

Regenerative Kraftstoffe – Bereitstellung und Perspektiven

Dr. Michael Specht
ZSW
michael.specht@
zsw-bw.de

Dr. Andreas Bandi
ZSW
andreas.bandi@
zsw-bw.de

Dr. Martin Pehnt
IFEU Institut für
Energie- und
Umweltforschung
Heidelberg GmbH,
Wilckensstr. 3,
D-69120 Heidelberg

1. Einleitung

Die Bereitstellung von regenerativen Kraftstoffen aus erneuerbaren Ressourcen wird in einem zukünftigen Energiesystem mit dezentralen Energieerzeugungs- und Nutzungsstrukturen eine herausragende Rolle übernehmen. Ziel der EU ist ein Mindestverbrauchsanteil von 5,75% Biokraftstoffen bis zum Jahr 2010. Darüber hinaus sollen 20% der herkömmlichen Kraftstoffe bis zum Jahr 2020 durch alternative Kraftstoffe ersetzt werden [1].

Regenerative Kraftstoffe sind neben Wasserstoff vor allem Alkohole, Kohlenwasserstoffe und biomassestämmige Öle, die als Alternativen oder als Zumischung zu den konventionellen Kraftstoffen verwendet werden können. Neben der Nutzung in Verbrennungskraftmaschinen ist der Einsatz regenerativer Kraftstoffe für den Betrieb von Brennstoffzellen in mobiler und dezentraler Anwendung als Kraft-Wärme-Kopplungs-Einheit eine besondere technologische Herausforderung. Bis auf den nur sehr begrenzt zur Verfügung stehenden Biodiesel existieren praktisch noch keine Lösungsansätze für eine "nachhaltige Mobilität" und für eine Diversifizierung auf dem Kraftstoffmarkt. Sowohl für konventionelle Verbrennungsmotoren wie auch für zukünftige Brennstoffzellensysteme sind Kraftstoffe erforderlich, die neben den schadstofflimitierten Emissionen eine günstige CO₂-Bilanz aufweisen. Dies kann neben einer Verbrauchsreduzierung längerfristig nur durch regenerativ hergestellte Kraftstoffe gewährleistet werden.

Im Rahmen dieses Beitrages werden die aussichtsreichsten Optionen regenerativer Kraftstoffe, deren Eigenschaften und Herstellungspfade sowie die primärenergetischen Potenziale und Kosten beschrieben.

2. Primärenergetisches Potenzial

In einer langfristig orientierten Kraftstoff-Strategie ist der Einsatz von erneuerbaren Primärenergieträgern unvermeidbar. Die prinzipielle Endlichkeit von Rohöl als Primärenergieträger für die meisten Kraftstoffe steht außer Frage. In den letzten Jahrzehnten hat die Zahl der Neufunde kontinuierlich abgenommen [2]. Lediglich der Zeitpunkt der Erschöpfung ist Gegenstand der aktuellen Diskussion. Die meisten Studien gehen davon aus, dass der Mid Depletion Point, also das Maximum der weltweiten Rohölproduktion, in fünf bis spätestens 15 Jahren erreicht sein wird.

Neben der begrenzten Reichweite erweist sich zudem die geographische Konzentration der Vorkommen als brisant vor dem Hintergrund ressourcenbedingter Konflikte. 73% der Reserven entfallen auf die OPEC und 61% auf den Nahen Osten [3].

Mittelfristig wird es also eine verstärkte Einführung erneuerbarer Energien in den Verkehrssektor geben. Dazu bieten sich eine Reihe unterschiedlicher Umwandlungsketten an, sowohl auf Basis erneuerbar erzeugten Stroms oder Biomasse als auch auf Basis der Kombination von beidem.

Die Bereitstellung der Kraftstoffe ist dabei mit unterschiedlich hohen Energieaufwendungen und Umweltauswirkungen verknüpft, die aus der Gewinnung der Primärenergie, dem Herstellungsprozess, dem Transport der Produkte bis zur Tankstelle und den Verwendungsmöglichkeiten von Nebenprodukten resultieren.

Erneuerbare Kraftstoffe zeichnen sich vor allem durch einen geringen Verbrauch erschöpflicher Ressourcen aus. Im Vergleich zu den Benzin- und Dieselherstellungsketten, deren "Bereitstellungswirkungsgrad" mit 85 bis 90% bereits relativ gut liegt, kann eine deutliche Einspa-

nung erzielt werden (Abb. 1, [4]).

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, beispielsweise Verflüssigung bzw. Kompression des Wasserstoffs.

Stroh (120-300 PJ/a), Landschaftspflege (10 PJ/a) und organische Rest- und Abfallstoffe zur Vergärung (Bio-/Grünabfälle 30 PJ/a, Klärschlamm 25 PJ/a, Abfälle aus Lebens-/Futtermittelindustrie 25 PJ/a). Hinzu kommt ein möglicher Beitrag von Energiepflanzen, dessen Höhe stark von agrarpolitischen und ökologischen Vorgaben und den standortspezifischen Erträgen abhängt. Vor allem die Nutzungskonkurrenz zur geforderten Extensivierung der Landwirt-

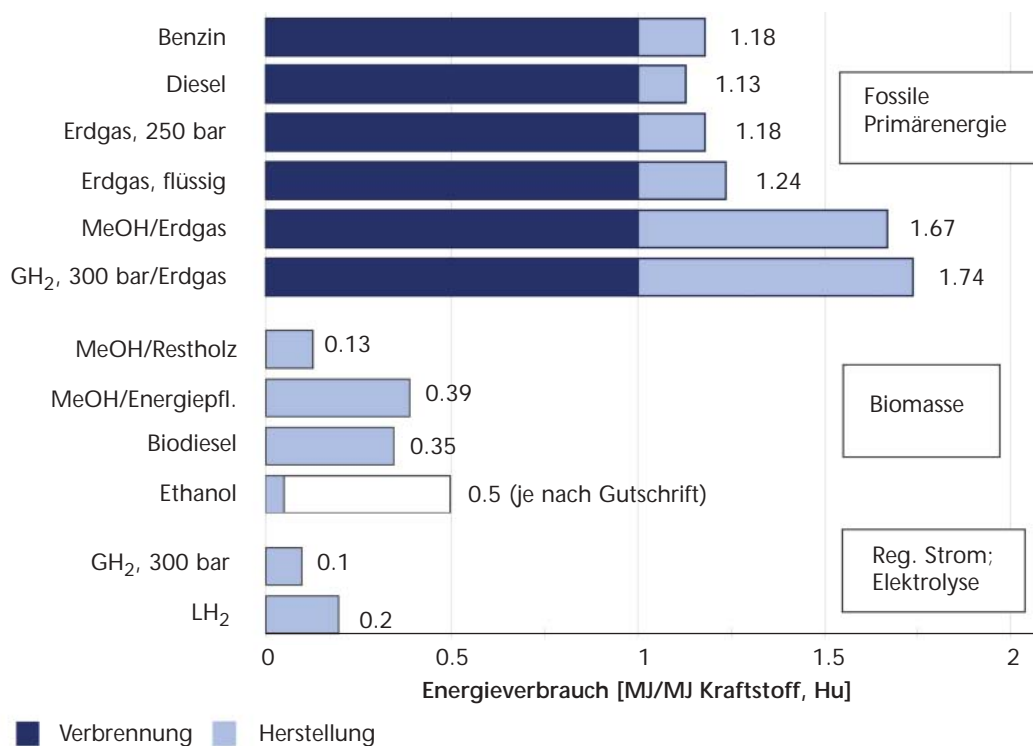


Abbildung 1 Verbrauch erschöpflicher Energie durch Herstellung und Nutzung (Verbrennung) von Kraftstoffen. (MeOH = Methanol Hu – unterer Heizwert)

