

# Biofuels – Which is the Most Economic One?#

Gunter W. Festel\*

**Abstract:** Taking an oil price of US\$ 60 per barrel both biodiesel and bioethanol produced in Europe from wheat are not profitable. Oil producers' high margins are solely due to current mineral oil tax concessions. At present, biomass-to-liquids (BTL) fuel cannot be produced competitively. At an oil price of US\$ 60, only bioethanol and biobutanol produced on a large scale from lignocellulose-containing raw materials have the potential to be produced competitively. Analysis of the technologies in this field shows that there are interesting new technological developments in Europe for the hydrolysis, fermentation and purification steps.

**Keywords:** Biobutanol · Biodiesel · Bioethanol · Biofuels · Biomass-to-Liquid

## 1. Einleitung

Wegen der steigenden Preise für fossile Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle sowie der CO<sub>2</sub>-Problematik hat die Entwicklung alternativer Kraftstoffe auf Basis von Biomasse mittlerweile eine grosse Bedeutung erlangt. Je nach Rohstoff und Herstellungsverfahren sind Biokraftstoffe wie Biowasserstoff, Biomethanol, Biodimethylether, Biomass-to-Liquid- (BTL-) Kraftstoffe, Bioethanol, Biobutanol, Biogas, Biodiesel oder reines Pflanzenöl zugänglich (Abb. 1).

Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Biokraftstoffen und Einflussfaktoren bei der Bewertung der Kraftstoffe besteht im Moment kein klares Meinungsbild. Zum einen gibt es zahlreiche Untersuchungen, welche die Vorteile von Biokraftstoffen darstellen.<sup>[1–8]</sup> Demgegenüber gibt es aber auch insbesondere bei Vertretern der Mineralölindustrie die Meinung, dass Biokraft-

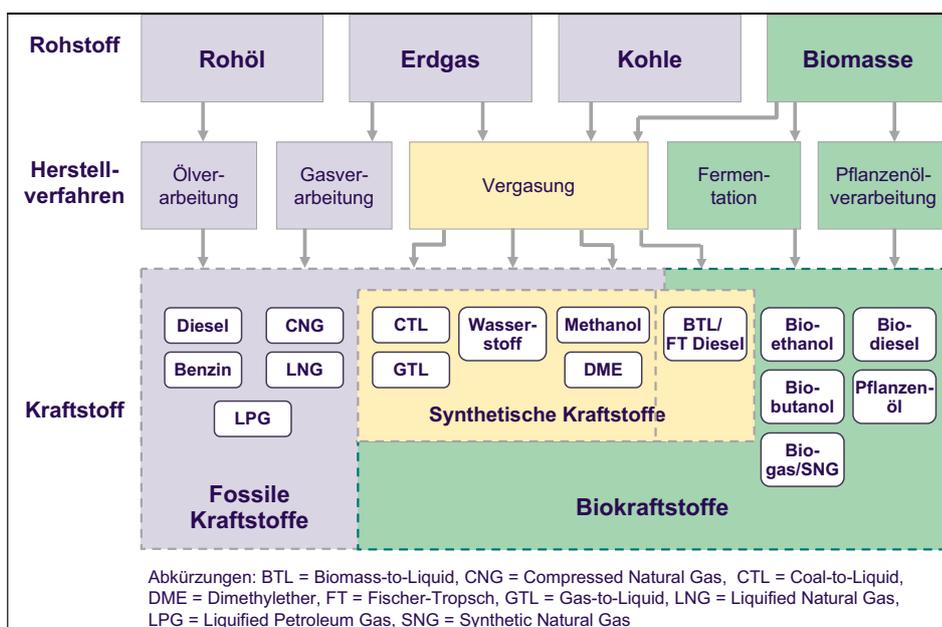


Abb. 1. Kategorisierung von Kraftstoffen anhand der Rohstoffe und Herstellungsverfahren

stoffe im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen nicht wettbewerbsfähig hergestellt werden können. Den Befürwortern von Biokraftstoffen wird unrealistisches Wunschenken vorgeworfen und die aktuelle Entwicklung als Modeerscheinung abgetan.

In diesem komplexen Umfeld wurde eine Untersuchung durchgeführt, um durch eine vergleichende Betrachtung der relevanten Bewertungskriterien aus Sicht der Endverbraucher die kurz- bis mittelfristigen Realisierungschancen von Biokraftstoffen abzuschätzen. Die Kernfrage dabei war: Wie können bei Beachtung der relevanten Einflussfaktoren für den Markterfolg von Biokraftstoffen interessante technologische Entwicklungen identifiziert werden, um

frühzeitig in diese Schlüsseltechnologien zu investieren?

## 2. Bewertungskriterien für Biokraftstoffe

Wegen der vielen verschiedenen Einflussfaktoren bei Biokraftstoffen, wie etwa technischen, wirtschaftlichen und ökologischen/politischen Faktoren, besteht die Gefahr, sich bei der Identifikation und Bewertung interessanter Technologien in Details zu verlieren (Abb. 2). Zur Identifikation interessanter Biokraftstofftechnologien wurden die komplexen Zusammenhänge auf die wesentlichen Einflussfaktoren redu-

\*Correspondence: Dr. G. W. Festel  
 FESEL CAPITAL  
 Schürmattstrasse 1  
 CH-6331 Hünenberg  
 Tel.: +41 41 780 16 43  
 Mobile: +41 796 52 71 12  
 E-Mail: gunter.festel@festel.com

#Presented at the Swiss Chemical Society Scientific Forum 'Energy and Raw Materials – The Contributions of Chemistry and Biochemistry in the Future', ILMAC, Sept. 25–28, 2007.

