



# Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Potenziale, Herstellung, Perspektiven

## 1. Zusammenfassung

M. Specht,  
U. Zuberbühler,  
A. Bandi  
ZSW  
Michael.Specht@zsw-bw.de

Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung sind zwar limitiert, sie können aber einen erheblichen Teil des Energiebedarfs decken. Unter der Annahme, dass 50% der energetisch nutzbaren Biomasse für die Kraftstofferzeugung zur Anwendung im Verkehrsbereich verwendet werden, ergibt sich - bei einem moderaten Zubau von Energiepflanzen auf 2 Mio. Hektar - für Deutschland ein Substitutionspotenzial von ca. 7%. Aufgrund der Energieverbrauchsstrukturen und der zur Verfügung stehenden Agrarflächen resultieren für die Europäische Union deutlich höhere Anteile von ca. 11% für die EU-15 bzw. ca. 17% für die EU-27. Das weltweite Potenzial beträgt ca. 27%. In Ländern mit zukünftig sinkendem Kraftstoffverbrauch wie Deutschland, können die Substitutionspotentiale auch deutlich überschritten werden.

Ein wesentliches Entscheidungskriterium für einen Kraftstoffpfad ist aufgrund der begrenzten Anbaufläche der Flächenertrag. Die spezifischen Flächenerträge von Kraftstoffen aus angebauter Biomasse unterscheiden sich je nach Agrarprodukt und Konversionspfad erheblich und liegen für Mitteleuropa in einer Bandbreite von ca. 11 MWh Biodiesel aus Raps bis ca. 40 MWh Wasserstoff aus Miscanthus (pro Hektar und Jahr). Bei einer durchschnittlichen jährlichen Fahrstrecke von 12.000 km reicht ein Hektar Anbaufläche zur Versorgung von 1,2 Fahrzeugen (Biodiesel aus Raps, heutiger Durchschnittsverbrauch mit 8 l Diesel-

äquivalent) bis zu 11 Fahrzeugen zukünftig (Wasserstoff aus Miscanthus, Verbrauch 3 l Dieseläquivalent).

Die Konversionstechnologien mit hohen Flächenerträgen sind fermentative Verfahren zur Erzeugung von methanhaltigen Produktgasen (Erdgassubstitut aus Biogas) und thermochemische Vergasungsprozesse zur Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen aus Synthesegas. Die thermochemischen Verfahren sind jedoch - im Gegensatz zur Erzeugung von Biodiesel, Ethanol und Biogas - noch nicht Stand der Technik. Aufgrund der Technologieverfügbarkeit werden zuerst die regenerativen Kraftstoffe am Markt abgesetzt werden, die die momentan existierende Infrastruktur bedienen können. Dies sind kurzfristig Biodiesel als Reinkraftstoff und als Zumischung zu Diesel sowie Ethanol bzw. das aus Ethanol hergestellte Antiklopfmittel ETBE (Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether) als Zumischung zum Ottokraftstoff. Mittelfristig mögliche regenerative Kraftstoffe sind flüssige Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzin- und Diesel-Substitute), Methanol, Dimethylether (DME) und Erdgas Substitut (SNG). Erst sehr langfristig wird sich Wasserstoff aufgrund der hohen Infrastrukturerfordernisse als Kraftstoff für den Verkehr am Markt durchsetzen können.

Auch erneuerbare Elektrizität kann, ohne Limitierung durch biogene Ressourcen, zur Erzeugung von Kraftstoffen verwendet werden. Elektrolytisch erzeugter Wasserstoff lässt sich entweder direkt als Energieträger im Verkehr einsetzen oder zusammen mit Kohlendioxid zur Synthese von synthetischen, kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen. Wegen der heutigen Stromerzeugungsstrukturen und der Nutzungskonkurrenz durch direkte elektrische Verbraucher ist die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff jedoch nur eine sehr langfristige Option.

## 1. Summary

A substantial part of the energy consumption could be covered by biomass. With the assumption, that 50% of biomass, usable for energy purposes, are employed for fuel generation - and 2 million hectares agricultural area in Germany are available for energy plants - approx. 7% of the present country's fuel consumption for transportation may be substituted by biofuels. Taking into account the agricultural areas of the EU, this potential appears substantially higher, approx. 11% for EU-15 and 17% for EU-27. The world-wide potential is estimated to approx. 27%. In countries with a decreasing fuel consumption for transport like Germany, the substitution potentials can be exceeded in the future.

Due to the limited availability of agricultural area, an important selection criterion for future fuels is the specific fuel yield per hectare cultivated area. The specific fuel yield differs substantially and ranges between approx. 11 MWh for bio-diesel made from rape seed and 40 MWh for hydrogen from miscanthus (per hectare and year). Thus, considering an average mileage of 12,000 km, one hectare cultivated area can supply fuel for 1.2 vehicles (assuming bio-diesel from rape seed and present average fuel consumption of 8l Diesel equivalent) to 11 vehicles in future (hydrogen from miscanthus, 3l Diesel equivalent).

The conversion technologies which lead to high yields per hectare are fermentative processes for the production of methane containing product gases (substitute natural gas, SNG) and thermochemical gasification processes for the production of hydrogen and synthetic fuels from synthesis gas. However, thermochemical conversion is in a developing stage so far, whereas production technologies of bio-

ethanol, bio-diesel and bio-gas are state of the art. Depending on the availability of technologies, first priority will be given to renewable fuels which are compatible with the current fuel supply and distribution infrastructure. These are in short term bio-diesel as neat fuel and/or as blend, as well as ethanol and/or the octane booster ETBE (Ethyl-Tertiary-Butyl-Ether) added to petrol. Medium term possible renewable fuels are Fischer-Tropsch hydrocarbons (e.g. petrol and diesel substitutes), methanol, dimethyl-ether (DME) and SNG. Hydrogen will possibly become a generally accepted fuel in the long term only, due to its specific infrastructure requirements.

Renewable electricity as source for hydrogen may have a substantial contribution to renewable transportation fuel generation in the future, as it is not subject to the availability limitations of the biomass resources. Electrolytic hydrogen can directly be used as transportation fuel, or together with CO<sub>2</sub> for the synthesis of carbon based fuel. Due to the competition between direct consumption of electricity and use for electrolysis, electrolytic hydrogen will be only a long term option.

## 2. Einleitung: Warum regenerative Kraftstoffe?

Der Verkehrsbereich verursacht einerseits einen hohen Anteil am CO<sub>2</sub>-Eintrag in die Atmosphäre, andererseits bewirken die Abgase des Verkehrs insbesondere in Ballungsräumen eine hohe lokale Belastung durch Luftschadstoffe. Neben der Effizienzsteigerung und Emissionsminderung konventioneller Verbrennungskraftmaschinen muss längerfristig eine grundsätzliche Änderung des Kraftstoffangebots stattfinden, die sowohl globale klimarelevante Auswirkungen als auch lokale Schadstoffbelastungen vermeidet. Dazu gehört die

Einführung neuer Antriebstechniken (z.B. Brennstoffzellen) aber auch die Weiterentwicklung konventioneller verbrennungsmotorischer Konzepte, die längerfristig mit einem steigenden Anteil an regenerativen Kraftstoffen<sup>1</sup> versorgt werden. Ein weiterer Grund für die Einführung von regenerativen Alternativen im Kraftstoffmarkt ist die nahezu völlige Abhängigkeit des Verkehrsbereichs vom Rohöl. Während sowohl der Strom- als auch der Wärmebedarf von einem breiten Primärenergiemix gedeckt wird, ist die Kraftstoffherzeugung für den Verkehr in der EU-15 mit über 99% fast ausschließlich vom Rohöl abhängig.

Für die Erzeugung von Wärme und Strom aus erneuerbaren Energien existieren eine Vielzahl von Optionen, während dies für C-basierte Kraftstoffe nur sehr eingeschränkt gilt. Von den verschiedenen Möglichkeiten, diese Kraftstoffe bereitzustellen, kommt aufgrund der Verfügbarkeit des organisch eingebundenen Kohlenstoffs und aus Kostengründen auf absehbare Zeit nur die Erzeugung aus Biomasse infrage. Erst sehr langfristig stehen neben den biogenen Ressourcen die regenerativ erzeugte Elektrizität und auch CO<sub>2</sub> als "Rohstoff" (z.B. aus Luft oder Rauchgasen) für eine Herstellung von Kraftstoffen zur Verfügung, die keiner Ressourcenlimitierung unterliegen.

Die Erschließung erneuerbarer Energie für den Verkehrsbereich fand jedoch in der energiepolitischen Diskussion bisher kaum Beachtung. Wenige Ausnahmen sind z.B. in Deutschland Biodiesel und in Brasilien Ethanol. Neben diesen Kraftstoffen kommen aber eine Reihe weiterer kohlenstoffhaltiger Verbindungen in Betracht, die sich aus

<sup>1</sup> Als "regenerative Kraftstoffe" werden hier die Energieträger bezeichnet, die sich aus erneuerbarer Primärenergie herstellen lassen und sich insbesondere für die Anwendung im Verkehrsbereich eignen.

regenerativen Ressourcen herstellen lassen: Methanol und Dimethylether sowie flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe wie synthetische Benzin-/Diesel-Kraftstoffe und methanhaltige Gase.

Die Frage, ob und wie erneuerbare Energien, v.a. Biomasse, im Verkehrsbereich nutzbar gemacht werden können und welcher regenerative Kraftstoff der geeignetste ist, hängt von verschiedenen Rahmenbedingungen ab, die derzeit nicht abschließend bewertet werden können. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei der Gewinnung biogener Kraftstoffe sind deutlich höher als bei der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse. Hinzu kommt, dass - wegen der relativ hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Elektrizitätserzeugung in Deutschland - regenerativer Strom aus Biomasse deutlich mehr CO<sub>2</sub> vermeidet als die Erzeugung von Kraftstoff aus Biomasse. Aus den genannten Gründen sowie aufgrund der Ressourcenlimitierung wird es zukünftig eine Nutzungskonkurrenz um die Biomasse geben. Hier stellt sich die Frage, welcher Stellenwert einer Diversifikation bzgl. der Rohstoffbasis im Kraftstoffmarkt und damit der Versorgungssicherheit zukünftig zugemessen wird. Von der Beantwortung dieser Fragen wird die weitere Entwicklung des Marktanteils regenerativer Kraftstoffe entscheidend abhängen.

Um den Anteil alternativer<sup>2</sup> und regenerativer Kraftstoffe zu steigern, wurden seitens der deutschen und europäischen Politik Rahmenbedingungen geschaffen, die die Marktdurchdringung entscheidend mitbestimmen werden. In Deutschland sind regenerative Kraftstoffe seit dem 01.01.2004 vollständig - auch in Höhe ihres Anteils in Kraftstoffmischungen - von der Mineralölsteuer befreit.

<sup>2</sup> Im Unterschied zu den "regenerativen Kraftstoffen" können "alternative Kraftstoffe" sowohl aus fossiler als auch aus erneuerbarer Primärenergie hergestellt werden.

Jahr	2005	2010	2015	2020
biogene Kraftstoffe	2 %	6 %	7 %	8 %
Erdgas	0 %	2 %	5 %	10 %
Wasserstoff	0 %	0 %	2 %	5 %
Gesamt	2 %	8 %	14 %	23 %

*Tabella 1:  
Zielquoten alternativer  
Kraftstoffe in der  
Europäischen Union*

Die Zielquoten der Europäischen Union [6] für die Anteile alternativer Kraftstoffe am gesamten Kraftstoffmarkt im Verkehrsbereich bis zum Jahr 2020 sind in *Tab. 1* dargestellt.

Um diese hohen Anteile zu erzielen, sind enorme Anstrengungen nötig, bei denen die Wahl der "richtigen" Kraftstoffpfade von wesentlicher Bedeutung ist. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages werden die aussichtsreichsten Optionen regenerativer Kraftstoffe, deren Eigenschaften und Herstellungspfade sowie die primärenergetischen Potenziale und Kosten, beschrieben.