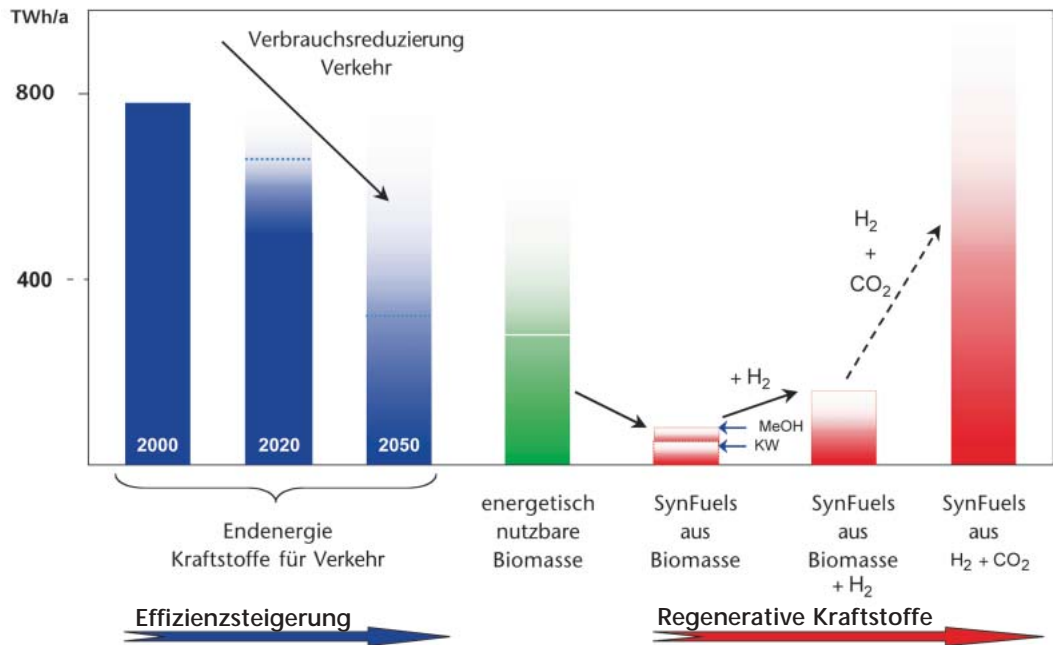
Entsprechend dem reduzierten Verbrauch fossiler Primärenergieträger liegen die bei der Herstellung und Verbrennung freigesetzten Klimagase bei erneuerbaren Kraftstoffen deutlich niedriger. Lediglich die Herstellung von Biodiesel führt zu etwas höheren CO₂-äquivalenten Emissionen, als man aufgrund des Energieverbrauchs vermuten würde. Dies ist vor allem auf die von der Art des Landbaus (Düngemittelsatz) abhängigen Lachgasemissionen zurückzuführen [5].

Das Potenzial an Biomasse in Deutschland teilt sich auf in Restholz zur energetischen Nutzung, das mit 120 bis 230 PJ/a beziffert wird,

schaft ist hier von Bedeutung. Ausgehend von den aktuell gültigen Stilllegungsquoten (10%) könnten in Deutschland beispielsweise 125 PJ/a zusätzlich angebaut werden. Unter Annahme, dass der Anteil der Fläche, der nicht für die Nahrungsmittelproduktion benötigt wird, weiter zunimmt, könnten in Deutschland über 300 PJ/a zur Verfügung gestellt werden. Insgesamt ergibt sich für biogene Festbrennstoffe und Biogas ein Potenzial zwischen 500 und 1000 PJ/a [6].

Aufgrund anderer Randbedingungen werden von einigen Autoren auch weitaus höhere Biomassepotenziale angegeben. Unter Einbeziehung einer Studie von [7] zu Energiepflan-

Abbildung 2
Nutzbares Potenzial regenerativer Kraftstoffe in Deutschland.
Annahme: verfügbare Biomasse 280 TWh/a (ca. 1000 PJ/a); Einsatz zu 50% für Kraftstoffherzeugung



Szenarien zum Rückgang des Kraftstoffverbrauchs bis 2020: nach [11]: 16%, [12]:17%, [13]: 28-38% (nur PKW), bis 2050: Verbrauchsreduzierung im Verkehr unter Berücksichtigung der deutschen Klimaschutzziele (u. a. durch "3-I-Fahrzeuge"), MeOH: Potenzial für Methanol, KW: Potenzial für flüssige Kohlenwasserstoffe

zen auf einer Fläche von 5 Mio. Hektar werden von [8] 1200 PJ/a errechnet. Mit neuen Anbauformen auf 4 Mio. Hektar werden von [9] über 2000 PJ/a angegeben. (Derzeit beträgt die landwirtschaftliche Fläche ca. 11,5 Mio. Hektar. Allein in den vergangenen 10 Jahren wurden u.a. aufgrund des Stilllegungsprogramms fast 2 Mio. Hektar aus der Nahrungsmittelproduktion herausgenommen.)

Der Vergleich der verfügbaren Biomassepotenziale mit dem momentanen Endenergieverbrauch im Verkehr in Abb. 2 berücksichtigt zunächst nicht die Verbrauchsreduzierung im Verkehrsbereich und die zusätzliche Verwendung von Wasserstoff bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen (Synfuels). Da der H₂-Anteil in den biomassestämmigen Synthesegasen zu gering ist, kann durch Zugabe von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff die Synfuel-Ausbeute je nach Verfahrensvariante um ein Mehrfaches gesteigert werden. Auch die Verfügbarkeit von erneuerbarer Elektrizität ist daher für die Erzeugung regenerativer Kraft-

stoffe von großer Bedeutung. So ist beispielsweise bei der Methanolsynthese über einen Vergasungsprozess im Fall der H₂-Zugabe ein 3,5-fach höherer Ausstoß zu erzielen als bei einer Variante mit CO₂-Abtrennung zur Konditionierung des Synthesegases [10]. Die Einbindung zusätzlichen Wasserstoffs bietet somit die Möglichkeit, eine hohe Konversion von Biomasse-Kohlenstoff in Kraftstoff-Kohlenstoff (> 80%) zu erzielen.