Technische Faktoren	Wirtschaftliche Faktoren	Ökologische / Politische Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rohstoffversorgung</li> <li>• Herstellverfahren</li> <li>• Motoren- / Antriebs-technologien</li> <li>• Infrastrukturanforderungen / Investitionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftstoffkosten (inkl. Subventionen und Steuern)</li> <li>• Motorenumrüstungskosten</li> <li>• Infrastruktur- / Verfügbarkeitskosten</li> <li>• Handelsbilanzeffekte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Treibhausgasemissionen und Reduktionskosten</li> <li>• Unterstützung lokaler Bauern</li> <li>• Effiziente Landnutzung / Nutzung für Lebensmittel vs. Kraftstoff</li> <li>• Geringere Abhängigkeit vom Erdöl</li> </ul>

Abb. 2. Einflussfaktoren zur Bewertung von Biokraftstoffen

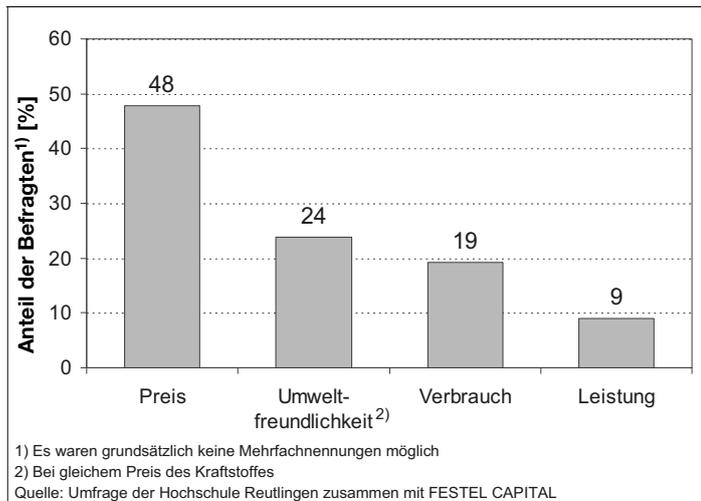


Abb. 3. Wichtigste Merkmale eines Kraftstoffs aus Sicht der Autofahrer

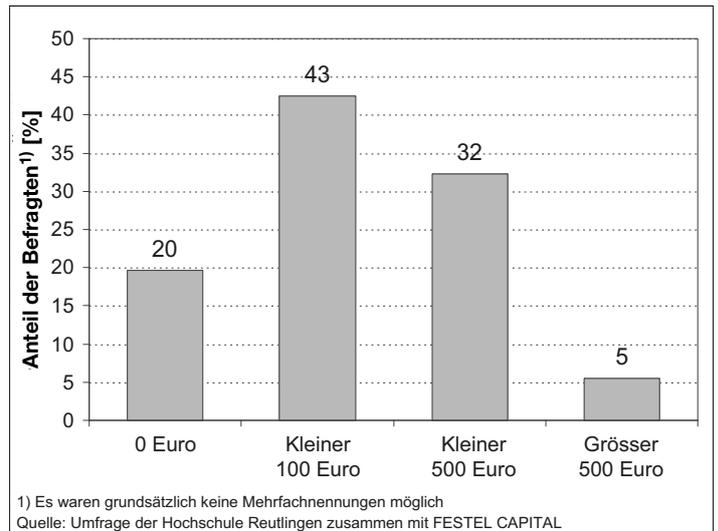


Abb. 4. Maximal akzeptierte Umrüstungskosten aus Sicht der Autofahrer

Kundenakzeptanz	Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein höherer Preis im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen</li> <li>• Normale Nutzung der vorhandenen Kraftfahrzeuge                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine Verlust an Leistung und Reichweite</li> <li>- Keine bzw. nur geringe Umrüstkosten</li> </ul> </li> <li>• Hohe Verfügbarkeit und leichte Handhabung wie bei herkömmlichen Kraftstoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wettbewerbsfähige Rohstoff- und Produktionskosten</li> <li>• Keine zusätzliche Distributions-/Infrastrukturkosten</li> <li>• Problemlose Beimischung zu herkömmlichen Kraftstoffen</li> <li>• Chemische/physikalische Eigenschaften wie bei herkömmlichen Kraftstoffen (z.B. Energiegehalt)</li> </ul>

Abb. 5. Voraussetzungen für Kundenakzeptanz und daraus abgeleitete Anforderung an Biokraftstoffe

ziert, um einen Vergleich der verschiedenen Biokraftstoffe durchführen zu können.

In einem ersten Schritt wurde das Kundenverhalten bei Biokraftstoffen näher analysiert. Dazu wurde im Sommer 2006 zusammen mit der Hochschule Reutlingen eine Befragung von rund 200 Autofahrern zu der Akzeptanz von Biokraftstoffen durchgeführt. Die Ergebnisse waren nicht überraschend. Für fast die Hälfte der Befragten ist der Preis das alleinige Kaufkriterium und nur knapp ein Viertel der Befragten achtet bei gleichem Preis des Kraftstoffes auf die Umweltfreundlichkeit (Abb. 3). In Bezug auf Umrüstkosten ist die Bereitschaft gering, Investitionen über 100 Euro zu tätigen. Nur etwas mehr als ein Drittel der Befragten wäre dazu bereit (Abb. 4). Umrüstkosten über 500 Euro würden sogar nur von jedem Zwanzigsten akzeptiert werden.