### 3. Ressourcen für die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe

Biomasse bietet vielfältige Möglichkeiten der energetischen Nutzung. Die Bandbreite reicht von der Wärme-/Stromerzeugung durch Verbrennung über die Herstellung von festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen für den Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung bis zur Herstellung von Kraftstoffen für den Transportsektor, wobei aus technischer Sicht auch hier mehrere Konversionspfade möglich sind. Es stellt sich die Frage, wann es zu einer Konkurrenzsituation um die Nutzung von Bioenergieträgern in den Nutzungssektoren kommen wird und wie gegebenenfalls Prioritäten zu setzen sind. Das Biomassepotenzial setzt sich aus den unterschiedlichsten Einsatzstoffen zusammen,

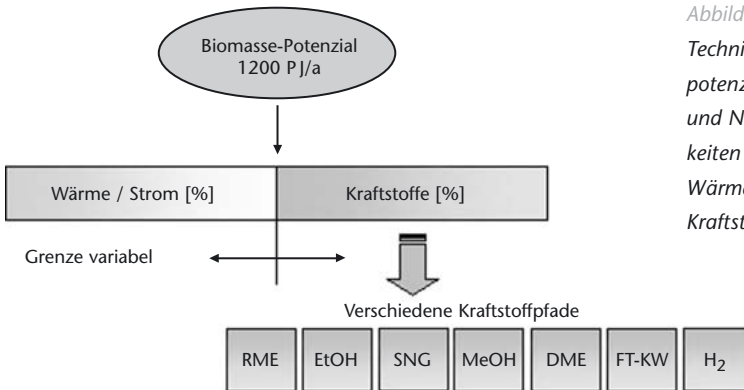


Abbildung 1:  
Technisches Biomasse-  
potenzial in Deutschland  
und Nutzungsmöglich-  
keiten in den Sektoren  
Wärme, Strom und  
Kraftstoffe

welche nicht für alle Konversionsverfahren gleichermaßen geeignet sind. Deshalb wird sich durch technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen eine Potenzialaufteilung einstellen. Zusätzlich existieren energiepolitische Rahmenbedingungen, die jedoch - sind sie erst einmal festgelegt - nur sehr schwer zu ändern sind.

Offen ist, welcher Anteil des Biomasse-Potenzials zukünftig einerseits für die Strom- und Wärmeerzeugung und andererseits zur Herstellung von Kraftstoffen zu verwenden ist (Abb. 1). In diversen Potenzialstudien wird der auf die Kraftstoffherzeugung entfallende Anteil pauschal mit 50% angegeben.

Im Folgenden sind wichtige Kriterien für die Betrachtung einer Potenzialaufteilung aufgeführt:

- Anforderungen an den Aufbau neuer Versorgungsstrukturen im Wärmemarkt
- Diversifizierung bei den Energieträgern für den Verkehr
- Räumliche Verteilung des Biomasseaufkommens
- Verfügbarkeit von Kohlenstoff außerhalb der fossilen

Anmerkung:  
RME (Rapsölmethylether, Biodiesel); EtOH (Ethanol); SNG (Erdgassubstitut, Substitute Natural Gas); MeOH (Methanol); DME (Dimethylether, Kraftstoff für Dieselmotoren); FT-KW (Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe, synthetische Benzin-/ Diesel-Kraftstoffe)



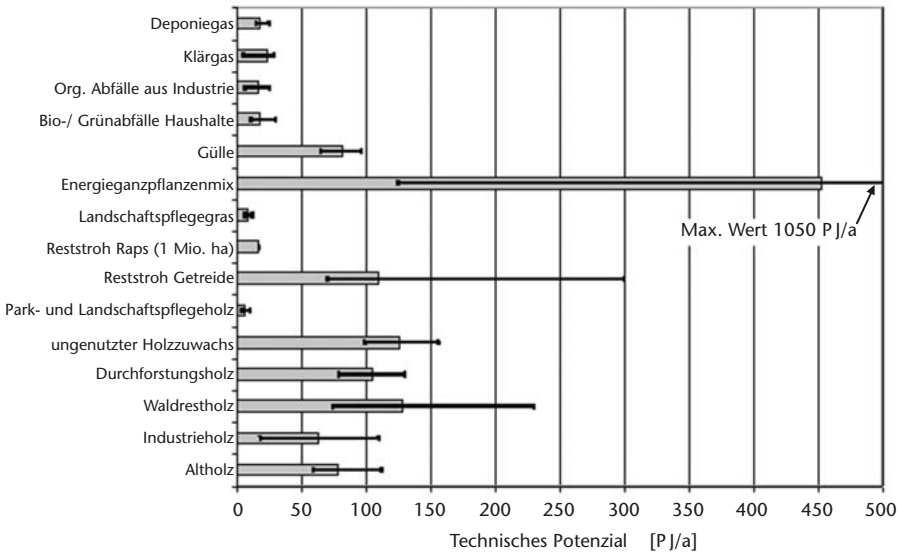
Ressourcen (Biomasse ist der einzige regenerative Energieträger, der Kohlenstoff in konzentrierter Form enthält)

- CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial in den verschiedenen Nutzungspfaden
- Kosten der Biomasseumwandlung
- Bestehende politische Zielsetzungen (z.B. Verdopplungsziel für die Erneuerbaren Energien, Ausbauziel für den Biomasseinsatz zur Kraftstoffproduktion [6])

### 3.1 Technisches Biomassepotenzial

Die in Deutschland und Europa vorhandenen Biomassepotenziale sind in einer Vielzahl von Studien abgeschätzt worden. Das technische Biomassepotenzial in Deutschland ist basierend auf diesen Ergebnissen und eigenen Recherchen in *Abb.2* dargestellt [23]. Danach beträgt das technische Potenzial im Mittel etwa 1.260 PJ/a. Damit ließen sich rein rechnerisch 8,7% des gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs oder - bei einer mittleren Konversionsrate von Biomasse in Kraftstoffe von 50% - etwa 23% des heutigen Kraftstoffverbrauchs decken.

Das Biomassepotenzial besteht zum überwiegenden Teil aus holzartiger Biomasse (43%), wovon etwa ein Viertel auf den ungenutzten Holzzuwachs entfällt. Ebenfalls erheblich ist das Aufkommen an Reststroh aus der Landwirtschaft und insbesondere das Potenzial des gezielten Anbaus von Energiepflanzen. Der hier angegebene Betrag basiert auf der Annahme, dass in Deutschland dauerhaft auf etwa 2 Mio. Hektar nachwachsende Rohstoffe oder Energiepflanzen angebaut werden können. In der Literatur finden sich jedoch teilweise niedrigere, mit bis zu 4 Mio. Hektar aber auch deutlich höhere Angaben [23].



(Zum Vergleich: Die derzeit genutzte Ackerfläche in Deutschland beträgt ca. 11,5 Mio. Hektar.)

### 3.2 "Freies" Biomassepotenzial für die Kraftstoffbereitstellung

Von dem technischen Biomassepotenzial kann nur ein Teil für die Erzeugung von regenerativen Kraftstoffen verwendet werden. Zu berücksichtigen sind dabei bereits etablierte und absehbare Stoffströme für die Wärmebereitstellung und Stromerzeugung. Hierbei handelt es sich einerseits um traditionell gewachsene Strukturen wie die Holznutzung im privaten Bereich oder im holzbe- und -verarbeitenden Gewerbe. Andererseits wurden und werden durch Förderprogramme auf Bundes- und Landesebene oder das Erneuerbare-Energien-Gesetz gezielt bestimmte Anwendungen

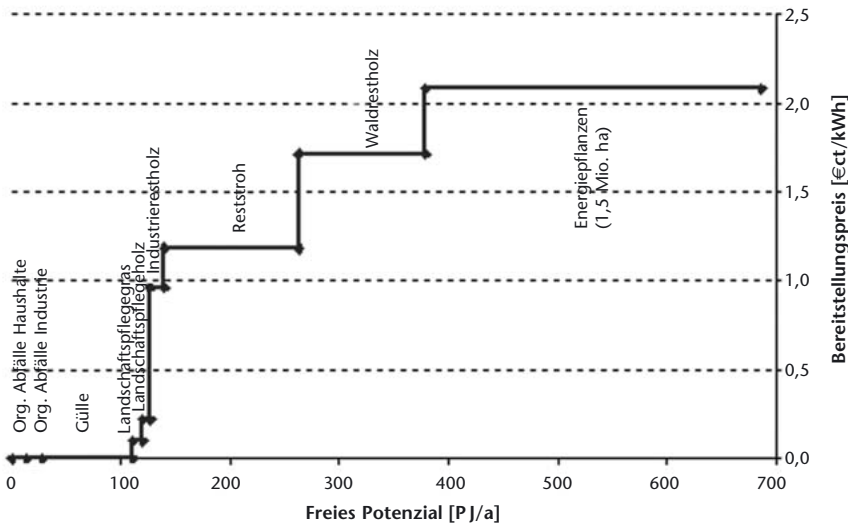
Abbildung 2:  
Zusammensetzung des  
Technischen Biomasse-  
potenzials (1.260 PJ/a)  
in Deutschland

Anmerkung:  
Angabe ist jeweils  
der Mittelwert und die  
Bandbreite verschiedener  
Studienergebnisse.

unterstützt. Es ist davon auszugehen, dass im Zuge des durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz induzierten Baus von Holz(heiz)kraftwerken in zwei bis drei Jahren die Potenziale von Altholz praktisch vollständig erschlossen sein werden. Unter Berücksichtigung bereits etablierter Biomassestoffströme im Bereich der Wärme- und Stromerzeugung reduziert sich das "freie" Potenzial auf etwa die Hälfte des o.g. technischen Potenzials.

Wie realistisch die Ausschöpfung der Ressourcen ist, hängt von zahlreichen weiteren Randbedingungen ab, nicht zuletzt von den Kosten. *Abb. 3* zeigt dazu die Kosten-Potenzial-Kurve für das "freie" Nutzungspotenzial, das mit gegenwärtigen bzw. absehbaren Bereitstellungskosten korreliert wurde. Nennenswerte Potenziale für mobile Anwendungen finden sich bei Gülle und Reststroh aus der Landwirtschaft (insgesamt ca. 200 PJ/a). Die Potenziale bei Waldrestholz und Energiepflanzen sind etwa doppelt so groß, mit bis zu 2€ct/kWh aber deutlich teurer. Bei einem angenommenen Konversionsgrad der Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe aus Biomasse von 50% bedeutet dies, dass sich allein der Biomassekostenanteil je Liter Benzinäquivalent auf ca. 0,40€ beläuft.

Bezogen auf den heutigen Kraftstoffverbrauch in Deutschland und den Annahmen, dass 50% des "freien" Biomassepotenzials für die Erzeugung von Kraftstoffen mit einem durchschnittlichen energetischen Wirkungsgrad von 50% verwendet werden (Faktor "Anteil x Effizienz" = 0,25) ergibt sich ein Substitutionspotenzial von 7% (*s. Tab. 2*). Der Faktor "Anteil x Effizienz" berücksichtigt neben der Effizienz der Umwandlung der Primärressource zu Kraftstoff den Anteil der Biomasse, der für die Kraftstoffherzeugung verwendet werden kann. Der in der Spalte "EU-27" und "Welt" geringfügig höhere Faktor beinhaltet das Verhältnis



von Biomasseaufkommen und Bevölkerungsdichte. Aufgrund limitierter Transportwege und eines geringeren Eigenverbrauchs stehen bei geringerer Bevölkerungsdichte mehr biogene Ressourcen für die Kraftstofferzeugung zur Verfügung. Wegen der deutlich höheren Energiedichte lassen sich die regenerativ erzeugten Kraftstoffe besser transportieren als die Biomasse, aus der sie erzeugt werden.

Abbildung 3:  
Kosten-Potenzial-Kurve  
für das "freie"  
Biomassepotenzial in  
Deutschland

Das "freie" Biomassepotenzial wird auch weltweit durch den Verbrauch von Biomasse für energetische Zwecke (insbesondere in den Ländern der 3. Welt) stark reduziert. Mit ca. 45 EJ/a trägt die Biomasse derzeit immerhin ca. 11% zur Deckung des Weltprimärenergieverbrauchs bei [12] – bei einem weltweiten Verbrauch an Kraftstoffen von 70,2 EJ/a.

