

Insgesamt ist als Fazit festzuhalten, dass in der Einführung synthetischer Kraftstoffe, die spezifisch auf die Brennverfahren (Motoren) abgestimmt sind, ein beträchtliches Minderungspotential bei den Emissionen besteht.

Anmerkung

- 1) CO₂-Sequestrierung bedeutet, dass das bei der Verbrennung (z. B. in einem Kohlekraftwerk) entstehende CO₂ abgetrennt, verdichtet und anschließend in unterirdische Lagerstätten (z. B. Erdöl- / Erdgaslagerstätten, Kohleflöze) zur Endlagerung eingepresst wird.

Literatur

Volkswagen AG, 2004: Die Basis nachhaltiger Mobilität. Informationsbroschüre. Stand Mai 2004; http://www.volkswagen-nachhaltigkeit.de/nhk/nhk_folder/de/download.Par.0019.Download.pdf; letzter Zugang: 14.03.2006

Kontakt

Dr. Frank Seyfried
Volkswagen AG
Konzernforschung, K-EFAK Kraftstoffe und Öle
Brieffach 17 78
38436 Wolfsburg
Tel.: +49 (0) 53 61 / 93 60 05
E-Mail: frank.seyfried@volkswagen.de

»

Einordnung und Vergleich biogener Kraftstoffe – „Well-to-Wheel“-Betrachtungen

von Jörg Schindler und Werner Weindorf,
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik

Neben der Bereitstellung biogener Kraftstoffe wird in diesem Beitrag auch deren Verwendung im Fahrzeug untersucht. Diese ganzheitliche Vorgehensweise wird als Well-to-Wheel-Ansatz¹ bezeichnet. Well-to-Wheel steht für die gesamte Prozesskette der Kraftstoffbereitstellung bis zur Verwendung im Fahrzeug. In einem ersten Schritt werden die jeweiligen Erzeugungspfade beschrieben und analysiert. Zunächst werden die Kosten der Kraftstoffherstellung und -verteilung bis zur Tankstelle dargestellt und bewertet. Daran schließt sich die Verwendung der Biokraftstoffe im Fahrzeug an. Die Darstellung stützt sich im Wesentlichen auf Studien, an denen die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik in den letzten Jahren beteiligt war.²

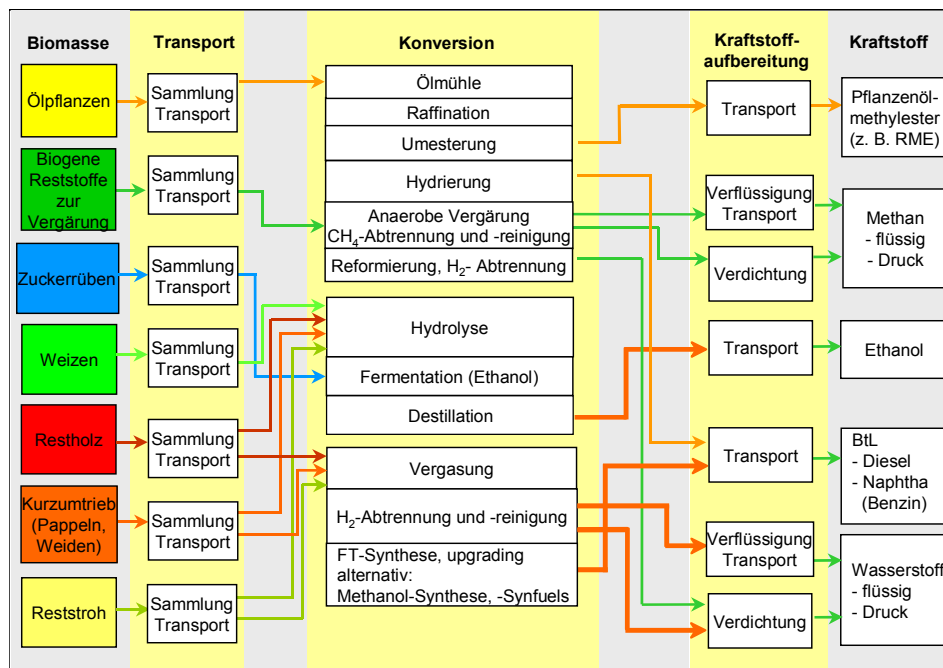
1 Bereitstellungspfade für biogene Kraftstoffe

Die verschiedenen Pfade, nach denen aus Biomasse Kraftstoffe hergestellt werden können, zeigt Abbildung 1 (nächste Seite). Die hierbei sich ergebenden Unterschiede in den Energiebilanzen und bei den Treibhausgasemissionen werden nachfolgend diskutiert.

Als einzelne Kraftstoffpfade werden berücksichtigt:

- Rapsölmethylester (RME) aus Rapsöl (über Umesterung),
- Methan aus dem Biogasreaktor (über anaerobe Vergärung),
- Ethanol aus Zuckerrüben, Mais, Weizen und schnellwachsenden Baumarten (über Fermentation / Vergärung),
- BtL-Kraftstoff (biomass to liquid) aus Restholz, Reststroh und schnellwachsenden Baumarten (über die Vergasung und Fischer-Tropsch-Synthese) und
- Wasserstoff, verdichtet oder verflüssigt, (über Vergasung von Restholz und schnellwachsende Baumarten).

Abb. 1: Mögliche Erzeugungspfade für Kraftstoffe aus Biomasse



Im Folgenden werden für die betrachteten Kraftstoff-Bereitstellungspfade die grundlegenden Annahmen für die Berechnung des Energieeinsatzes, der Kosten und der Treibhausgasemissionen skizziert. Zu beachten ist, dass viele der untersuchten Pfade heute noch nicht großtechnisch umgesetzt sind und deshalb die Abschätzungen auf Basis von Labor- oder Pilotanlagen erfolgen. Dennoch gibt es auf Grund vieler Studien und aus anderen Verwendungszusammenhängen bekannter Technologien eine gute Datenbasis, anhand der die Energieeffizienz und die Gesamtemissionen der jeweiligen Prozesse hergeleitet werden können. Größere Unsicherheiten bestehen erwartungsgemäß für Kostenabschätzungen, da sie insbesondere von der Kapazität der Kraftstofferzeugungsanlagen abhängen. Die gewonnenen Ergebnisse dienen vor allem dazu, die aussichtsreichsten biogenen Kraftstoffe und ihre Erzeugungspfade zu identifizieren. Zunächst werden die Prozessketten für biogene Kraftstoffe umrissen.