Unter der Voraussetzung, dass 50% der energetisch nutzbaren Biomasse von 1000 PJ/a für die Synfuellerzeugung verwendet werden, ergibt sich ein Substitutionspotenzial für Kraftstoffe von ca. 10% des heutigen Kraftstoffverbrauchs.

Die Mineralölindustrie geht bis zum Jahr 2020 von einem Kraftstoff-Verbrauchsrückgang von über 15% aus [11, 12]. Nach einer Studie [13] wird der Kraftstoffkonsum von Personenkraftwagen in Deutschland bis 2020 sogar um 28-38% sinken. Dieser Trend wird sich auch

zukünftig weiter fortsetzen. Wird eine Verbrauchsreduzierung im Verkehrsbereich bis zum Jahr 2050 auf 40% des heutigen Wertes zugrunde gelegt (u. a. durch Fahrzeuge mit 3-l-Technologie), so wird unter Einbindung von zusätzlichem Wasserstoff ein Substitutionspotenzial von 45% erreicht. Eine von CO₂ ausgehende Synthese erschließt weitere Potenziale für die Kraftstofferzeugung, so dass es prinzipiell möglich ist, zukünftig den Bedarf an Kraftstoffen regenerativ abzudecken.

Aufgrund der Nutzungskonkurrenz werden auch die Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse einen Teil des Gesamtaufkommens beanspruchen, so dass nur ein Teil der Biomasse für die Kraftstofferzeugung zur Verfügung steht (für die o.g. Potenziale 50%). Da Biomasse die einzige regenerative Ressource ist, die den Kohlenstoff in konzentrierter Form liefert, sollten diese Ressourcen mittel- bis langfristig verstärkt der Kraftstofferzeugung vorbehalten bleiben, anstatt sie für die Wärme- und Stromerzeugung zu nutzen.

3. Kraftstoffoptionen und Herstellung

Das Potenzial von Alternativkraftstoffen - insbesondere für den Verkehrsbereich - wird z. Zt. seitens der Automobil- und Mineralölindustrie sowie seitens verschiedener Länder kontrovers diskutiert. Langfristig wird dem Wasserstoff ein hohes Substitutionspotenzial zugeschrieben, was aber nicht bedeutet, dass dann ausschließlich Wasserstoff Verwendung finden wird.

Selbst wenn sich die Industrieländer über einige Dekaden eine Wasserstoff-Infrastruktur aufbauen, wird parallel weiterhin eine Nachfrage nach einfach speicher- und transportierbaren Kraftstoffen bestehen bleiben.

3.1 Regenerative Kraftstoffe

Als regenerative Kraftstoffe kommen neben Wasserstoff eine Reihe C-stämmiger Verbindungen in Betracht. Diese sind: Pflanzenöle und deren Ester (Biodiesel), die Alkohole Methanol und Ethanol sowie Kohlenwasserstoffe wie synthetische Benzin-/Diesel-Kraft-

stoffe und synthetisches Methan bzw. Methan aus Biogas. Neben der Verwendung reiner Kraftstoffe kommen für eine stufenweise Substitution auch Kraftstoffzumischungen infrage, sogenannte Blendings. Die wichtigsten Bewertungskriterien für die Einführung von alternativen Kraftstoffen sind:

- Diversifizierung der Ressourcen (fossil / regenerativ; incl. Übergangsstrategien)
- ökologisch verträgliche Bereitstellung der Ressourcen
- geringe CO₂- und Schadstoff-Emissionen der gesamten Systemkette ("well-to-wheel")
- niedrige Lokalemissionen
- Energetische Effizienz der gesamten Systemkette
- Infrastrukturerfordernisse / Komplexität im Fahrzeug
- ausreichende Reichweite des Fahrzeugs mit einer Tankfüllung
- akzeptable Kraftstoffgestehungskosten
- Eignung für verschiedene Antriebssysteme (Verbrennungsmotor / Brennstoffzelle)
- Versorgungssicherheit (bzgl. ressourcenbedingter Konflikte)
- Akzeptanz bei den Verbrauchern, geringe Toxizität, hohe Sicherheit

Die heute in größeren Mengen produzierten Kraftstoffe aus Biomasse für den Verkehr sind Pflanzenölmethylester und Ethanol, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

Pflanzenöle und ihre Ester

Bei der Nutzung biogener Kraftstoffe spielt in Deutschland derzeit nur der Rapsmethylester (sogenannter Biodiesel) eine Rolle. Biodiesel hat in Deutschland z. Zt. einen Marktanteil für Dieselkraftstoff von 1,1%. In Relation zum gesamten Kraftstoffmarkt sind es 0,55% [14].

Pflanzenöle werden durch Pressung/Extraktion ölhaltiger Pflanzen (z. B. Raps) gewonnen. Zur weiteren Verwendung wird das Pflanzenöl mit Methanol verestert (Pflanzenölmethylester bzw. Rapsmethylester = RME), um so einen Kraftstoff zu erzeugen, der in einem Großteil der heute existierenden Dieselmotoren einsetzbar ist.

Ethanol

Ethanol wird durch die Fermentation zucker- und stärkehaltiger Pflanzen gewonnen. Neben stärkehaltigen Pflanzen 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. Ethanol kann als Blendingkomponente für handelsüblichen Ottokraftstoff eingesetzt werden (z. B. E10: 10 Vol.% Ethanol, 90 Vol.% Benzin). Auch höhere Ethanolkonzentrationen (E85) bzw. reines Ethanol sind als Kraftstoff für Ottomotoren geeignet. Das bisher weltweit größte Biokraftstoff-Programm ist das brasilianische "Proalcool"-Programm. Brasilien ist der größte Ethanolproduzent und -nutzer im Verkehrsbereich. Die jährliche Ethanolproduktion in Brasilien betrug im Jahr 1999 dreizehn Milliarden Liter und entsprach damit ca. 42% des gesamten Kraftstoffbedarfs in Brasilien [15]. Auch in den USA wird Ethanol als Kraftstoffzusatz hergestellt. Die produzierte Menge von 6 Milliarden Liter im Jahr 2001 entspricht ca. 1,5% des Benzinabsatzes in den USA [16].

Zur Erweiterung der Rohstoffbasis für die Ethanolproduktion werden auch biogene Ressourcen auf der Basis von Cellulose und Lignocellulose (Holz, Getreidestroh, ertragsstarke Energiepflanzen wie z. B. Miscanthus) untersucht. In den vergangenen Jahren wurde eine Nutzung dieser Ressourcen intensiv erforscht. Die Produktion aus nicht zucker- und stärkehaltigen Pflanzen könnte einen Durchbruch für die Ethanolerzeugung aus Biomasse bedeuten.

