid
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Kohlenstoffdioxid- Äquivalente
CCS	combined combustions systems
DDGS	Distillers Dried Grains with Solubles
EU	Europäische Union
FAME	Fettsäuremethylester
ff.	folgende
Fkm	Fahrzeugkilometer
FM	Frischmasse
FT	Fischer-Tropsch
FT-KW	Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe
GE	Getreideeinheiten
GJ	Gigajoule
GPS	Ganzpflanzensilage
H <sub>2</sub> O	Wasser
ha	Hektar
i.d.R.	In der Regel
K	Kalium
Kg	Kilogramm
KS	Kraftstoff
KSÄ	Kraftstoffäquivalent
KUP	Kurzumtriebsanlage
L	Liter
MJ	Megajoule
N	Stickstoff



---

N <sub>2</sub> O	Distickstoffoxid (Lachgas)
oTS	Organische Trockensubstanz
P	Phosphor
ppm	Parts per million
SNG	Synthetic natural gas
t	Tonne
THG	Treibhausgas
TS	Trockensubstanz
u. a.	Unter anderem
Vgl.	vergleiche

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1	Klimagase und Klimagasfaktoren bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren nach IPCC 2001 /5/.....	4
Tabelle 2	Betrachtete Fruchtarten entsprechend der Biokraftstoffpfade .....	11
Tabelle 3	Energieaufwand je Fahrzeugkilometer in Abhängigkeit vom Kraftstoff /9/.....	19



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Darstellung des Untersuchungsrahmens entlang der Prozesskette .....	3
Abbildung 2	Darstellung der Konversionspfade zum "Bio-Kraftstoff" /6/ .....	5
Abbildung 3	Überblick über die gegenwärtigen und zukünftigen Biokraftstofftechnologien im Vergleich zu anderen Optionen der energetischen Biomassenutzung (Quelle: IE, eigene Darstellung).....	5
Abbildung 4	Überblick über die betrachteten Biokraftstoffpfade (IE, eigene Darstellung).....	13
Abbildung 5	Kraftstoffenergieertrag ausgewählter Biokraftstoffpfade je Hektar (GJ/ha) .....	18
Abbildung 6	Kraftstoffenergieertrag ausgewählter Biokraftstoffpfade je Hektar bezogen auf das Kraftstoffäquivalent.....	19
Abbildung 7	Fahrzeugkilometer ausgewählter Biokraftstoffpfade je Hektar .....	20
Abbildung 8	Bereitstellung verschiedener Biokraftstoffe: Spezifischer Energieaufwand (KEA fossil) je GJ Kraftstoffinhalt im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen.....	21
Abbildung 9	Spezifischer Energieaufwand (KEA fossil) je Fahrzeugkilometer verschiedener Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen .....	23
Abbildung 10	THG-Emissionen für den Anbau verschiedener Energiepflanzen je Hektar .....	25
Abbildung 11	Bereitstellung verschiedener Biokraftstoffe: THG-Emissionen je GJ Kraftstoffinhalt im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen .....	26
Abbildung 12	THG-Emissionen verschiedener Biokraftstoffpfade je Fahrzeugkilometer im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen.....	28
Abbildung 13	THG-Emissionen der Biokraftstoffpfade je Fkm – Studienvergleich /9/, /15/, /16/, /17/, /18/, /19/, /24/ .....	29
Abbildung 14	Unterschiede bei den THG-Emissionen für Bioethanol im Vergleich der Beimischung zum Direktkraftstoff .....	31
Abbildung 15	THG-Emissionen für den Anbau verschiedener Energiepflanzen je t Frischmasse .....	41

**Anhang-Verzeichnis**

Anhang 1	Annahmen der betrachteten Biokraftstoffpfade im Überblick.....	37
Anhang 2	Aufwendungen für den Anbau der betrachteten Energiepflanzen .....	39
Anhang 3	Hektarerträge in Abhängigkeit von der Anbaukultur.....	40
Anhang 4	Ertragsbezogene Klimagasemissionen je t Frucht (Frischmasse).....	41
Anhang 5	Energieinput-/Output-Verhältnisse .....	42



