



Koordinationsstelle
der Wasserstoff-Initiative Bayern

**Perspektiven einer Wasserstoff-
Energiewirtschaft - Teil 6**

Energieeffizienz alternativer Kraftstoffe aus Biomasse und Erdgas im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen

**Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Prof. Dr.-Ing. U. Wagner**

**Bearbeiter:
Dipl.-Ing. M. Baitsch
Dipl.-Ing. S. Richter**

München, Oktober 2007

Energieeffizienz alternativer Kraftstoffe aus Biomasse und Erdgas im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen

Auftraggeber:

**Bayerisches
Staatsministerium für
Wirtschaft,
Infrastruktur, Verkehr
und Technologie**

FfE-Auftragsnummer:

057.12.06

Bearbeiter/in:

**Dipl.-Ing. M. Baitsch
Dipl.-Ing. S. Richter**

Fertigstellung:

Oktober 2007

Impressum:

Endbericht
der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
(FfE)

zum Projekt:

Energieeffizienz alternativer Kraftstoffe aus Biomasse
und Erdgas im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen

Auftraggeber:

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft,
Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Kontakt:

Am Blütenanger 71
80995 München
Tel.: +49 (0) 89 158121-0
Fax: +49 (0) 89 158121-10
E-Mail: info@ffe.de
Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dipl.-Phys. R. Corradini

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Stand der Technik	3
2.1	Kraftstoffherstellung	4
2.1.1	Diesel aus Erdöl	4
2.1.2	Herstellung von BtL-Diesel aus Holz nach dem Carbo-V-Verfahren und Verflüssigung	5
2.1.3	Wasserstoff aus Erdgas durch Dampfreformierung	7
2.1.4	Wasserstoff aus Biomasse	8
2.2	Antriebskonzepte	9
2.2.1	Moderner PKW-Dieselmotor	9
2.2.2	Diesel-Hybrid	10
2.2.3	Brennstoffzellenantrieb	11
3	Energieeffizienz alternativer Antriebskonzepte	14
3.1	Definitionen	14
3.2	Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes	15
3.2.1	Dieselfahrzeug mit konventionellem Dieselkraftstoff	15
3.2.2	Diesel-Hybrid mit konventionellem Dieselkraftstoff	15
3.2.3	Diesel-Hybrid mit dieselähnlichem Kraftstoff aus Biomasse	16
3.2.4	Brennstoffzellenfahrzeug mit Wasserstoff aus Erdgas	16
3.2.5	Brennstoffzellenfahrzeug mit Wasserstoff aus Biomasse	17
3.3	Ergebnisse	18
3.3.1	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	18
3.3.2	Kosten	22
4	Zusammenfassung	26
5	Literaturverzeichnis	27

Energieeffizienz alternativer Kraftstoffe aus Biomasse und Erdgas im Vergleich mit konventionellen Kraftstoffen

1 Einleitung

Rund 30 Prozent des gesamten Primärenergieverbrauchs Deutschlands gehen zu Lasten des Verkehrssektors. Durch die dominierende Verwendung mineralölbasierter Kraftstoffe trägt dieser Sektor erheblich zur Abhängigkeit von Energieimporten bei und bedingt mit rund 150 Mio. t Jahresausstoß über 20% der Kohlendioxidemissionen.

Aus diesen Gründen wird in Politik, Wissenschaft und Industrie intensiv nach Alternativen für konventionelle Kraftstoffe gesucht. Dabei spielen u. a. Btl-Kraftstoffe und Wasserstoff eine besondere Rolle, da für diese mittel- und langfristig ein Potenzial zur Substitution von Benzin und Diesel gesehen wird. BtL-Kraftstoffe aus der Umwandlung von Biomasse (Biomass to Liquid – BtL) besitzen gegenüber anderen Biokraftstoffen wie Rapsmethylester (RME) unter anderem den Vorteil, dass die gesamte Biomasse genutzt werden kann und damit der nutzbare Hektarertrag höher ist. Wasserstoff zeichnet sich vor allem durch die Vielzahl der möglichen Herstellungsmethoden und die dadurch bedingte Unabhängigkeit von einem speziellen Primärenergieträger aus.

Ziel dieser Studie ist die Darstellung alternativer Nutzungspfade zu Dieselmotoren nach dem aktuellen Stand der Technik und der Vergleich zu BtL-Kraftstoff und Wasserstoff. Im Vordergrund stehen dabei Nutzungspfade, die zum einen nahe einer großtechnischen Realisierbarkeit sind und zum anderen den energieeffizientesten Einsatz ermöglichen. Die Studie beinhaltet eine Übersicht zum aktuellen Stand der Technik sowie eine ganzheitliche Bewertung von fünf ausgewählten alternativen Nutzungspfaden. Als Methode für den Vergleich kommt eine ganzheitliche Bilanzierung zum Einsatz, bei der als Indikatoren der kumulierte Energieaufwand (KEA) und die Kosten bilanziert werden. Dem Umfang der Studie entsprechend wird dabei im Wesentlichen auf vorhandene Literatur zurückgegriffen und es werden zum Teil vereinfachte Abschätzungen getroffen.

2 Stand der Technik

Einleitend wird kurz der aktuelle Stand der Technik für die Herstellung der alternativen Kraftstoffe und für die Anwendung Diesel-Hybrid, Brennstoffzellen-Hybrid und eines modernen Dieselfahrzeugs mit direkt einspritzendem Diesel-Verbrennungsmotor dargestellt. **Abbildung 2-1** zeigt die in dieser Studie betrachteten Nutzungspfade.

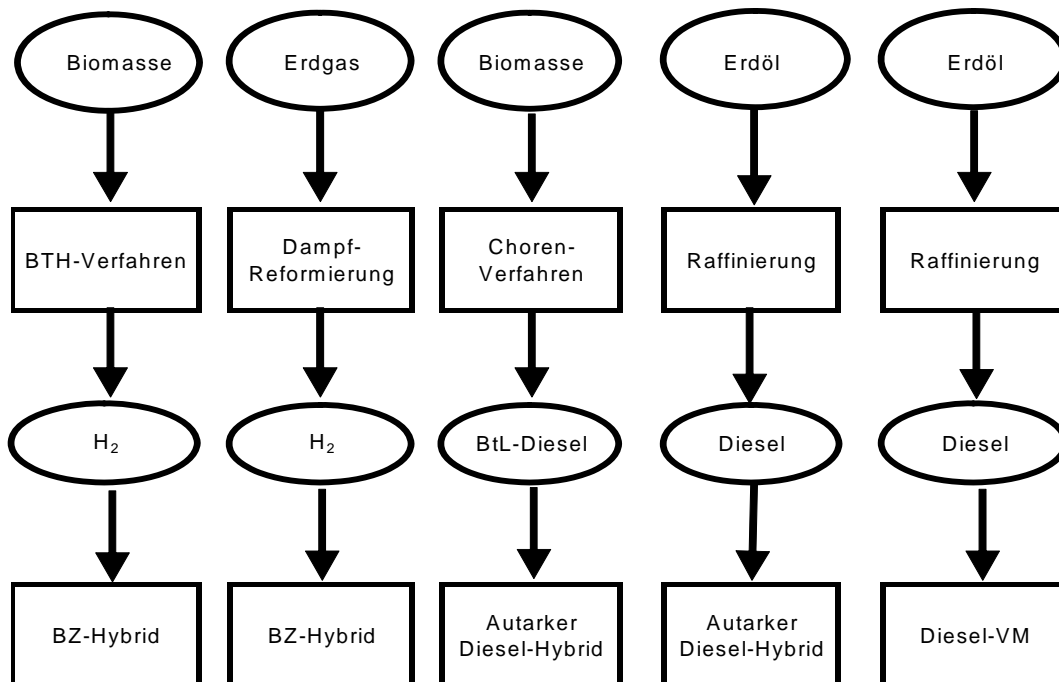


Abbildung 2-1: Nutzungspfade alternativer Kraftstoffe in Kfz

Die Herstellung von Dieseldieselkraftstoff aus Mineralöl und dessen Verwendung in Verbrennungsmotoren repräsentiert die aktuell kosteneffizienteste Art der Endenergiebereitstellung für Antriebe im Verkehr. Durch die Entwicklung sparsamer Antriebskonzepte wie z.B. eines elektrisch unterstützten Diesel-Hybridantriebs, wird weiteres Potential zur Senkung des Energiebedarfs, der Betriebskosten und der Schadstoffemissionen erschlossen.

Synthetisch hergestellter Diesel-Kraftstoff aus Biomasse (Biomass to Liquid – BtL) basiert auf der Umwandlung nachwachsender kohlenstoffhaltiger Energieträger und ist daher im Vergleich zu erdölbasierten Treibstoffen als weitestgehend kohlendioxidneutral anzusehen. Allerdings sind bei der Herstellung höhere Kosten und extensivere Energieaufwendungen aufgrund der umfangreicheren Aufbereitung und Verarbeitung der Biomasse zu erwarten.

Die Verwendung von Brennstoffzellenfahrzeugen setzt eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur voraus, wobei die großtechnische Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas eine mittelfristig vergleichsweise schnell umsetzbare Option darstellt. Dem potentiell geringen Energieverbrauch von Brennstoffzellenfahrzeugen steht ein verhältnismäßig hoher Energieaufwand zur Bereitstellung des Kraftstoffes gegenüber, der durch aufwändige Prozessschritte wie den Transport, die Herstellung oder die Verflüssigung hervorgerufen wird. Analog zur Substitution von Dieseldieselkraftstoffen besteht auch

beim Wasserstoff die Möglichkeit, endliche Ressourcen zu schonen und den Wasserstoff bspw. durch die Vergasung von Biomasse herzustellen.

2.1 Kraftstoffherstellung

Es werden die Herstellungswege von Kraftstoffen aus fossilen und regenerativen Primärenergieträgern, die in Kraftfahrzeugen Anwendung finden können, betrachtet. Auf fossilen Primärenergieträgern basierende Herstellungstechniken sind im großtechnischen Maßstab verfügbar und dementsprechend ökonomisch, bei neueren nachhaltigen Techniken besteht i.d.R. noch Entwicklungsbedarf, um vergleichbare Bereitstellungskosten zu erreichen.