Zum Vergleich sind Abschätzungen der Biomassepotenziale und der sich ergebenden Kraftstoffsubstitutionspotenziale auch für die EU-15 (11 %), die EU-27 (17 %) sowie weltweit (27 %) in *Tab. 2* dargestellt. Bezogen auf den momentanen Verbrauch kann also immer nur ein Teil des Kraftstoffbedarfs aus biomassestämmigen Ressourcen gedeckt werden. Dies gilt insbesondere für industrialisierte Länder mit einem hohen Energieverbrauch und limitierter landwirtschaftlicher Fläche. Die prozentualen Substitutionspotenziale können aber erheblich gesteigert werden, wenn die Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe mit einer Effizienzsteigerung/Verbrauchsreduzierung der Fahrzeugantriebe einhergeht (z. B. "3l Auto"). Dies gilt v.a. für Länder wie Deutschland mit einem zurückgehenden Verbrauch an Kraftstoffen für den Verkehr. Andererseits ist weltweit ein steigender Verbrauch durch ein stark zunehmendes Verkehrsaufkommen zu verzeichnen, der zumindest kurzfristig durch eine Effizienzsteigerung nicht aufgefangen werden kann.

*Tabelle 2:  
Deutsche, europäische  
und weltweite Substi-  
tutionspotenziale  
regenerativer Kraftstoffe  
aus Biomasse*

	Deutschland	EU-15	EU-27 <sup>3)</sup>	Welt
Kraftstoffverbrauch <sup>1)</sup> [EJ/a]	2,7	10,5	12,0	70,2
Technisches Biomassepotenzial [EJ/a]	1,2	6,8	8,9	109,0
"Freies" Biomassepotenzial [EJ/a]	0,7	4,6	6,9	63,8
Faktor <sup>2)</sup> : "Anteil x Effizienz"	0,25	0,25	0,3	0,3
Kraftstoff-Substitutionspotenzial [EJ/a]	0,2	1,2	2,1	19,1
Kraftstoff-Substitutionspotenzial [%]	7	11	17	27

<sup>1)</sup> Kraftstoffverbrauch im Verkehrsbereich (1999)

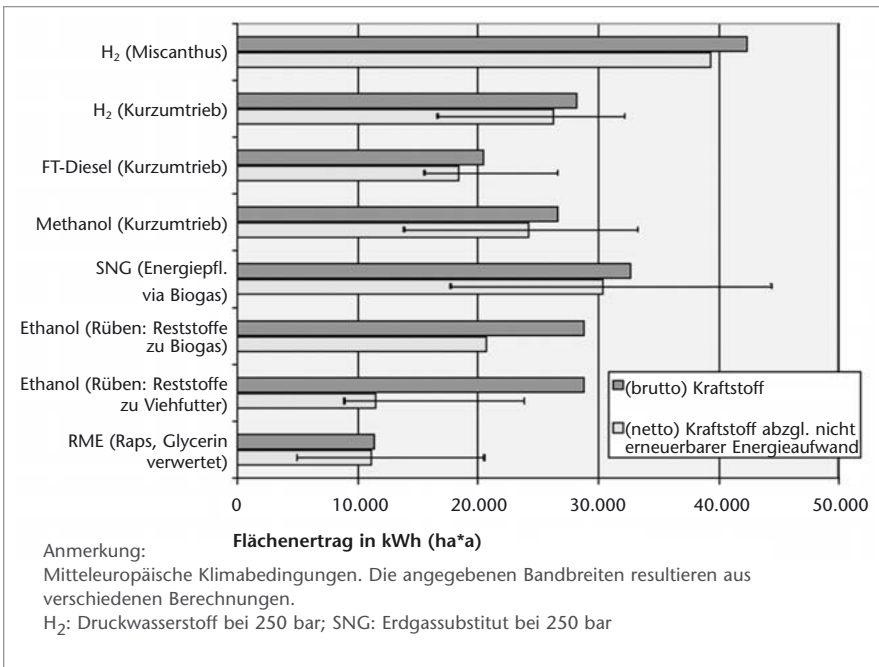
<sup>2)</sup> Der Faktor "Anteil x Effizienz" berücksichtigt den Anteil von Biomasse, der zur Erzeugung von Kraftstoffen verwendet wird und die energetische Effizienz der Konversion.

<sup>3)</sup> inklusive Rumänien und Bulgarien

### 3.3 Kraftstoff-Flächenerträge bei unterschiedlichen Herstellungspfaden

Da zumindest in Deutschland landwirtschaftliche Anbauflächen nur begrenzt zur Verfügung stehen, ist der pro Fläche erzielbare Kraftstofftrag für die Kraftstoffherstellung von besonderer Bedeutung. Wie aus *Abb. 4* hervorgeht, gibt es bezüglich der erzielbaren Flächenerträge erhebliche Unterschiede zwischen den Herstellungspfaden verschiedener Kraftstoffe. Die Flächenerträge sind als erzielbare Energie an Kraftstoff pro Hektar und Jahr aufgetragen. Die verschiedenen Kraftstoffe benötigen zur ihrer Herstellung unterschiedliche Mengen an nicht erneuerbarer Energie, was durch den zweiten, kleineren Balken in *Abb. 4* symbolisiert

*Abbildung 4:*  
Flächenerträge an Kraftstoff pro Hektar und Jahr für verschiedene Kraftstoffpfade – brutto und netto (abzüglich der zur Herstellung benötigten, nicht erneuerbaren Energie)



wird, bei dem der nicht erneuerbare Energieanteil von den Bruttoerträgen abgezogen ist. Zusätzlich ist die Variationsbreite bei den Nettoerträgen dargestellt [3, 23, 25, 38]

Die Netto-Kraftstofferrträge mit den höchsten Erträgen sind mit Herstellungsverfahren zu erzielen, die über eine primäre Gaserzeugung ablaufen (Synthesegas- bzw. Biogas-erzeugung). Bei Verfahren, die nur bestimmte Pflanzenteile wie Öl, Zucker und Stärke nutzen (RME, Ethanol), sind die Flächenerträge kleiner. Die Bandbreite reicht unter mittlereuropäischen Klimabedingungen hierbei von ca. 11MWh/(ha × a) für Biodiesel aus Raps bis zu ca. 40MWh/(ha × a) für die Erzeugung von Wasserstoff aus Miscanthus über die thermochemische Vergasung.

Für den derzeit schon genutzten Kraftstoff Ethanol sind zwei unterschiedliche Herstellungsverfahren mit identischem Brutto-Kraftstofferrtrag angegeben, die sich aber im Nettoertrag unterscheiden. Die Differenzen resultieren aus der unterschiedlichen Nutzung der Rest- bzw. Nebenprodukte. In einem Fall wird Biogas aus den anfallenden Reststoffen gewonnen, was den Einsatz an nicht erneuerbarer Energie vermindert und somit netto einen höheren Ertrag ermöglicht als bei einer stofflichen Verwertung als Futter.

Um aufzuzeigen in welcher Bandbreite die Anzahl von Fahrzeugen liegt, die pro Hektar Anbaufläche versorgt werden können, seien zwei extreme Beispiele mit einem sehr hohen und einem sehr niedrigen Flächenertrag bei unterschiedlichem Energiebedarf für den Fahrtrieb kurz dargestellt. Unterstellt man einen durchschnittlichen Verbrauch eines Fahrzeugs mit 8l Diesel pro 100km und eine jährliche Fahrstrecke von 12.000km, reicht ein Hektar Anbaufläche im Fall von Biodiesel zur Versorgung von ca. 1,2 Fahrzeugen. Bei zukünftigen, energiesparenden Fahrzeugen

mit einem Verbrauch von 3 l Dieseläquivalent (konventionell oder Brennstoffzellen-Antrieb) und gleicher jährlicher Fahrstrecke können immerhin 11 Fahrzeuge bedient werden, wenn Wasserstoff über eine thermochemische Vergasung von Miscanthus hergestellt wird. Ohne sich bereits jetzt auf einen konkreten Pfad festzulegen, soll dieses Zahlenbeispiel verdeutlichen, dass die Einführung "flächeneffizienter" Kraftstoffe von "energieeffizienten" Fahrzeugantrieben begleitet werden muss. (Zum Vergleich: Ein Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche reicht unter mitteleuropäischen Klimabedingungen bei den heutigen Konsumgewohnheiten in Deutschland im Durchschnitt zur Versorgung von ca. 5 Einwohnern mit Nahrungsmitteln.)

### 3.4 Bedeutung regenerativ erzeugter Elektrizität für die Kraftstofferzeugung

Auch die Verfügbarkeit von erneuerbarer Elektrizität ist für die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe von entscheidender Bedeutung. Hierbei steht nicht die elektrolytische Wasserstofferzeugung zum Spitzenlastausgleich bei der Elektrizitätsversorgung im Vordergrund, sondern der Import regenerativen Stroms. Die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff zur Dämpfung der Fluktuation regenerativer Strombereitstellung ist ein allenfalls langfristig relevanter Aspekt. Bei regenerativen Stromanteilen bis etwa 30 % in Deutschland sind keine Überschüsse zu erwarten [14, 20, 22]. Erst bei Überschreiten dieses Anteils wird Überschusselektrizität verfügbar sein. Diese Überschüsse können zwar eine hohe Leistung aufweisen, stellen jedoch nur Strommengen in der Größenordnung zwischen 5 und 30 TWh/a bereit.

Langfristig zeichnet sich mit der Möglichkeit des Imports erneuerbar erzeugten Stroms über Hochspannungsleitung-



en eine weitere Option ab, den Anteil erneuerbarer Energieträger in Deutschland zu erhöhen. In manchen Ländern sind bereits heute die erneuerbaren Energiepotenziale nur durch Export oder verstärkte Ansiedlung energieintensiver Industrien zu erschließen (z. B. Norwegen und Island), da diese Länder fast ausschließlich regenerativen Strom nutzen. Nachfolgend sind beispielhaft technische Potenziale für einen möglichen Import regenerativ erzeugten Stroms in TWh/a angegeben: Windkraft Europa: 400–3.000; Windkraft Marokko: 300–600; Wasserkraft Norwegen: 60; Wasserkraft Island 30; Wasserkraft GUS: 1.300 und Solarstrom aus Nordafrika: >106 [20]. (Zum Vergleich: Der deutsche Stromverbrauch lag 2003: bei 589 TWh/a [4])

In Nordafrika bestehen enorme Solarstrompotenziale, die durch solarthermische und gegebenenfalls auch durch Photovoltaik-Kraftwerke erschlossen werden können. Bereits 1% der dort nutzbaren technischen Potenziale könnte rechnerisch den gesamten heutigen Weltstrombedarf decken. Natürlich ist eine solche Konzentration auf eine einzige Ressource wenig sinnvoll, aber das Zahlenbeispiel zeigt die große Bedeutung dieser Region für eine zukünftige regenerative Stromversorgung Europas im Rahmen eines Nord-Süd-Verbunds. Zudem ist der Export regenerativ erzeugter Elektrizität für die betreffenden Regionen auch mit einer wirtschaftlichen und infrastrukturellen Entwicklung verbunden.

Die regenerative Elektrizität kann zur Erzeugung von elektrolytischem Wasserstoff verwendet werden, der 3 verschiedene Verwertungswege zulässt: 1) Wasserstoff wird direkt als Sekundärenergieträger eingesetzt. 2) Wasserstoff kann zur Deckung des Wasserstoffdefizits bei der Erzeugung synthegasgestämmiger, kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe aus Biomasse verwendet werden. Da der H<sub>2</sub>-Anteil in biomasse-

stämmigen Synthesegasen zu gering ist (vgl. Kap. 4.2), wird durch Zugabe von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff die Menge an Kraftstoff je nach Verfahrensvariante um ein Mehrfaches gesteigert. So ist beispielsweise bei der Methanolsynthese über einen Biomasse-Vergasungsprozess im Fall der H<sub>2</sub>-Zugabe eine 3-fach höhere Produktmenge zu erzielen [29]. Die Einbindung zusätzlichen Wasserstoffs bietet somit die Möglichkeit, eine hohe Konversion von Biomasse-Kohlenstoff in Kraftstoff-Kohlenstoff (>80 %) zu erzielen. 3) Wasserstoff wird zusammen mit Kohlendioxid als Edukt zur Synthese kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe eingesetzt (ohne die Nutzung biogener Ressourcen als Kohlenstoffquelle).

