

Perspektiven einer Wasserstoff- Energiewirtschaft Teil 4

Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien


**Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung
alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zu
konventionellen Systemen für den PKW-Bereich**

Gefördert durch: StMWVT

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

**Bearbeiter:
Dipl.-Phys. R. Corradini (Projektleitung)
Dipl.-Ing. A. Krimmer**

München, März 2003



**wiba – Koordinationsstelle
der Wasserstoff-Initiative Bayern**

**Perspektiven einer Wasserstoff-
Energiewirtschaft – Teil 4**

Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien

**Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung
alternativer Antriebstechnologien im Vergleich zu
konventionellen Systemen für den PKW-Bereich**

Gefördert durch das StMWVT

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

**Bearbeiter:
Dipl.-Phys. R. Corradini (Projektleitung)
Dipl.-Ing. A. Krimmer**

München, März 2003

Impressum:

Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft – Teil 4

Systemvergleich alternativer Antriebstechnologien

Primärenergetische Analyse der Herstellung und Nutzung alternativer
Antriebstechnologien im Vergleich zu konventionellen Systemen für
den PKW-Bereich

ISBN 3 – 933 283 – 31 – 0

2. Auflage 2003

Copyright:

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
Am Blütenanger 71
80995 München

Tel.: +49 (0)89 / 15 81 21 - 0

Fax: +49 (0)89 / 15 81 21 - 10

E-mail: info@ffe.de

Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Dr.-Ing. W. Mauch

Alle Rechte vorbehalten, auch die des auszugsweisen Vervielfältigens
gleich welcher Art, der Übersetzung sowie der Bearbeitung für Ton-
und Bildträger, für Film und Fernsehen, für den Gebrauch in
Lehrgeräten jeder Art.

München, März 2003

Vertrieb:

E&M Energie und Management Verlagsgesellschaft mbH, Herrsching

Inhalt

0 Zusammenfassung	1
1 Einführung	1
2 Zielsetzung	3
2.1 Untersuchungsumfang	3
2.2 Kriterien zur Auswahl der betrachteten Antriebsvarianten	3
3 Definition der Rahmenbedingungen	5
3.1 Referenzfahrzeuge	5
3.1.1 Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge	5
3.1.2 Elektrofahrzeug	5
3.1.3 Brennstoffzellenfahrzeug	5
3.1.4 Ermittlung der Kenngrößen	5
3.2 Methodik zur ganzheitlichen energetischen Bewertung	6
3.2.1 Zielproduktorientierte Methode	6
3.2.2 Gutschriftenmethode	7
3.2.3 Quantitative Methode	7
3.2.4 Angewandte Methodik	7
3.3 Bilanzraum	7
3.4 Referenz-Fahrzyklus	8
4 Kraftstoffe für die mobile Anwendung	10
4.1 Energieträger und Erzeugung	10
4.1.1 Ottokraftstoff (Euro-Super)	11
4.1.2 Erdgas (CNG)	12
4.1.3 Autogas (LPG)	12
4.1.4 Methanol (MeOH)	13
4.1.5 Diesekraftstoff	14
4.1.6 Biodiesel / Rapsmethylester (RME)	15
4.1.7 Elektrische Energie	15
4.1.8 Wasserstoff (H ₂)	16
4.2 Primärenergetischer Bereitstellungsaufwand der Kraftstoffe	18
5 Untersuchte Antriebssysteme	20
5.1 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	20
5.1.1 Referenzfahrzeug	21