Wichtige Kriterien aus Sicht der Autofahrer sind, im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen, keine höheren Preise, keine Einschränkungen bei Motorenleistung und Reichweite, keine grösseren Motorenumrüstkosten sowie eine hohe Verfügbarkeit und leichte Handhabung. Biokraftstoffe müssen deshalb die folgenden Kriterien erfüllen: wettbewerbsfähige

Produktionskosten, keine zusätzlichen Distributions-/Infrastrukturkosten und problemlose Mischbarkeit mit herkömmlichen Kraftstoffen durch ähnliche chemische/physikalische Eigenschaften (Abb. 5).

Der entscheidende Faktor für den Markterfolg von Biokraftstoffen sind damit in erster Linie die Kosten für den Autofahrer und hier insbesondere der Preis des Kraftstoffs an der Tankstelle. Diese Aussage bestätigt die Tatsache, dass bei Produkten, deren Umweltvorteile nicht direkt gesehen werden können, das Argument der Umweltfreundlichkeit in der Regel bei Verbrauchern keine grosse Rolle spielt. Werden die genannten Dinge berücksichtigt, so reduziert sich die Gruppe der kurz- bis mittelfristig realisierbaren Biokraftstoffe auf Bioethanol, Biobutanol, Biodiesel und BTL-Kraftstoff.

### 3. Biokraftstoffe der 1. Generation

Biokraftstoffe der 1. Generation wie Bioethanol aus zucker- oder stärkehaltigen Rohstoffen und Biodiesel sind am Markt etabliert, d.h. sie werden schon seit einiger Zeit in grösseren Mengen hergestellt und als Kraftstoff eingesetzt.

#### 3.1. Bioethanol der 1. Generation

Nach DIN EN 228 ist in Deutschland eine Beimischung von max. 5% Ethanol zu Benzin zulässig (E5-Kraftstoff). Herkömmliche Ottomotoren vertragen bis zu 10% Ethanolbeimischung, d.h. höhere Anteile erfordern eine Motorenanpassung. Bioethanol kann auch für die Herstellung von Ethyltertiärbutylether (ETBE) verwendet werden, welcher normalem Otto-Kraftstoff zur Verbesserung der Klopfestigkeit zugesetzt wird. ETBE hat mittlerweile Methyltertiärbutylether (MTBE), welches aus fossilen Rohstoffen hergestellt wird, weitgehend ersetzt und kann bei geltenden Normen bis zu 15% beige-mischt werden. Darüber hinaus kann E85-Kraftstoff (85% Ethanol, 15% Benzin) als Treibstoff verwendet werden. Dafür sind allerdings spezielle Ethanolmotoren bzw. Flexible Fuel Vehicles (FFVs) notwendig, die beliebige Benzin-Ethanol-Mischungen bis zu einem Anteil von 85% Ethanol verwenden können. Diese sind in Brasilien sowie den USA stark verbreitet. In Europa ist Schweden Vorreiter in der Nutzung von Bioethanol. Seit 2005 bieten einige Hersteller FFVs auch in Deutschland an. Der Mehrverbrauch gegenüber einem mit Benzin betriebenen Auto liegt wegen der

niedrigeren Energiedichte des Ethanol bei etwa 50%. Auch Ethanol-Diesel-Mischungen sind möglich und werden in einzelnen Ländern wie Brasilien und den USA eingesetzt.

Bioethanol wird durch den anaeroben Abbau von Kohlenhydraten zu Ethanol mit Hilfe von Mikroorganismen wie etwa Hefen gewonnen. Neben stärkehaltigen Pflanzen wie Weizen, Roggen oder Mais sind Zuckerrohr und Zuckerrüben die am häufigsten verwendeten Ausgangsmaterialien. Während zuckerhaltige Pflanzen direkt vergoren werden können, muss bei Getreide oder Mais die Stärke zunächst enzymatisch in Zucker umgewandelt werden. In Europa werden vor allem Zuckerrüben und Getreide eingesetzt.<sup>[9]</sup> Die Bioethanolproduktion aus diesen Rohstoffen ist technologisch ausgereift.

Die Flächenproduktivität (z.B. Kraftstofftrag pro Hektar) aus Zuckerrüben ist höher als bei Getreide. Sie ist auch mehr als doppelt so hoch wie bei der Produktion von Biodiesel oder Pflanzenöl. Bei Bioethanol geht man als Faustregel von einem Umwandlungsfaktor von drei bei den effizientesten Rohstoffen aus, d.h. aus 3 t Biomasse entsteht etwa 1 t Bioethanol. Unter den Getreidearten hat Weizen die höchste Flächenproduktivität. Roggen und Triticale spielen bei der Ethanolherzeugung nur eine geringe Rolle. Bei der Ethanolgewinnung entsteht als Nebenprodukt Schlempe bzw. Vinasse, die als Futtermittel, Düngemittel oder Substrat für Biogasanlagen eingesetzt werden kann. Aus der Getreideschlempe wird häufig ein als Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS) bezeichnetes Futtermittel hergestellt.