2.1.1 Diesel aus Erdöl

Dieselmotorkraftstoff wird großtechnisch in Raffinerien aus Erdöl gewonnen. Da die Biokraftstoff-Richtlinie der EU aus dem Jahr 2003 bis 2005 /EU 03/ einen Biokraftstoffanteil von 2% (bezogen auf den Energiegehalt) vorgegeben hat, der bis 2010 auf 5,75 % erweitert werden soll, ist Dieselmotorkraftstoff zumindest teilweise als regenerativ anzusehen. Man unterscheidet im Wesentlichen zwischen reinen Kraftstoff- oder Brennstoff-Raffinerien, die Kraftstoffe für Kfz sowie leichtes und schweres Heizöl liefern und sog. Vollraffinerien, wie sie in **Abbildung 2-2** gezeigt wird. Diese können neben den oben genannten Produkten auch Flüssiggas, petrochemische Rohstoffe, Schmierstoffe und andere auf Mineralöl basierende Produkte fraktionieren.

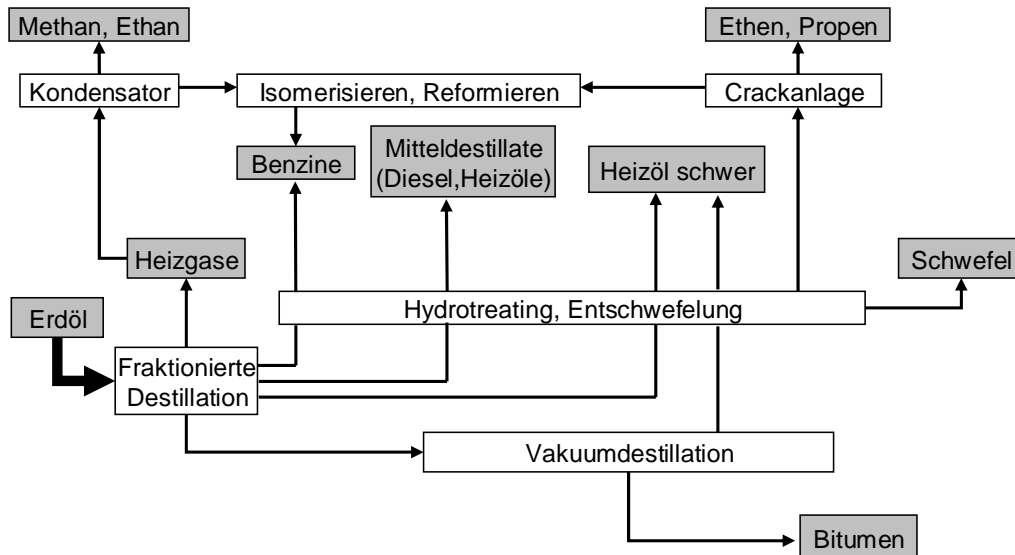


Abbildung 2-2: Prozessschema einer Erdölraffinerie

Durch die Destillation wird der Einsatzstoff Rohöl in Destillationstürmen durch die unterschiedlichen Siedebereiche der im Rohöl vorhandenen Komponente und somit nach Molekulargrößen in Gase (Methan, Ethan), Benzin und Mitteldestillate sowie schwere Rückstände aufgeteilt (vgl. Abbildung 2-2). Durch eine Vakuumdestillation werden aus

den schweren Rückständen Vakuum-Gasöle, die dem Mitteldestillat zugemischt werden können, Wachsdestillate oder Bitumenkomponenten gewonnen.

Im nachfolgenden Konversionsschritt wird durch das Aufbrechen langer Kohlenwasserstoffmoleküle durch gängige Crack-Verfahren die Umwandlungsrate in das Zielprodukts, meist leichte Ölprodukte wie Diesel- oder Benzinkraftstoffe, erhöht. Letzter Verfahrensschritt ist die Nachbehandlung (z.B. Entschwefelung von Dieselkraftstoffen), d.h. die Anpassung der gewonnen Produkte an den gewünschten Standard. Die Abgrenzung zwischen den einzelnen Raffinerieprozessen ist nicht starr, vielmehr führen einige Prozesse zu mehreren Produktergebnissen. Nach /Ara 06/ sind Wirkungsgrade von 90 % Stand der Technik. Nach eigenen Untersuchungen /FfE 07/ liegt der Wirkungsgrad einer Raffinerie bei 93 %.

2.1.2 Herstellung von BtL-Diesel aus Holz nach dem Carbo-V-Verfahren und Verflüssigung

Nach optimistischen Quellen wie /Den 06/ ist das technische Biomassepotential unter Vorbehalt von Nutzungskonkurrenzen mit Strom, Wärme und Chemie, in Deutschland ausreichend, um bis zu 20 % des heutigen Kraftstoffverbrauchs mit BtL abzudecken.

Durch die Kombination von Vergasungs- und Syntheseprozessen ist es möglich, kohlenstoffhaltige Substanzen zu flüssigen Energieträgern umzuwandeln. Eine geeignete Methode ist die Fischer-Tropsch-Synthese, welche 1925 entwickelt wurde. Ausgangsstoff war damals Steinkohle. Auch Biomasse eignet sich, nach entsprechender Vorbehandlung, zur Herstellung synthetischer flüssiger Kraftstoffe.

Die Firma Choren hat ein Flugstromvergasungsverfahren für den direkten Einsatz von Biomasse entwickelt. Auch hier wird wie bei anderen Vergasungsmethoden zunächst ein Gemisch aus Teer und Pyrolysegas sowie Koks erzeugt (vgl. Abbildung 2-3).

Durch die Oxidation erwärmt sich das Pyrolysegas auf Temperaturen zwischen 1.300 bis 1.500 °C. Damit wird der Ascheschmelzpunkt der verwendeten Brennstoffe überschritten. Im entstandenen Gas werden ungewollte Komponenten wie Teere und Methan umgewandelt, so dass ein Gasgemisch aus Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserstoff und Wasserdampf vorliegt. Der gebildete Koks wird ebenfalls im angeschlossenen Flugstromvergaser zugeführt, durch die Vergasung des Koks reduziert sich die Temperatur im Flugstromvergaser auf 800 – 900 °C /Rud 05/.

Es existieren darüber hinaus noch weitere Vergasungsverfahren von Biomasse im Entwicklungsstadium. Das hier ausgewählte Verfahren besitzt jedoch nach bisherigem wissenschaftlichen Stand die höchsten Umwandlungswirkungsgrade und dient daher als Grundlage zum Vergleich mit anderen Kraftstoffherstellungsverfahren. Im Gegensatz zu allen anderen Herstellungsverfahren ohne Flugstromvergasung sind für das Vergasungsverfahren von Choren (Carbo-V-Verfahren) keine aufwendigen Prozessschritte notwendig, die das erzeugte Gas von Teerkondensaten reinigen. Damit entfällt auch eine aufwändige Wasseraufbereitung.

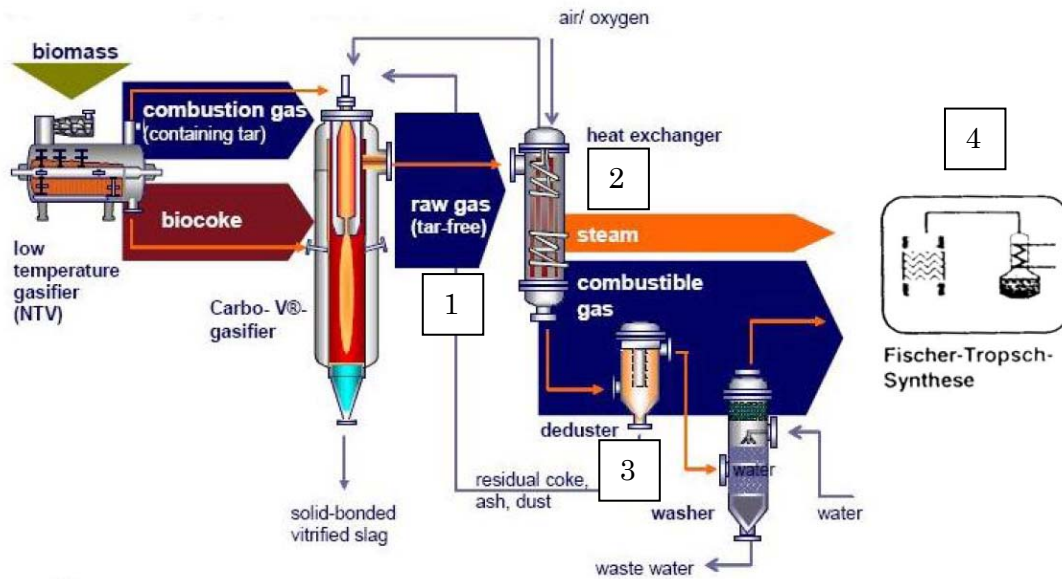


Abbildung 2-3: Prozessschema des Choren-Verfahrens mit anschließender Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe /Heb 06/

Das teerfreie Gas (1) reagiert im angeschlossenen Reformer (2) mit einem Vergasungsmittel (Luft oder reinem Sauerstoff) und wird anschließend gereinigt (3). Das so genannte Carbo-V-Verfahren kann mit einer Fischer-Tropsch-Synthese (4) kombiniert werden, um synthetischen Dieselkraftstoff zu erzeugen /Ber 03/.

Die erste kommerzielle Anlage mit einer thermischen Leistung von 50 MW und einer Tagesproduktion von rd. 48 m³ synthetischem Dieselkraftstoff aus Biomasse wird in Freiberg errichtet /Heb 06/. Solche BtL-Verfahren können nur im großen Leistungsbereich wirtschaftlich betrieben werden, da für kleinere Anlagen von höheren leistungsbezogenen Investitionen ausgegangen werden muss. Für die ganzheitliche Bilanzierung im Rahmen dieser Studie wird daher von einer Anlagengröße von 500 MW und einer direkten Versorgung mit dem bisher eingesetzten Rohstoff Holz ausgegangen. Eine andere Möglichkeit der Brennstoffversorgung wäre die lokale Erzeugung eines Öl-Koks-Gemischs, das sich durch einen höheren massenspezifischen Energiegehalt auszeichnet und zu einem zentralen Reformer transportiert wird.

Nach /Den 06/ sind dezentrale Konzepte zur Brennstoffversorgung aufgrund ihres höheren logistischen Aufwandes ökonomisch schlechter. Dem hohen Brennstoffbedarf einer großtechnischen Anlage bei direkter Versorgung durch Biomasse und dem damit einhergehenden notwendigen größeren Einzugsgebiet des Rohstoffs wird durch eine Verlängerung der Transportwege Rechnung getragen /Ram 06/.

2.1.3 Wasserstoff aus Erdgas durch Dampfreformierung

Durch die endotherme Reaktion von Erdgas mit Wasserdampf bei über 800 °C im Dampfreformer entsteht eine Mischung aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid, und Kohlendioxid. Sie läuft in der Regel unter Wärmezufuhr an Nickelkatalysatoren ab. **Abbildung 2-4** zeigt schematisch den Ablauf der Dampfreformierung.