5.1.2	Ottomotor mit Euro-Super-Benzin	21
5.1.3	Ottomotor mit Erdgas (CNG)	22
5.1.4	Ottomotor mit Autogas (LPG)	23
5.1.5	Ottomotor mit Methanol	25
5.1.6	Turbo-Dieselmotor mit konventionellem Dieselmotor	26
5.1.7	Turbo-Dieselmotor mit Biodiesel	26
5.2	Elektrofahrzeug	27
5.2.1	Referenzfahrzeug	27
5.2.2	Marktdurchdringung	28
5.2.3	Traktionsbatterie	29
5.2.4	Endenergieverbrauch	30
5.2.5	Emissionen	31
5.3	Brennstoffzellen-Fahrzeug	31
5.3.1	Referenzfahrzeug	31
5.3.2	On-Board-Speicherung von Wasserstoff	32
5.3.3	Weitere Aspekte	32
5.4	Rekuperation	33
5.5	Platzbedarf	34
6	Kumulierter Energieaufwand	35
6.1	Fahrzeugherstellung	35
6.1.1	Konventionelle Fahrzeuge	36
6.1.2	Elektrofahrzeug	36
6.1.3	Brennstoffzellen-Fahrzeug	37
6.1.4	Leichtbau	37
6.2	Nutzungsphase	38
6.2.1	Kraftstoffbereitstellung	38
6.2.2	Endenergieverbrauch der untersuchten Antriebsvarianten	38
6.2.3	Instandhaltung	40
6.2.4	Indirekte Energieaufwendungen	41
6.3	Fahrzeugentsorgung	41
6.4	Ergebnisse	41
6.4.1	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	41
6.4.2	Kumulierter Nicht-Regenerativer Aufwand (KNRA)	42
7	Fazit	45
8	Verzeichnisse	47
8.1	Literatur	47
8.2	Abkürzungsverzeichnis	50

0 Zusammenfassung

Weltweit hat der Verkehrssektor einen hohen Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch und den Schadstoff-Emissionen. Im Interesse einer nachhaltigen Schonung von Umwelt und Ressourcen sind der verkehrsbedingte Energieverbrauch und damit auch der Schadstoffausstoß so weit wie möglich zu reduzieren. Die wichtigsten technischen Maßnahmen sind die Verbesserung und Optimierung heutiger konventioneller Antriebstechniken, sowie die Entwicklung von innovativen Antriebssystemen.

In dieser Untersuchung soll in einem ersten Schritt der nutzungsspezifische Energieverbrauch ausgewählter Antriebsvarianten ermittelt, verglichen und bewertet werden. Dabei wird nach dem kumulierten Energieaufwand (KEA) inklusive erneuerbarer Energie und dem kumulierten nicht-regenerativen Energieaufwand (KNRA) unterschieden. Zudem sollen die Herstellungsaufwendungen und die nutzungsbedingten Energieaufwendungen getrennt betrachtet werden.

Untersuchte Varianten

Die hier untersuchten Fahrzeugvarianten mit Verbrennungsmotor basieren auf einem Volvo V40 Kombi als Referenzfahrzeug und beinhalten seitens der konventionellen Antriebstechniken einen dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden Benzin-Direkteinspritzer-Ottomotor sowie einen Turbo-Diesel-Direkteinspritzer-Motor mit Common-Rail-Technik. Hinzu kommen als bereits marktreife alternative Antriebsvarianten der bivalente Erdgas- und Autogas-Antrieb.

Als biogene Kraftstoffe werden Biodiesel (Rapsmethylester RME) und Methanol (MeOH aus Biomasse, hier: Waldrestholz) betrachtet, die in RME-tauglichen Dieselmotoren bzw. umgerüsteten Methanol-Ottomotoren eingesetzt werden. Diese alternativen Kraftstoffe konnten sich bisher nicht in größerem Umfang am Markt durchsetzen und es ist noch keine flächendeckende Treibstoffversorgung für diese Antriebsvarianten vorhanden. Deshalb sind diese Antriebssysteme in der Regel auf bivalenten Betrieb ausgelegt, d. h. wahlweise auch mit konventionellem Kraftstoff betreibbar. Weiterhin wird der Einsatz von Methanol, das aus Erdgas reformiert wurde, in einem Ottomotor betrachtet.

Diese bereits relativ ausgereiften Antriebssysteme werden nun mit innovativen Brennstoffzellenfahrzeugen mit PEM-Brennstoffzelle (PEM-BZ) und Flüssigwasserstoff (LH₂) als Kraftstoff verglichen; diese befinden sich noch in der Entwicklungs- und Testphase. Dabei werden die Verbrauchswerte eines Opel Zafira „HydroGen 3“ zum Vergleich herangezogen.