## Literaturverzeichnis

- /1/ Deutscher Bundestag: Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften (Biokraftstoffquotengesetz - BioKraftQuG). vom 18.12.2006, verkündet in Jahrgang 2006 Nr. 62 vom 21.12.2006
- /2/ ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsche und Englische Fassung, DIN EN ISO 14040:2006, 10/2006
- /3/ ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Deutsche und Englische Fassung, DIN EN ISO 14044: 2006, 10/2006
- /4/ Institut für Energetik und Umwelt gGmbH: Schlüsseldaten Klimagasemissionen. Studie im Auftrag der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (ufop), Leipzig, 2007
- /5/ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Third Assessment Report (TAR). Cambridge University Press, Cambridge, 2001
- /6/ Kaltschmitt, M.; Thrän, D.: Status quo und Potenziale der energetischen Biomassenutzung in Deutschland – Wozu sollen welche Potenziale genutzt werden? In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR)/ Bundesverband BioEnergie (BBE) (Hg.): Ausbau der Bioenergie – im Einklang mit dem Natur- und Umweltschutz?! Eine Standortbestimmung. Tagung am 10. Februar 2004, Landesvertretung Schleswig Holstein, Berlin.
- /7/ Mozaffarian, M.; Zwart, R.W.R.; Boerrigter, H.; Deurwaarder, E. P.; Kersten, S. R. A.: "Green Gas" as SNG (Synthetic Natural Gas) - A Renewable Fuel With Conventional Quality. Energy research Centre of the Netherlands (ECN). Contribution to the "Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion" Conference 30 August to 2 September 2004, Victoria, Vancouver Island, BC, Canada, 2004
- /8/ Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry: Methanation and Methane Synthesis. Gas production, Volume 15, 6. überarb. Ausgabe, Wiley-VCH, 2002
- /9/ Institut für Energetik und Umwelt gGmbH: Analyse und Evaluierung von Anlagen und Techniken zur Produktion von Biokraftstoffen, im Auftrag der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg, Leipzig, 2007



- /10/ Internet-Quelle: <http://www.biosicherheit.de/de/raps/landwirtschaft/50.doku.html>  
(Zugriff am 03.12.07)
- /11/ FNR e.V., Grafik zur Flächennutzung für die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Internet-Quelle: [www.fnr.de](http://www.fnr.de), (Zugriff am 03.12.07)
- /12/ Spath, P. L.; Dayton, D. C.: Preliminary Screening - Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, 2003
- /13/ Thrän, D.; Müller-Langer, F.; Lenz, Volker, Brauer, S., Weber, M.: Potenziale und Nutzungspfade für flüssige Biobrennstoffe zur Wärmeengewinnung. Studie im Auftrag der IWO (Institut für wirtschaftliche Oelheizung e. V.), Leipzig, 2007
- /14/ Institut für Energetik und Umwelt gGmbH: vorhandene Datenbasis, Leipzig, 2005/2006
- /15/ Quirin, M., Gärtner, S. O., Pehnt, M., Reinhardt, G. A.: CO<sub>2</sub>-Studie - CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe: Eine Bestandsaufnahme. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), Heft 789, Frankfurt am Main, 2004
- /16/ EUCAR, CONCAWE, JRC/IES: Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Version 2b, May 2006
- /17/ EUCAR, JRC/IES (the Institute for Environment and Sustainability of the EU Commission's Joint Research Centre ) et al, Well-To-Wheels Analysis Of Future Automotive Fuels And Powertrains In The European Context, Well-To-Tank Report, Version 2c, March 2007
- /18/ VIEWLS WP2: Environmental and economic performance of biofuels, Madrid 2005
- /19/ Zah, R. et al.: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen – Schlussbericht, Bern 2007
- /20/ Fehrenbach, H., Giegrich, J., Gärtner, S. O., Reinhardt, G., Rettenmaier, N.: Klimagasbilanzen zur Biomassenachhaltigkeitsverordnung (BioNachV). Erläuterungen



zur Berechnung der Default-Werte, Anlage 2. Entwurf vom November 2007, Heidelberg, 2007

- /21/ C.A.R.M.E.N. e.V.(Hrsg.): NAWAROS – Nachwachsende Rohstoffe – Produkte, Projekte, Politik, Ausgabe 9/2007
- /22/ Meier, D.: Fruchtfolgen durch Artenvielfalt auflockern, Energiepflanzenbautag der LWK Niedersachsen. In: Energiepflanzen Nr. 5/2007
- /23/ UFOP e.V., Internet-Quelle: <http://www.ufop.de/706.php>, (Zugriff am 05.12.07)
- /24/ FNR e.V. (Hrsg.): Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Gülzow, 2007
- /25/ Reinhardt, G., Jungk, N. C.: KEA und regenerative Energieträger: Methodische Besonderheiten und Aussagekraft der Ergebnisse. Heidelberg, 1999