Findet die Bioethanolproduktion in Deutschland aus heimischen Rohstoffen statt, können neue Einkommensquellen für die Landwirtschaft geschaffen werden. Bei Erreichung des 5,75%-Anteils von Bioethanol am Benzinabsatz bis 2015 ergibt sich ein Absatz von 1,8 Mio. t Bioethanol bzw. 7 Mio. t Getreide.<sup>[10]</sup> Dies würde zu einem Flächenbedarf von ca. 1 Mio. Hektar bzw. 6% der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland führen.

Als Alternative ist aber auch der Import von Bioethanol insbesondere aus Brasilien möglich. Brasilien ist hinter den USA der zweitgrösste Ethanolproduzent und grösster Exporteur. Das Land verfügt über die grösste Anbaufläche für Zuckerrohr und verfügt über eine 30-jährige Erfahrung bei der Verwendung von Ethanol im Kraftstoffsektor. Die Energie- und Treibhausgasbilanz der Ethanolproduktion aus Zuckerrohr ist günstiger im Vergleich zu Getreide und Zuckerrüben. Dies liegt an der Vorteilhaftigkeit des Zuckerrohrs als Rohstoff und am geringen Einsatz fossiler Energie in der Konversion, bei der die anfallende Bagasse energetisch genutzt wird.

### 3.2. Biodiesel

Biodiesel wird heute normgerecht nach DIN EN 590 fossilem Diesel mit bis zu 5% beigemischt (B5-Kraftstoff). Biodiesel wird aber auch als Reinkraftstoff eingesetzt (B100-Kraftstoff). Der Mehrverbrauch gegenüber einem mit normalem Diesel betriebenen Auto liegt wegen der etwas niedrigeren Energiedichte bei rund 10%. Der Nachteil von Biodiesel ist seine Aggressivität. So verursacht er leicht Korrosion und leckende Dichtungen. Zudem verstopfen Filter und Kunststoffe lösen sich auf. Herkömmliche Dieselmotoren können mit reinem Biodiesel betrieben werden, sofern eine Freigabe seitens des Fahrzeugherstellers vorliegt. Die Freigabeerteilungen sind allerdings rückläufig und aufgrund der Euro-IV- und V-Normen, die mit Biodiesel nicht erfüllt werden können, ist die Verwendung von B100 im Gegensatz B5 rückläufig.

Biodiesel ist in Deutschland in der Regel Rapsmethylester (RME) und wird durch die Umesterung von Rapsöl mit Methanol hergestellt. Bei Biodiesel geht man von einem Umwandlungsfaktor von etwa drei für Raps aus, d.h. aus 3 t Rapskorn entsteht 1 t Biodiesel. Die derzeitige Biodieselproduktion in Deutschland bindet damit ca. 700 000 bis 900 000 Hektar. Auf die stark steigende Biodieselnachfrage wurde bisher mit einem deutlichen Ausbau der Produktionskapazitäten reagiert. Unter Berücksichtigung der Produktion für andere Verwendungszwecke wie z.B. die Nahrungsmittelproduktion ist das Potenzial aufgrund von Fruchtfolgegrenzen weitgehend ausgeschöpft.

Die Produktion aus Raps ist ausgereift und es ist nicht mehr mit entscheidenden Prozessinnovationen zu rechnen. Optimierungspotenzial besteht allerdings bei der Verwendung der bei der Produktion anfallenden Nebenprodukte wie Glycerin. Zudem wird erwogen, das aus fossilen Rohstoffen hergestellte Methanol bei der Umesterung durch Bioethanol zu ersetzen. Damit würde Biodiesel zu einem reinen Biokraftstoff werden. Neben Rapsöl sind auch andere Pflanzenöle sowie Altspeise- und Tierfette geeignet. Weltweit sind besonders Palm- und Sojaöl bedeutsam, die im Vergleich zu Rapsöl kostengünstiger produziert werden können. Deren Einsetzbarkeit ist jedoch aufgrund technischer Aspekte eingeschränkt.

### 4. Biokraftstoffe der 2. Generation

Besonders interessant sind die Technologien zur Herstellung von Biokraftstoffen der 2. Generation. Der Begriff 2. Generation bedeutet dabei, dass im Gegensatz zu Biokraftstoffen der 1. Generation (Bioethanol aus zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen oder Biodiesel aus Raps- oder Palmöl) Rohstoffe verwendet werden, die nicht

auch zur Herstellung von Nahrungsmitteln verwendet werden. Dabei handelt es sich in erster Linie um lignozellulose-haltige Rohstoffe wie Energiepflanzen (z.B. Mais), bei denen die gesamte Pflanze verarbeitet wird, Stroh, Holz und verschiedene Rest- und Abfallprodukte aus der Landwirtschaft und Holzverarbeitung sowie Grünabfälle.

#### 4.1. Bioethanol der 2. Generation

Die Flächenproduktivität kann deutlich gesteigert werden, falls Lignozellulose zu Bioethanol verarbeitet wird. Im Vergleich zur Verwendung zucker- und stärkehaltiger Rohstoffe ist dieser Prozess allerdings aufgrund der Umwandlung von Lignozellulose in Zucker wesentlich anspruchsvoller. Eine Herausforderung ist dabei die Hemizellulose, da die bei der Spaltung entstehenden Pentosen (Xylose und Arabinose) zunächst nicht vergoren werden können. Hefen können aber gentechnisch so modifiziert werden, dass ausser der Glucose auch Arabinose und Xylose zu Ethanol vergoren wird. In diesem Bereich ist beispielsweise die Arbeitsgruppe von Prof. Boles von der Universität Frankfurt führend.