Wasserstoff

Wasserstoff ist ein idealer Kraftstoff zur Versorgung von Brennstoffzellen aber auch von konventionellen Energiewandlern wie z. B. Verbrennungsmotoren. 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, so dass C-stämmige Brennstoffe zumindest additiv zur Verfügung stehen müssen. Eine Fokussierung allein auf die Option Wasserstoff als Energieträger sollte daher nicht verfolgt werden.

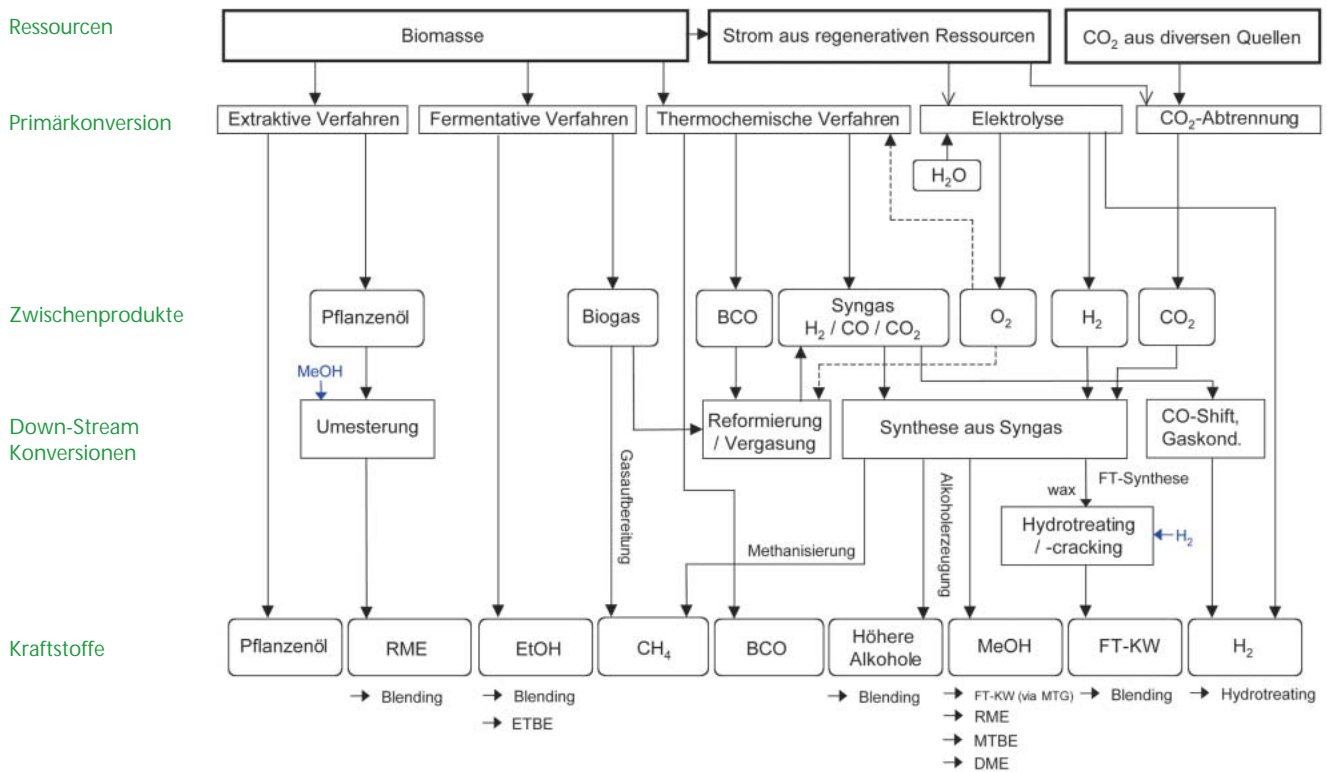
Methanol

Die Verwertungswege für Methanol reichen von einer Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen (ohne Änderung der Nutzungstechnik) 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) und die Herstellung von Oktanboostern (MTBE).

Gegenüber den konventionellen Kraftstoffen hat Methanol einen entscheidenden Nachteil: Methanol ist zwar flüssig, kann jedoch aufgrund korrosiver Eigenschaften nicht wie Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe über die bestehenden Verteilungsstrukturen vertrieben werden. Im Gegensatz zu verschiedenen Qualitäten von Benzin-, Diesel- oder Flugturbinenkraftstoff, die alle über die selbe Pipeline transportiert werden können, ist dies bei Methanol über bestehende Pipelines nicht möglich.

Synthetische Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe

Die gleichzeitige Eignung sowohl für verbrennungsmotorische Konzepte als auch für die Brennstoffzelle gilt nur sehr eingeschränkt für die flüssigen Kohlenwasserstoffe. Hier stellt die Kombination aus einer on board-Wasserstoffherzeugung mit einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle völlig andere Anforderungen als der Verbrennungsmotor. Additive (z. B. zur Erhöhung der Oktanzahl) sowie der hohe Aromaten- und Olefinanteil in konventionellen Otto- und Dieselmotorkraftstoffen sind für die on board-Wasserstoffherzeugung nicht nötig bzw. sogar schädlich. Ein "Brennstoffzellenbenzin" – bezeichnet auch als Brennstoffzellen-Naphtha – bestünde



im Wesentlichen aus kurzkettingen Kohlenwasserstoffen ($C_5 - C_8$) und ist aromatenfrei sowie olefinarm. Aufgrund der paraffinartigen Zusammensetzung hat dieser Kraftstoff den maximalen Wasserstoffgehalt und ist wegen des katalytischen Syntheseweges praktisch schwefelfrei. Ein Brennstoffzellen-Naphtha würde zusätzlich zu den Otto- und Dieselmotoren angeboten werden. Auch für Kolbenmotoren lassen sich adaptierte, schwefel- und aromatenfreie Kraftstoffe herstellen, die die Voraussetzung für weitere Schadstoffreduzierungen verbrennungsmotorischer Konzepte bilden. Die flüssigen Kohlenwasserstoffe haben den großen Vorteil, dass sie ohne Einschränkungen über die konventionellen Transport- und Speichersysteme vertrieben werden können. Nachteilig sind dagegen die aufwändige Synthese sowie nur eine eingeschränkte Eignung für die on board-Reformierung.

Methan

Da Methan gegenüber Wasserstoff eine mehr als dreifach höhere volumetrische Energiedichte aufweist, ist die gasförmige Speicherung zur Erzielung hoher Reichweiten deutlich einfa-

cher möglich. Bei direktem Einsatz von Methan in adaptierten Gasmotoren kommt der Vorteil von Methan bzgl. der geringen spezifischen CO_2 -Emissionen direkt zum Tragen.

Die Gasindustrie plant den flächendeckenden Aufbau von mehr als 1000 Erdgastankstellen in Deutschland. Diese Infrastruktur eröffnet die Möglichkeit, als Transportmedium für regenerative Energie Methan zu verwenden. Die regenerative Bereitstellung von Methan für den Verkehrsbereich wird bereits in der Schweiz praktiziert, indem aufbereitetes Biogas in das Gasnetz eingespeist und an öffentlichen Tankstellen als Kraftstoff abgegeben wird [17].