1.1 Pflanzenölmethylester (z. B. RME)

Pflanzenöle aus Ölsaaten (z. B. Raps, Sonnenblumen, Öllein) werden durch Umesterung zu Pflanzenölmethylester (siehe dazu auch den

Beitrag von Bockey in diesem Schwerpunkt). Für den hier betrachteten Rapsölmethylester (RME), umgangssprachlich auch als „Biodiesel“ bezeichnet, wird ein Kornertrag von 3 t pro ha und Jahr angenommen (10 % Wassergehalt). Die Rapssaat wird über eine Entfernung von 50 km mit Lkw zur Ölmühle transportiert. Dort wird Pflanzenöl durch Pressung und Extraktion gewonnen. Anschließend wird das rohe Pflanzenöl gereinigt (Raffination). Das Nebenprodukt Rapschrot dient als Viehfutter, verdrängt hierbei Sojaschrot und wird mit dessen Erlösen gegenbilanziert. Das gereinigte Pflanzenöl wiederum wird mit Methanol zu Rapsölmethylester umgeestert. Pro ha und Jahr werden 41 GJ (1,1 t) RME erzeugt.

Glycerin, als Nebenprodukt der Umesterung, kann zur Substitution von synthetisch erzeugtem Glycerin eingesetzt werden. Jedoch wird bereits heute nahezu das gesamte in Europa benötigte Glycerin aus der Erzeugung von Pflanzenölmethylester bereitgestellt. Deshalb wurde in diesen Abschätzungen davon ausgegangen, dass Glycerin als Rohstoff für die Herstellung von Propylenglykol eingesetzt wird (Edwards et al. 2005).

Das hergestellte RME wird anschließend zu einem Zwischenlager transportiert (mittlere

Entfernung 150 km), dort dem konventionellen Dieselkraftstoff zugemischt und anschließend nochmals durchschnittlich 150 km zu den Tankstellen transportiert.

1.2 Methan

Zunächst wird via anaerobe Vergärung aus biogenen Reststoffen Biogas erzeugt. In der anschließenden Druckwasserwäsche wird das im Biogas vorhandene CO₂ weitgehend entfernt, um einen Methangehalt über 98 % und somit Erdgasqualität zu erreichen. Die Rückstände aus der Vergärung werden auf die Felder gebracht. Bei biogenen Reststoffen (z. B. aus Haushalten und Kantinen) wird eine Düngergutschrift berücksichtigt.

Das so erzeugte Methan wird auf maximal 1 bar verdichtet, in das bestehende Erdgasnetz (Mittel- oder Niederdruck) eingespeist und an Tankstellen (mit Erdgasoption) entnommen. Damit es für die 200-bar-Druckflaschen in erdgasbetriebenen Fahrzeugen zur Verfügung steht, wird es zuvor an der Tankstelle auf 250 bar komprimiert.

1.3 Ethanol

Im Folgenden wird die Ethanolherstellung aus Zuckerrüben, Weizen und Holz bzw. Stroh beschrieben (siehe auch den Beitrag von Schmitz in diesem Schwerpunkt). Für alle diese Varianten gilt, dass das produzierte Ethanol zu einem Zwischenlager transportiert (unterstellte Entfernung 150 km) und dort dem konventionellen Benzin zugemischt wird. Das Gemisch aus Benzin und Ethanol wird anschließend über eine durchschnittliche Entfernung von 150 km zu den Tankstellen transportiert.

Herstellung aus Zuckerrüben

Ausgehend von einem Ertrag von 51,2 t Zuckerrüben pro ha und Jahr (bei 76,5 % Wassergehalt) (Dreier et al. 1998) werden die Zuckerrüben über eine mittlere Entfernung von 50 km mit Lkw zur Ethanolanlage transportiert. Der Energieverlust der Rüben während der Lagerung wird mit durchschnittlich 4,5 % ange-

nommen. Pro ha und Jahr werden so 99 GJ (3,7 t) Ethanol erzeugt.

Die für die Herstellung des Ethanols benötigte Wärme wird durch Erdgas gedeckt (Wirkungsgrad 90 %) und die erforderliche elektrische Energie dem öffentlichen Stromnetz entnommen.

Herstellung aus Weizen

Als Basis für die Ethanolherstellung wird in dieser Variante Weizen unterstellt. Der jährliche Kornertrag beträgt 8 t pro ha (bei 16 % Wassergehalt) (Gover et al. 1996), daraus resultieren 61 GJ (2,3 t) Ethanol. Die Weizen- und Sojabohnensaat wird über eine Entfernung von 50 km mit Lkw zur Ethanolanlage transportiert. Das bei der Ethanolproduktion anfallende Nebenprodukt Trockenschlempe wird als Viehfutter eingesetzt und gegen die Bereitstellung von importiertem Sojaschrot bilanziert.

Für die Deckung des Wärme- und Strombedarfs der Ethanolanlage wird in der ersten Variante eine mit Braunkohle betriebene Kraft-Wärme-Kopplungsanlage unterstellt; deren Überschussstrom wird gegen Gutschrift ins Netz eingespeist.

In der zweiten Variante wird der Energiebedarf mittels eines von der Universität Hohenheim ökologisch optimierten Konzepts gedeckt (Senn 2003). Und zwar wird Schlempe aus der Ethanolanlage zusammen mit zugekaufter Rapssaat einer Biogasanlage zugeführt und zu Biogas als Energieträger für die Ethanolproduktion umgesetzt.

Herstellung aus Stroh und Holz

Bei diesem Pfad der Ethanolherstellung werden Reststroh und Holzhackschnitzel (aus Restholz oder schnellwachsenden Baumarten) eingesetzt. Der Ertrag wurde mit 10 t Trockenmasse (TM) pro ha und Jahr angenommen, das entspricht 180 GJ / ha. Das Stroh und die Holzhackschnitzel werden über eine Entfernung von 50 km mit Lkw zur Konversionsanlage transportiert. Für das Restholz wird aufgrund der geringeren Verfügbarkeit zusätzlich ein Binnenschifftransport über 400 km unterstellt.