## 4. Regenerative Kraftstoffe und deren Bereitstellungspfade

Neben Benzin und Diesel kommen eine Reihe weiterer Kraftstoffe für den Verkehrsbereich infrage, von denen die wichtigsten kurz beschrieben werden. Welche regenerativen Kraftstoffe am ehesten Benzin und Diesel im Verkehr zu substituieren vermögen, hängt von folgenden Kriterien ab:

- Versorgungssicherheit/Diversifizierung der Ressourcen
- CO<sub>2</sub>- und Schadstoff-Emissionen (der gesamten Systemkette, "well-to-wheel")
- Lokalemissionen (v.a. in verkehrsbelasteten Ballungsräumen)
- Flächenertrag an Kraftstoff pro landwirtschaftlicher Nutzfläche
- Energetische Effizienz der gesamten Systemkette
- Infrastrukturerfordernisse/Komplexität im Fahrzeug
- Reichweite des Fahrzeugs mit einer Tankfüllung
- Kraftstoffgestehungskosten/CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

- Eignung für verschiedene Antriebssysteme (Verbrennungsmotor/Brennstoffzelle)
- Akzeptanz, Toxizität, Sicherheit
- Beschäftigungseffekte

## 4.1 Kraftstoffoptionen

Die einzigen heute in größeren Mengen produzierten Kraftstoffe aus Biomasse für den Verkehr sind Pflanzenölmethylester (in Deutschland im Wesentlichen Rapsölmethylester, RME) und Ethanol, die im Folgenden kurz dargestellt werden. Anschließend werden die heute kaum verbreiteten Kraftstoffe Wasserstoff, Methanol, Dimethylether, synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe und methanhaltige Gase (SNG) als Alternativen zu den erdölstämmigen Kraftstoffen beschrieben.

### **Pflanzenöle/Pflanzenölester**

Bei der Nutzung biogener Kraftstoffe spielt in Deutschland derzeit nur der Rapsölmethylester (sogenannter Biodiesel) eine Rolle. Biodiesel hat in Deutschland zurzeit einen Anteil am gesamten Kraftstoffmarkt (Otto-, Diesel- und Flugturbinenkraftstoff) von 0,8%, der Anteil am Markt für Dieselmethylester beträgt 1,7% [31]. Biodiesel wird heute an über 1.700 öffentlichen Tankstellen angeboten und ist somit derzeit der einzige flächendeckend verfügbare regenerative Kraftstoff in Deutschland. Nur etwa 40% des Biodiesels werden über Tankstellen verkauft, während 60% an Fahrzeugflottenbetreiber des Transport- und Güterverkehrs abgesetzt werden.

Zur Anwendung in Dieselmotoren wird das durch Pressung/Extraktion gewonnene Pflanzenöl mit Methanol umgeestert, um so einen Kraftstoff zu erzeugen, der in einem Großteil der heute existierenden Dieselmotoren

einsetzbar ist. Das unveresterte Öl ist ausschließlich in speziell adaptierten Motoren verwendbar.

Die Biodieselbranche kann auf eine positive Entwicklung in den vergangenen Jahren zurückblicken. Neben den steuerpolitischen Rahmenbedingungen werden insbesondere die motor- und abgastecnischen Anforderungen die weitere Entwicklungsperspektive von Biodiesel bestimmen. Biodiesel muss sich den technischen Herausforderungen stellen, die vor allem durch die europäische Gesetzgebung zur Verschärfung der abgasrechtlichen Anforderungen als Voraussetzung für die Typenzulassung entsprechender Motoren vorgegeben werden. Die zurzeit gültigen Grenzwerte können mit Biodiesel noch ohne technische Maßnahmen erreicht werden. Zukünftig müssen Fahrzeuge aber die abgasrechtlichen Anforderungen nach Euro IV bzw. Euro V erfüllen. Aufgrund zukünftiger Abgasgrenzwerte, die im Wechselbetrieb Diesel/Biodiesel nicht mehr ohne weiteres erreicht werden, und der aktuellen Änderung des Mineralölsteuergesetzes, wonach seit dem 01.01.2004 auch Kraftstoffmischungen in Höhe des Biokraftstoff-Anteils steuerbefreit sind, ist dem Vertriebsweg über eine Zumischung zu Dieseldieselkraftstoff (bis 5 Vol.% RME) der Vorzug zu geben.

Aufgrund der geringen Flächenerträge haben die Kraftstoffe Biodiesel und Pflanzenöl nur ein begrenztes Substitutionspotenzial und sollten – neben der Zumischung zu Dieseldiesel – eingesetzt werden, wo der spezifische ökologische Vorteil der biologischen Abbaubarkeit von Biodiesel/ Pflanzenöl zum Tragen kommt (z.B. bei der Substitution von Dieseldieselkraftstoff in sensiblen Umweltbereichen wie Landwirtschaft, Wasserschutzgebiete, Schifffahrt).

### **Ethanol**

Weltweit hat zurzeit Ethanol die größte Bedeutung als biogener Kraftstoff. Brasilien ist mit dem "Proalcool"-Programm der größte Ethanolproduzent und -nutzer im Verkehrsbereich. Die Ethanolproduktion in Brasilien betrug im Jahr 2001 ca. 12 Milliarden Liter und entsprach damit ca. 12% des gesamten Kraftstoffbedarfs für den Verkehr in Brasilien [1]. Auch in den USA wird Ethanol als Kraftstoffzusatz produziert. Die Menge von ca. 7 Milliarden Liter im Jahr 2001 entsprach ca. 1,5% des Benzinabsatzes in den USA [5].

Ethanol kann als Zusatz für handelsüblichen Ottokraftstoff eingesetzt werden (z.B. E5: 5 Vol.% Ethanol in Benzin), ohne dass Umstellungen an der Infrastruktur bzw. den Fahrzeugen erforderlich sind. Auch höhere Ethanolkonzentrationen (E85) bzw. reines Ethanol sind als Kraftstoff für Ottomotoren prinzipiell geeignet, erfordern aber adaptierte Verbrennungsmotoren. In E85-tauglichen Fahrzeugkonzepten wird die Kraftstoffart automatisch erkannt und die Parameter der Motorsteuerung automatisch angepasst, was es ermöglicht sowohl konventionellen Kraftstoff als auch E85 zu nutzen. Ein weiterer Verwertungsweg für Ethanol ist die Erzeugung des Antiklopfmittels Ethyl-Tertiär-Butyl-Ether (ETBE), das Benzin bis zu 15 Vol.% zugesetzt werden kann.

### **Wasserstoff**

Wasserstoff ist ein idealer Kraftstoff zur Versorgung von Brennstoffzellen, aber auch von konventionellen Energiewandlern wie Verbrennungsmotoren, der aus einer Vielzahl fossiler und regenerativer Primärenergieträger zugänglich ist. Aus diesem Grund wird Wasserstoff als der zukünftige Energieträger schlechthin betrachtet. Die Nachteile von Wasserstoff sind jedoch die Infrastrukturerfordernisse für Speicherung und Transport. Ein weltweiter, vollständiger

Ersatz von konventionellen Kraftstoffen durch Wasserstoff ist auch in den nächsten Jahrzehnten nicht absehbar. Eine Fokussierung allein auf die Option Wasserstoff als Energieträger sollte daher, zumindest kurz- bis mittelfristig, nicht verfolgt werden.

### **Methanol**

Die Verwertungswege für Methanol reichen von einer Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen bis hin zu reinem Methanol als Kraftstoff, das als Antrieb für zukünftige Brennstoffzellenantriebe geeignet ist oder sich für Fahrzeuge mit otto- und dieselmotorischem Antrieb eignet. Weitere Möglichkeiten sind die Verwendung von Methanol als Edukt zur Produktion von Dieseleratzkraftstoffen (zusammen mit Pflanzenölen), die Erzeugung des Kraftstoffes Dimethylether, die Herstellung von Kohlenwasserstoffen über den MTG-Prozess (Methanol-To-Gasoline) oder die Erzeugung des Antiklopfmittels MTBE (Methyl-Tertiär-Butyl-Ether).

Bei der Verwendung von Methanol für Brennstoffzellen wird zwischen der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC), bei der das Methanol direkt an der Anode umgesetzt wird, und der indirekten Methanol-Brennstoffzelle unterschieden, bei der in einem vorgeschalteten Reformer Wasserstoff aus Methanol erzeugt wird. Gelingt die Kommerzialisierung der DMFC, werden sich die Chancen für Methanol als Kraftstoff deutlich erhöhen, da die Komplexität der Brennstoffzellenperipherie gegenüber einem Brennstoffzellen-Antrieb mit einer vorgelagerten Reformierung stark abnehmen wird. Gegenüber den konventionellen Kraftstoffen hat Methanol einen entscheidenden Nachteil: Methanol ist zwar flüchtig, kann jedoch aufgrund korrosiver Eigenschaften nicht wie Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe über die bestehenden Verteilungsstrukturen (Kraftstofflager, Pipelines, etc.) vertrieben werden.

### **Dimethylether (DME)**

Dimethylether ist ein Gas, wird aber bei moderaten Drücken wie das weit verbreitete LPG (Liquefied Petroleum Gas, Propan/Butan, Auslegungsdruck 30 bar) gehandhabt. Hiermit kann auch die Infrastruktur für LPG mit geringfügigen Modifikationen genutzt werden. Wegen seiner hohen Cetanzahl ist DME ein ausgezeichneter Kraftstoff für adaptierte Dieselmotoren. Mit DME werden die hohen dieseltypischen Wirkungsgrade erreicht, aufgrund der nicht vorhandenen C-C-Bindungen und des Sauerstoffgehaltes ist das Abgas jedoch praktisch partikelfrei. DME wird v.a. als Kraftstoff für den Schwerlastverkehr vorgeschlagen, für den nur eine relativ geringe Anzahl Tankstellen erforderlich wäre.

### **Synthetische Benzin-/Dieselkraftstoffe**

Flüssige Kohlenwasserstoffe haben den großen Vorteil, dass sie ohne Einschränkungen über die konventionellen Transportsysteme vertrieben werden können und sich sofort in die bestehende Infrastruktur integrieren lassen. Kurzfristig lassen sich synthetische Kohlenwasserstoffe zunächst aus Erdgas über GTL-Prozesse (Gas-To-Liquids) herstellen und mittelfristig aus Biomasse über BTL-Verfahren (Biomass-To-Liquids). Diese Kraftstoffe können als Reinkraftstoffe oder als Zumischungen zu den konventionellen Kraftstoffen vermarktet werden. Längerfristig lassen sich auch adaptierte, aromatenfreie und olefinarme "Designerkraftstoffe" für adaptierte Kolbenmotoren herstellen, die die Voraussetzung für weitere Schadstoffreduzierungen verbrennungsmotorischer Konzepte bilden. Aufgrund der paraffinartigen Zusammensetzung hat dieser Kraftstoff den maximalen Wasserstoffgehalt und ist wegen des katalytischen Syntheseweges praktisch schwefelfrei. Nachteilig ist der gegenüber anderen Kraftstoffen aufwändige Herstellungsprozess sowie eine nur sehr eingeschränkte Eignung für zukünftige Brennstoffzellen-Antriebe.

### **Erdgassubstitut (SNG)**

Eine Vorreiterrolle zur Verwendung von regenerativ erzeugten, methanhaltigen Gasen als Energieträger spielt die derzeit steigende Verbreitung von Erdgas im Verkehrsbereich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Einsatz von Erdgas im Verkehr eine Diversifikation bzgl. der fossilen Ressourcen erlaubt, die Lokalemissionen deutlich geringer anfallen als bei vergleichbaren Dieselfahrzeugen und die Fahrzeuge kommerziell verfügbar sind. Weltweit werden heute über 1 Mio. Fahrzeuge mit Erdgas betrieben. Ein weiterer Grund in Deutschland ist die fiskalische Besserstellung von Erdgas gegenüber Benzin/Diesel. Da Methan gegenüber Wasserstoff eine mehr als dreifach höhere volumetrische Energiedichte aufweist, ist die gasförmige Speicherung zur Erzielung hoher Fahrzeugreichweiten deutlich einfacher möglich. Bei Verwendung von adaptierten Gasmotoren kommt der Vorteil von Methan bzgl. der geringen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen direkt zum Tragen.