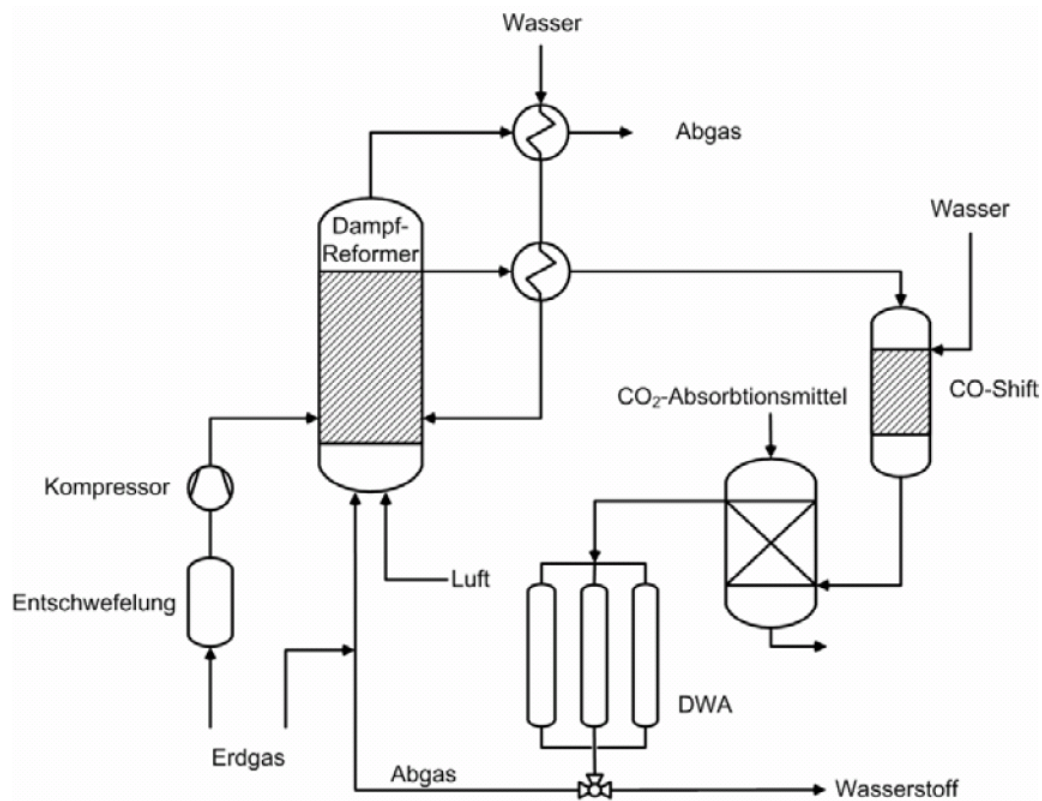


Abbildung 2-4: Prozessbild der Wasserstoffherstellung aus Erdgas /Ric 06/

Mit der so genannten homogenen Wasserreaktion (CO-Shift) erfolgt anschließend die exotherme katalytische Umsetzung des gebildeten Kohlenmonoxids bei Zufuhr von Wasserdampf zu Wasserstoff und Kohlendioxid.

Große Erdgasreformer im Bereich von mehreren 100 MW besitzen Umwandlungswirkungsgrade von über 72 %. Dieser Wert liegt wesentlich über dem dezentraler Anlagen. Die Brennstoffversorgung eines Dampfreformers wird durch das bereits bestehende Erdgasnetz gewährleistet.

Die Dampfreformierung leichter Kohlenwasserstoffe wie z. B. Erdgas ist das heute weltweit am meisten verbreitete Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff. Deshalb und aufgrund der hohen Effizienz wird es auch zu Beginn der Einführung einer Wasserstoff-Energiewirtschaft eine entscheidende Rolle spielen. Die Entwicklung der Dampfreformierung ist hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Optimierung relativ weit fortgeschritten. Weitere ökonomische und technische Verbesserungen bei zukünftigen Anlagen sind vor allem durch die gekoppelte Erzeugung von Wasserstoff, Strom und Wärme zu erwarten /Ang 00/.

2.1.4 Wasserstoff aus Biomasse

Wasserstoff kann durch Pyrolyse und anschließende Vergasung kohlenstoffhaltigen Energieträgern hergestellt werden. Die thermochemische Umsetzung von festen Brennstoffen unter Sauerstoffmangel wird als Pyrolyse bezeichnet. Produkte dieses Umwandlungsprozesses sind organische Moleküle mit geringerer Molekularmasse.

Durch die Pyrolyse wird der Festbrennstoff, der aus großen, vernetzten Molekülen besteht, unter Abwesenheit von Sauerstoff in kleinere Moleküle zerlegt.

Im anschließenden Prozess der Vergasung erfolgt eine thermochemische Zersetzung des Brennstoffes in Synthesegas, wobei als Vergasungsmittel sauerstoffhaltige Gase in unterstöchiometrischer Dosierung verwendet werden. Dieses wird, je nach Vergasungsmittel, durch die partielle Oxidation und anschließende homogene Shift-Reaktion oder die heterogene Wassergasreaktion und anschließende homogene Shift-Reaktion in Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Der Reinigung des Wasserstoffs von Staub, sauren Schadstoffkomponenten und der Kondensation des im Produktgas vorhandenen Wasserdampfs ist die Feinreinigung angeschlossen, in welcher Wasserstoffsulfid abgeschieden wird. Letzter Prozessschritt ist eine Druckwechseladsorptionsanlage, die Wasserstoff mit einer Reinheit von über 98,5 % erzeugt /Ang 00/.

Da die thermische Konversion nur bei hohen Temperaturen stattfindet, muss die erforderliche Wärme von außen (allotherm) oder durch teilweise Verbrennung des Rohstoffes selbst (autotherm) bereitgestellt werden.

Die Vergasung von festen Brennstoffen in Festbettvergasern ist aufgrund der geringeren erreichbaren Temperaturen nicht möglich. Für die Hochtemperaturvergasung kommen nur Wirbelschicht- oder Flugstromvergasen in Betracht.

Diese Technik ist als regenerativ anzusehen, wenn als Eingangsgröße Biomasse verwendet wird. Bei großtechnischen zentralen Anlagen ist aufgrund der niedrigen Energiedichte des festen Brennstoffes mit einem höheren logistischen Aufwand zu rechnen.

2.2 Antriebskonzepte

Für die Ermittlung des Endenergieverbrauchs werden, soweit detaillierte Daten zur Verfügung stehen, Serien- und seriennahe Fahrzeuge verwendet. Neben dem konventionellen Referenzsystem, einem direkt einspritzenden Selbstzündermotor betrieben mit Mineralöldiesel, werden zwei weitere Antriebskonzepte untersucht: Ein seriennahes Brennstoffzellenfahrzeug sowie ein aus Diesel- und Elektromotor bestehendes Hybridkonzept. Das Hybridkonzept stellt eine effiziente Methode zum Einsatz von mineralöl- oder biomassebasiertem Dieselkraftstoff dar, daher wird es aus Gründen der Vergleichbarkeit in beiden Nutzungspfaden der Studie betrachtet.

2.2.1 Moderner PKW-Dieselmotor

Durch den Einsatz von Abgasturboladern und der Direkteinspritzung des Kraftstoffs in den Verbrennungsraum konnte das Leistungsgewicht von Dieselmotoren in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert werden. Gleichzeitig ermöglichten bessere Werkstoffe und verbesserte Regelungen der Einspritzabläufe Wirkungsgraderhöhungen, die den Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen weiter senkten. Als Konsequenz hiervon stiegen durch höhere Zulassungszahlen die geleisteten Fahrzeugkilometer von Dieselfahrzeugen von 99.708 Mio fkm im Jahr 1995 auf 186.721 Mio fkm 2005 an /DIW 06/. Nachteile bestehen in der verglichen zu Ottomotoren hohen Partikel- und Stickoxidemission. Durch die Anwendung von Feinstaubfiltern können Rußpartikelemissionen weitgehend reduziert werden. Die Minderung der Stickoxidemissionen kann durch die Senkung der Verbrennungstemperaturen, z.B. durch Abgasrückführung und Schichtladung oder durch den Zusatz von ADBLUE, einer harnstoffhaltigen Lösung, realisiert werden.

Um ein zündfähiges Kraftstoffgemisch im Verbrennungsraum eines Dieselmotors zu erhalten, muss der eingespritzte Kraftstoff möglichst fein zerstäubt werden. Hierfür wird der Kraftstoff durch eine Hochdruckpumpe auf das entsprechende Druckniveau komprimiert und über elektronisch gesteuerte Einspritzventile den Zylindern zugeführt. Dadurch sind mehrere Einspritzungen pro Arbeitstakt möglich, was zu einer verringerten Schadstoff- und Partikelemissionen, weniger Verbrauch und einer homogeneren Leistungskurve führt.

Zwischenzeitlich haben sich zwei Einspritzsysteme durchgesetzt: Einspritzsysteme mit Hochdruckpumpen und Düseneinheiten für jeden Zylinder (Pumpe-Düse-Einspritzungen) oder Einspritzsysteme, die über eine zentrale Versorgungsleitung verfügen (Common-Rail).

Bei Pumpe-Düse-Einspritzungen wird der Einspritzdruck direkt in der Einspritzeinheit erzeugt und liegt aktuell bei 2.200 bar, eine Drucksteigerung auf 2.500 bar ist jedoch möglich /Sie 06/. Common-Rail- Einspritzsysteme besitzen eine gemeinsame Versorgungsleitung. Der Kraftstoff wird mit einem Einspritzdruck von über 1.600 bar in die Brennräume injiziert. Nach /Bos 07/ sind Systeme mit Einspritzdrücken von über 2.000 bar in Entwicklung.

Ein Mercedes Benz 180 CDI der A-Klasse wurde als Referenzmodell gewählt. Wie der Peugeot 307 repräsentiert er klassifiziert nach /KBA 06/ ein weit verbreitetes Modell der Kompaktklasse.