Über die gleichzeitige Hydrolyse und Fermentation der Zellulose werden die Holz-

hackschnitzel (Wooley et al. 1999) bzw. das Stroh zu Ethanol umgesetzt. Aus 10 t TM Holz können so 60 bis 67 GJ (2,2 bis 2,5 t) Ethanol gewonnen werden. Das abgetrennte Lignin wird vor Ort zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt. Der hierbei anfallende Überschussstrom wird gegen ein mit Holzhackschnitzeln betriebenes Kraftwerk bilanziert.

1.4 BtL-Kraftstoff

Bei diesem Kraftstoffherzeugungspfad werden Hackschnitzel aus Restholz und aus schnellwachsenden Baumarten in Kurzumtriebsplantagen³ eingesetzt. Die Hackschnitzel werden zunächst mittels Vergasung zu Synthesegas umgesetzt. Das Synthesegas, das ein Gemisch aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO) ist, wird nach der Reinigung in einer Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Um eine möglichst hohe Ausbeute an flüssigen Produkten zu bekommen, wird die FT-Synthese so betrieben, dass zunächst sehr langkettige Kohlenwasserstoffe entstehen. Die langkettigen Kohlenwasserstoffe werden in einem Hydrocracker mit nachgeschalteter Destillation / Rektifikation zu den gewünschten Produkten Naphtha, Kerosin und Diesel aufgespalten. Kerosin und Diesel können als Kraftstoff für Dieselmotoren eingesetzt werden, Naphtha ist ein Vorprodukt bei der Herstellung von Ottokraftstoff.

Die jährliche Kraftstoffausbeute, ausgehend von einem Ertrag von 10 t TM Holz pro Hektar, liegt mit ca. 70 GJ (1,6 t) BtL höher als bei dem entsprechenden Ethanolpfad. Vorteilhaft ist der Stromüberschuss in der Höhe von 17 GJ / ha.

1.5 Wasserstoff

Im Folgenden wird die Wasserstoffherstellung über Biogas und aus Holz beschrieben (siehe auch den Beitrag von Bossel in diesem Schwerpunkt). Für alle Varianten gilt, dass der produzierte Wasserstoff anschließend verdichtet oder verflüssigt wird.

Herstellung über Biogas

Aus biogenen Reststoffen wird durch anaerobe Vergärung Biogas erzeugt. Das erzeugte Biogas wird in einer Druckwasserwäsche zu reinem Methan (CH₄) aufbereitet (CH₄-Gehalt > 98 %), (vgl. Kap. 1.2). Dieses Methan wird ins Erdgasnetz eingespeist und an der Tankstelle wieder entnommen. In Reformieranlagen wird das Gas dort zu Wasserstoff umgesetzt.

Herstellung aus Restholz und schnellwachsenden Baumarten

Die bei diesem Pfad eingesetzten Holzhackschnitzel stammen aus Restholz und dem Anbau von schnellwachsenden Baumarten (Kurzumtrieb); der jährliche Ertrag wurde ebenso mit 10 t TM / ha angenommen (vgl. Kap. 1.3). Das zugrunde gelegte dezentrale Anlagenkonzept mit einem Biomasseinput von 10 MW_{th} bedingt eine mittlere Anlieferungsstrecke der Biomasse per Lkw von nur 12 km.

Die Vergasung der Holzhackschnitzel erfolgt mit dem von der Firma D.M.2-Verwertungstechnologien entwickelten Verfahren der „gestuften Reformierung“. Dabei wird ein wasserstoffreiches Synthesegas erzeugt. Das ebenso im Produktgasstrom enthaltene CO wird durch einen nachgeschalteten CO-Shift-Reaktor zu CO₂ und H₂ umgesetzt. Die Reinigung des Wasserstoffs erfolgt in einer Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption (PSA)). Das Spülgas aus der PSA-Anlage wird zur Erzeugung von Strom in einem Gasmotor eingesetzt; ein Teil des Stroms deckt den Bedarf für die Verdichtung des Wasserstoffs, der Rest wird ins Netz eingespeist. Aus 10 t TM (180 GJ) lassen sich 92 GJ bzw. 0,65 t Wasserstoff erzeugen⁴. Eine erste Pilotanlage „Blauer Turm“ wurde in Herten / Nordrhein-Westfalen errichtet – ohne die Aufbereitung des Synthesegases zu Wasserstoff. Die erforderlichen Komponenten zur Aufbereitung des Synthesegases zu reinem Wasserstoff (CO-Shift-Reaktor, PSA) sind Stand der Technik und kommerziell verfügbar.

Konditionierung des Wasserstoffs

Wasserstoff wird als Druck-Wasserstoff oder verflüssigt angeboten. Falls Fahrzeuge mit

Druck-Wasserstoff betankt werden sollen, wird dieser zur Zwischenspeicherung bis auf 300 bar nachverdichtet. Datengrundlage hierfür sind Angaben des Anlagenherstellers Haldor Topsoe, die sich auf eine Wasserstoffleistung von 320 bis 560 Normkubikmeter (Nm³) pro Stunde beziehen. Für die weiteren Abschätzungen wurde unterstellt, dass die Gasflaschen in den Fahrzeugen auf 700 bar Druckniveau ausgelegt sind. Die Betankung der Fahrzeuge erfolgt über ein Booster-Konzept, das für den Tankvorgang 850 bar bereitstellt. Der Energiebedarf für die Verdichtung des Wasserstoffs auf 850 bar wird mit 0,07 kWh Strom pro kWh H₂ angesetzt.

Für die Produktion von Flüssigwasserstoff sind größere Anlagen sinnvoll. In Edwards et al. (2005) wurde eine Vergasungsanlage mit einem Biomasseinput von etwa 200 MW_{th} unterstellt. Die Prozessführung basiert auf einem vom Battelle-Columbus-Laboratory entwickelten Verfahren, das heute von FERCO in den USA kommerziell vertrieben wird.