Für den flächendeckenden Ausbau der Infrastruktur plant die Gasindustrie ca. 1.000 Erdgastankstellen in Deutschland zu errichten. Diese Tankstellen werden an strategisch wichtigen Standpunkten aufgestellt, die an die Erdgasversorgung angeschlossen sind (und zukünftig mit dezentralen Reformern zur Wasserstoffherzeugung ausgerüstet werden können). Diese Option eröffnet die Möglichkeit als Transportmedium für regenerative Energie Methan zu verwenden, so dass die vorhandene Verteilungsinfrastruktur verwendet werden kann, ohne in eine Transportinfrastruktur für Wasserstoff zu investieren.

Bislang wird SNG als Kraftstoff im Verkehrsbereich nur in wenigen Ländern (v.a. in Schweden und der Schweiz) angewendet [35]. Hierbei handelt es sich um aufbereitetes Biogas, das entweder direkt oder über eine Einspeisung



in das Erdgasnetz - so dass es an beliebiger Stelle des Erdgasnetzes formal als SNG entnommen werden kann als - Kraftstoff für Fahrzeuge zur Verfügung steht.

## 4.2 Technische Bereitstellungspfade

Mittelfristig wird es eine verstärkte Notwendigkeit der Einführung erneuerbarer Energien in den Verkehrssektor geben. Dazu bieten sich eine Reihe unterschiedlicher Umwandlungsketten sowohl auf Basis erneuerbar erzeugten Stroms, von Biomasse als auch auf Basis der Kombination von beiden an. In *Abb. 5* sind die Hauptpfade für die Kraftstoffbereitstellung aus erneuerbarer Energie dargestellt.

Die Herstellungsverfahren lassen sich grob einteilen in: Extraktive, fermentative und thermochemische Verfahren sowie die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff.

### **Kraftstoffe aus Ölpflanzen**

Pflanzenöl wird durch Pressen/Extraktion von Ölsaaten gewonnen und kann direkt in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Diese Anwendung beschränkt sich jedoch auf Fahrzeuge mit speziell adaptierten Motoren. Weitaus bedeutender ist der Einsatz von Biodiesel. In Deutschland wird Biodiesel hauptsächlich durch die Umesterung von Rapsöl mit Methanol hergestellt (Rapsölmethylester, RME), es können aber auch andere biomassestämmige Öle eingesetzt werden. Der Biodieselabsatz in Deutschland betrug im Jahr 2003 ca. 0,65 Mio.t (bei einer Produktionskapazität für Biodiesel von ca. 1,2 Mio.t) [27]. Typische Anlagengrößen reichen von 5.000 t/a bis über 100.000 t/a bei Neuanlagen.

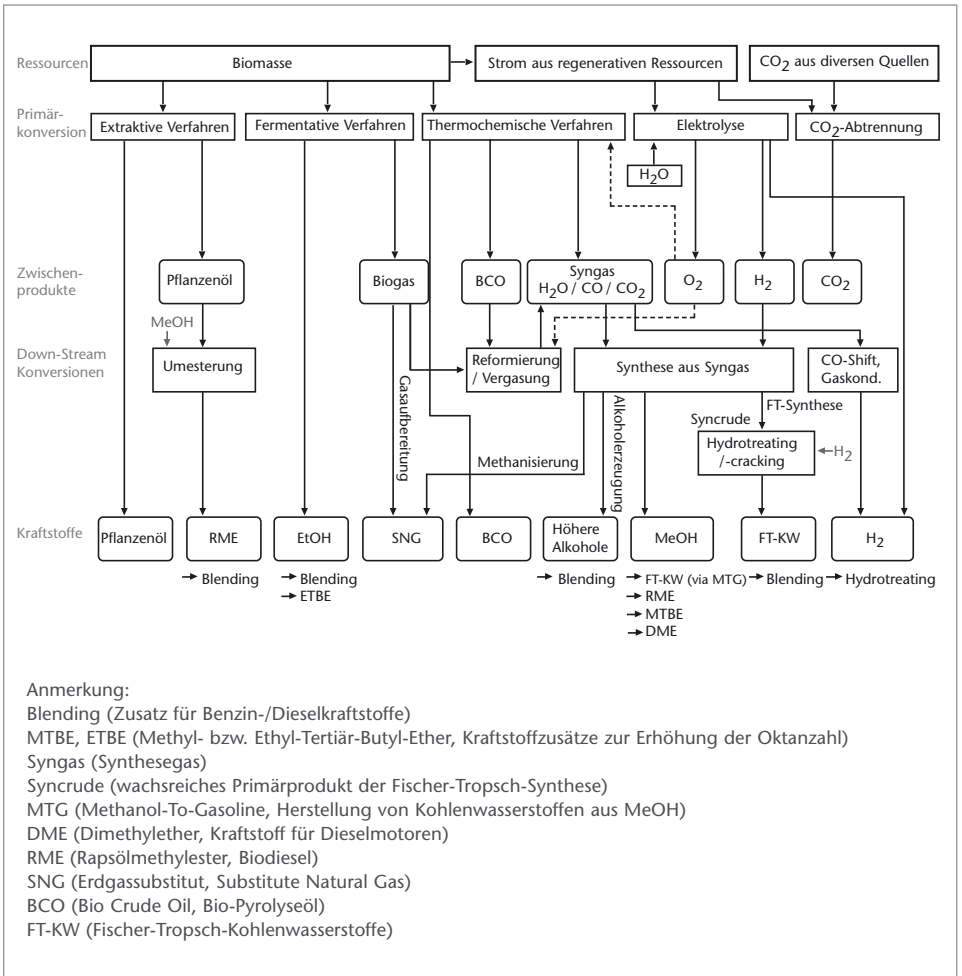


Abbildung 5:  
Herstellungspfade  
regenerativer Kraftstoffe

### Ethanol durch alkoholische Gärung

Ethanol wird durch Fermentation zucker- und stärkehaltiger Pflanzen gewonnen. Neben stärkehaltigen Pflanzen, wie z.B. Mais, sind Zuckerrohr und -rüben die am häufigsten verwendeten Ausgangsmaterialien für die Ethanolproduktion. Während zuckerhaltige Pflanzen direkt vergoren werden, muss bei Getreide die Stärke zunächst enzymatisch in Zucker umgewandelt werden. In *Tab. 3* sind die europa- und weltweit produzierten Ethanolmengen wiedergegeben [2].

Ein relativ neues Verfahren ermöglicht den Einsatz von zellulosehaltiger Biomasse für die Ethanolproduktion, wodurch das Potenzial möglicher Einsatzstoffe erheblich erweitert wird (Holz, Getreidestroh, ertragsstarke Energiepflanzen wie z.B. Miscanthus). Beim Einsatz von zellulosehaltiger Biomasse, wie z.B. Stroh oder Holzhackschnitzel, muss zunächst deren Struktur aufgebrochen werden, was durch Erhitzen unter Säurezugabe erfolgt. Danach kann die Zellulose durch chemisch-enzymatischen Aufschluss für die Verzuckerung und Vergärung umgewandelt werden. Lignin fällt als Nebenprodukt bei dem Aufschlussprozess an. Die Produktion aus nicht zucker- und stärkehaltigen Pflanzen könnte einen Durchbruch für die Ethanolerzeugung aus Biomasse bedeuten, das Verfahren ist aber noch nicht kommerzialisiert

Tabelle 3:  
Ethanolproduktion in  
10°Litern pro Jahr

Jahr	2001	2000	1999	1998	1997
<b>Welt</b>	<b>31.392</b>	<b>29.936</b>	<b>31.071</b>	<b>31.963</b>	<b>32.961</b>
Brasilien	11.900	11.400	12.982	14.122	15.493
USA	7.580	7.050	6.605	6.450	5.886
<b>Europa</b>	<b>4.153</b>	<b>4.024</b>	<b>4.073</b>	<b>4.140</b>	<b>4.308</b>
Frankreich	800	812	754	779	767
Deutschland	295	285	340	364	375

### **Erdgassubstitut aus der anaeroben Vergärung**

SNG kann durch Aufbereitung von Biogas gewonnen werden, welches durch anaerobe Fermentation von organischen Reststoffen oder speziell zur Vergärung angebauter Energiepflanzen entsteht. Biogas ist ein Gemisch aus den Hauptbestandteilen Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) sowie Spuren weiterer Begleitstoffe ( $\text{H}_2\text{S}$ , Siloxane, etc.). In der Mehrzahl der Anwendungsfälle erfolgt derzeit eine motorische Nutzung des Biogases in Form von Blockheizkraftwerken zur Stromerzeugung. Alternativ kann die Nutzung von Biogas als regenerativer Kraftstoff direkt oder über eine Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz erfolgen. Hierzu muss das Biogas durch Abtrennung von  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{S}$  sowie gegebenenfalls weiterer Komponenten aufbereitet werden. Zur Abtrennung werden Waschverfahren oder die Druckwechseladsorption (PSA) eingesetzt. Wie Erdgas ist SNG ein Gasgemisch, in dem neben dem Hauptbestandteil Methan gewisse Fremddanteile anderer Gase (inerte Komponenten, höhere Kohlenwasserstoffe, etc.) toleriert werden - eine Anreicherung auf fast 100% Methan ist deshalb nicht notwendig. Neben der Erzeugung aus Biogas ist SNG auch synthetisch über eine thermochemische Vergasung zugänglich.

### **Kraftstoffe aus Synthesegas/Synthesegaserzeugung**

Neben den extraktiven und fermentativen Verfahren besitzen insbesondere die thermochemischen Verfahren zur Verwertung der Biomasse eine herausragende Bedeutung, weil dieser Weg die Verwertung des gesamten Pflanzmaterials zulässt (Ganzpflanzennutzung). Bei den extraktiven bzw. fermentativen Verfahren wird immer nur ein Teil der Biomasse genutzt (z.B. Öl- oder Stärkeanteil). Bei den Herstellungsverfahren über Synthesegas kann eine Vielzahl

biogener Ressourcen verwertet werden, so dass die ökologische Vielfalt erhalten bleibt. Monokulturen wie z.B. beim Anbau ölhaltiger bzw. zucker- und stärkehaltiger Pflanzen könnten hierdurch vermieden werden. In einem langfristigen Szenario eröffnet der Weg über CO<sub>2</sub> und Wasserstoff (CO-freies Syngas) eine weitere Option für die Synthese kohlenstoffhaltiger Kraftstoffe, ohne dass hierbei die Ressourcen einer Limitierung unterliegen.

Nicht nur auf der Edukt-, sondern auch auf der Produktseite erschließt der Weg über das Synthesegas eine größtmögliche Flexibilität. Die Kraftstoffe mit dem zukünftig höchsten Anwendungspotenzial sind: Wasserstoff, Methanol, DME, synthetische Benzin/Diesel-Kraftstoffe und SNG, die über die Zwischenstufe des Synthesegases herstellbar sind. Die Technologie "Synthesegaserzeugung aus Biomasse - Kraftstoffherstellung aus Synthesegas" ist zurzeit jedoch in dezentralen Anlagen (<50MW) nicht kommerziell verfügbar. Die Vergasung von Kohle ist im Bereich großer Anlagen Stand der Technik. Diese Technologie ist jedoch nicht ohne weiteres auf kleine, dezentrale Anlagen zu übertragen.

Der Primärschritt bei der Synthesegaserzeugung aus Biomasse ist eine thermochemische Konversion. Ziel ist hierbei die Zerlegung der Biomasse in ein Produktgas mit den Hauptkomponenten Wasserstoff und Kohlenmonoxid, das sich als Eduktgas zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe einsetzen lässt (vgl. Abb. 5). Als Vergasungsmittel können Luft, Sauerstoff, Wasserdampf und Wasserstoff (sowie teilweise Mischungen dieser Gaskomponenten) eingesetzt werden. Die größte Herausforderung für die Erzeugung von Kraftstoffen aus Biomasse über eine thermochemische Vergasung ist die Erzeugung eines "synthesetauglichen" Gases, das hohen Anforderungen zu genügen hat. Das

Synthesegas muss frei von Teer, Partikeln und Katalysatorgiften sein sowie neben einem geringen Inertgasanteil einen hohen Wasserstoffgehalt aufweisen. Bisherige Verfahren zur Gaserzeugung aus Biomasse sind nicht auf die Herstellung synthesesetauglicher Gase optimiert, sondern auf die Verbrennung bzw. Verstromung des erzeugten Produktgases.