Bislang besteht weltweit noch keine grosstechnische Produktion von Bioethanol aus Lignozellulose. Die Gewinnung von Ethanol aus Lignozellulose stellt aber insbesondere in Kanada, den USA und Skandinavien einen Forschungsschwerpunkt dar.<sup>[11]</sup> Es wird ein grosses Potenzial gesehen und erste Praxisversuche werden als viel versprechend gewertet. Die Internationale Energieagentur rechnet daher mit der baldigen Errichtung erster kommerzieller Anlagen.

#### 4.2. Biobutanol der 2. Generation

Nachteilig bei Bioethanol sind bestimmte chemische und physikalische Eigenschaften wie Flammpunkt, Dampfdruck bzw. Dampfdruckanomalien bei der Mischung mit Benzin und die gute Mischbarkeit mit Wasser. Vorteile bietet Biobutanol, welches von den chemischen und physikalischen Eigenschaften dem Benzin wesentlich ähnlicher ist als Bioethanol und daher, ähnlich wie BTL-Kraftstoff und im Gegensatz zu Bioethanol, herkömmlichen Kraftstoffen fast ohne Einschränkungen beigemischt und ohne Modifikation der Motoren eingesetzt werden kann.

Durch Bakterien der Gattung Clostridium kann bei der Buttersäuregärung auf Nebenwegen aus der Brenztraubensäure neben oder statt Buttersäure auch Butanol, Ethanol, Aceton und/oder 2-Propanol gebildet werden. Diese Nebenwege werden insbesondere bei niedrigen pH-Werten beschritten. Allerdings sind die Ausbeuten an Butanol bei dieser so genannten ABE-Fermentation (ABE steht für die Produkte Aceton, Butanol und Ethanol) nicht zufriedenstellend. In den USA wurde eine zweistu-

fige Fermentation mit höheren Ausbeuten an Butanol entwickelt. Allerdings gibt es in diesem Bereich noch erheblichen Optimierungsbedarf und es wird weltweit auch am Einsatz anderer Mikroorganismen zur Produktion von Biobutanol geforscht.

#### 4.3. BTL-Kraftstoff

Die Herstellung von BTL-Kraftstoff beinhaltet drei unterschiedliche Verfahrensschritte. Zunächst wird die zur Verfügung stehende Biomasse in einem Niedrigtemperaturverfahren zu Biokoks und teerhaltigem Gas mit hoher Energiedichte konvertiert. Aus diesen Ausgangsrohstoffen wird teerfreies Synthesegas (CO und H<sub>2</sub>) hergestellt. Es wird mit verschiedenen Reaktortypen gearbeitet, wobei die Minimierung des im Synthesegas vorliegenden Teergehalts eine hohe Priorität genießt. In einem dritten Schritt werden aus dem Synthesegas mit Hilfe des Fischer-Tropsch-Verfahrens an Eisen- oder Cobalt-Katalysatoren flüssige Kohlenwasserstoffe synthetisiert. Aus dem Synthesegas kann mit den entsprechenden Verfahren auch Biowasserstoff gewonnen oder Biomethan synthetisiert werden.

BTL-Kraftstoff hat zahlreiche Vorteile. Er kann je nach Oktanzahl in herkömmlichen Otto- oder Dieselmotoren ohne Umrüstung eingesetzt werden und es ist kein separates Tankstellennetz notwendig. Der Einsatz der Kraftstoffe führt zu einer deutlichen Verringerung der Abgas- und Russpartikelemissionen. Die Eigenschaften des Kraftstoffs können während der Synthese durch Variation bestimmter Parameter nach Wunsch beeinflusst werden. Bei BTL-Kraftstoff geht man von einem Umwandlungsfaktor von fünf bei den effizientesten Rohstoffen aus, d.h. aus 5 t Biomasse entsteht 1 t BTL-Kraftstoff. Neben Holz und Stroh können auch diverse Rest- und Abfallstoffe in Kraftstoff umgewandelt werden. Mit knapp 4000 Liter pro Hektar erzielt BTL einen hohen flächenbezogenen Kraftstofftrag.<sup>[12]</sup>

Es gibt verschiedene Verfahren im Demonstrationsmassstab wie etwa das von Choren, mit welchem Biomasse im Größenmassstab von einigen hundert Litern pro Tag zu BTL-Kraftstoff umgewandelt werden kann. Weitere Verfahren sind an der TU Bergakademie Freiberg, am Forschungszentrum Karlsruhe und auch in anderen europäischen Ländern (ECN/Niederlande, TU Wien/Österreich; VTT/Finnland, Verano/Schweden) in der Entwicklung.