Für die H₂-Verflüssigung sind 0,3 kWh Strom pro kWh Wasserstoff erforderlich, der mittels GuD-Kraftwerk⁵ (Wirkungsgrad 42,5 %) mit integrierter Biomassevergasung hergestellt wird. Die erzielbare Kraftstoffausbeute, bezogen auf 10 t TM Holz, beträgt 76 GJ (0,54 t) verflüssigter Wasserstoff.

2 Ausbeute und Kosten bei Biokraftstoffen von unterschiedlichen Biomassen

In den Kapiteln 1.1 bis 1.5 wurde dargestellt, dass die jährlichen, auf den Energiegehalt bezogenen Hektarerträge der biogenen Kraftstoffe bei Ölsaaten, Weizen, Holz und Stroh sehr unterschiedlich sind. Die Spanne reicht von rd. 40 bis 100 GJ. Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass sich die Ausbeute an Kraftstoffen aus diesen Pflanzen deutlich unterscheidet. Die besten Konversionswirkungsgrade bieten hierbei RME und Ethanol aus Zuckerrüben und Weizen. Sie liegen bei 50 bis 58 %, bezogen auf den Energiegehalt der eingesetzten Zuckerrüben bzw. Raps- und Weizensaat. Etwas geringere Gesamtwirkungsgrade weist die Wasserstoffherstellung aus Holz und Stroh auf. Bei Ethanol aus Holz und Stroh ist die Kraftstoffausbeute deutlich niedriger. Es ist zu berücksichtigen, dass bei RME und vor allem bei der konventionellen Produktion von Ethanol aus

Weizen und Zuckerrüben ein erheblicher externer Energieeinsatz erforderlich ist (vor allem für die Destillation). Bei BtL, Ethanol und Wasserstoff aus Holz und Reststroh ist nur ein geringer zusätzlicher Energiebedarf erforderlich. Das gleiche gilt für Methan und Wasserstoff aus Biogas. Das wird vor allem bei der Gesamtbilanz in Tabelle 3 (siehe Kap. 3.2) ersichtlich. Bei der Herstellung von Methan aus Biogas finden sich etwa 70 % der Energie im Methan wieder.

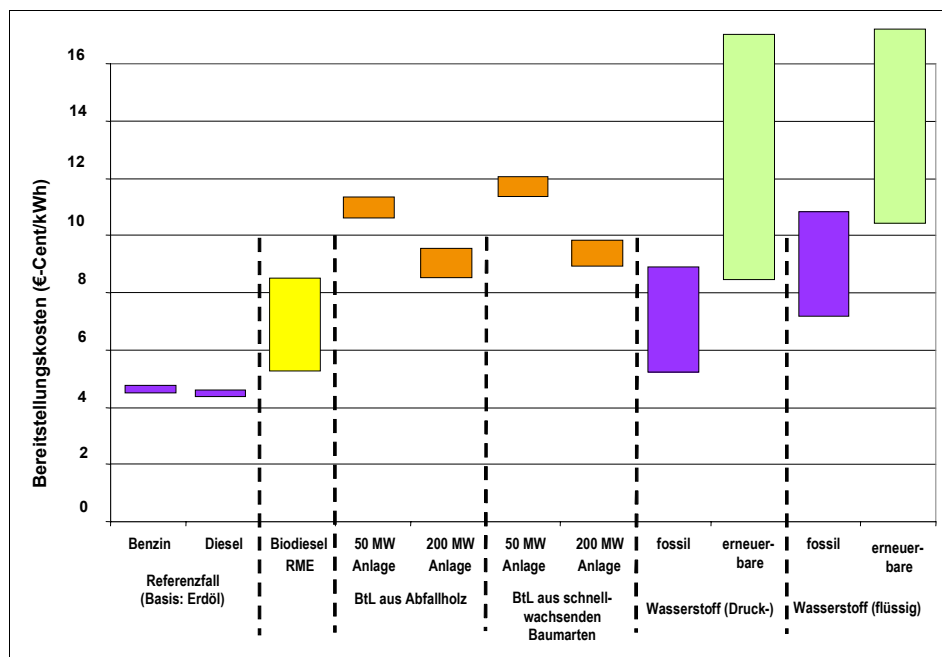
Tab. 1: Energetische Kraftstoffausbeute

| | (MJ _{Kraftstoff} / MJ _{Biomasse}) |
|---|--|
| RME | 0,58 ¹⁾ |
| Ethanol aus | |
| Zuckerrüben | 0,50 ²⁾ |
| Weizen, Braunkohle-KWK | 0,53 ³⁾ |
| Weizen, Biogas-KWK | 0,58 ³⁾ |
| Restholz | 0,32 - 0,36 ⁴⁾ |
| Reststroh | 0,42 ⁵⁾ |
| Methan aus Biogas | 0,71 ⁶⁾ |
| BtL via | |
| Methanol | 0,45 |
| Fischer-Tropsch-Synthese | 0,38 ⁷⁾ |
| Wasserstoff (Druck-) aus | |
| Biogas | 0,40 - 0,50 |
| Holz, Reststroh | 0,50 |
| Wasserstoff (flüssig) aus Holz, Reststroh | 0,41 |

- 1) bezogen auf den Energiegehalt der Rapsaat (26,4 MJ/kg TM)
- 2) bezogen auf den Energiegehalt der Zuckerrüben (16,3 MJ/kg TM)
- 3) bezogen auf den Energiegehalt der Weizensaat (17,0 MJ/kg TM)
- 4) Überschussstrom 0,03 bis 0,04 MJ
- 5) Überschussstrom 0,02 MJ
- 6) bezogen auf Biogas
- 7) Überschussstrom 0,09 MJ

Die Abschätzung der Bereitstellungskosten für biogene Kraftstoffe (vgl. Abb. 2 nächste Seite) bezieht sich auf eine Studie, welche die L-B-Systemtechnik zusammen mit DaimlerChrysler und dem Forschungszentrum Jülich erstellt hat (Höhlein et al. 2003), sowie auf Daten, die für eine Studie für CONCAWE, EUCAR und dem JRC zusammengestellt wurden (Edwards et al. 2005). Hierbei wurde angenommen, dass 5 % des Kraftstoffverbrauchs durch biogene Kraftstoffe substituiert werden. Dies bedeutet, dass der Substitutionsumfang in einer Größenord-

Abb. 2: Bereitstellungskosten für biogene Kraftstoffe im Vergleich zu fossilen



Zusammengestellt nach Dreier et al. 1998; Edwards et al. 2005; Höhlein et al. 2003; EUCAR VES 2002⁶; Vetter 2005

nung liegt, welcher hinsichtlich der notwendigen Biomassebereitstellung und technischen Machbarkeit der Produktion der biogenen Kraftstoffe bereits erhebliche Anforderungen stellt.