3.2 Technische Bereitstellungspfade

In Abb. 3 sind die Hauptpfade für die Kraftstoffbereitstellung aus regenerativen Ressourcen dargestellt. Die Herstellungsverfahren lassen sich grob einteilen in: Extraktive, fermentative und thermochemische Verfahren sowie die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff. Regenerative, C-stämmige Kraftstoffe werden häufig allgemein als "Biofuels" oder biogene

Abbildung 3 Herstellungspfade regenerativer Kraftstoffe MTBE, ETBE: Oktanbooster (Kraftstoffzusatz); RME: Rapsmethylester (Biodiesel); DME: Dimethylether (Kraftstoff für Dieselmotoren); FT-KW: Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffe; BCO: Bio-Pyrolyseöl (Bio Crude Oil)

Kraftstoffe bezeichnet. Diese Aussage verkennt, dass die o.g. Endenergieträger auch auf Pfaden zugänglich sind, die nicht von biogenen Ressourcen ausgehen (Kraftstoffe auf Basis von CO₂ und regenerativ erzeugtem Strom).

Kraftstoffe aus Synthesegas

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 Pflanzenmaterials zulässt (Ganzpflanzennutzung). Bei den extraktiven bzw. fermentativen Verfahren wird immer nur ein Teil der Biomasse genutzt (z. B. Öl- oder Stärkeanteil). Neben dem energetisch verwertbaren Anteil der Biomasse spielt auch ein möglichst hoher Kohlenstoffkonversionsgrad (C-Kraftstoff/C-Biomasse) eine entscheidende Rolle. Der Schwerpunkt innerhalb dieses Beitrags soll daher auf thermochemische Konversionsverfahren gelegt werden, bei denen als Zwischenprodukt ein Synthesegas (Syngas) erzeugt wird. Ein weiterer Grund für die Bevorzugung der Herstellungsverfahren über Syngas ist die Tatsache, dass eine große Bandbreite biogener Ressourcen verwertet werden kann, und dadurch die ökologische Vielfalt erhalten bleibt. Monokulturen wie z. B. beim Anbau ölhaltiger bzw. zucker- und stärkehaltiger Pflanzen können hierdurch vermieden werden. In einem langfristigen Szenario eröffnet der Weg über CO₂ 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, synthetische Benzin-/Diesel-Kraftstoffe und Methan, die über die Zwischenstufe des Synthesegases herstellbar sind. Diese Kraftstoffoptionen können als Alternative zu den fossilen Energieträgern einen wesentlichen Anteil am zukünftigen Kraftstoffmarkt abdecken.

Für die Erzeugung eines Synthesegases aus Biomasse besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Bisherige Verfahren zur Gaserzeugung aus Biomasse sind nicht auf die Herstellung synthesesetauglicher Gase optimiert, sondern auf die Verstromung des erzeugten Produktgases. Die Kohle-Vergasungstechnologie ist Stand der Technik, aber nicht ohne Weiteres auf die Biomasse-Vergasung in kleinen dezentralen Anlagen (< 50 MW) übertragbar.

Der Primärschritt bei der Gaserzeugung aus Biomasse ist eine thermochemische Konversion. Als Vergasungsmittel können Luft, Sauerstoff, Wasserdampf und Wasserstoff sowie Mischungen dieser Gaskomponenten eingesetzt werden. Da die nachfolgende Kraftstoffherzeugung ein katalytischer Prozess ist, muss das Synthesegas speziellen Anforderungen genügen. Es existieren zwar Lösungsansätze, die Erzeugung eines synthesesetauglichen, teer-, staub- und inertgasfreien, wasserstoffreichen Gases aus Biomasse konnte bisher jedoch in Anlagen < 50 MW nicht nachgewiesen werden (sofern auf Sauerstoff als Vergasungsmittel verzichtet wird und sich der Aufwand für die Gaskonditionierung in einem akzeptablem Umfang hält). Entscheidend bei der Biomassenutzung sind aus logistischen Gründen kleine Anlagen, die so konzipiert sein müssen, dass auf den Einsatz von Sauerstoff verzichtet werden kann. Denn aus Kostengründen ist der Bau einer Luftzerlegungsanlage für die dezentrale Biomassevergasung ungeeignet. Eine weitere, wesentliche Anforderung ist der Wasserstoffgehalt im erzeugten Synthesegas. Der typische Wasserstoffgehalt von Vergasungsverfahren – insbesondere bei autothermen Verfahren – liegt meist bei deutlich unter 50%, was für ein stöchiometrisch eingestelltes Gas nicht ausreichend ist. Indirekt beheizte Vergasungsverfahren (allotherme Verfahren) haben für die Erzeugung von Synthesegasen aus Biomasse das weitaus größte Anwendungspotenzial. Bei diesem Prozess, bei dem die Wärme von außen in die Reaktionszone eingetragen wird, ist eine Bereitstellung von Sauerstoff nicht erforderlich und das resultierende Produktgas verfügt über einen höheren Wasserstoffanteil.

Die Themenbereiche mit hohem Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur effizienten Herstellung regenerativer Kraftstoffe werden auch im Rahmen des ZSW-koordinierten Netzwerkes "Regenerative Kraftstoffe" (ReFuelNet) aufgezeigt und reichen von der thermochemischen Biomassevergasung, der Herstellung von Wasserstoff und Synthesegasen bis zur Synthese von Methanol und Kohlenwasserstoffen. Im Einzelnen sind dies:

- Reduzierung der Komplexität von Syntheseverfahren für Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen,
- "Downscaling" der Anlagengröße mit neuen Syntheseverfahren,
- Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas aus Biomasse durch in situ-Gaskonditionierungstechnologien.

Die größte Herausforderung stellt hierbei die Bereitstellung konditionierter, wasserstoffreicher Synthesegase für die Kraftstoffherzeugung dar. Die Entwicklung neuer Gaskonditionierungstechnologien ist hierzu eine wesentliche Voraussetzung [siehe auch www.refuelnet.de].

Herstellung von Wasserstoff, Methanol und Kohlenwasserstoffen

Wasserstoff wird im Wesentlichen aus Synthesegas hergestellt. Über die Wassergas-Shift-Reaktion wird der CO-Anteil im Synthesegas in Wasserstoff und CO₂ konvertiert und anschließend Wasserstoff vom Restgas 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 - 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, was bei biomassestämmigen Synthesegasen nur über eine Gas-

konditionierung mit CO₂-Abtrennung möglich ist (oder alternativ durch Zugabe von Wasserstoff). Die kalkulierten energetischen Wirkungsgrade für die Erzeugung von Methanol aus Biomasse erreichen Werte von bis zu 55% [18, 19]. Alternativ kann eine Auslegung mit niedrigeren Wirkungsgraden (bezogen auf Methanol) gewählt werden, bei der das Syntheserestgas zur Co-Generation von Strom verwendet wird ([19, 20], Abb. 4).