#### 5. Produktionskosten der ausgewählten Biokraftstoffe

Da der entscheidende Faktor für den Markterfolg von Biokraftstoffen in erster Linie der Preis des Kraftstoffs an der Tankstelle ist, lag der Fokus der vergleichenden

Tabelle. Produktionskosten und Gewinnmargen verschiedener Biokraftstoffszenarien bei einem Preis an der Zapfsäule von 1,30 Euro/l für Benzin und 1,10 Euro/l für Diesel

Szenario	Bio-kraftstoff	Rohstoff	Region	Annahmen	Anlagen-grösse (kt/Jahr)	Anlagen-investition (Mio. Euro)	Produktions-kosten (Euro/l)	Gewinn-marge (Euro/l)
B-0	Benzin	Rohöl	Europa	60 USD/Barrel	10.000	2.600	0,37	0,05
B-1a	Biobutanol	Mais	USA	Large-scale 2008	200	240	0,33	0,02
B-1b	Biobutanol	Lignozellulose	USA	Large-scale 2008	200	240	0,30	0,05
B-1c	Biobutanol	Lignozellulose	Europa	Large-scale 2008	200	240	0,31	0,09
B-2a	Bioethanol	Lignozellulose	USA	Small-scale 2008	50	90	0,45	-0,13
B-2b	Bioethanol	Lignozellulose	USA	Large-scale 2008	200	240	0,30	0,02
B-2c	Bioethanol	Lignozellulose	USA	Large-scale 2012	200	240	0,27	0,05
B-2d	Bioethanol	Lignozellulose	Europa	Large-scale 2008	200	240	0,36	0,01
B-2e	Bioethanol	Weizen	Europa	Large-scale 2006	200	200	0,48	-0,11
D-0	Diesel	Rohöl	Europa	60 USD/Barrel	10.000	2.600	0,37	0,06
D-1a	Biodiesel	Raps	Europa	Large-scale 2006	200	40	0,54	-0,13
D-2a	BTL	Holz	Europa	Small-scale 2008	120	180	1,02	-0,61
D-2b	BTL	Holz	Europa	Large-scale 2012	1.200	1.800	0,82	-0,41

Anmerkungen: ohne Korrektur mit der Energiedichte; inkl. Mineralölsteuer und Ökosteuer in Deutschland in Höhe von ca. 0,65 Euro/Liter bei Benzin und 0,47 Euro/Liter bei Diesel; Investitionskosten bei Biodiesel inkl. Ölmühle

Betrachtung auf den Produktionskosten. Dazu wurden öffentlich zugänglichen Angaben zu Produktionskosten ausgewertet und ein konsistentes Rechenmodell für den Biokraftstoffmarkt in Deutschland aufgebaut. Neben Plausibilitätschecks wurde insbesondere auf eine Vergleichbarkeit und Konsistenz der Angaben geachtet und ggf. Korrekturen vorgenommen. Um den unterschiedlichen Entwicklungsständen gerecht zu werden und die Skaleneffekte abzubilden, wurden realistische Szenarien entwickelt. Als Ergebnis wurden neben den Rohmaterialkosten und Fertigungskosten auch die Kapitalkosten, Beimischungskosten und Distributionskosten bis zur Zapfsäule bestimmt. Ausgehend vom Preis an

der Zapfsäule war die Gewinnmarge als Differenz zwischen Preis und den einzelnen Kostenbestandteilen das Kriterium für die Wirtschaftlichkeit (Tabelle). Da sich Biokraftstoffe nur dann nachhaltig durchsetzen werden, falls sie auch ohne jegliche Steuervorteile wettbewerbsfähig hergestellt werden können, wurde bei den Berechnungen auch bei den Biokraftstoffen die übliche Mineralölsteuer in Deutschland (inkl. der Ökosteuer) in Höhe von ca. 0,65 Euro/Liter bei Benzin und 0,47 Euro/Liter bei Diesel berücksichtigt.

Das Ergebnis unserer Analyse ist eindeutig, falls als Messlatte Benzin und Diesel bei einem Rohölpreis von 60 US\$ pro Barrel genommen wird (Szenario B-0 in

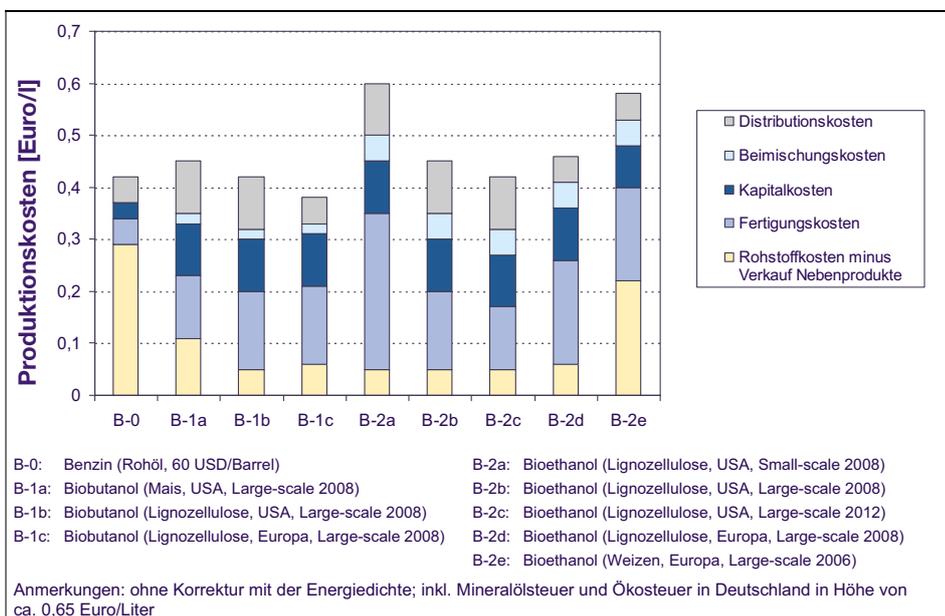


Abb. 6. Szenarien zur Wettbewerbsfähigkeit der im Vergleich zu Benzin relevanten Biokraftstoffarten in Deutschland

Abb. 6 und Szenario D-0 in Abb. 7). Sowohl Bioethanol aus Weizen als auch Biodiesel sind in Europa bei Berücksichtigung der Mineralölsteuer nicht profitabel (Szenario B-2e in Abb. 6 und Szenario D-1 in Abb. 7). Die hohen Margen der Hersteller resultieren bzw. resultieren aus der Steuerbefreiung. Auch BTL-Kraftstoff kann nach heutigem technologischem Stand nicht wettbewerbsfähig hergestellt werden (Szenario D-2a in Abb. 7) und auch die mittelfristigen Ausichten bis zum Jahr 2012 sind wenig ermutigend (Szenario D-2b in Abb. 7).