Die Kosten der biogenen Kraftstoffe sind je nach verwendetem Primärenergieträger für die Bereitstellung der Hilfsenergien unterschiedlich (vgl. Abb. 2). Die Bereitstellungskosten für Druck-Wasserstoff liegen bei der fossilen Basis zwischen 5 und 9 €-Cent / kWh. Regenerativ erzeugter Wasserstoff kostet beinahe das Doppelte. Ähnliche Verhältnisse finden sich beim verflüssigten Wasserstoff, wobei der größere Aufwand der Verflüssigungsanlage gegenüber dem Verdichter etwa 2 €-Cent / kWh Wasserstoff beträgt.

Großanlagen lassen deutlich niedrigere Kraftstofferzeugungskosten erwarten als kleinere Einheiten. Abbildung 2 zeigt die Möglichkeiten der Kostenreduktion bei der BtL-Produktion mit steigenden Anlagenrößen (50 - 200 MW). Die Verwendung von biogenen Abfällen und Reststoffen weist hierbei Kostenvorteile gegenüber dem Einsatz von gezielt angebauten Energiepflanzen auf.

3 Gesamtbewertung der Kraftstofffade nach Well-to-Wheel

Durch Verknüpfung der Teilschritte Kraftstoffbereitstellung und der -verwendung im Fahrzeug ergibt sich die Möglichkeit der Gesamtbeurteilung nach dem Well-to-Wheel-Ansatz. Im Folgenden werden die Einzelaspekte Kraftstoffverbrauch, Energieeinsatz, Mehrkosten und Treibhausgasemissionen diskutiert.

3.1 Kraftstoffverbrauch

Der niedrigere Kraftstoffverbrauch des mit Erdgas bzw. biogenem Methan betriebenen Pkws resultiert aus der höheren Klopfestigkeit⁷ von Methan, was wiederum höhere Verdichtungen erlaubt. Bei Ethanol wird nur die Zumischung von Ethanol zu Benzin betrachtet und keine speziell für Ethanol ausgelegten Fahrzeuge. Daher wird für Ethanol der gleiche Kraftstoffverbrauch wie für Benzin angenommen.

Tab. 2: Kraftstoffverbräuche von Hybrid-Fahrzeugen (Basis: VW Golf)

| Antriebskonzept / Kraftstoff | Kraftstoffverbrauch | |
|--|---------------------|-------------------------------|
| | (MJ / km) | (l Benzinäquivalent / 100 km) |
| Otto-Verbrennungsmotor / Benzin, Ethanol | 1,62 | 5,0 |
| Diesel-Verbrennungsmotor / Diesel, RME, FT-Diesel | 1,46 | 4,5 |
| Otto-Verbrennungsmotor / Erdgas bzw. Methan aus Druckflaschen | 1,39 | 4,3 |
| Brennstoffzelle / Wasserstoff aus Druckflaschen bzw. flüssiger Wasserstoff | 0,84 | 2,6 |

Quelle: Edwards et al. 2005

Für jeden Kraftstoff gibt es zugehörige geeignete Antriebskonzepte. Bei den Fahrzeugantrieben wird unterschieden zwischen konventionellem

Verbrennungsmotor und künftig möglichen Antrieben mit Brennstoffzelle. Beide Varianten können auch als Hybride (mit Elektrospeicher und im Falle des Verbrennungsmotors auch mit zusätzlichem Elektroantrieb) ausgeführt werden. In Tabelle 2 werden die Kraftstoffverbräuche für Fahrzeuge mit Hybridantrieb dargestellt und in Benzin-Äquivalente umgerechnet, um einen Vergleich zu ermöglichen. Diese angeführten geringen Verbrauchswerte, die auf dem neuen europäischen Fahrzyklus basieren, stellen durchaus eine aussichtsreiche Zukunftsoption dar. In den weiteren Betrachtungen wird jedoch von konventionellen Verbrennungsmotoren ausgegangen. Als Referenzfahrzeug wurde ein VW Golf ausgewählt.

3.2 Energieeinsatz

Den Energieeinsatz Well-to-Wheel für die gesamte Prozesskette, also die Bereitstellung und die Nutzung verschiedener Biokraftstoffe zeigt Tabelle 3. Die Angaben beziehen sich auf einen

Tab. 3: Energieeinsatz bei biogenen Kraftstoffen (Well-to-Wheel-Ansatz)

| Kraftstoff | Antriebskonzept: ¹⁾ Hybridfahrzeuge mit | Energieeinsatz nach Herkunft (MJ/km) | | | |
|---|---|--------------------------------------|--------|---------|--------|
| | | erneuerbar | fossil | nuklear | gesamt |
| <i>Referenzkraftstoffe</i> | | | | | |
| Benzin aus Rohöl | Ottomotor | 0 | 1,83 | 0,01 | 1,84 |
| Diesel aus Rohöl | Dieselmotor | 0 | 1,68 | 0,01 | 1,69 |
| <i>Kraftstoffe aus Biomasse</i> | | | | | |
| RME | Dieselmotor | 2,53 | 0,59 | 0,02 | 3,13 |
| Methan aus Biogas | Ottomotor | 1,96 ²⁾ | 0,00 | 0,03 | 1,99 |
| Ethanol aus Zuckerrüben | Ottomotor | 3,22 | 1,31 | 0,10 | 4,62 |
| Weizen | | | | | |
| - Ethanolherstellung mit Braunkohle-KWK | | 3,05 | 1,36 | 0,03 | 4,44 |
| - Ethanolherstellung mit Biogasanlage ³⁾ | | 3,79 | -0,26 | -0,41 | 3,11 |
| Holz | | 4,32 | 0,42 | 0,01 | 4,76 |
| Stroh | | 3,58 | 0,16 | 0,02 | 3,75 |
| BtL-Kraftstoff aus Holz ⁴⁾ | Dieselmotor | 3,11 | 0,09 | 0,01 | 3,20 |
| <i>Wasserstoff</i> | | | | | |
| Druck-W.: über Biogas | Brennstoffzelle | 1,74 ²⁾ | 0,08 | 0,09 | 1,91 |
| aus Holz | | 1,70 | 0,10 | 0,06 | 1,86 |
| flüssiger W.: aus Holz | | 2,04 | 0,05 | 0 | 2,09 |