2.2.2 Diesel-Hybrid

Hybridantriebe werden im Allgemeinen als Fahrzeugantriebe mit mehr als einer Antriebsquelle definiert. Sie verfügen über mindestens zwei verschiedenartige Energiespeicher- und Energiewandlersysteme. Am bedeutendsten ist die Ausführung als Elektro-Hybrid (HEV: Hybrid Electric Vehicle), einer Kombination aus Verbrennungsmotor mit Kraftstofftank und Elektroantriebsmotor mit elektrischem Energiespeicher. Prinzipiell zeichnen sich Hybridfahrzeuge durch gute Fahrleistungen bei niedrigem Verbrauch aus, da der elektrische Antrieb durch hohes Drehmoment und guten Wirkungsgrad den Verbrennungsmotor effektiv unterstützt. Neben einem lokal emissionsfreien und geräuscharmen Betrieb ist es zudem möglich, Bremsenergie zurück zu gewinnen. Durch die unterstützende Funktion des elektrischen Antriebs ist es darüber hinaus möglich, den Verbrennungsmotor zu verkleinern („Down-sizing“) und so höhere Nutzungsgrade durch einen höheren Volllastanteil im Betrieb zu erzielen.

Es wird im wesentlichen zwischen zwei Antriebsarten unterschieden: Bei parallelen Hybridantrieben können elektrischer und verbrennungsmotorischer Antrieb gleichzeitig mechanische Energie zur Fortbewegung bereitstellen. Der elektrische Antrieb unterstützt somit den Verbrennungsmotor.

Im Falle eines seriellen Hybridantriebs treibt ein Verbrennungsmotor einen Generator an. Die produzierte elektrische Energie wird nur durch einen dementsprechend dimensionierten elektrischen Antrieb in mechanische Energie umgesetzt.

In Abhängigkeit der mechanischen Leistung des elektrischen Antriebs können HEV in Micro-, Mild-, Voll- oder Power-Hybrid-Fahrzeuge eingeteilt werden, siehe **Tabelle 2-1**. Mit einer elektrischen Dauerleistung von 16 kW handelt es sich bei dem hier zugrunde gelegten Fahrzeug um ein Voll-Hybrid.

Tabelle 2-1: Einteilung von Hybrid-Fahrzeugen, eigene Darstellung

	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Voll-Hybrid	Power-Hybrid
Start-Stop-Funktion	✓	✓	✓	✓
Generator-Betrieb	✓	✓	✓	✓
Boosten	✗	✓	✓	✓
Rekuperieren	✗	✓	✓	✓
Elektrisch Fahren	✗	✗	✓	✓
Leistung	2-3 kW	10-15 kW	> 15 kW	> 50 kW
Mögliche Verbrauchseinsparung	5-10 %	15-20 %	> 20 %	> 20 %

Peugeot hat als erster europäischer Automobilhersteller auf dem Genfer Automobilsalon im Frühjahr 2006 ein Diesel-Hybridfahrzeug, das Modell 307 Hybrid HDI, als Studie

vorgestellt. Das Antriebskonzept besteht aus einem direkteinspritzenden Dieselmotor, der beim Beschleunigen von einem Elektromotor unterstützt wird und begrenzt auch rein elektrisch betrieben werden kann. Der Elektromotor ist zwischen Verbrennungsmotor und dem Schaltgetriebe angeordnet. Ein kleinerer Elektromotor mit rd. 1,7 kW Leistung ermöglicht einen verschleißfreien, geräuschlosen und schnellen Startvorgang nach verkehrsbedingten Stillständen (Start-Stop-Funktion). Der Elektromotor mit einer Spitzenleistung von 23 kW kann als Generator fungieren und so Bremsenergie zurückgewinnen, siehe **Abbildung 2-5**. Als Energiespeicher dient eine Nickelmetallhydridbatterie mit einer Kapazität von 6,5 Ah bei einer Spannung von 288 Volt /Peu 06b/. Im reinen Elektrobetrieb sind somit Geschwindigkeiten bis zu 50 km/h möglich, die Reichweite liegt dann bei 6 km. Der rein elektrische Antriebsmodus eignet sich somit nur für kurze Strecken innerorts.

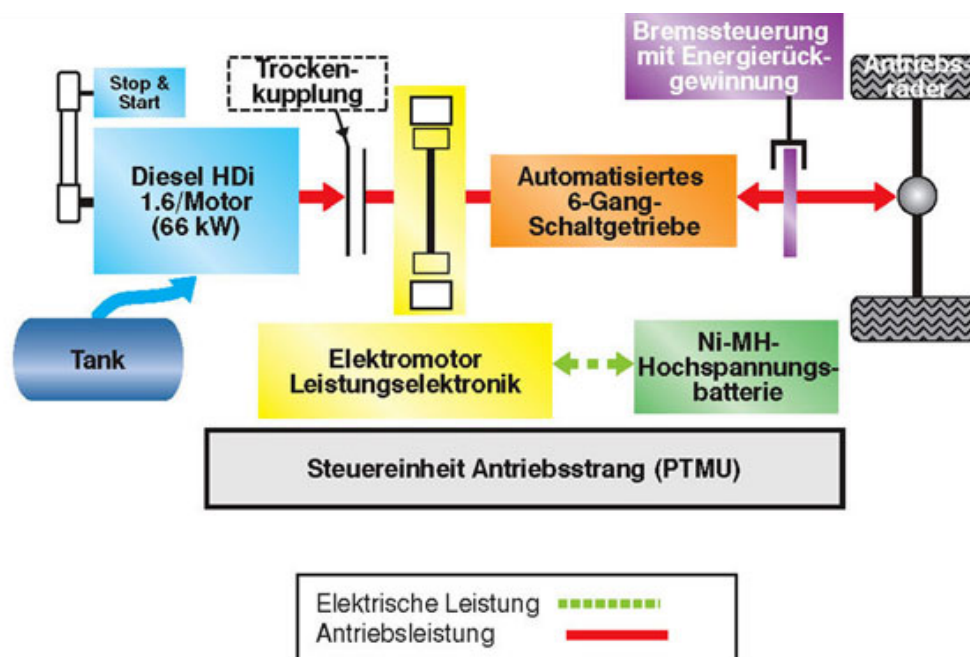


Abbildung 2-5: Antriebseinheit Peugeot 307 HDI Hybrid /Peu 06a/

Im Vergleich zu einem baugleichen Dieselfahrzeug wird der Kraftstoffverbrauch um 1,6 l / 100 km (32 %) im sog. „Drittel-Mix“ verringert. Da sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor ihre Leistung in das automatisierte Schaltgetriebe einspeisen, wird das Antriebskonzept als Parallelhybrid bezeichnet. Mehrgewicht und Mehrpreis werden vom Hersteller mit 110 kg bzw. 2.000 € angegeben, die Markteinführung soll 2010 erfolgen /Peu 06b/.

2.2.3 Brennstoffzellenantrieb

Brennstoffzellenfahrzeuge sind rein elektrische Fahrzeuge, die ihre Energie aus der katalytischen Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff in der Brennstoffzelle beziehen. Der dabei entstehende Strom wird durch Elektromotoren in mechanische Bewegung umgesetzt. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren besteht in der Regel keine Notwendigkeit in der Verwendung eines variablen Übersetzungsgetriebes, da die Drehzahlregelung durch Frequenzrichter realisiert wird und das Drehmoment eines Elektromotors für adäquate Fahrleistungen ausreicht. Um Spitzenlasten im Fahrbetrieb ausgleichen

zu können, werden elektrische Pufferspeicher verwendet, die kurzzeitig große elektrische Leistungen abgeben können. Dadurch ist auch eine Rekuperation der Bremsenergie möglich.

Prinzipbedingt besitzen Brennstoffzellenantriebe einen sehr guten Teillast- und Volllastwirkungsgrad, womit ein im NEFZ günstiger Energieverbrauch realisierbar ist. Durch den elektrischen Antrieb ergeben sich lokal keine Schadstoff- oder Lärmemissionen.

Probleme bereitet bisher die Erzeugung und Speicherung des Energieträgers Wasserstoff. Dieser liegt in der Natur nicht in reiner, sondern stets in gebundener Form vor und muss erst aus Primärenergieträgern erzeugt werden. Dieser Erzeugungsprozess ist mit Umwandlungsverlusten behaftet. Die Speicherung des im Normzustand gasförmig vorliegenden und sehr flüchtigen Wasserstoffs kann in flüssiger oder komprimierter Form oder durch die Absorption an Metallstrukturen erfolgen. Letztere fand aufgrund ihrer geringen massenspezifischen Energiedichte in automobilen Anwendungen bisher keinen Einzug. Da die Energiedichte des gasförmigen Wasserstoffs sehr gering ist und die Antriebstechnik mit der konventioneller Fahrzeuge, die eine Reichweite pro Tankfüllung von mehr als 500 km aufweisen, konkurriert, ist eine Erhöhung des volumetrischen Energiedichte durch Komprimierung des Wasserstoffs auf 350 bzw. 700 bar oder Verflüssigung auf - 253 °C notwendig.

Das in dieser Studie untersuchte Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb basiert auf dem Modell „F-cell“ der A-Klasse von Daimler Chrysler. Es handelt sich hierbei um eine Kleinserie, insgesamt wurden 60 Fahrzeuge produziert.

Der 65 kW leistende Elektromotor wirkt über ein fest übersetztes Getriebe auf die Vorderräder. Der elektrische Antrieb bezieht seine Energie hauptsächlich aus einer Brennstoffzelle der Firma Ballard. Der Antrieb erzeugt bis zu 68 kW aus dem in Wasserstoffdrucktanks mitgeführten Brennstoff. Der erzeugte Gleichstrom wird in Drehstrom umgewandelt und dem Elektromotor zugeführt. Im Teillastbereich und zur Bremsenergie-rückgewinnung wird ein Pufferspeicher beladen, der bei erhöhtem Leistungsbedarf elektrischen Strom bereitstellen kann. Hierfür dient eine Nickel-Metallhydrid-Hochleistungsbatterie von Sanyo mit einer Kapazität von 1,14 kWh. Als Wasserstoffspeicher dienen zwei 350 bar-Tanks im Sandwichboden des Fahrzeugs /Wei 02/. Damit wird eine Reichweite von 150 km ermöglicht.

Der Brennstoffzellenantrieb befindet sich bei allen Automobilherstellern noch in der Erprobungsphase. Mit einer ökonomischen Konkurrenzfähigkeit dieses Antriebskonzepts mit konventionellen Verbrennungsmotoren ist kurzfristig nicht zu rechnen. Für den Kostenvergleich wird ein Mehrpreis eines Brennstoffzellenfahrzeugs bezogen auf ein Dieselhybridfahrzeug von 2.000 € angenommen. Um die Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, wird dem Listenpreis des Referenzfahrzeugs der Mehrpreis eines Hybridantriebs nach /Peu 06b/, dem Brennstoffzellenfahrzeug nach /Fis 05/ auferlegt.

Eine Zusammenfassung der technischen Daten der in dieser Studie verwendeten Fahrzeuge kann **Tabelle 2-2** entnommen werden.