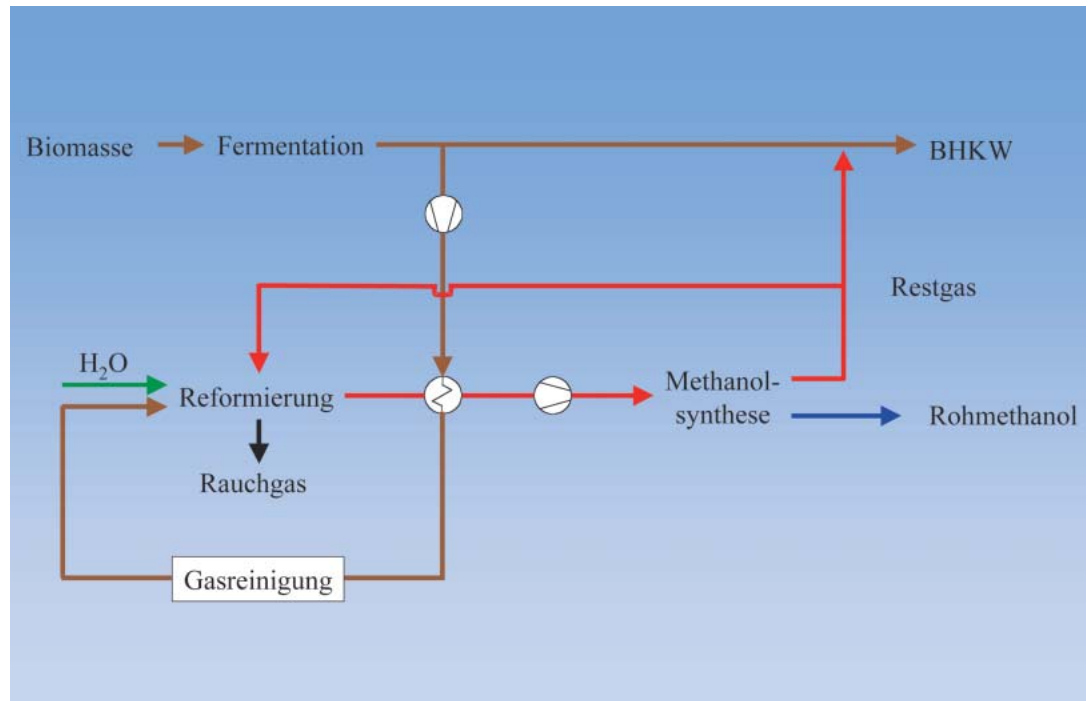
Aus Synthesegas sind auch Kohlenwasserstoffe nach der Fischer-Tropsch-Synthese zugänglich. Die Reaktionsbedingungen sind 220 - 240°C und ca. 25 bar unter Verwendung von Eisen- und Cobalt-basierten Katalysatoren. Die Primärprodukte sind langkettige Kohlenwasserstoffe (wachsreiches "Syncrude"), die in einem weiteren Verfahrensschritt durch die Zugabe von Wasserstoff in kürzerkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden müssen. Bei einer dezentralen Kraftstoffherzeugung ist es technisch jedoch sehr aufwändig, aufgrund der Produktbandbreite der Fischer-Tropsch-Synthese, definierte Kraftstoffqualitäten für Kolbenmotoren bzw. Brennstoffzellenantriebe zu erzeugen.

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 Methan kann aus Synthesegas (Methanisierungsreaktion) oder durch eine hydrierende Druckvergasung von Biomasse hergestellt werden, die bereits im ersten Primärschritt ein Gas mit einem hohen Methananteil liefert (z. B. 50% im Prozess von [21]). In einem nachfolgenden Reaktionsschritt wird der Restanteil im Gas bei einer Temperatur von ca. 400 °C methanisiert.

Neben biomassestämmigen, CO-haltigen Synthesegasen können für die Methanolsynthese, die Fischer-Tropsch-Synthese und die Methanisierung auch CO-freie Synthesegase verwen-

Abbildung 4
Schematisches
Verfahrensfließbild
zur Herstellung von
Methanol und
Elektrizität aus
Biogas



det werden. Dies eröffnet die prinzipielle Möglichkeit, Kohlenwasserstoffe auch aus CO₂ und H₂ zu erzeugen. Alle heute verwendeten, auf fossiler Basis hergestellten Kohlenwasserstoffe sind prinzipiell auch auf regenerativem Wege zugänglich.

3.3 Demoprojekt: Regeneratives Methanol

Am ZSW wurde bereits in zwei Demoprojekten die vollständig regenerative Herstellung von Synfuels demonstriert. Im Rahmen eines Forschungsverbundprojektes wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von atmosphärischem CO₂ bzw. CO₂ aus Rauchgasen und regenerativer Energie zur Synthese von Methanol durchgeführt. Die Erzeugung von Methanol aus atmosphärischem CO₂ und Wasserstoff wird nach Abschluss des Projektes vom technischen Standpunkt aus als machbar betrachtet. Hierzu ist im Rahmen des Projektes eine Pilotanlage aufgebaut und in Betrieb genommen worden.

Die Methanolherstellung wurde bezüglich der energetischen Effizienz, der entstehenden Emissionen und der Kosten analysiert [22]. Bei Zugrundelegung eines elektrischen Ener-

giebedarfs von 4 kWh_e/Nm³H₂ für die Wasserelektrolyse resultiert eine auf den unteren Heizwert bezogene energetische Gesamteffizienz zur Erzeugung von regenerativem Methanol aus atmosphärischem CO₂ und Elektrizität von ca. 46%. Steht bereits aufkonzentriertes CO₂ zur Verfügung, so steigt die Effizienz auf über 61% an. Die resultierenden Kosten und die CO₂-Emissionen in der Energiekette (well-to-tank) sind in Abb. 5 aufgeführt (die angenommenen Strombezugskosten aus Wasserkraft betragen hierbei 0,026 EUR/kWh_e). Insbesondere der Pfad über atmosphärisches CO₂ ist praktisch CO₂-neutral.