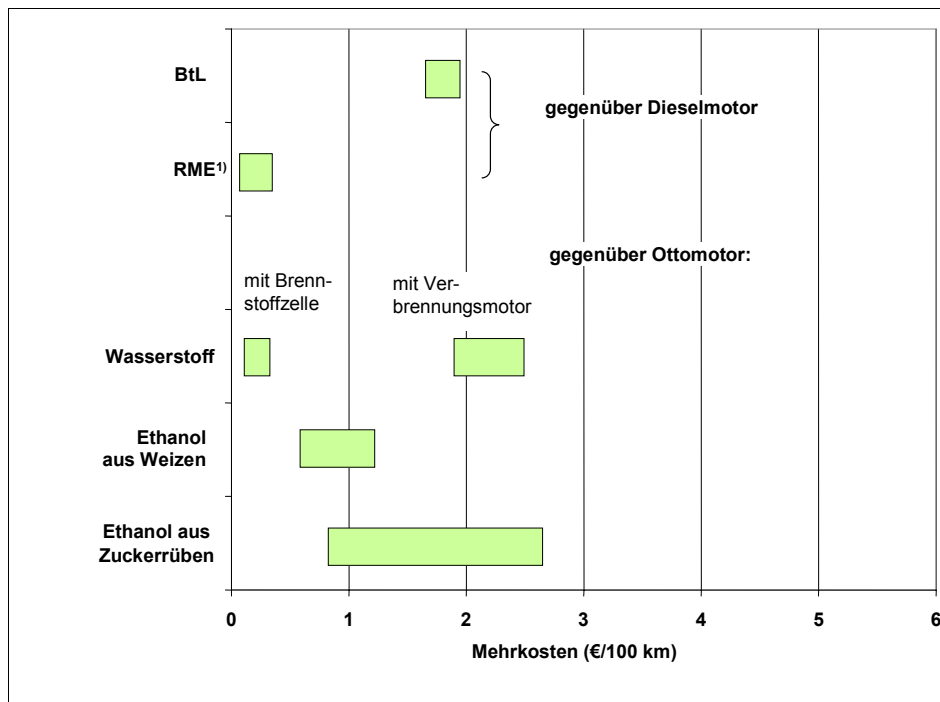
¹⁾ Basis: VW Golf

²⁾ Bezogen auf das rohe Biogas (Einsatzstoff biogene Reststoffe)

³⁾ Ökologisches Gesamtkonzept mit Rückführung der Reststoffe auf die Ackerflächen

⁴⁾ Synthetischer Dieselmotor aus Fischer-Tropsch-Synthese; Hybridfahrzeuge: Fahrzeuge mit verschiedenen Antriebskonzepten, z. B. Verbrennungsmotor mit Elektromotor

Abb. 3: Mehrkosten der Biokraftstoffe gegenüber Benzin und Diesel



¹⁾ ohne Flächenprämie für Rapsanbau

Quelle: Edwards et al. 2005; ergänzt um eigene Berechnungen bei Hybridfahrzeugen, ausgehend von einem Rohölpreis von 60 \$ pro barrel

gefahrenen Kilometer, wobei nach dem jeweiligen ursprünglichen Energieeinsatz (erneuerbar, fossil, nuklear) unterschieden wurde. Zum Vergleich der biogenen mit den herkömmlichen fossilen Kraftstoffen sind zusätzlich Werte für Benzin- und Dieselfahrzeuge angegeben. Auffallend sind die notwendigen hohen fossilen Beiträge bei der Ethanolherstellung aus Zuckerrüben und aus Weizen. Der hohe Prozessenergiebedarf wird in diesen beiden Varianten mit Erdgas bzw. Braunkohle gedeckt. Den höchsten Biomasseinput verlangt ebenfalls ein Ethanolpfad: die Ethanolherstellung aus Holz. Energetisch gesehen besonders günstig ist die Bereitstellung von komprimiertem Wasserstoff aus Holz und die Methanherzeugung aus Biogas.

3.3 Mehrkosten

Für ausgewählte biogene Kraftstoffe werden in Abbildung 3 die Mehrkosten pro 100 km Fahrstrecke gegenüber einem Fahrzeug mit Otto- bzw. Dieselmotor mit fossilen Kraftstoffen dargestellt. Als Referenzfahrzeug wurde ein

VW Golf V gewählt. Nach der ADAC-Datenbank für Pkw-Nutzungskosten (ADAC 2006) liegen dessen Gesamtkosten sowohl für den Benzin- als auch den Dieselmotor bei einer Nutzung von 16.000 km pro Jahr bei etwa 35 €/100 km. Demgegenüber liegen die Mehrkosten (für Investition, Betrieb und Kraftstoff) für Fahrzeuge mit biogenen Kraftstoffen zwischen 2 und 5 € pro 100 km Fahrstrecke (bzw. 6 bis 15 % der Gesamtkosten). Aus Verbrauchersicht scheint dies noch akzeptabel. Allerdings muss hierbei der Staat auf die Mineralölsteuer verzichten. Aktuell (März 2006) liegt der Barrelpreis bei ca. 60 \$ (MWV 2006). Bei RME sind heute unter Berücksichtigung der Flächenprämien für den Rapsanbau eher Kostenvorteile festzustellen; in Abbildung 3 ist dies jedoch nicht berücksichtigt, da Flächenprämien einen Subventionstatbestand darstellen.