Tabelle 2-2: Technische Daten verwendeter Fahrzeugmodelle nach Herstellerangaben
Daimler Chrysler, /Peu 06b/, /Win 06/

	MB 180 CDI	Peugeot 307 Hybrid HDI	MB F-cell (A-Klasse)
Antriebsart	Diesel	Diesel-Hybrid	BZ
Preis in €	22.000 €	24.000 €	26.000 €
Fahrzeugmasse in kg	1345	1600	1650
Fahrleistungen			
Höchstgeschwindigkeit in km/h	186	180	140
Beschleunigung (0 - 100 km/h)	10,8	12,4	16
Reichweite in km ¹	1000	1765	150
Verbrauch (NEFZ) in l/100km	5,2	3,4	3,6
Nennleistung in kW	80	66/16 ² (23) ³	65
Drehmoment in Nm	250	215/(80/130 ⁴)	210

1: Rechenwert, NEFZ-Verbrauchswerte vorausgesetzt

2: Dauerleistung des el. Antriebs

3: kurzzeitige Spitzenleistung

4: dauerhaftes/kurzzeitiges Drehmoment des el. Antriebs

Bei den hier angesetzten Kosten für das Brennstoffzellenfahrzeug handelt es sich um Zielkosten. Hierbei werden vorteilhafte Preisentwicklungen bezüglich der Brennstoffzellenstapel, der notwendigen Peripherie und der Speichertechnik vorausgesetzt. Derzeitig existierende Brennstoffzellenfahrzeuge sind aufgrund ihres Studiencharakters noch wesentlich teurer. Eine breite Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird voraussichtlich erst in den kommenden Jahrzehnten möglich sein.

Die große Reichweite des Diesel-Hybrid-Fahrzeugs resultiert aus der Annahme, dass das Tankvolumen im Vergleich zum Serienfahrzeug nicht verkleinert wurde.

3 Energieeffizienz alternativer Antriebskonzepte

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) ist insbesondere für Energiesysteme, bei denen die energetischen und stofflichen Aufwendungen während der Nutzungsphase überwiegen, ein geeignetes Kriterium zur Beurteilung der Energieeffizienz. Daneben ist der kumulierte nichtregenerative Energieaufwand (KNRA) geeignet, den im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Gutes entstehenden bzw. diesem ursächlich zuzuweisenden Verbrauch konventioneller Primärenergieträger zu bilanzieren. Die ganzheitliche Bilanzierung im Rahmen dieser Studie erfolgt mit dem Softwaretool GEMIS 4.3.

3.1 Definitionen

Wesentliche Merkmale für den Vergleich verschiedener Antriebs- bzw. Kraftstoffbereitstellungskonzepte sind der fahrstreckenspezifische kumulierte Energieaufwand für jedes Antriebssystem sowie der kumulierte Nicht-Regenerative Energieaufwand (KNRA), der analog die für den Verbrauch nicht nachwachsender Rohstoffe relevante Größe darstellt.

Allgemein lässt sich der KEA als Summe des Energiebedarfs für Herstellung KEA_H , Nutzung KEA_N und Entsorgung, KEA_E , formulieren.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$$

Der KEA schließt somit die Herstellungsaufwendungen (KEA_H) für die verschiedenen Antriebssysteme und deren Aufbereitungstechnik mit ein. Diese sollen hier durch Implementierung der unterschiedlichen Antriebssysteme inklusive Kraftstoffspeicher in das Basisfahrzeug abgeschätzt werden. Durch Batteriepufferspeicher, zusätzliche Antriebseinheiten oder eine Brennstoffzelle steigt das Fahrzeuggewicht und der Energiebedarf für die Herstellung und Nutzung weiter an. Zur Berechnung des KEA_H muss die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Fahrzeuge und der Kraftstoffherstellungstechnik bekannt sein. Im Falle des Brennstoffzellenfahrzeugs dient das Referenzfahrzeug als Basis. Zur Gewichtsbestimmung des Dieselhybridantriebs wurden auf die Herstellerangaben für das Modell Peugeot 307 zurückgegriffen. Die stofflichen Aufwendungen für die Anlagentechnik zur Bereitstellung von BtH und BtL wird mit denen konventioneller Anlagen zur Herstellung von Dieselkraftstoff gleichgesetzt.

Durch Kenntnis des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs der betrachteten Fahrzeuge und des Bereitstellungsnutzungsgrades des verwendeten Kraftstoffs ergibt sich der fahrstreckenspezifische Anteil des KEA_N . Wird der KEA auf einen Personenkilometer bezogen, lassen sich die verschiedenen Kraftstoffnutzungspfade untereinander vergleichen. Der energetische Aufwand für die Entsorgung der Fahrzeuge wird in dieser Studie nicht berücksichtigt, da sich in der Vergangenheit gezeigt hat, dass dessen Anteil am gesamten KEA sehr gering ist /Cor 03/.

Als Bezugszeitpunkt wurde das Jahr 2006 gewählt.

3.2 Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes

Unter der Bedingung der ganzheitlichen Betrachtung werden nun die fünf verschiedenen Nutzungspfade näher behandelt. Dabei wird der Energieverbrauch während der Lebensdauer sowie der streckenspezifische Energieverbrauch nach NEFZ, soweit dieser Wert vorhanden und belastbare Aussagen erlaubt, verwendet. Weitere Zuladungen wurden nicht berücksichtigt

Energetische Gutschriften, z.B. durch Nutzung von Nebenprodukten bei der Herstellung von BTL, oder zusätzlich Aufwendungen bei der Fahrzeugentsorgung werden mangels detaillierter Daten nicht berücksichtigt. Zusatzenergien wie Strom zur Verflüssigung des Wasserstoffs oder Transportenergie für die Beförderung der Brennstoffe werden berücksichtigt. Zur Bestimmung des KEA_H ist die Kenntnis der Zusammensetzung des jeweiligen Fahrzeugs notwendig. Die angenommenen Daten aller verwendeten Fahrzeuge können Tabelle 2-2 entnommen werden.

3.2.1 Dieselfahrzeug mit konventionellem Dieselkraftstoff

Der Kraftstoff für das Referenzfahrzeug wird im großtechnischen Maße hergestellt. Das Rohöl wird über Pipelines zur Raffinerie transportiert. Die thermische Leistung und der Nutzungsgrad der Raffinerie werden in dieser Studie zu 2.000 MW bzw. 93 % angesetzt /FFE 07/. Der Transport des Kraftstoffs von der Raffinerie zur Tankstelle erfolgt mit LKW über eine Entfernung von durchschnittlich 150 km. Der Kraftstoff wird unterirdisch in konventionellen Behältern gelagert und an einer Tankstelle mit einer Kapazität von 2.000 kg/d verkauft. Somit kann der Energiebedarf für rund 1.100 Fahrzeugen mit Durchschnittsverbrauch von 5,2 l/100 km Diesel, das entspricht dem Verbrauch des Referenzfahrzeugs, bereitgestellt werden.

3.2.2 Diesel-Hybrid mit konventionellem Dieselkraftstoff

Die Bereitstellung des Dieselkraftstoffs erfolgt analog zu 3.2.1.

Dem Diesel-Hybridfahrzeug liegen die technischen Daten der Testfahrzeuge des PSA-Konzerns zugrunde, welche im Januar 2006 präsentiert wurden. Um den annähernd gleichen Fahrzeugnutzen des Referenzfahrzeugs bezüglich des Raumangebots zu erhalten, wurden die technischen Herstellerdaten für den Peugeot 307 Limousine verwendet. Laut /FTD 06/ sind die Mehrkosten des Antriebs für verschiedene Modelle der gleichen Produktreihe gleich. Dem Basispreis und dem Basisgewicht des Kombis werden unter Annahme der Fahrleistungen der Prototypen die in /FTD 06/ und /Peu 06b/ aufgeführten Mehrkosten von 2.000 € addiert, das Fahrzeuggewicht beträgt 1.600 kg.

3.2.3 Diesel-Hybrid mit dieselähnlichem Kraftstoff aus Biomasse

Die Herstellung des BtL-Treibstoffes erfolgt nach dem Carbo-V-Verfahren mit angeschlossener Verflüssigung des Treibstoffs. Es wird angenommen, dass der Rohstoff Holz geerntet, über eine Strecke von 50 km transportiert und mechanisch zerkleinert wird. Dem Prozess der Aufbereitung schließt sich ein Transportweg von 150 km an, bevor der Rohstoff nach dem Choren-Prinzip in einer großtechnischen Raffinerie von 500 MW_{th} vergast und verflüssigt wird. Der Wirkungsgrad wird nach /Ram 06/ zu 48 % angesetzt, die Auslastung beträgt 7.000 Stunden. Der Transport von der Raffinerie zur Tankstelle erfolgt ebenfalls per LKW bei einer durchschnittlichen Transportentfernung von 150 km. Der Kraftstoff wird wie handelsüblicher Dieselkraftstoff unterirdisch gelagert und bei Bedarf getankt /Ram 06/.

Der synthetisch hergestellte Dieselkraftstoff zeichnet sich durch eine höhere Cetanzahl und eine leicht verminderte massenspezifische Energiedichte aus, die in den Berechnungen berücksichtigt wird. Da über die Wirkungsgradsteigerung durch die besseren physikalischen Eigenschaften des synthetischen Kraftstoffs keine Angaben existieren, wurde eine Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungsmotors außer Acht gelassen /Rud 05/. Tatsächlich wäre dadurch eine weitere Senkung des Kraftstoffverbrauchs des Diesel-Hybridfahrzeugs möglich.

3.2.4 Brennstoffzellenfahrzeug mit Wasserstoff aus Erdgas

Der Ferntransport von gasförmigem Wasserstoff per Lkw ist für eine großtechnische Bereitstellung von Kraftstoff aufgrund der geringen Energiedichte ökonomisch nicht sinnvoll. Daher wird der Wasserstoff bei -253 °C verflüssigt, wodurch eine Energiedichte von 120 MJ/kg_{H₂} bei einer Dichte von 71 kg/m³ erreicht wird. In dieser Studie wird von einem durchschnittlichen Flüssigtransport über 150 km und einer lokalen Verdampfung des Wasserstoffs zur Betankung der Fahrzeuge ausgegangen /Ric 06/. Desweiteren wird angenommen, dass durch ein Konditioniersystem mit Verdampfung des Wasserstoffs in der Tankstelle keine zusätzliche Pumpenergie benötigt wird /Alt 03/.