Nur Bioethanol und Biobutanol der 2. Generation auf Basis lignozellulosehaltiger Rohstoffe haben bei entsprechend grossen Anlagen das Potenzial, beim jetzigen Rohölpreis wettbewerbsfähig hergestellt zu werden (Szenarien B-1b und B-1c für Biobutanol sowie Szenarien B-2a bis B-2d für Bioethanol in Abb. 6). Es zeigt sich, dass Biobutanol gegenüber Bioethanol vor allem im Bereich der Beimischungskosten Vorteile aufweist, da Bioethanol aufgrund der aufwendigen Trocknung vor einer Beimischung zu normalem Kraftstoff höhere Kosten verursacht. Insgesamt ist Biobutanol aus Lignozellulose am kostengünstigsten und auch beim vollen Steuersatz mit einer angemessenen Gewinnmarge herzustellen (Szenario B-1c in Abb. 6). Nicht mit aufgenommen in den Vergleich wurde Bioethanol aus Brasilien, da es sich um eine rein politische Entscheidung handelt, ob auf diese Bezugsquelle zurückgegriffen werden soll. Bei sehr wettbewerbsfähigen Herstellkosten in Bereich von 0,22 bis 0,26 Euro/Liter spielen hier die Importzölle (im Moment ca. 0,20 Euro/Liter) die entscheidende Rolle.

Bei dem Vergleich müssen natürlich auch die unterschiedlichen Energiedichten der Kraftstoffe berücksichtigt werden (Energiedichten in MJ/l: Benzin 32,00, Diesel 35,30, Bioethanol 21,14, Biobutanol 29,20, Biodiesel 32,65, BTL 33,45). Nach Korrektur der Produktionskosten (inkl. Beimischungs- und Distributionskosten) mit den unterschiedlichen Energiedichten fällt Bioethanol aufgrund der geringen Energiedichte ab und die Vorteile von Biobutanol werden umso deutlicher: auch nach der Korrektur bleibt Biobutanol im Vergleich zu herkömmlichem Benzin aufgrund der nur etwas geringeren Energiedichte wettbewerbsfähig (Abb. 8).

## 6. Fazit und Ausblick

Etwas überspitzt kann gesagt werden, dass sich bei der Einführung von Biokraftstoffen für die Autofahrer bezüglich der Nutzung und Kosten im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen nicht viel ändern darf und ökologische Aspekte in der Regel keine Rolle spielen. Daher sind kurz- bis mit-

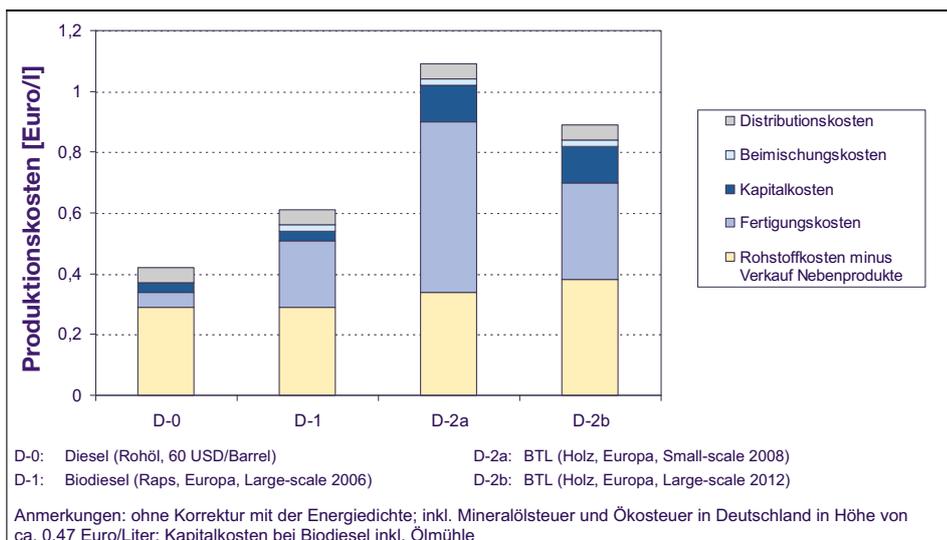


Abb. 7. Szenarien zur Wettbewerbsfähigkeit der im Vergleich zu Diesel relevanten Biokraftstoffarten in Deutschland