Auch aus Biogas wurde am ZSW erstmalig vollständig regeneratives Methanol erzeugt. Für die technische Umsetzung ist eine containerintegrierte Versuchsanlage zur Konversion von Biogas zu Methanol konzipiert, aufgebaut und getestet worden [23]. Durch Fermentation wird ein Biogas gewonnen, das ca. 65% Methan und 35% Kohlendioxid enthält und für den Betrieb eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) genutzt wird (Abb. 4). Für die Methanolherstellung wird ein Teilstrom des Biogases abgezweigt, gereinigt, entschwefelt und anschließend einer Reformierung unterzogen. Der für die Wasserdampfpreformierung benötigte Dampf wird vor dem Eintritt in den Reformier

dem Biogasstrom zugeführt. Die für die Reformierung benötigte Reaktionsenthalpie wird durch Verbrennen von Brenngas im FLOX®-Betrieb (flammenlose Oxidation) aufgebracht, wobei der Reformier in die Brennkammer integriert ist. Bei Reformierwirkungsgraden von ca. 75% wurde Synthesegas (Biogas-Reformat) erzeugt, mit welchem Rohmethanol mit einem Methanolanteil um 90% erhalten wurde. Neben Wasser wurden an Nebenprodukten geringe Anteile an höheren Alkoholen nachgewiesen. Das in der Methanolsynthese nicht umgesetzte Gas wird zum Betrieb des Reformierbrenners und zur Verstromung genutzt (Co-Generation). Die Versuchsanlage ist für eine maximale Methanolerzeugung von ca. 10 t pro Jahr bei kontinuierlichem Betrieb ausgelegt.

Die Anlagentechnik soll weiter entwickelt und optimiert werden, so dass die eingesetzte Reformierstufe als Spaltstufe, bzw. Nachreformierung von Produktgasen aus thermochemischen Konversionsprozessen eingesetzt werden kann. Die Größe von Anlagen zur dezentralen Methanolproduktion muss einerseits auf das lokale Biomasse-Aufkommen abgestimmt sein und andererseits energetischen Forderungen (wie Wärmeintegration, Druckstufen) genügen, die mit zunehmender Anlagengröße besser zu

erfüllen sind. Innerhalb dieses Spannungsfeldes liegt weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die dezentrale Methanolerzeugung aus biogenen Ressourcen.

4. Perspektiven und Kosten regenerativer Kraftstoffe

Ein wesentlicher Faktor für den Zeitpunkt des Einsatzes regenerativer Kraftstoffe ist der ökonomische Einsatz der regenerativen Primärenergieträger. Dieser hängt davon ab wie viel CO₂-Emissionen oder andere Umweltwirkungen vermieden werden können, indem regenerative Energieträger verwendet werden. Während in Deutschland eine Kilowattstunde Strom im derzeitigen, relativ ineffizienten und kohlelastigen Erzeugungssystem zu 680g CO₂ führt, verursacht die Produktion und Verbrennung von einer Kilowattstunde Benzin lediglich ca. 300g CO₂ (vgl. Abb. 5, Darstellung in Anlehnung an [24]). Die Substitution konventionellen Stroms durch regenerative Primärenergieträger ist also unter Klimagesichtspunkten mehr als doppelt so effizient wie der Ersatz von konventionellen Kraftstoffen. Neben den Kriterien der CO₂-Vermeidung zur Einführung regenerativer Kraftstoffe spielen auch weitere Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle. Wird der Kriterienkatalog

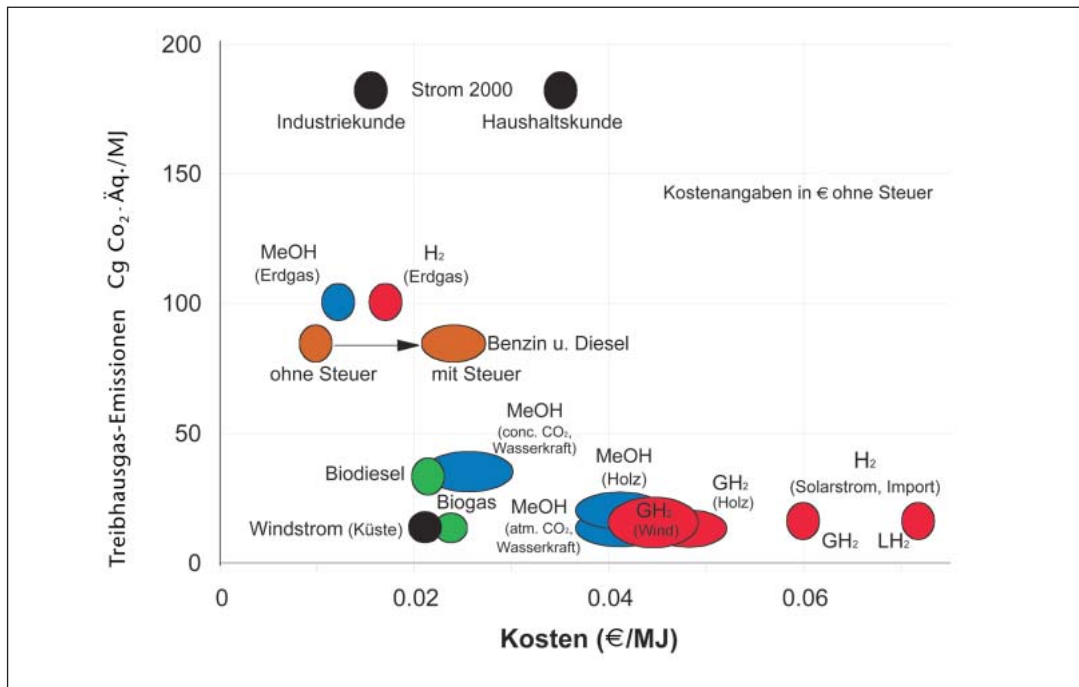


Abbildung 5 Kosten und Treibhausgas-Emissionen verschiedener fossiler und regenerativer Kraftstoffe;

MeOH: Methanol aus CH₄, Holz, Rauchgas-CO₂ bzw. atmosphärischem CO₂. Bei regenerativem Wasserstoff und Methanol sind die zukünftigen Kosten abgeschätzt.

um die Diversifizierung im Kraftstoffmarkt und die Versorgungssicherheit erweitert, so ergeben sich für die Verwertung der Biomasse andere Präferenzen. Während im Strom- und Wärme- markt eine Vielzahl von Substitutionsmöglichkeiten besteht, ist die Reduzierung der Rohöl Abhängigkeit im Verkehrsbereich weitaus schwieriger. Gerade diese Tatsache spricht für einen verstärkten Einsatz biogener Ressourcen für die Erzeugung von Kraftstoffen.

Kosten regenerativer Kraftstoffe

Der Einsatz regenerativer Kraftstoffe muss sich neben den Potenzialen und der ökologischen Substitutionswirkung auch an der Kostensituation orientieren (Abb. 5). Es ist ersichtlich, dass die Umwandlung regenerativer Primärenergieträger in Kraftstoffe auf absehbare Zeit noch einen zusätzlichen Aufpreis bedeutet. Die Kosten von Kraftstoffen auf Biomasse-Basis bewegen sich in einer Bandbreite zwischen 0,02 und 0,05 EUR/MJ und sind somit deutlich höher als die Herstellungs- und Verteilungskosten von Benzin und Diesel. Zukünftiger regenerativer Strom liegt hingegen durchaus im Bereich der Kosten der Endverbraucherebene (Haushalte). Der Kostenunterschied zwischen regenerativen und fossilen Endenergieträgern ist also bei Kraftstoffen deutlich größer als im Stromsektor.