Einem zentralen Reformer mit einer Leistung von 1.000 MW wird Erdgas über Pipelines zugeführt. Verluste durch Förderung und Transport werden berücksichtigt. Es wird ein Anlagenwirkungsgrad von 70 % angenommen. Der durch die Dampfreformierung erzeugte Wasserstoff wird abgetrennt, gereinigt und verflüssigt. Es wird ein Wirkungsgrad des Verflüssigers von 70 % angesetzt /Alt 03/. Der Transport des LH₂ von der Raffinerie zur Tankstelle erfolgt bei -253 °C in Tanklastzügen mit Vakuumisolierung. An der Tankstelle erfolgt die Lagerung des Treibstoffs ebenfalls in superisolierten Tanks. Zur Betankung der Fahrzeuge wird der Wasserstoff verdampft und durch Kompressoren auf das benötigte Druckniveau zur Betankung verdichtet. Für die Betankung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen existiert neben der Befüllung mit Flüssigwasserstoff oder der Druckbetankung bei 350 bar noch die Option einer Befüllung bei 700 bar. In dieser Studie wird von einem Speicherdruck von 350 bar ausgegangen.

Aufgrund des sehr niedrigen Temperaturniveaus des flüssigen Wasserstoffs, welches bei Speicherung und Transports eingehalten werden muss, besteht stets ein Wärmeeintrag aus der Umgebung. Dieser führt wiederum zu Abdampfverlusten, die, je nach Güte der Isolierung, zwischen 0,03 % bis 0,3 % pro Tag der vorhandenen Wasserstoffmenge betragen können /Ang 00/. Die Abdampfverluste können jedoch zur Betankung der Fahrzeuge verwendet werden.

Das F-cell-Fahrzeug unterscheidet sich vom Referenzfahrzeug maßgeblich durch den niedrigeren streckenspezifischen Energieverbrauch und durch eine erhöhte Fahrzeugmasse. Daher liegt dem hier verwendeten Brennstoffzellenfahrzeug die Fahrzeugmasse des Serienfahrzeugs zugrunde, welche durch Literaturwerte um den Mehranteil des Brennstoffzellenantriebs samt zugehörigen Systemkomponenten vergrößert wurde /Fis 05/.

3.2.5 Brennstoffzellenfahrzeug mit Wasserstoff aus Biomasse

Ernte, Transport und Aufbereitung der Biomasse erfolgt analog 3.2.3. Der anschließende Transport des Brennstoffs zum zentralen Reformier mit einer Leistung von $500 \text{ MW}_{\text{thermisch}}$ erfolgt per LKW. Der Anlagennutzungsgrad wird auf 65 % angesetzt /Alt 03/. Der entstandene Wasserstoff wird aus dem Produktgas abgetrennt und verflüssigt. Der Transport erfolgt analog zur großtechnischen Wasserstoffherstellung aus Erdgas mittels Lkw /Ang 00/.

3.3 Ergebnisse

Für eine ganzheitliche Betrachtung der untersuchten Nutzungspfade werden der energetische Aufwand für die Herstellung eines Fahrzeugs, dessen Kraftstoffverbrauch sowie alle Aufwendungen zur Bereitstellung der Kraftstoffe auf die Fahrtstrecke bezogen.

3.3.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Abbildung 3-1 zeigt die Bereitstellungsnutzungsgrade und den Primärenergieaufwand für die Kraftstoffbereitstellung der betrachteten Nutzungspfade. Bei der Berechnung des Primärenergieaufwands wurden alle energetischen Aufwendungen für die Herstellung der Infrastruktur sowie für den Transport berücksichtigt.

Der energetische Aufwand zur Herstellung von Biomassereformern zur großtechnischen Herstellung von BtL und BtH ist nicht bekannt. Dieser dürfte sich jedoch nur unwesentlich von dem konventioneller Raffinerieanlagen unterscheiden. Daher wurde bei lückenhafter Datenbasis auf diese Werte zurückgegriffen.

Abbildung 3-1 und Tabelle 3-1 zeigen die Bereitstellungsnutzungsgrade und KEA der Kraftstoffherstellung.

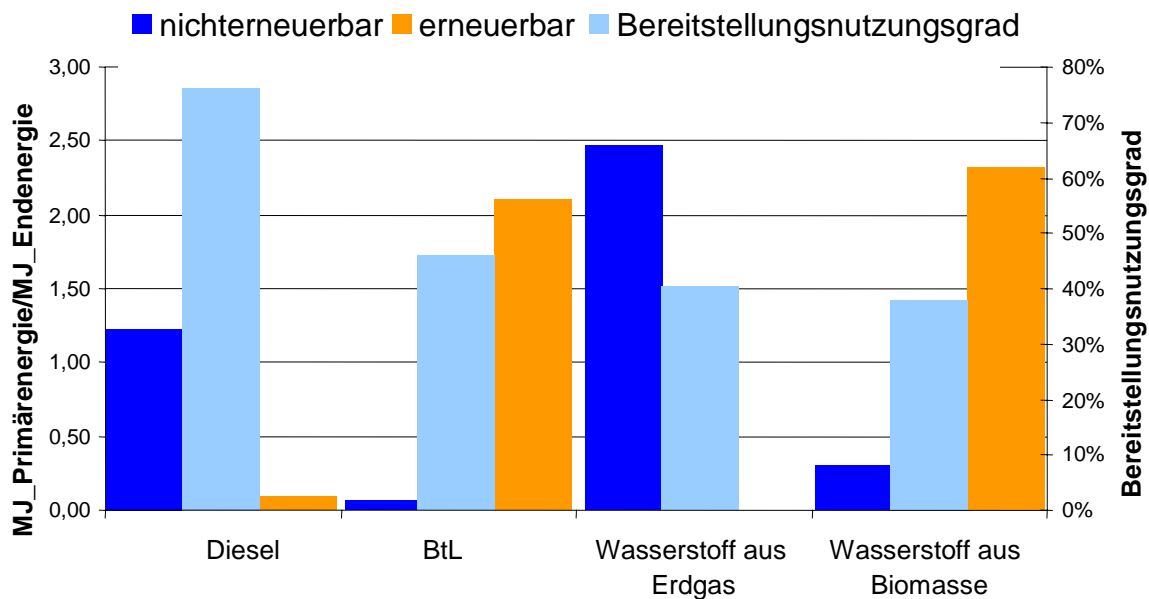


Abbildung 3-1: Bereitstellungsnutzungsgrade und Primärenergieaufwand der Kraftstoffbereitstellung

Tabelle 3-1: *Bereitstellungsnutzungsgrade und Primärenergieaufwand der Kraftstoffbereitstellung*

	Bereitstellungsnutzungsgrad in %	Primärenergieaufwand in MJ/MJ _{Endenergie}		
		nicht regenerativ	regenerativ	Summe
Diesel	76%	1,22	0,09	1,32
BtL	46%	0,07	2,10	2,17
Wasserstoff aus Erdgas	40%	2,47	0,00	2,47
Wasserstoff aus Biomasse	38%	0,30	2,32	2,62

Die Ergebnisse in Tabelle 3-1 verdeutlichen, dass eine Einsparung an fossilen Ressourcen durch den Energieträger Wasserstoff realisiert werden kann, wenn dieser aus Biomasse hergestellt wird.

Tabelle 3-2 zeigt die in dieser Studie angenommene Massenverteilung der Fahrzeuge. Für die Bereitstellung von Stahl und HDPE¹ werden nach /FfE 99/ 28,8 MJ/kg und 65,3 MJ/kg angesetzt.

Tabelle 3-2: *Primärenergieaufwand der betrachteten Fahrzeuge*

	Stahl in kg	HDPE in kg	Primärenergieaufwand zur Herstellung in MJ
Diesel Referenz	1.050	295	49.575
Diesel-Hybrid	1.350	250	55.303
BZ-Fahrzeug	1.300	350	60.384

Abbildung 3-2 und **Tabelle 3-3** zeigen den kumulierten Energieaufwand pro Personenkilometer der in dieser Studie betrachteten Nutzungspfade.

¹ HDPE: High Density Polyethylen, im Automobilbau häufig eingesetzter Kunststoff.

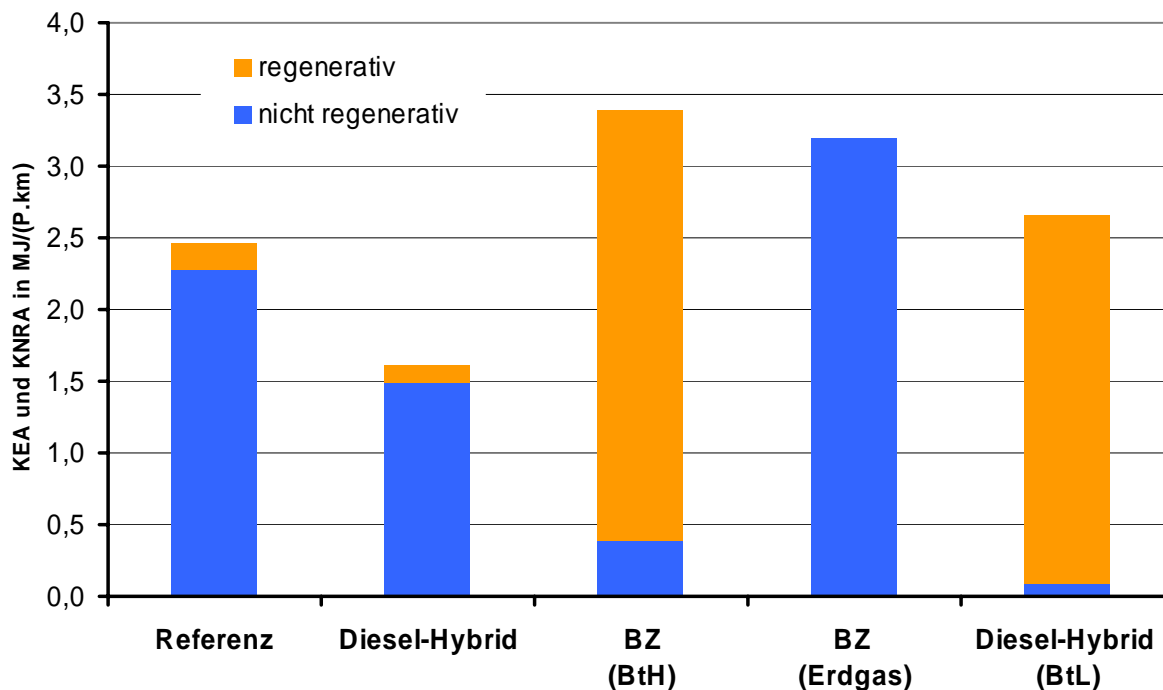


Abbildung 3-2: KEA der betrachteten Nutzungspfade

Tabelle 3-3: KEA und KNRA der betrachteten Nutzungspfade

	Nicht regenerativer Anteil (KNRA) in MJ/(P.km)	Regenerativer Anteil in MJ/(P.km)	Summe (KEA) in MJ/(P.km)
Referenz	2,3	0,2	2,5
Diesel-Hybrid	1,5	0,1	1,6
BZ (BtH)	0,4	3,0	3,4
BZ (Erdgas)	3,2	0,0	3,2
Diesel-Hybrid (BtL)	0,1	2,6	2,7

Bei herkömmlichen Antriebstechnologien mit Verbrennungsmotor, deren Kraftstoff sich hauptsächlich aus fossilen Primärenergiequellen zusammensetzt, besteht nur ein geringer regenerativer Energieanteil. Die elektrische Energie, die bei der Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas benötigt wird, wird nur zu einem kleinen Teil regenerativ generiert und ist daher in der gesamten Betrachtung von untergeordneter Rolle.