Ergänzend wird ein existierendes Elektrostraßenfahrzeug (ESF) mit Lithium-Ionen-Traktionsbatterie, der Ford e-Ka – basierend auf einem Ford Ka – mit in den Vergleich aufgenommen. Batteriebetriebene Fahrzeuge waren bisher nur in Nischenanwendungen zu finden, da die erzielbaren Reichweiten durch die geringen Speicherdichten herkömmlicher Batteriesysteme sich ausschließlich für den innerstädtischen Betrieb eigneten. Die Lithium-Ionen-Technik bietet zukünftig erweiterte Anwendungsbereiche.

Herstellungsaufwand

Der energetische Herstellungsaufwand der Fahrzeuge mit konventionellen und alternativen bzw. innovativen Antriebssystemen differiert deutlich. Während sich der energie-

tische Mehraufwand für die Umrüstung von Fahrzeugen auf Flüssiggas- oder Erdgas-Betrieb in Grenzen hält, liegt der Herstellungsaufwand für ein Brennstoffzellenfahrzeug gegenüber dem Referenzfahrzeug in der Basisversion mit Ottomotor um ca. 75 % höher. Dies ist vorwiegend auf den hohen Herstellungsaufwand der Brennstoffzelle inkl. der benötigten Peripherie zurückzuführen. Das Elektrofahrzeug (Basis Ford Ka) gehört als einziges Fahrzeug in dieser Untersuchung der Kompaktklasse an. Dadurch ist der Herstellungsaufwand für das Basismodell (mit konventionellen Antrieb) geringer als beim Volvo V40. Durch die energieintensive Herstellung der großen und schweren Traktionsbatterie in Lithium-Ionen-Technik liegt der gesamte Herstellungsaufwand des Ford e-Ka nur knapp unter dem der BZ-Variante.

Der Anteil des herstellungsbedingten Energieaufwands am KEA bewegt sich zwischen rund 8,9 % (Ottomotor-Fahrzeug mit Methanol aus Waldrestholz) und 25,8 % beim Elektrofahrzeug und ist somit ein nicht zu vernachlässigender Faktor für die ganzheitliche Bewertung der Energieeffizienz der verschiedenen Antriebssysteme.

Aufwendungen während der Nutzungsphase

Die Nutzungsphase von zehn Jahren bei 150.000 km Laufleistung verursacht bei allen Konzepten den größten Anteil am KEA. Darin enthalten sind Bereitstellungsaufwendungen für den Kraftstoff frei Tankstelle (inklusive aller stofflichen Verluste und sonstiger Aufwendungen), der fahrstreckenspezifische Endenergieverbrauch des jeweiligen Fahrzeugs und anteilige Aufwendungen für verkehrsinfrastrukturelle Maßnahmen, sowie die Fahrzeuginstandhaltung. Da für die innovativen Antriebsvarianten noch keine verlässlichen Daten über die Höhe zukünftiger Instandhaltungsaufwendungen existieren, wurde dieser Aufwand abgeschätzt. Beim ESF ist die Traktionsbatterie auf die Fahrzeuglebensdauer ausgelegt und verursacht keine weiteren Aufwendungen für Instandhaltung oder Batterietausch.

Im Vergleich berücksichtigt ist der jeweilige Zyklusnutzungsgrad der Antriebstechnologien; dieser enthält u. a. die Verluste durch Selbstentladung von Batterien, Verdunstung von flüssigem Wasserstoff sowie ggf. Energiegewinne durch elektrische Nutzbremsung (beim ESF) ausgehend von einer mittleren Fahrzeugbeanspruchung von 15.000 km Laufleistung pro Jahr. Grundsätzlich spielt auch die individuelle Fahrweise eine große Rolle für den nutzungsabhängigen Energieverbrauch, wobei sich beim ESF durch die Möglichkeit der Bremsenergieerückgewinnung dieser Faktor deutlich schwächer auswirkt.

Erwartungsgemäß liegt der spezifische Endenergieverbrauch (Tank-to-Wheel) des ESF mit rund 21 kWh/100km im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) von allen Antriebsvarianten am niedrigsten, da der Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von rund 90 % deutlich über denen von Verbrennungsmotoren liegt. Die übrigen Varianten liegen zwischen rund 48 kWh/100km (BZ-Fahrzeug) und 84 kWh/100km (Erdgas-Antrieb). Beim BZ-Fahrzeug ist der gegenüber dem ESF deutlich höhere Endenergieverbrauch einerseits auf die Umwandlungsverluste in der BZ zurückzuführen, andererseits auf das um rund 36 % höhere Fahrzeuggewicht bedingt vorwiegend durch das höhere Basisgewicht des Volvo V40 gegenüber dem Ford Ka.