Tab. 4: Treibhausgasemissionen bei biogenen Kraftstoffen („Well-to-Wheel“-Ansatz)

| Kraftstoff | Antriebskonzept: ¹⁾ Hybridfahrzeuge mit | Emissionen (g CO ₂ -Äquivalente/km) | | | |
|--|---|--|-----------------|------------------|-------|
| | | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | Summe |
| <i>Referenzkraftstoffe</i> | | | | | |
| Benzin aus Rohöl | Ottomotor | 139 | 0 | 1 | 140 |
| Diesel aus Rohöl | Dieselmotor | 128 | 0 | 2 | 130 |
| <i>Kraftstoffe aus Biomasse</i> | | | | | |
| RME | Dieselmotor | 24 | 3 | 34 | 61 |
| Methan aus Biogas ²⁾ | Ottomotor | 1 | 18 | -2 | 16 |
| Ethanol aus Zuckerrüben | Ottomotor | 79 | 5 | 9 | 94 |
| Weizen | | 136 | 1 | 13 | 150 |
| - Ethanolherstellung mit Braunkohle-KWK | | -23 | -2 | 33 | 8 |
| - Ethanolherstellung mit Biogasanlage | | | | | |
| Holz | | 29 | 1 | -1 | 30 |
| - Restholz | | | | 5 | 36 |
| - schnellwachsende Baumarten | | | 1 | 16 | |
| Stroh | | 14 | 1 | 1 | 16 |
| BtL-Kraftstoff | Dieselmotor | | | | |
| - aus Restholz | | 7 | 0 | 2 | 9 |
| - schnellwachs. Baumarten | | 6 | | 6 | 12 |
| Wasserstoff | Brennstoffzelle | | | | |
| - Druck-W.: über Biogas ²⁾ | | 7 | 15 | -3 | 19 |
| aus Holz | | 7 | 1 | 1 | 9 |
| swB ³⁾ | | 9 | | 3 | 13 |
| - flüssiger W.: aus Holz | | 4 | 0 | 0 | 4 |
| swB ³⁾ | | | 3 | 7 | |

¹⁾ Basis: VW Golf

²⁾ Einsatzstoff Biomüll

³⁾ swB = schnellwachsende Baumarten

3.4 Treibhausgasemissionen

Kraftstoffe verursachen nicht nur bei ihrem Einsatz im Fahrzeug klimarelevante Emissionen, sondern auch bei ihrer Erzeugung, beim Transport und bei der Konditionierung. Alle Emissionen an klimarelevanten Gasen, die mit der Bereitstellung und Nutzung der Kraftstoffe verbunden sind, wurden in den Vergleich einbezogen. Nicht berücksichtigt sind die aus dem Bau der zugehörigen Anlagen resultierenden Treibhausgasemissionen (vgl. Edwards et al. 2005).

Zu den Treibhausgasen zählen insbesondere Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Der CO₂-Äquivalent-Emissionsfaktor rechnet die Klimawirksamkeit der genannten Gase auf äquivalente Mengen CO₂ um.⁸ Werden bei der Bereitstellung und Nutzung der Biokraftstoffe zusätzlich fossile Ener-

gieträger benötigt, so werden deren Emissionen bei der Bilanzierung berücksichtigt. Die Verbrennung von Biomasse ist CO₂-neutral, da nur soviel CO₂ freigesetzt wird, wie vorher beim Wachstum der Pflanze aus der Atmosphäre entzogen wurde. Tabelle 4 zeigt die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung und Nutzung verschiedener Biokraftstoffe im Vergleich zu fossilem Benzin und Diesel.

Die Ergebnisse lassen sich in drei Gruppen einteilen. Günstige Gesamt-Treibhausgasemissionen weisen die Wasserstoff- und BtL-Konzepte auf, da vorwiegend Restholz oder Holz aus schnellwachsenden Baumarten eingesetzt wird, ebenso die Ottomotoren, die mit Ethanol aus Weizen (über die Hilfsenergie Biogas) betrieben werden. Aufgrund der Stickstoffdüngung erreichen die Fahrzeuge mit Biodiesel nur mittlere Emissionswerte. Falls der hohe Energiebedarf für die Herstellung von

Ethanol aus Zuckerrüben oder Weizen über Braunkohle abgedeckt wird, übertreffen die damit verbundenen Emissionen sogar die Emissionen bei Benzin oder Diesel.

4 Schlussfolgerungen

Die Umwandlung biogener Energieträger in Kraftstoffe ist gegenwärtig relativ teuer. Für alle Verfahren gilt: Die hohen Kosten und die Komplexität der Biomassebereitstellung, die hohen Investitionen für die Konversionsanlagen sowie der noch zu niedrige Gesamtwirkungsgrad aller Umwandlungsschritte sind die Haupthürden einer großtechnischen Umsetzung der Bereitstellung von biogenen Kraftstoffen. Im Gegensatz dazu lässt die Verwendung des biogenen Kraftstoffs in den Zumischungsvarianten technisch keine größeren Probleme erwarten. Gemessen an Diesel und Benzin liegen die Mehrkosten (für Investition, Betrieb und Kraftstoff) gegenüber Fahrzeugen mit biogenen Kraftstoffen zwischen 2 und 5 € pro 100 km Fahrstrecke. Dieses kostenmäßig günstige Gesamtbild wird dadurch getrübt, dass für diese biogenen Kraftstoffe keine Mineralölsteuer berücksichtigt wurde.

Werden die Treibhausgasemissionen betrachtet, so ergeben sich beim Ethanol sehr unterschiedliche Ergebnisse. Wird der Energiebedarf der Ethanolanlage über Braunkohle gedeckt, können die Treibhausgasemissionen sogar höher sein als bei Benzin und Diesel. Relativ hohe Treibhausgasemissionen ergeben sich auch aus der Bereitstellung von RME. Der Grund hierfür liegt vor allem am Einsatz von Stickstoffdünger und den daraus resultierenden hohen N_2O -Emissionen.