Der geringe energetische Aufwand des Referenz- und Hybridfahrzeugs resultiert aus dem heutigen hohen Entwicklungsstand der zugrunde liegenden Antriebstechniken und den hohen Kraftstoffbereitstellungsnutzungsgraden des konventionellen Dieselkraftstoffs.

Während der kumulierte Energieverbrauch für einen Personenkilometer des Referenzfahrzeug und des Diesel-Hybridantriebs bezogen auf den Kraftstoffverbrauch nur rd. 30 % über dem Kraftstoffverbrauch (1,87 bzw. 1,22 MJ/km) liegt und den geringen energetischen Verbrauch der Kraftstoffbereitstellung darstellt, wird der energetische Mehr-

verbrauch der übrigen Nutzungspfade hauptsächlich durch aufwändigere und längere Prozessketten zur Bereitstellung des Kraftstoffs hervorgerufen.

Der kumulierte Energieaufwand für einen Personenkilometer bei der Verwendung von synthetischem Dieselkraftstoff aus Biomasse im Diesel-Hybridfahrzeug ist, bezogen auf das Referenzfahrzeug MB 180 CDI, um 8 % höher. Im Vergleich zum Hybridfahrzeug mit Dieselkraftstoff: jedoch 68 %. Dies wird hauptsächlich durch den geringeren Umwandlungswirkungsgrad des BtL-Verfahrens, längere Transportwege und dem erhöhten logistischen Aufwand bewirkt.

Das mit BtH betriebene Brennstoffzellenfahrzeug kann trotz geringem Kraftstoffverbrauch den energetischen Mehraufwand, der durch die lange Prozesskette zur Bereitstellung von Flüssigwasserstoff und niedrigere Anlagenwirkungsgrade bei der Herstellung von gasförmigen Wasserstoff aus Biomasse hervorgerufen wird, nicht kompensieren. Dies führt zu streckenspezifischen Energieverbrauchswerten, die um rd. 36 % über denen des Referenzfahrzeugs liegen.

Werden die nichtregenerativen Anteile der energetischen Aufwendung betrachtet, so ergibt sich ein Vorteil von BtL-Kraftstoffen beim Einsatz in Fahrzeugen mit Hybridtechnik gegenüber allen anderen Nutzungspfaden. Der KNRA bei der Verwendung von BtH-Kraftstoffen in Brennstoffzellenfahrzeugen mit 0,4 MJ/km ist, verglichen zu BtL im Dieselhybridfahrzeugen, um den Faktor 4 höher.

3.3.2 Kosten

Ein nachhaltiges Wirtschaften berücksichtigt auch den effizienten Umgang mit begrenzten finanziellen Ressourcen. Aus diesem Grund schließt der hier vorgenommene Vergleich unterschiedlicher Kraftstoffe und Antriebsvarianten auch die Kosten mit ein. Da sich jedoch z. B. das Herstellungsverfahren für BtL-Diesel bzw. die Brennstoffzellenfahrzeuge noch in der Entwicklung befinden, ist hier nur eine überschlägige Abschätzung möglich. In Anbetracht des Umfangs dieser Studie werden die verfügbaren Literaturangaben kritisch geprüft und als Basis für den Vergleich der fünf Nutzungspfade herangezogen.

Tabelle 3-4 und **Tabelle 3-5** zeigen die den Berechnungen zugrunde liegenden angenommenen Kosten für die Anschaffung und Unterhalt der betrachteten Kraftfahrzeuge sowie die Investitionskosten für die Prozesstechnik.

Tabelle 3-4: *Kosten der betrachteten Kraftfahrzeuge*

	Peugeot 307 Hybrid		
	MB 180 CDI	HDI	MB F-cell
Antriebsart	Diesel	Diesel-Hybrid	BZ-Elektromotor
Preis in €	22.000	24.000	26.000
Jährliche Fahrleistung in km	15.000	15.000	15.000
Lebensdauer in Jahren	10	10	10
Abschreibungsdauer	10	10	10
Kapitalkosten in €/Jahr	3.132	3.417	3.702
Steuernkosten in €/Jahr	278	247	25
Wartungskosten in €/Jahr	500	500	500
Versicherungskosten in €/Jahr	1.206	996	1.206

Der Steuersatz zur Berechnung der jährlichen Steuerkosten beträgt 15,44 € pro angefangene 100 cm³ Hubraum (Schadstoffklasse EU 4). Somit ergeben sich für das Referenzfahrzeug und das Hybridfahrzeug (1,6 l Hubraum) Steuerkosten von 278 und 247 € pro Jahr.

Fahrzeuge mit ausschließlich elektrischem Antrieb, der ganz oder überwiegend aus mechanischen oder elektrochemischen Energiespeichern gespeist wird, werden nach /KRA 05/ mit einem Steuersatz von 5,63 €/200 kg belegt und sind zudem 5 Jahre von der Kfz-Steuer befreit. Die in Deutschland zugelassenen Brennstoffzellenfahrzeuge werden momentan als reine Elektrofahrzeuge eingestuft. Bei höheren Zulassungszahlen ist eine Änderung der Gesetzlage möglich /BdF 07/.

Da für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeug keine Angaben bezüglich der Wartungskosten vorliegen, wurden diese auf jeweils 500 €/Jahr festgelegt.

Den Fahrzeugen wurde eine Vollkaskoversicherung mit einer Selbstbeteiligung von 300 € zugrunde gelegt. Die Fahrzeugmodelle, die zur Berechnung der Versicherungskosten herangezogen wurden, bedingen eine Kostendifferenz in Höhe von 210 €

Tabelle 3-5: *Investitionskosten der betrachteten Nutzungspfade*

	Mineralöl Diesel	Wasserstoff aus Erdgas	Wasserstoff aus Biomasse	Synthetischer Diesel
Raffineriekosten in Tsd.€/MW	259	259	1.820	2.000
Verflüssiger in Tsd.€/MW		797	797	
Tankstellenkapazität in kg/d	2.000	500	500	2000
Tankstellenkosten in Tsd.€/MW	130	1.848	1.848	130
Versorgbare Fahrzeuge /a	1.100	970	970	1.100
Verwendung durch	Diesel-Referenzfahrzeug und Diesel-Hybrid-Fahrzeug	BZ-Fahrzeug	BZ-Fahrzeug	Diesel-Hybrid-Fahrzeug

Die in Tabelle 3-5 aufgeführten Kosten beziehen sich auf /Ang 00/, Alt 03/ und /Ram 06/. Durch die Wahl der Tankstellenkapazität des Referenznutzungspfades ist unter der Annahme der Verbrauchswerte nach Tabelle 2-2 eine annähernd gleiche Anzahl von Fahrzeugen zu versorgen. Die hohen Tankstellenkosten für die Brennstoffzellenfahrzeuge werden durch die aufwändige Speicher- und Anlagentechnik hervorgerufen. Die Investitionskosten werden für einen Abschreibzeitraum von 20 Jahren berechnet und auf den Energieoutput des Herstellungspfades bezogen.

Tabelle 3-6 zeigt die Kraftstoffherstellungskosten ohne Mineralölsteuer, die in die weitere Berechnung einfließen. Die Kosten für die eingesetzten Energieträger Holz, Erdgas und Rohöl betragen 5 €/GJ (75 €/t), 10,4 €/GJ und 10,5 €/GJ. Die Schwankungsbreite von Holz unterliegt starken Schwankungen und kann nach Literaturdaten zwischen 50 bis 160 €/t liegen.

Tabelle 3-6: *Kraftstoffherstellungskosten inkl. vorgelagerter Prozessketten*

	Kosten in €/l und €/kg (H ₂)
Diesel	0,52
BtL	0,68
BtH	4,50
H2 - Erdgas	3,25

Die um 2.000 € höheren Investitionskosten des Diesel-Hybridfahrzeugs werden bereits bei einer jährlichen Fahrleistung von 15.000 km aufgrund des um 34,6 % geringeren Kraftstoffverbrauchs kompensiert (vgl. **Abbildung 3-3**). Die allgemein niedrigen streckenspezifischen Kosten der Diesel-Fahrzeuge lassen sich auf das langjährig erprobte, großtechnische Herstellungsverfahren von Dieseltreibstoff aus Rohöl und dessen bereits vorhandene technische Infrastruktur zurückführen. So sind die streckenspezifischen Kraftstoffkosten bei der Verwendung von BtL-Kraftstoff im Dieselhybridfahrzeug um 43,8 % im Vergleich zum Dieseltreibstoff im Diesel-Hybridfahrzeug höher. Der Einsatz von Dieseltreibstoff in Diesel-Hybridfahrzeugen ist unter den gewählten Rahmenbedingungen der kostengünstigste.