Aufgrund der Reaktionsgleichungen zur Erzeugung von Methanol bzw. längerkettigen Alkanen (aus  $\text{CO} + 2 \text{H}_2$  bzw.  $\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$ ) folgt, dass ein bestimmtes Verhältnis der Gasbestandteile  $\text{H}_2/\text{CO}/\text{CO}_2$  für einen hohen Umsatz bei der Synthese eingehalten werden muss. Der Stöchiometriekoeffizient  $S$  ( $S = (p_{\text{H}_2} - p_{\text{CO}_2}) / (p_{\text{CO}} + p_{\text{CO}_2})$ ) des Synthesegases sollte für die Methanol- und Fischer-Tropsch-Synthese deshalb auf  $S=2$  eingestellt sein. Einen noch höheren Wasserstoffanteil erfordert die synthetische Herstellung von Methan mit einem Stöchiometriekoeffizienten von  $S=3$ . Ziel der thermochemischen Vergasung mit einer nachfolgenden Kraftstoffsynthese ist deshalb die Erzeugung eines wasserstoffreichen, konditionierten Produktgases. Prinzipiell ist bei der thermochemischen Vergasung von Biomasse zwischen autothermen und allothermen Verfahren zu unterscheiden. Bei autothermen Verfahren wird die Energie für die endotherme Vergasung durch eine Teilverbrennung der Edukte direkt in den Prozess eingebracht (direkte Vergasung). Um das Produktgas nicht durch Stickstoff zu verdünnen, kann bei den autothermen Verfahren nur mit Sauerstoff (nicht mit Luft) vergast werden. Das Produktgas enthält hierbei auch den Abgasstrom aus der Teilverbrennung, so dass trotz Vergasung mit Sauerstoff der erforderliche Stöchiometriekoeffizient nicht erreicht wird. Zur Einstellung der Stöchiometrie ist deshalb eine nachgeschaltete  $\text{CO}_2$ -Abtrennung erforderlich oder es erfolgt nur eine Teilkonversion des Synthesegases zu Kraftstoff - der

nicht umgesetzte (wasserstoffarme bzw. kohlenoxidreiche) Restanteil wird z.B. für die Co-Produktion von elektrischer Energie genutzt. Eine weitere Möglichkeit ist die unter Kap. 3.4 beschriebene Zugabe von elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff zur Einstellung der Stöchiometrie.

Höhere Wasserstoffanteile in der thermochemischen Vergasung lassen sich mit allothermen Prozessen erzielen, bei denen die notwendige Prozessenergie von außen (über einen Wärmeübertrager oder über einen Wärmeträger) in den Vergasungsteil eingebracht wird (indirekte Vergasung). Die aufwändigere Prozessführung bei den allothermen Verfahren hat den Vorteil, dass das Abgas des wärmeliefernden Prozesses nicht mit dem Produktgas gemischt ist und so ein wasserstoffreicheres Gas mit bis zu 55 Vol.% H<sub>2</sub> resultiert. Auch bei den allothermen Verfahren reicht der Wasserstoffgehalt jedoch nicht aus um den gewünschten Stöchiometriefaktor zu erzielen.

Nachfolgend sind einige Entwicklungen skizziert, die ein Synthesegas für eine nachfolgende Konversion zu regenerativen Kraftstoffen liefern.

Im Verfahren von Choren [36] wird eine autotherme Niedertemperaturvergasung mit einer autothermen Flugstromvergasung, in der die in der Niedertemperaturstufe erzeugten Produkte Pyrolysegas und -koks umgesetzt werden, gekoppelt. Dieses zweistufige Verfahren benötigt zum Betrieb Sauerstoff als Vergasungsmittel. Das erzeugte, fast teerfreie Produktgas wird nach CO<sub>2</sub>-Abtrennung in einem Syntheseschritt zu Methanol bzw. Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffen konvertiert.

Der FICFB-Prozess (Fast Internally Circulating Fluidised Bed) der Universität Wien [11], der im 8-MW-Maßstab in

Güssing in Österreich realisiert wurde, besteht aus zwei kommunizierenden Wirbelschichten, in denen ein inerte Wärmeträger (z. B. Quarzsand) zirkuliert. Während in einem Wirbelbett Biomasse allotherm mit Wasserdampf unter Zuführung des heißen Wärmeträgers vergast wird, erfolgt in der zweiten Wirbelschicht die Wärmezufuhr zum Erhitzen des Wärmeträgers durch Verbrennen der Vergasungsrückstände mit Luft. Bei diesem Verfahrenskonzept sind die Gasströme getrennt, so dass das Produktgas nicht durch das Abgas des Verbrennungsteils verdünnt wird. Dieser Prozess wird zurzeit mit einer nachgeschalteten Methansynthese zur Erzeugung von Erdgassubstitut getestet, eine Erweiterung um eine Fischer-Tropsch-Anlage ist geplant [7].

Auch das Verfahren der gestuften Reformierung [19] ist ein zweistufiger Prozess mit Trennung der Gasströme, bei dem das in der ersten Stufe erzeugte Pyrolysegas in einem nachgeschalteten Reformier mit Dampf allotherm zu einem Synthesegas konvertiert wird. Der in der Pyrolyse mitentstehende feste Rückstand (Koks) liefert die Prozesswärme durch Verbrennung mit Luft in einer separaten Brennkammer, in der ein inerte Wärmeträger (z.B. Stahl- oder Keramikugeln) erhitzt wird, um die Reaktionswärme für die endothermen Prozesse Reformierung und Pyrolyse zu liefern.

In einem speziell für die nachfolgende Synthese entwickelten Prozess zur Erzeugung konditionierter Synthesegase nach dem Konzept der absorptionsunterstützten Wasserdampfvergasung mit einem CO<sub>2</sub>-absorbierenden Wirbelbettmaterial - auch hier mit zwei gekoppelten Wirbelbetten nach dem FICFB-Konzept - wurden kontinuierliche Wassergehalte im erzeugten Produktgas von ca. 70 Vol.% nachgewiesen [17].



Ein weiterer Verfahrensansatz zur Erzeugung wasserstoffreicher Produktgase aus Biomasse ist die hydrothermale Vergasung, bei der Biomasse in überkritischem Wasser bei 600-700 °C und ca. 250 bar umgesetzt wird und nach prozessintegrierter CO<sub>2</sub>-Abtrennung hohe Wasserstoffgehalte von über 80 Vol.% resultieren [26].

Von [10] wird ein Verfahrenskonzept bearbeitet, bei dem aufgrund des Anfalls der Biomasse dezentral ein Biopyrolyseöl (BCO) mit hoher Energiedichte durch eine Flashpyrolyse hergestellt wird (vgl. Abb.5), um anschließend, nach Transport, in zentral angeordneten Flugstromdruckvergasern zu Synthesegas konvertiert zu werden.

Beim ZSW wurde eine Anlage zur Herstellung von Methanol aus einem CO-freien Synthesegas, bestehend aus Kohlendioxid und elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff, aufgebaut [30]. In einer weiteren Demonstrationsanlage wurde Biogas zu einem Synthesegas reformiert und anschließend zu Methanol umgesetzt [16].

### **Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen**

Wasserstoff wird im Wesentlichen aus Synthesegas hergestellt. Über die Wassergas-Shift-Reaktion wird der CO-Anteil im Synthesegas mit Wasserdampf in Wasserstoff und CO<sub>2</sub> konvertiert und anschließend Wasserstoff vom Restgas (CO<sub>2</sub>, Rest-CO, Wasserdampf, evtl. N<sub>2</sub>, nicht umgesetztes Edukt) über eine Druckwechseladsorption (PSA) abgetrennt.

Die Herstellung von Methanol erfolgt praktisch ausschließlich über die sogenannte Niederdruck-Synthese bei einem Druck von bis zu 100 bar und Temperaturen von 250 bis

280 °C unter Verwendung von Katalysatoren auf Cu/ZnO-Basis. Aus thermodynamischen Gründen kann nur ein Teil des eintretenden Synthesegases zu Methanol konvertiert werden. Das Syntheserestgas wird rezykliert, um eine möglichst hohe Kohlenstoff-Konversion zu erzielen. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine genaue Einstellung der Stöchiometrie des Synthesegases. Im Gegensatz zu Erdgas als Edukt für die Synthese ist bei biomassestämmigen Synthesegasen die Einstellung der Stöchiometrie nur über eine CO<sub>2</sub>-Abtrennung möglich. Die energetischen Wirkungsgrade für die Erzeugung von Methanol aus Biomasse erreichen - in Abhängigkeit von der Verfahrensführung und den verwendeten Ausgangsmaterialien - Werte von bis zu 55 % [13, 37]. Alternativ kann eine Auslegung mit niedrigeren energetischen Wirkungsgraden (bezogen auf Methanol) gewählt werden, bei der das Syntheserestgas zur Co-Generation von Strom verwendet wird [32, 17].

Dimethylether kann entweder aus Methanol (Methanol Dehydration Technology) oder aus Synthesegas (Single-Step DME Synthesis) hergestellt werden. Der indirekte Herstellungspfad, bei dem zunächst konventionell Methanol erzeugt wird, mit anschließender katalytischer Umsetzung zu DME, ist Stand der Technik. Derzeit werden einige kleinere Pilotanlagen betrieben, bei denen DME auch direkt an einem speziell entwickelten Katalysator erzeugt wird.

Aus Synthesegas sind auch Kohlenwasserstoffe nach der Fischer-Tropsch-Synthese zugänglich. Die Reaktionsbedingungen der Fischer-Tropsch-Synthese sind 200-300 °C bei einem Druck bis 25 bar unter Verwendung von Eisen- und Cobalt-basierten Katalysatoren. Die Primärprodukte sind nur zum Teil die gewünschten Kohlenwasserstoff-Fractionen, sondern v.a. langkettige Kohlenwasserstoffe

(wachsreiches "Syncrude"), die in einem weiteren Verfahrensschritt durch die Zugabe von Wasserstoff in kürzerkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden müssen. Bei der hydrierenden Spaltung - wie auch zuvor bei der Fischer-Tropsch-Synthese - wird eine Produktbandbreite verschiedener Kohlenwasserstoffketten erzeugt. Hier unterscheidet sich die Herstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe z.B. von der Methanolsynthese, bei der nur eine bestimmte chemische Verbindung erzeugt wird. Bei einer dezentralen Kraftstoffherzeugung ist es technisch sehr aufwändig, aufgrund der Produktbandbreite bei der Fischer-Tropsch-Synthese definierte Kraftstoffqualitäten zu erzeugen, die direkt für die Nutzung im Fahrzeug verwendet werden können.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen ist der MTG-Prozess (Methanol-to-Gasoline), bei dem Methanol an Zeolith-Katalysatoren umgesetzt wird. Methanol wird bei Temperaturen von 350-450 °C und geringem Überdruck von einigen bar zunächst zu Dimethylether konvertiert, der über die Stufe der leichten Olefine schließlich zu Benzin-Fractionen reagiert.

Auch methanreiche Gase (SNG) können aus Synthesegas durch eine sogenannte Methanisierung hergestellt werden. Eine Alternative hierzu ist die hydrierende Druckvergasung von Biomasse, die bereits im ersten Primärschritt ein Gas mit einem hohen Methananteil liefert. In einem nachfolgenden Verfahrensschritt wird nur der Restanteil im Gas bei einer Temperatur von ca. 400 °C methanisiert [18, 33].

Neben biomassestämmigen, CO-haltigen Synthesegasen können für die Methanol-, DME-, Methan- und die Fischer-Tropsch-Synthese auch CO-freie Synthesegase verwendet

werden. Dies eröffnet die Möglichkeit kohlenstoffbasierte Kraftstoffe auch aus  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  zu erzeugen. Alle heute verwendeten, auf fossiler Basis hergestellten Kraftstoffe sind prinzipiell auch auf regenerativem Wege aus Biomasse, aus erneuerbarer Elektrizität oder aus einer Kombination der beiden Energieträger zugänglich.