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 die kürzeren Reichweiten, eine Verschiebung des Zeitpunktes ergeben kann, zu dem der Einsatz im mobilen Sektor attraktiver wird. Eine Studie von Prognos [25] geht beispielsweise davon aus, dass sich die Rohölpreise bis 2050 verdreifachen werden, während der Strompreis bis 2010 leicht fallen und dann moderat ansteigen wird. Damit wird die Substitution von rohölbasierten Kraftstoffen attraktiver.

5. Zusammenfassung

Zukünftig können erhebliche Anteile des Energiebedarfs im Verkehr durch erneuerbare Kraftstoffe abgedeckt werden. Unterstellt man eine längerfristige Verbrauchsreduzierung bei den Kraftstoffen bis zum Jahr 2050 auf etwa 40% des heutigen Bedarfs (u.a. durch 3-l-Fahrzeuge) und einen Einsatz der energetisch nutzbaren Biomasse zu 50% für die Kraftstofferzeugung, so ließen sich fast 25% des Verbrauchs in Deutschland regenerativ decken. Die zusätzliche Verwendung von regenerativem Wasserstoff für die Erzeugung von Synfuels erhöht diesen Anteil auf fast 45%. Eine von Kohlendioxid ausgehende Synthese erschließt weitere Potenziale für die Kraftstofferzeugung, so dass es prinzipiell möglich ist, den Bedarf an C-stämmigen Kraftstoffen regenerativ abzudecken.

Als regenerative Kohlenstoff- und Primärenergieressource können Restbiomassen und – zukünftig verstärkt – Energiepflanzen verwendet werden. Insbesondere vor dem Hintergrund der EU-Osterweiterung sind hierbei neue Erwerbsquellen in der Landwirtschaft zu erschließen. Langfristig stehen neben den biogenen Ressourcen die regenerativ erzeugte Elektrizität und auch CO₂ als "Rohstoff" zur Verfügung, die keiner Ressourcenlimitierung unterliegen.

Zieht man zur Beurteilung des Einsatzes von erneuerbarer Energie, speziell von Biomasse, zur Erzeugung von Wärme, Elektrizität oder Kraftstoffen ausschließlich die CO₂-Vermeidungskosten heran, so erscheint die Substitution fossiler Energie zur Wärme- und Stromerzeugung deutlich günstiger als die Substitution von Rohöl durch die Kraftstoffherstellung. Wird der Kriterienkatalog jedoch um die Diversifizierung und die Versorgungssicherheit erweitert, so ändert sich das Ergebnis der Bewertung zugunsten der Kraftstofferzeugung aus erneuerbaren Energien.

Literatur

- [1] Europäische Kommission: "Grünbuch - Hin zu einer europäischen Strategie für Versorgungssicherheit" (2001); "Weißbuch - Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellung für die Zukunft" (2001)
- [2] C. J. Campbell: "The Imminent Peak of World Oil Production"; www.oilcrisis.com/campbell/commons.htm (1999)
- [3] H. Rempel: "Geht die Kohlenwasserstoff-Ära zu Ende?"; Vortrag auf der DGMK/BGR-Veranstaltung "Geowissenschaften für die Exploration und Produktion: Informationsbörse für Forschung und Industrie", Hannover 23.5.2000, www.bgr.de/b123/kw_aera/kw_aera.htm
- [4] M. Pehnt: "Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik"; Dissertation, DLR - Institut für Technische Thermodynamik, VDI-Verlag Fortschrittsberichte, Düsseldorf in Vorbereitung.
- [5] G. Reinhardt, G. Zemanek: "Ökobilanz Bioenergieträger: Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen"; Erich Schmidt, Berlin (2000)
- [6] J. Nitsch, M. Nast, M. Pehnt, F. Trieb und C. Rösch: "HGF-Projekt, Zukunftsfähige Entwicklung - Schlüsseltechnologie Regenerative Energien"; DLR- Institut für Technische Thermodynamik, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Stuttgart, Karlsruhe (2001)
- [7] "Möglichkeiten der Marktanreizförderung"; Zwischenbericht im Auftrag des BMWi, Prognos AG, Basel (1998)
- [8] B. Janzing, Solarthemen 109, S.7 (2001)
- [9] K. Scheffer: "Biomasse – gespeicherte Sonnenenergie aus der Vielfalt der Pflanzenarten – Potenziale, Bereitstellung, Konversion" in Forschungsverbund Sonnenenergie, Themen 2000, S. 34, Berlin (2000)
- [10] M. Specht, A. Bandi, F. Baumgart, C.N. Murray, J. Gretz: "Synthesis of Methanol from Biomass/CO₂ Resources" in "Greenhouse Gas Control Technologies", B. Eliasson, P.W.F. Riemer, A. Wokaun (Eds.), pg. 723, Pergamon, Amsterdam (1999)
- [11] "MWV-Prognose 2020 für die Bundesrepublik Deutschland"; Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV), Hamburg (2001)
- [12] "Esso Energieprognose 2000"; Esso Deutschland GmbH, Hamburg (2000)
- [13] "Szenarien des PKW-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020"; Deutsche Shell GmbH, Abt. Energie- und Wirtschaftspolitik, Hamburg (2001)
- [14] F. Staiß, "Jahrbuch Erneuerbare Energien 2001", Hrsg.: Energiestiftung Baden- Württemberg, Biebrich-Fachbuchverlag, Radebeul (2001)
- [15] I. Macedo: "Commercial Perspectives of Bioalcohol in Brazil"; Proceedings of 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, p. 35, Sevilla, Spain, 5-9. June (2000)
- [16] www.ethanolRFA.org (2002)
- [17] www.kompogas.ch (2002)
- [18] E. Larson, R. Katofsky in "Advances in Thermochemical Biomass Conversion", A. Bridgwater (Ed.), Chapman and Hall (1994)
- [19] M. Specht, A. Bandi, F. Baumgart, C. Linkohr, F. Staiß: "Kombinierte Nutzung von Biomasse und Wasserkraft"; Endbericht, Forschungsauftrag (1999)

- [20] S. Stucki: "Biometh – Methanolproduktion aus Biomasse-Abfällen in der Schweiz"; Schlussbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Schweiz (1996)

- [21] Netherlands Energy Research Foundation (ECN), Petten, Annual Report, p.4 (1998)

- [22] 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)

- [23] T. Marquard Möllenstedt, F. Baumgart, M. Specht: "Herstellung von regenerativem Methanol aus Biogas"; DGMK-Tagungsberichtsband 2002-2, in Vorbereitung (2002)

- [24] U. Bünger, Berechnungen für die verkehrswirtschaftliche Energiestrategie, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Ottobrunn (2000)

- [25] M. Schlesinger: "Szenarienerstellung - soziodemografische und ökonomische Rahmendaten"; Zwischenbericht für die Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung" des Deutschen Bundestages, Prognos AG, Basel (2001)