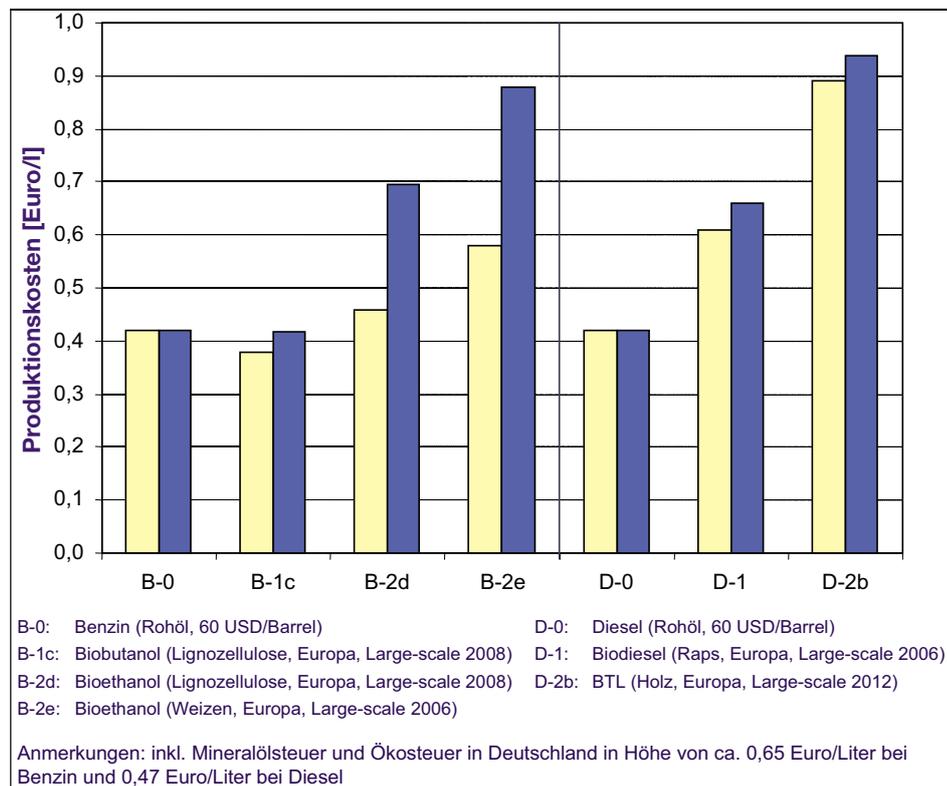


Abb. 8. Vergleich der Produktionskosten nach Korrektur mit der Energiedichte bei ausgewählten Szenarien

telfristig Biokraftstoffe der 2. Generation auf Basis lignozellulosehaltiger Rohstoffe besonders viel versprechend. Der entscheidende Aspekt ist, dass diese Rohstoffe im Vergleich zu Rohstoffen für Biokraftstoffe der 1. Generation auch in der Zukunft ausreichend und zu geringeren Kosten zur Verfügung stehen werden. Allerdings müssten dafür verlässliche Anreize für die Rohstoffproduzenten bestehen. Zudem stellen Ernte und Logistikkette eine Herausforderung

dar. Neben Bioethanol ist vor allem Biobutanol aufgrund der klaren Vorteile bei den Produktionskosten und den Eigenschaften überzeugend, so dass in diesem Bereich in Zukunft interessante Investitionsmöglichkeiten entstehen werden.

Eingegangen: 11. Juli, 2007

[1] J. Schindler, W. Weindorf, *Technikfolgenabschätzung: Theorie und Praxis* 2006, 1, 50.

- [2] T. Dreier, B. Geiger, A. Saller, 'Ganzheitliche Prozesskettenanalyse für die Erzeugung und Anwendung von biogenen Kraftstoffen', Studie im Auftrag der Daimler Benz AG und des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, TU München und Forschungsstelle für Energiewirtschaft, **1998**.
- [3] R. Edwards, J.-F. Larivé, V. Mahieu, P. Rouveiolles, 'Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context', Conservation of clean air and water in Europe (CONCAWE), European Council for Automotive R&D (EUCAR), European Commission Directorate General, Joint Research Center (JRC), **2005**.
- [4] M. P. Gover, S. A. Collings, G. S. Hitchcock, D. P. Moon, G. P. Wilkins, 'Alternative Road Transport Fuels – A Preliminary Life-cycle Study for the UK', ETSU Report, Study co-funded by the UK Department of Trade and Industry and the Department of Transport, **1996**.
- [5] 'Basisdaten Biokraftstoffe', Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, **2005**.
- [6] 'Biokraftstoffe. Pflanzen, Rohstoffe, Produkte', Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, **2005**.
- [7] 'Synthetische Biokraftstoffe. Techniken – Potenziale – Perspektiven. Schriftenreihe 'Nachwachsende Rohstoffe'', Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Landwirtschaftsverlag, Münster, **2005**.
- [8] B. Kavalov, 'Biofuel Potentials in the EU, Report EUR 21012 EN', European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies (ipts), Seville, **2004**.
- [9] T. Senn, 'Die Produktion von Bioethanol als Treibstoff unter dem Aspekt der Energie-, Kosten- und Ökobilanz', FVS Fachtagung Regenerative Kraftstoffe, Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie, FG Gärungstechnologie mit Forschungs- und Lehrbrennerei, Stuttgart, **2003**.
- [10] 'Biokraftstoffe – Eine vergleichende Analyse', Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow, **2006**.
- [11] R. Wooley, M. Ruth, J. Sheehan, K. Ibsen, H. Majdeski, A. Galvez. in 'Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios', National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado USA, **1999**.
- [12] A. Vetter in 'Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Synthetische Biokraftstoffe', Ed. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, Landwirtschaftsverlag, Münster, **2005**, p. 11.