## 5. Kosten und $\text{CO}_2$ -Emissionen regenerativer Kraftstoffe

Der Einsatz regenerativer Kraftstoffe muss sich neben den ökologischen Effekten auch an der Kostensituation orientieren. In *Abb. 6* ist dargestellt, dass die Umwandlung regenerativer Primärenergieträger in Kraftstoffe auf absehbare Zeit noch mit Zusatzkosten gegenüber den heutigen Kosten für Diesel bzw. Benzin verbunden ist. Im Allgemeinen sind die Herstellungsprozesse für regenerative Kraftstoffe komplizierter und energetisch weniger effizient (und damit teurer), da es sich um chemische Konversionsprozesse handelt, während die Gewinnung von Diesel/Benzin zum wesentlichen Teil nur ein physikalischer Abtrennprozess ist. Zudem liegen die reinen Rohstoffkosten für Energiepflanzen mit ca.  $0,02 \text{ €/kWh}$  (*vgl. Abb. 3*) - bei deutlich schlechteren Umwandlungswirkungsgraden zu Kraftstoff - höher als die derzeitigen Rohölkosten (30 US-\$/Barrel entsprechen ca.  $0,016 \text{ €/kWh}$ ).

Die Kosten von Kraftstoffen auf Biomasse-Basis bewegen sich in einer Bandbreite zwischen  $0,05$  und  $0,15 \text{ €/kWh}$  und sind somit deutlich höher als die Herstellungskosten von Benzin/Diesel. Die Kosten reichen bis ca.  $0,5 \text{ €/kWh}$  für Flüssigwasserstoff aus photovoltaisch erzeugtem Strom (und damit ca.  $5 \text{ €}$  pro Liter Benzin-/Dieseläquivalent).

Die Bereitstellung der Kraftstoffe ist mit unterschiedlich hohen Energieaufwendungen und Umweltauswirkungen verknüpft, die aus der Gewinnung der Primärenergie, dem Herstellungsprozess, dem Transport der Produkte, den Verwendungsmöglichkeiten von Nebenprodukten sowie der Kraftstoffnutzung resultieren. Erneuerbare Kraftstoffe zeichnen sich vor allem durch einen geringen Verbrauch erschöpflicher Ressourcen und damit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Im Vergleich zu den Benzin- und Dieselherstellungsketten kann eine deutliche CO<sub>2</sub>-Einsparung erzielt werden. Die Aufwendungen bei Kraftstoffen auf Biomassebasis hängen vor allem davon ab, ob Reststoffe oder Energiepflanzen eingesetzt werden und wie die Nebenprodukte verwendet werden. Zudem sind, auch bei Kraftstoffen auf Basis erneuerbaren Stroms, die Transportketten und andere nachgelagerte Prozessschritte von Belang.

Entsprechend dem reduzierten Verbrauch fossiler Primärenergieträger liegen die durch Herstellung und Verbrennung freigesetzten Klimagase bei erneuerbaren Kraftstoffen deutlich niedriger. Während für die regenerativen Kraftstoffe Einsparungen von bis zu 90 % bzgl. der klimarelevanten Emissionen möglich sind, führt die Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus fossilen Primärenergieträgern (Erdgas, Kohle) zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber den konventionellen Kraftstoffen Benzin/Diesel aus Erdöl. Insbesondere die Nutzung von Kohle zur Herstellung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen ist mit drastisch höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden (um den Faktor 2,5!). Auch die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen oder Wasserstoff aus Erdgas bedingt, bezogen auf den erzeugten Sekundärenergieträger ("well-to-tank"), ca. 20 % höhere CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber Benzin/Diesel, die in der gesamten Energiekette ("well-to-wheel") durch energieeffiziente Antriebstechnologien (z.B. Brennstoffzellen) wieder kompensiert werden müssen.

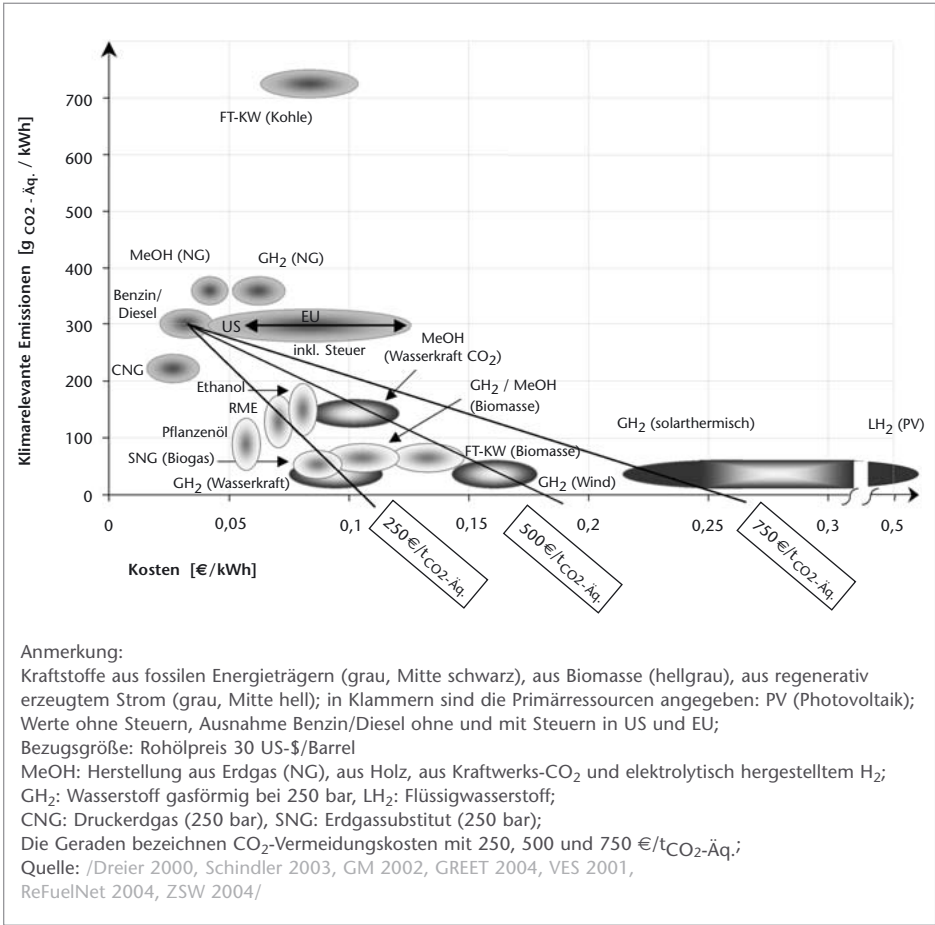


Abbildung 6:  
 Kosten und Treibhausgas-  
 Emissionen verschiedener  
 fossiler und regenerativer  
 Kraftstoffe

Die Herstellung von Biodiesel führt zu etwas höheren CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen, als man aufgrund des Energieverbrauchs vermuten würde. Dies ist vor allem auf die von der Art des Landbaus (z.B. Düngemittleinsatz) abhängigen Lachgasemissionen zurückzuführen [24].

Bei Ethanol ist ein erheblicher Anteil nicht erneuerbarer Energie zur Erzeugung notwendig. In diesen Fällen fällt die Einsparung klimarelevanter Gase geringer aus als bei den Herstellungspfaden über Synthese- bzw. Biogas als Zwischenprodukt oder auf Basis erneuerbaren Stroms.

Gegenüber dem Referenzfall Benzin/Diesel in *Abb. 6* können aus der Kostendifferenz und den eingesparten klimarelevanten Emissionen für die verschiedenen regenerativen Kraftstoffe die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten berechnet werden. Die in *Abb. 6* eingezeichneten Geraden bezeichnen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten mit 250, 500 und 750 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> bezogen auf den heutigen Referenzfall (30 US-\$/Barrel).

Die niedrigsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ergeben sich für die Nutzung der fossilen Ressource Erdgas. Erdgas weist aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs pro Kilowattstunde geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen auf als Benzin/Diesel. Je wasserstoffreicher der (fossile) Brennstoff ist, desto niedriger ist die pro Kilowattstunde resultierende CO<sub>2</sub>-Menge. Selbst in komprimierter Form ist Erdgas kostenmäßig etwas günstiger als Benzin/Diesel, so dass in diesem Fall sogar negative CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten resultieren (ohne Berücksichtigung weiterer Transaktionskosten).

Die geringsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für die Erzeugung und Nutzung regenerativer Kraftstoffe resultieren für unverestertes Pflanzenöl mit ca. 120 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>. Für Biodiesel und für Erdgassubstitut aus Biogas betragen die mittleren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ca. 230 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> für Ethanol sowie

Wasserstoff bzw. Methanol aus Biomasse ca. 330 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> und für Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe mindestens 400 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>. Bei der Nutzung von regenerativ erzeugtem Strom sind mit Ausnahme der Erzeugung von Wasserstoff aus Wasserkraft mit ca. 250 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten deutlich höher und betragen für Wasserstoff aus Windenergie und für Methanol aus elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff (aus Wasserkraft) und abgetrenntem CO<sub>2</sub> aus den Rauchgasen konventioneller Kraftwerke ca. 500 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>. Für solaren Wasserstoff resultieren sogar CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von mindestens 750 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>.

Damit liegen die Kosten zur Vermeidung klimarelevanter Emissionen im Verkehrsbereich durch regenerative Kraftstoffe deutlich über anderen Maßnahmen, wie z.B. der Substitution von fossilen Energieträger durch Biomasse im Wärmemarkt mit bis zu 50 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> oder durch den Einsatz von Biomasse zur Stromerzeugung mit 50-100 €/t<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub>.

## 6. Perspektiven

Mit regenerativen Kraftstoffen sind drastische CO<sub>2</sub>-Einsparungen von über 90 % möglich, die allein mit der Effizienzsteigerung der Antriebsaggregate nicht zu erzielen wären. Biogene Ressourcen sind zwar nicht unbegrenzt vorhanden, vermögen aber doch nennenswerte Anteile von 7 % für Deutschland bis 27 % weltweit (bezogen auf den heutigen Kraftstoffverbrauch für den Verkehr) zu decken. Langfristig kommt auch regenerativ erzeugte Elektrizität für die Erzeugung von Kraftstoffen in Betracht.

Wie wird sich vor dem Hintergrund der ambitionierten Zielvorgaben der Europäischen Union der Anteil verschiedener regenerativer Kraftstoffe am Gesamtverbrauch zukünftig



gestalten? Wann welcher regenerative Kraftstoff eine Marktdurchdringung erfahren wird, hängt u.a. von den vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, den CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten und der Verfügbarkeit verschiedener Technologien ab.

Ein wesentlicher Faktor für den Zeitpunkt des Einsatzes regenerativer Kraftstoffe ist der ökoeffiziente Einsatz der regenerativen Primärenergieträger. Dieser hängt davon ab, wie viel CO<sub>2</sub>-Emissionen oder andere Umweltwirkungen vermieden werden können, indem regenerative Energieträger verwendet werden. Während in Deutschland eine kWh Strom im derzeitigen, relativ ineffizienten und kohlelastigen Erzeugungssystem zu ca. 0,7 kg CO<sub>2</sub> führt, verursacht eine kWh Benzin bzw. Diesel lediglich ca. 0,3 kg CO<sub>2</sub>. Die Substitution konventionellen Stroms durch regenerative Energieträger ist also unter Klimagesichtspunkten mehr als doppelt so effizient wie der Ersatz von konventionellen Kraftstoffen [28]. Der optimale Einsatz von regenerativ hergestellten Kraftstoffen im Verkehr ist unter diesen Gesichtspunkten allerdings eine Funktion der Zeit. Einerseits werden die zunehmende Durchdringung des Kraftwerksparks durch klimaneutrale Energieträger und die Substitution von Kohle durch Erdgas zu sinkenden spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Stromerzeugung führen. Gebremst wird dieser Rückgang jedoch durch den Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland. Andererseits werden Benzin/Diesel-Kraftstoffe durch zunehmende Ressourcenverknappung und zusätzliche Umwandlungsschritte (synthetische Kraftstoffe aus Erdgas/Kohle) sowie durch die steigenden Anforderungen an die chemische Zusammensetzung der Kraftstoffe zu wachsenden Emissionen führen. Aus Gründen der Ökoeffizienz erweist sich der Einsatz erneuerbarer Energieträger zumindest auf einer langfristigen Zeitskala deshalb als dringend geboten.