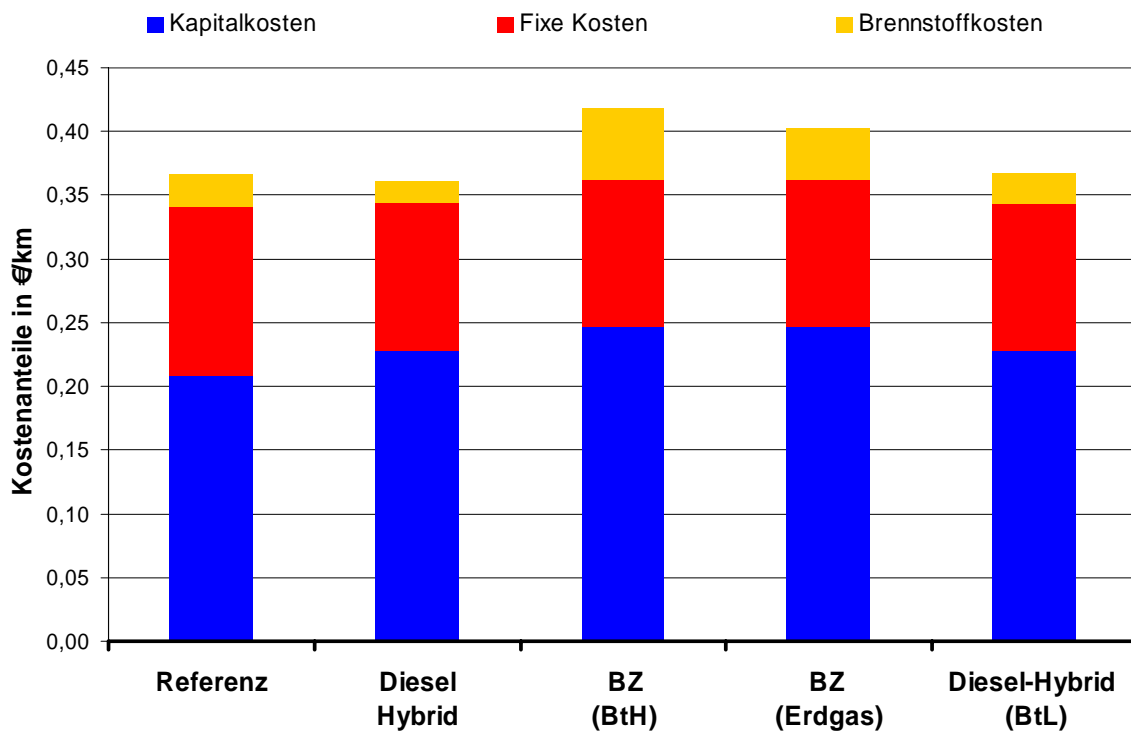


Abbildung 3-3: Kosten der betrachteten Nutzungspfade (ohne Mineralölsteuer, Fixkosten beinhalten Steuer-, Versicherungs- und Wartungskosten)

Die Kosten für den Nutzen von BtL, das nach dem Choren-Verfahren hergestellt wurde, im Diesel-Hybridfahrzeug liegen unter den hier getroffenen Annahmen mit 0,37 €/P.km unter denen des Brennstoffzellenfahrzeugs, das Wasserstoff aus Erdgas, dem unter den derzeitigen Rahmenbedingungen günstigsten Herstellungspfad für Wasserstoff, verwendet.

Tabelle 3-7: Kosten der betrachteten Nutzungspfade

	Referenz	Diesel Hybrid	BZ (BtH)	BZ (Erdgas)	Diesel-Hybrid (BtL)
Gesamtkosten in €/P.km	0,373	0,365	0,412	0,398	0,369
Kapitalkosten in €/P.km	0,209	0,228	0,247	0,247	0,228
Fixe Kosten in €/P.km	0,132	0,116	0,115	0,115	0,116
Kraftstoffkosten in €/P.km	0,025	0,017	0,056	0,040	0,024

Die Kraftstoffkosten von Wasserstoff aus Biomasse sind mit rd. 0,06 €/km bezogen auf die Dampfreformierung um rd. 40 % höher und liegen generell über denen konventioneller Kraftstoffe. Dies wird durch den höheren logistischen Aufwand zur Biomasseaufbereitung- und Verteilung hervorgerufen. Nutzungskonflikte bei der Biomasseverwendung können ebenso wie steigende Rohöl- und Erdgaspreise die Kraftstoffbereitstellungskosten erhöhen.

4 Zusammenfassung

Auf Basis der hier durchgeführten Untersuchung lassen sich die folgenden Ergebnisse sowie Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Nutzungspfade aufzeigen:

- Der Einsatz von konventionell hergestelltem Dieseldieselkraftstoff in Dieselhybridfahrzeugen stellt momentan die kostengünstigste Nutzungsvariante dar. Sowohl Diesel – als auch Diesel-Hybridfahrzeuge besitzen den geringsten KEA.
- Die Bereitstellungskosten für BtH- oder BtL-Kraftstoffe werden durch den vergrößerten logistischen Aufwand erhöht und liegen somit über denen konventioneller Nutzungspfade. Zukünftige Nutzungskonflikte bei der Verwendung von Biomasse können die Bereitstellungskosten der Kraftstoffe wesentlich beeinflussen.
- Eine Gewichtsreduzierung des Brennstoffzellenfahrzeugs unter das Niveau des Dieselhybridfahrzeugs, eine optimierte Nutzung von elektrischen Zwischenspeichern und Verbesserung des Brennstoffzellenwirkungsgrads kann den Verbrauch weiter senken und somit die streckenspezifischen Gesamtkosten weiter reduzieren. Dadurch wäre eine Kompensation der hohen Kraftstoffbereitstellungskosten für BtH gegenüber konventionellen Kraftstoffen möglich.
- Alternative Kraftstoffe wie z.B. H₂ führen dann zu Einsparungen fossiler Energieträger und CO₂-Einsparungen, wenn sie aus regenerativen Energiequellen erzeugt werden. Durch energieintensive Herstellungsschritte wie die Erzeugung, Verflüssigung und Komprimierung von Wasserstoff kann trotz hoher Wirkungsgrade der Brennstoffzellen dessen Nutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen bisher noch keine fossile Ressourceneinsparung bewirken, solange für die Gewinnung des Wasserstoffs fossile Primärenergieträger genutzt werden.

Zukünftig kann durch den steigenden Bedarf an Biomasse und den entstehenden Konflikten mit anderen Industriezweigen mit einem Anstieg des Rohstoffpreises gerechnet werden. Somit würden sich die Kraftstoffbereitstellungskosten für BtH und BtL-Kraftstoffe erhöhen. Die steigenden Kosten für Diesel und Erdgas führen auch bei Dieseldieselkraftstoffen und Wasserstoff, der aus Erdgas erzeugt wird, zu erhöhten Kraftstoffbereitstellungskosten.

Für den Endverbraucher ist nicht nur der Endenergieverbrauch ausschlaggebend, sondern auch Faktoren wie Anschaffungskosten, Komfort, Zuverlässigkeit und Alltagstauglichkeit spielen eine wichtige Rolle. Demzufolge besitzen Diesel-Hybridfahrzeuge, welche BtL-Kraftstoffe verwenden, aufgrund ihres geringen Verbrauchs, der erprobten Antriebstechnik, in Zukunft zu erwartender, relativ geringer Mehrkosten gegenüber reinen Dieselfahrzeugen und vergleichbaren Komfort und Fahrleistungen in Zukunft großes Marktpotential.

5 Literaturverzeichnis

- Alt 03 Altmann, M., Landinger, H., Weindorf, W., Wurster, R., Zerta, M.: *H2-Roadmap: AP1: Prinzipielle Anforderungen an die Infrastruktur*, Deutscher Wasserstoffverband e.V., Berlin, 2003
- Ang 00 Angloher, J., Dreier, Th.: *Techniken und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung, Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft (Teil1)*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2003
- Ara 06 <http://www.aral.de/aral/sectiongenericarticle.do?categoryId=4000008&contentId=56173>, Link vom 20.12.2006
- BdF 07 Telefonische Mitteilung Bundesministerium für Finanzen, Hr. Dittmar, 11.10.2007
- Bei 04 Beister, U. J.: *Aktuelle Entwicklungstendenzen hybrider Antriebskonzepte in den USA*. In: VDI-Berichte Nr. 1852, 2004. VDI Verlag. Düsseldorf 2004
- Ber 03 Berger, R. u.a.: *Verfahrensübersicht: Synthesegaserzeugung aus Biomasse*, FVS Fachtagung, Stuttgart, 2003
- Bos 07 <http://rb-k.bosch.de/de/einsatzgebiete/emissionen/dieselsysteme/einspritzmanagementpkw/crs.html>, Link vom 14.8.2007
- Cal 06 <http://www.calcars.org/calcars-news/300.html>, Link vom 20.12.2006
- Cor 03 Corradini, R., Krimmer, A.: *Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2003
- Den 06 Deutsche Energieagentur GmbH: *Biomass to liquid- Btl Realisierungsstudie*, Berlin, 2006
- DIW 06 Wochenbericht 32/2006: *Rückgang von Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch im Jahr 2005, anhaltender Trend zum Diesel-Pkw*; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, 2006
- EU 03 RICHTLINIE 2003/30/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor, 2003
- FfE 99 Corradini, R. et al., *Ganzheitliche Bilanzierung der Energiebereitstellung, Teil 3 + 4*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2003
- FfE 07 Beer, Michael et al., *Energie-Daten und Analyse R&D (EduaR&D): Teilprojekt: Ganzheitliche und dynamische Bewertung der KWK mit Brennstoffzellentechnologie*, gefördert durch das BMWA, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 2007
- Fis 05 Fishedick, M., Schmid, S., Ramesohl, S.: *Fahrzeugkonzepte der Zukunft auf dem Prüfstand*, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Wuppertal, 2005
- FTD 06 <http://www.ftd.de/auto/autoindustrie/116381.html>; Link vom 20.12.2006

- Heb 06 Hebecker, D. u.a.: *Konversions-, Speicher- und Versorgungstechnologien für die energetische Biomassenutzung*, Berlin- Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, 2006
- KBA 06 *Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2006 nach Segmenten und Modellreihen*, Informationen des Kraftfahrtbundesamtes, 2006
- KRA 05 Kraftfahrzeugeteuergesetz, Stand 2005,
- Peu 06a http://www.peugeot.de/newsletter/artikel/2006-03/artikel5_307cc.php, Herstellerangaben Peugeot, Link vom 20.12.2006:
- Peu 06b <http://www.peugeot.de>, Herstellerangaben Peugeot, Bereich „FAQ“, Link vom 11.10.2007
- Ram 06 Ramesohl, S., u.a.: *Strategische Bewertung der Perspektiven synthetischer Kraftstoffe auf der Basis fester Biomasse in NRW*, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Wuppertal, 2006
- Ric 06 Richter, S.: *Einbindung von Wasserstoff in Tankstellen*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2006
- Rud 05 Rudloff, M.: *Biomass-to-Liquid Fuels (Btl) - Made by CHOREN Process, environmental Impact and latest developments*, Choren Industries GmbH, Freiberg, 2005
- Sie 06 http://www.siemensvdo.de/press/releases/powertrain/2005/SV_200504_005_d.htm, Link vom 20.12.2006
- Wei 02 Weidenhammer, P. „Erste Probefahrt mit Brennstoffzellenautos“, VDI-Nachrichten, Ausgabe vom 18.10.2002
- Win 06 Wind, J.: *Well-to-Wheel Analysis Energy consumption and Green-House-Gas emissions of future sustainable mobility options*, StorHy 2006, Ingolstadt