Die synthesesgasstämmigen BtL-Kraftstoffe und Wasserstoff weisen niedrige Treibhausgasemissionen auf. Das gleiche gilt für Methan aus Biogas, Ethanol aus Weizen (mit Biogasanlage) sowie Ethanol aus biogenen Reststoffen und Holz von Kurzumtriebsplantagen.

Eine Minderung der Treibhausgasemissionen anhand biogener Kraftstoffe bedeutet immer eine Bürde mit hohen Kosten. Die Bereitschaft, mehr für den Kraftstoff zu bezahlen, führt jedoch nicht grundsätzlich zu CO_2 -Einsparungen.

Anmerkungen

- 1) „Well-to-Wheel“ steht für den ganzheitlichen Ansatz der Gesamtkette von der Kraftstoffbereitstellung bis zur Verwendung in Fahrzeugen. „Well“ steht für „Bohrloch“ bzw. „Bohrung“ und lehnt sich somit an die klassische Bereitstellungskette für fossilen Kraftstoff an. „Wheel“ (Rad) steht hierbei für die Verwendung des Kraftstoff im Fahrzeug.
- 2) Das von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik entwickelte Programm und Datenbanksystem „E3database“ zur Berechnung und Bewertung von Energieketten, der Treibhausgasemissionen und des Energieaufwands wurde in Edwards et al. 2005 verwendet.
- 3) Kurzumtriebsplantagen sind Flächen, auf denen schnellwachsende Baumarten, in unseren Breiten meist Weiden oder Pappeln, angebaut werden. Diese Plantagen werden über eine Zeitdauer von 20 bis 30 Jahren intensiv bewirtschaftet, d. h. gedüngt und in den ersten Jahren vor Unkrautbewuchs geschützt. Die Flächen werden in diesem Zeitrahmen mehrfach abgeerntet.
- 4) Oberer Heizwert von Wasserstoff:
12,75 MJ / Nm³ bzw. 141,85 MJ / kg
- 5) GuD-Kraftwerke, ausgeschrieben „Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke“, dienen der Stromerzeugung, wobei der Gasturbinen- und Dampfturbinenprozess miteinander kombiniert werden. Die heißen Abgase der Gasturbinen werden in einem Dampfkessel zur Erzeugung von Wasserdampf verwendet. Der Dampf wird anschließend über einen herkömmlichen Dampfturbinenprozess entspannt.
- 6) Zitiert nach J.W. Goudriaan, Arbeitsgruppe: Biomassepotentiale im Rahmen der Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie (VES), 2002
- 7) Das „Klopfen“ von Benzinmotoren ist ein Zeichen für eine unkontrollierte Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches im Zylinder. Die Zündung erfolgt vorzeitig allein durch die Kompression, noch bevor der Zündfunke ausgelöst wird. Dadurch wird der Motor geschädigt und seine Leistung vermindert. Motoren mit hoher Verdichtung benötigen besonders klopfbeständiges Benzin.
- 8) Wertigkeit bei den CO_2 -Äquivalenten bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren (Houghton et al. 2001): $CO_2 = 1$, $CH_4 = 23$, $N_2O = 296$. Weitere Treibhausgase sind FCKW, FKW und SF_6 , die hier jedoch nicht relevant sind.

Literatur

ADAC, 2006: Autokostenrechner-Datenbank; http://www.adac.de/Auto_Motorrad/autokosten/autokosten-rechner (letzter Zugang 22.03.2006)

Dreier, T.; Geiger, B.; Saller, A., 1998: Ganzheitliche Prozesskettenanalyse für die Erzeugung und Anwendung von biogenen Kraftstoffen. Studie im Auftrag der Daimler Benz AG und des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e.V. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, TU München und Forschungsstelle für Energiewirtschaft

Edwards, R.; Larivé, J.-F.; Mahieu, V. et al., 2005: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Conservation of clean air and water in Europe (CONCAWE), European Council for Automotive R&D (EUCAR), European Commission Directorate General, Joint Research Center (JRC); http://ies.jrc.cec.eu.int/media/scripts/getfile.php?file=fileadmin/H04/Well_to_Wheels/WTW/WTW_Report_231205.pdf (letzter Zugang 22.03.2006)

Gover, M.P.; Collings, S.A.; Hitchcock, G.S. et al., 1996: Alternative Road Transport Fuels – A Preliminary Life-cycle Study for the UK. A study co-funded by the Department of Trade and Industry and the Department of Transport. Harwell: ETSU, Volume 2

Höhlein, B.; Biedermann, P.; Dolls, A. et al., 2003: ReFuelNet. Teil III: „Systemanalytische Begleitforschung“, Arbeitspaket 1. Abschlussbericht über das Projektvorhaben. Forschungszentrum Jülich und L-B-Systemtechnik, Ottobrunn

Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J. et al., 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, S. 388

MPE, 2000: Produktvorstellung der Mannesmann Pilotentwicklung GmbH (mpe) auf der Hannover Messe 2000

MWV, 2006: Mineralölwirtschaftsverband e.V. Foliensatz 2006 / Teil A: Mineralölversorgung, Preisentwicklung, Besteuerung; <http://www.mwv.de/download/a-versorgung.pdf> (letzter Zugang 22.03.2006)

Senn, T., 2003: Die Produktion von Bioethanol als Treibstoff unter dem Aspekt der Energie-, Kosten- und Ökobilanz. Fachtagung „Regenerative Kraftstoffe“, 13./14. November 2003, Universität Hohenheim, Institut für Lebensmitteltechnologie, FG Gärungstechnologie mit Forschungs- und Lehrbrennerei, Stuttgart

Vetter, A., 2005: Bereitstellungsketten und -kosten land- und forstwirtschaftlicher Biomassen zur Pro-

duktion von BtL-Kraftstoffen; Münster: Landwirtschaftsverlag, (Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 25)

Wooley, R.; Ruth, M.; Sheehan, J. et al., 1999: Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Pre-hydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios. Golden (Colorado): National Renewable Energy Laboratory

Kontakt

Jörg Schindler
Werner Weindorf
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
Daimlerstrasse 15, 85521 Ottobrunn
Tel.: +49 (0) 89 / 60 81 10 - 0
Fax: +49 (0) 89 / 609 97 31
E-Mail: info@lbst.de

«