Der spezifische Endenergieverbrauch des Fahrzeugs mit Dieselmotor liegt rund 2,5 mal höher als beim ESF und damit knapp über dem BZ-Fahrzeug. Die Ottomotor-Variante liegt rund 14 % über der Diesel-Variante wie auch die MeOH-Verbrennungsmotoren.

Die gasbetriebenen Fahrzeuge mit Erdgas (CNG compressed natural gas) und Flüssiggas (LPG liquefied petroleum gas) liegen zum einen durch die suboptimale bivalente Auslegung und zum anderen durch den Entwicklungsvorsprung der konventionellen Techniken (Direkteinspritzung etc.) bezüglich der spezifischen Endenergieverbräuche über der Ottomotor-Variante.

Ein wesentlicher Punkt für die energetische Bewertung der Nutzungsphase ist die Bereitstellung des Kraftstoffes im Falle des ESF. Hier dient Netzstrom aus dem deutschen Kraftwerks-Mix als Energiequelle, der mit einem Bereitstellungsnutzungsgrad frei Haushalt von rund 32 % bilanziert wird. Damit liegen Benzin oder Diesel mit Bereitstellungsnutzungsgraden von rund 85,6 % bzw. 89,5 % deutlich günstiger als Netzstrom. Der Hauptvorteil von elektrischem Strom als Energiequelle ist jedoch die Vielzahl der fossilen, nuklearen wie auch regenerativen Erzeugungsmöglichkeiten und die Emissionsfreiheit vor Ort.

Die hier betrachteten biogenen Kraftstoffe RME, Methanol aus Biomasse und LH₂ aus Windenergie weisen mit 46,1 %, 58,7 % und 59,6 % zwar relativ geringe Bereitstellungsnutzungsgrade auf, der nicht-regenerative Anteil daran ist jedoch sehr gering. Der Bereitstellungsnutzungsgrad von RME kann zusätzlich durch die Nutzung der Koppelprodukte bei der Rapsölverarbeitung (Rapsschrot, Glycerin, Fettsäuren) auf 73,5 % gesteigert werden. Der Energieinhalt dieser Koppelprodukte wird dem bei der RME-Herstellung anfallenden regenerativen Energieaufwand wieder gutgeschrieben. Damit ergibt sich ein niedrigerer KEA und insbesondere KNRA.

Folgende Abbildung zeigt die gesamten und nicht-regenerativen Energieaufwendungen im Vergleich:

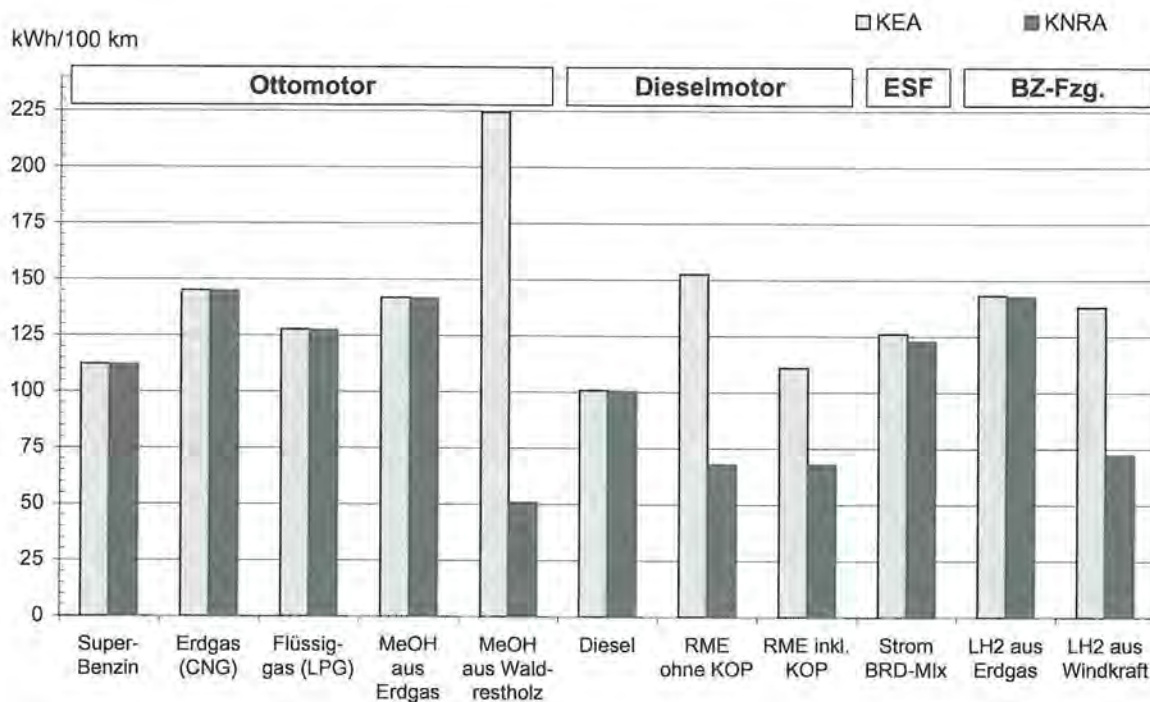


Abbildung 0-1: Gegenüberstellung der KEA / KNRA-Werte der untersuchten Antriebsvarianten

Vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung und Umweltrelevanz ist zur besseren Vergleichbarkeit „fossiler“ und „erneuerbarer“ Techniken die Beurteilung nach dem KNRA aussagekräftiger als nach dem KEA. Daher wurden in dieser Studie die nicht-regenerativen Aufwendungen stets zusätzlich zum KEA ausgewiesen. Die Ergebnisse für die einzelnen Antriebsvarianten können den jeweiligen Kapiteln entnommen werden.

Weitere Aspekte

Gewichtseinsparungen durch Leichtbau sind primärenergetisch gesehen nur bedingt sinnvoll, da erst ab hohen Laufleistungen eine Energieeinsparung erfolgt. Die Verwendung von regenerativ erzeugtem Flüssigwasserstoff bringt ökologische Vorteile, da sie die einzige Variante darstellt, die im Idealfall keinerlei Schadstoff-Emissionen verursacht. Unabhängig von der Erzeugungsstruktur der Kraftstoffe verursacht der Betrieb von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb bzw. Elektrofahrzeugen keine Emissionen vor Ort.

Als einzige kurzfristige Maßnahme zur Verringerung des verkehrsbedingten Schadstoffausstoßes bietet sich die Umrüstung des bestehenden Fahrzeugbestands auf alternative Treibstoffe wie Erdgas oder Flüssiggas. Ein primärenergetischer Nutzen resultiert daraus jedoch nicht.

Die vorhandenen Reduktionspotenziale sind bei den konventionellen Techniken recht gering, während im Bereich alternativer Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren noch höhere Potenziale realisiert werden könnten (z. B. Einführung von Direkteinspritzung, höhere Ladedrücke etc.). Die höchsten Reduktionspotenziale liegen klar bei den BZ-Fahrzeugen, die sie sich noch in der Entwicklung befinden. Der Energieverbrauch des weitgehend ausgereiften Elektrofahrzeugs hängt dagegen entscheidend von der Erzeugungsstruktur des „getankten“ Stroms ab. Erst ein höherer regenerativer Anteil am Strommix bringt ökologische Vorteile für die Bilanz des ESF.

Dies zeigt, dass zum heutigen Zeitpunkt noch keine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative zu den konventionellen Motoren existiert. Die Forschungsaktivitäten der großen Automobilhersteller gehen noch nicht einheitlich in dieselbe Richtung, sondern favorisieren unterschiedliche Antriebskonzepte als Forschungsschwerpunkte für die zukünftigen Antriebstechnologien.

Der Trend geht jedoch seitens der großen Automobilbauer nicht hin zu einer Weiterentwicklung von „Zwischenlösungen“ wie z. B. dem Erdgasantrieb, sondern man verfolgt in der Regel langfristige Ziele wie die Entwicklung von innovativen Technologien wie der Brennstoffzelle. Einzelne Hersteller wie die BMW AG verfolgen weiterhin die Entwicklung von Verbrennungsmotoren, die mit Flüssigwasserstoff betrieben werden. Die BZ kommt hier als Stromquelle für die Bordelektronik (z. B. Klimatisierung im Stand) zur Anwendung.