Mit den Vermeidungskosten von Klimagasen allein lässt sich der Einsatz regenerativer Kraftstoffe derzeit nicht rechtfertigen, da die CO<sub>2</sub>-Vermeidung im Verkehrsbereich besonders teuer ist. Zukünftig wird jedoch jeder Energieverbrauchssektor, auch der Verkehrsbereich, seinen Beitrag zur Senkung klimarelevanter Emissionen leisten müssen. Von strategischer Bedeutung für die Bewertung des Einsatzes regenerativer Primärenergieträger im Verkehr ist allerdings die zukünftige Preisentwicklung, da sich durch eine relative Verschiebung der Preisentwicklungen im mobilen und stationären Bereich, also beispielsweise durch einen früheren überproportionalen Anstieg der Rohölkosten durch kürzere Reichweiten, eine Verschiebung des Zeitpunktes ergeben kann, zu dem der Einsatz im mobilen Sektor attraktiver wird. Eine Studie von Prognos [21] geht beispielsweise von einer Verdreifachung der Rohölpreise bis 2050 aus, während der Strompreis moderat ansteigen wird. Damit wird die Substitution von rohölbasierten Kraftstoffen zukünftig attraktiver.

Neben den Kriterien der CO<sub>2</sub>-Vermeidung zur Einführung regenerativer Kraftstoffe spielen jedoch auch weitere Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle. Wird der Kriterienkatalog um die Diversifizierung der Ressourcen und der daraus resultierenden Versorgungssicherheit erweitert, so ergeben sich für die Verwertung regenerativer Energieträger andere Präferenzen. Während im Strom- und Wärmemarkt eine Vielzahl von Substitutionsmöglichkeiten besteht, ist die Reduzierung der Rohöl-Abhängigkeit im Verkehrsbereich weitaus schwieriger. Gerade diese Tatsache spricht für einen verstärkten Einsatz regenerativer Primärenergieträger für die Erzeugung von Kraftstoffen.

Die Mineralölsteuerbefreiung für Biokraftstoffe in Deutschland wird dazu führen, dass die Mineralölkonzerne regenerative Anteile den konventionellen Kraftstoffen zumischen.

Aufgrund der vorhandenen Infrastruktur werden kurzfristig verstärkt Biodiesel (als Reinkraftstoff und als Zumischung bis 5 Vol.% zu konventionellem Dieselmotorkraftstoff) sowie Ethanol (als Zumischung bis 5 Vol.% zu Benzin bzw. zur Erzeugung des "Oktanboosters" ETBE) Anteile am Markt gewinnen.

Wegen der relativ geringen Netto-Flächenerträge von ca. 11 MWh/(ha × a) ist das Wachstumspotenzial von Biodiesel (und je nach Herstellungsart auch für Ethanol) jedoch begrenzt. Mittelfristig werden - neben Erdgassubstitut aus Biogas - synthetische Kraftstoffe eine verstärkte Marktdurchdringung erfahren, sofern es gelingt, an die Biomasse angepasste Konversionstechnologien zu etablieren. Erst sehr langfristig (>2050?) wird erwartet, dass Wasserstoff wesentliche Anteile gewinnen kann, da die Infrastrukturerfordernisse große ökonomische Herausforderungen darstellen. Fraglich ist hierbei, wann dieser Wasserstoff aus regenerativen Ressourcen hergestellt wird, oder - was wahrscheinlicher ist - die Herstellung zunächst aus fossilen Rohstoffen erfolgt, mit den daraus resultierenden klimarelevanten Emissionen.

Die Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse zur Erzeugung von Kraftstoffen ist auch vor dem Hintergrund der EU-Osterweiterung von Interesse, um im Rahmen eines agrarpolitischen Umbaus - unter Wahrung ökologischer Randbedingungen und des Lebensmittelanbaus - neue Erwerbsquellen für die Landwirtschaft zu schaffen. Nicht zu vernachlässigen sind hierbei die Beschäftigungseffekte. Für die EU-15 wird geschätzt, dass ein Anteil von 1 % Biokraftstoffen 45.000 bis 75.000 Arbeitsplätze generieren wird [15].

## Literatur

- [1] Balanco Energetico Nacional, BEN 2002, MME, Ministerio das Minas e Energia, Brasilia, Brazil (2002)
- [2] C. Berg: "World Ethanol Production 2001", [www.distill.com/world\\_ethanol\\_production.htm](http://www.distill.com/world_ethanol_production.htm) (2004)
- [3] T. Dreier: "Ganzheitliche Systemanalyse und globale Potenzialanalyse biogener Kraftstoffe", Dissertation TU-München, Ife Schriftenreihe, Heft 42, E&M Verlag Herrsching (2000)
- [4] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, [www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de) (2004)
- [5] [www.ethanolRFA.org](http://www.ethanolRFA.org) (2004)
- [6] Europäische Kommission: "Grünbuch - Hin zu einer euro-päischen Strategie für Versorgungssicherheit" (2001); "Weissbuch - Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellung für die Zukunft" (2001); "Über alternative Kraftstoffe für den Straßenverkehr und ein Bündel von Maßnahmen zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen", Brüssel, COM 547 (2001)
- [7] Integrated Project SES6-CT-2003-502705 der Europäischen Union im 6. Forschungsrahmen-Programm (2003)

- [8] "Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study", LB-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, (2002)  
<http://www.lbst.de/gm-wtw/> (2004)
  
- [9] GREET: Transportation Fuel Cycle Model, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory  
<http://www.transportation.anl.gov/greet/> (2004)
  
- [10] E. Henrich, E. Dinjus, D. Meier, F. Weirich: "A New Concept for Biomass Gasification at High Pressure", Proceedings 12th European Conference on Biomass, published on CD, Amsterdam (2002)
  
- [11] H. Hofbauer, R. Rauch:  
"Zweibett-Wirbelschichtvergasung in Güssing (A) mit 2 MWe/4,5 MWt - Konzept, Betriebserfahrungen und Wirtschaftlichkeit", 7. Holzenergie Symp., ETH Zürich, Schweiz (2002)
  
- [12] International Energy Agency:  
"World Energy Statistics from IEA", Paris (2001)
  
- [13] E. Larson, R. Katofsky: "Advances in Thermochemical Biomass Conversion", A. Bridgwater (Ed.), Chapman and Hall, London (1994)
  
- [14] O. Langniß, J. Nitsch, J. Luther und E. Wiemken:  
"Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung"

- Ein solares Langfristszenario für Deutschland“,  
Proceedings des Workshops “Strategien für einen  
nachhaltige Energieversorgung“ 12.12.1997,  
Freiburg, Forschungsverbund Sonnenenergie (1997)
- [15] R. Linkohr: “Regenerative Kraftstoffe aus Sicht  
der Politik“, M. Specht, U. Zuberbühler, U. Zimmer,  
G. Stadermann (Eds.)  
273, ZSW/FVS, Stuttgart, Berlin (2004)
- [16] T. Marquard-Möllenstedt, F. Baumgart, M. Specht:  
“Herstellung von regenerativem Methanol aus  
Biogas“, DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 189 (2002)
- [17] T. Maquard-Möllenstedt, P. Sichler, M. Specht,  
M. Michel, R. Berger, K.R.G. Hein, E. Höftberger,  
R. Rauch, H. Hofbauer: “Wasserstoffherstellung durch  
absorptionsunterstützte Wasserdampf-Vergasung  
von Biomasse“; DGMK-Tagungsbericht 2004-1,  
177 (2004)
- [18] M. Mozaffarian, R. Zwart: “Production of Substitute  
Natural Gas by Biomass Hydrogasification“;  
Proceedings of the World Conference on Biomass  
for Energy and Industry, Sevilla, Spain, 1601 (2001)
- [19] H.-J. Mühlen, M. Mayer, C. Schmid:  
“Gestufte Reformierung biogener Reststoffe -  
Erste Betriebserfahrungen mit der 1 MW-Versuchs-  
anlage “Der Blaue Turm“ in Herten“,  
DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 103 (2002)

- [20] J. Nitsch und F. Trieb: "Potenziale und Perspektiven regenerativer Energieträger", Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, DLR Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (2000)
  
- [21] M. Schlesinger: "Szenarienerstellung - soziodemografische und ökonomische Rahmendaten", Zwischenbericht für die Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung" des Deutschen Bundestages, Prognos AG, Basel (2001)
  
- [22] V. Quaschnig: "Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert", Habilitationsschrift, Technische Universität Berlin, Berlin (1999)
  
- [23] Abschlussbericht des Kompetenznetzwerks "Regenerative Kraftstoffe ReFuelNet", Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart (2004) [www.refuelnet.de](http://www.refuelnet.de)
  
- [24] G. Reinhardt, G. Zemanek: "Ökobilanz Bioenergieträger: Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen", Erich Schmidt, Berlin (2000)
  
- [25] T. Schindler, W. Weindorf: "Biomasse als Basis einer neuen regionalen Energieversorgungsstruktur: Potenziale, Techniken, Kosten", 1. Aachener Anwenderforum für Bioenergienutzung in Stadt und Region, 29. April 2003, Aachen; <http://www.eurosolar.org/new/de/downloads/SchindlerKopie.pdf> (2004)

- [26] H. Schmieder, J. Abeln, E. Dinjus, A. Kruse, M. Kluth, G. Petrich, E. Sadri, M. Schacht: "Hydrothermal Gasification of Biomass and Organic Waste", J. Supercritical Fluids 17, 145 (2000)
  
- [27] S. Schneider, D. Falkenberg, M. Kaltschmitt: "Erneuerbare Energien in Deutschland - Stand 2003", BWK 4 (2004)
  
- [28] M. Specht, A. Bandi, M. Pehnt: "Regenerative Kraftstoffe - Bereitstellung und Perspektiven", Themen 2001 "Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen", Forschungsverbund Sonnenergie, 114, Berlin (2002)
  
- [29] M. Specht, A. Bandi, F. Baumgart, C.N. Murray, J. Gretz: "Synthesis of Methanol from Biomass/CO<sub>2</sub> Resources" in "Greenhouse Gas Control Technologies", B. Eliasson, P.W.F. Riemer, A. Wokaun (Eds.), 723, Pergamon, Amsterdam (1999)
  
- [30] M. Specht, F. Staiß, A. Bandi and T. Weimer: "Comparison of Renewable Transportation Fuels, Liquid Hydrogen and Methanol, with Gasoline - Energetic and Economic Aspects", Int. J. Hydrogen Energy 23, 387 (1998)



- [31] F. Staiß: "Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03",  
Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg,  
Bieberstein, Radebeul (2003)
  
- [32] S. Stucki: "Biometh - Methanolproduktion aus  
Biomasse-Abfällen in der Schweiz", Schlussbericht,  
Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Schweiz  
(1996)
  
- [33] S. Stucki: "Vom Holz zum Methan",  
"Regenerative Kraftstoffe aus Sicht der Politik",  
M. Specht, U. Zuberbühler, U. Zimmer, G. Stadermann  
(Eds.) 210, ZSW/FVS, Stuttgart, Berlin (2004)
  
- [34] "Kraftstoff der Zukunft", Verkehrswirtschaftliche  
Energiestrategie, Bundesministerium für Verkehr,  
Bau- und Wohnungswesen  
<http://www.bmwbw.de/Mobilitaet-.643.2458/.htm>  
(2004)
  
- [35] A. Wellinger, A. Lindberg: "Biogas Upgrading and  
Utilisation", IEA Bioenergy, Task 24: Energy from  
Biological Conversion of Organic Waste,  
[www.novaenergie.ch/ieabioenergytask37/  
Dokumente/Biogas%20upgrading.pdf](http://www.novaenergie.ch/ieabioenergytask37/Dokumente/Biogas%20upgrading.pdf) (2004)
  
- [36] B. Wolf: "Von der Kohle- zur Biomassevergasung",  
DGMK-Tagungsbericht 2002-2, 53 (2002)

- [37] M. Specht, A. Bandi, F. Baumgart, C. Linkohr, F. Staiß: "Kombinierte Nutzung von Biomasse und Wasserkraft", Endbericht, Forschungsauftrag (1999)
- [38] Berechnungen des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart (2004)