Welche Konzepte sich durchsetzen werden, hängt daher nicht nur vom technischen Fortschritt der einzelnen Varianten ab, sondern wird maßgeblich von energiepolitischen Rahmenbedingungen wie Ressourcenverfügbarkeit, Energiepreisentwicklung und ggf. umweltpolitischen Vorgaben ab.

1 Einführung

Der Verkehrssektor ist mit einem Anteil von rund 22 % der drittgrößte Verbraucher von Primärenergie in Deutschland und verursacht knapp 30 % der klimarelevanten Treibhausgas-Emissionen, sowie einen noch höheren Anteil anderer Emissionen. Vor dem Hintergrund des weiter zunehmenden Individualverkehrs und sich verschärfenden Umweltschutzbestrebungen stellt sich unweigerlich die Frage nach alternativen Antriebskonzepten und dem damit erzielbaren Nutzen.

In einem ersten Schritt werden konventionelle, alternative sowie regenerative Kraftstoffe und Energieträger untersucht. Zudem soll die Frage geklärt werden, ob bzw. welche alternativen Antriebstechniken kurz-, mittel-, oder langfristig zur Verringerung des verkehrsbedingten Primärenergieverbrauchs, bzw. der damit verbundenen Emissionen beitragen könnten. Grundsätzlich können kurz- bis mittelfristig weitere Verbrauchseinsparungen an fossilen Energieträgern durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der konventionellen Antriebssysteme (Otto-/Dieselmotoren) erzielt werden. Die noch vorhandenen Verbesserungspotenziale auf diesem Gebiet sind durch den bereits hohen Stand der Technik allerdings relativ gering. Der Trend der letzten Jahrzehnte zu stetig effizienteren Verbrennungsmotoren wurde jedoch zum Teil durch die ebenfalls kontinuierlich steigenden Fahrzeuggewichten kompensiert.

Alternative Kraftstoffe wie Erdgas, Flüssiggas (Autogas, LPG) oder aus Erdgas reformiertes Methanol stehen heute bereits in hohem Maße zur Verfügung oder können im Hinblick auf die technischen Möglichkeiten problemlos erzeugt werden. Diese könnten möglicherweise zur Reduktion der Schadstoff-Emissionen und des Primärenergieverbrauchs beitragen.

Das grundlegende Problem der Ressourcenverknappung wird durch diese Varianten aber auch nur hinausgezögert. Langfristig stellen diese Varianten demnach keine nachhaltige Lösung dar.

Daher sind insbesondere regenerativ erzeugte Energieträger von besonderem Interesse der Untersuchungen. Dazu zählt u. a. aus Windkraftstrom erzeugter Flüssigwasserstoff oder Biodiesel.

Biodiesel kommt als biogener Kraftstoff dem Ziel eines geschlossenen Kohlenstoff-Kreislaufs bereits sehr nahe. Seine Herstellung erfordert nur einen sehr geringen Anteil fossiler Energie.

Eine großflächige Einführung vollständig regenerativer Energieträgern wie Wasserstoff, der aus erneuerbarem Strom erzeugt wird, steht dagegen noch in (weiter) Ferne.

In einem weiteren Schritt werden im Rahmen dieser Studie alternative Antriebskonzepte mit konventionellen Antriebstechniken (Verbrennungsmotoren mit unterschiedlichen Kraftstoffen) sowie mit elektromotorisch betriebenen Fahrzeugen verglichen. Dabei werden u. a. umgerüstete Benzin- und Dieselmotoren für den Einsatz der oben erwähnten Alternativ-Kraftstoffe betrachtet, die bereits am Markt eingeführt oder technisch realisiert wurden. Die Fahrzeuge mit Elektromotor werden entweder aus einer Traktionsbatterie oder einer PEM-Brennstoffzelle mit Flüssigwasserstofftank gespeist.

Das reine Elektrofahrzeug wurde in den Vergleich miteinbezogen, da sich diesem Sektor durch die Weiterentwicklung der Akkumulatorentechnik (Lithium-Ionen-Technik) neue Potenziale abseits einer Nischenanwendung eröffnen. Besonders in sensiblen Bereichen wie innerstädtischen Zonen wird zukünftig der lokal emissionsfreie Verkehr immer mehr im Vordergrund stehen.

Um eine möglichst ganzheitliche Aussage über den spezifischen kumulierten Energieaufwand (KEA) eines Fahrzeugs zu treffen, ist es notwendig, neben der Nutzungsphase auch die Herstellungsphase des Fahrzeugs zu analysieren.

Des Weiteren wird qualitativ auf Emissions- und kostenspezifische Gesichtspunkte der jeweils betrachteten Antriebssysteme eingegangen.

2 Zielsetzung

Diese Studie trifft auf Basis eines ganzheitlichen energetischen Vergleichs der Prozessketten zur Bereitstellung von verschiedenen Treibstoffen für Kraftfahrzeuge, sowie der Kombination mit unterschiedlichen Antriebsvarianten, Aussagen über die Energieeffizienz einiger ausgewählter alternativer Antriebssysteme.

2.1 Untersuchungsumfang

Wesentliche Vergleichsgrößen sind der fahrstreckenspezifische kumulierte Energieaufwand (KEA) für jedes Antriebssystem sowie der Kumulierte Nicht-Regenerative Energieaufwand (KNRA), der die für den Ressourcen- und Umweltschutz relevante Kenngröße darstellt.

Der KEA schließt die Herstellungsaufwendungen (KEA_H) für die verschiedenen Antriebssysteme mit ein. Diese sollen hier durch Implementierung der unterschiedlichen Antriebssysteme inklusive Kraftstoffspeicher in das Basisfahrzeug abgeschätzt werden. Durch Zusatztanks, Batteriespeicher oder eine Brennstoffzelle an Bord steigt in der Regel das Fahrzeuggewicht, wodurch wiederum der Endenergiebedarf während der Nutzungsphase und damit der KEA_N beeinflusst wird.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$$

Ausgehend vom durchschnittlichen Kraftstoff-/Energieverbrauch eines Fahrzeugs ergibt sich in Verbindung mit dem Bereitstellungsnutzungsgrad des verwendeten Treibstoffs der unmittelbar fahrstreckenspezifische Anteil des KEA_N . Zudem werden alle sonstigen, in der Nutzungsphase eines Pkw anfallenden Aufwendungen wie Instandhaltung, Wartung, Reparatur oder Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt.

Gutschriften bzw. Aufwendungen bei der Fahrzeugentsorgung bleiben im Rahmen dieser Studie mangels detaillierter Daten bezüglich Recycling – speziell bei der Entsorgung der innovativen Antriebssysteme – unberücksichtigt. Eine ausführlichere Darstellung dieses Sachverhalts ist **Kapitel 6.3** zu entnehmen.

2.2 Kriterien zur Auswahl der betrachteten Antriebsvarianten

Grundsätzlich bestehen sehr viele Variationsmöglichkeiten von Fahrzeugtypen, Antriebssystemen und Kraftstoffen, kombiniert mit einer Reihe von Nebenaggregaten (Klimatisierung, Bremsenergieerückgewinnung etc.). Dazu kommt die Wahl eines geeigneten Kraftstoffspeichers/-tanks, evtl. auch des Aggregatzustands des mitgeführten Kraftstoffs und die Auslegung der erzielbaren Reichweite pro Speicherinhalt.

Aus dieser Fülle von Möglichkeiten wurden in dieser Vergleichsstudie die aus heutiger Sicht aussichtsreichsten Kombinationen ausgewählt, die in Folge näher betrachtet und mit den bisher konventionellen Varianten des Verbrennungsmotors (VM) mit Otto- und Dieselmotoren verglichen werden. Zusätzlich zu weiteren verbrennungsmotorischen Varianten mit Alternativ-Kraftstoffen werden neuartige Brennstoffzellen-Fahrzeuge

(ohne On-Board-Reformer) und ein Elektrofahrzeug der neuesten Generation verglichen.

Im Zuge der umfassenden Charakterisierung werden weitere Varianten und Aspekte, die nicht im Rahmen der Studie näher untersucht werden, qualitativ bewertet.

3 Definition der Rahmenbedingungen

3.1 Referenzfahrzeuge

Als Referenzfahrzeuge für die Ermittlung des Endenergieverbrauchs kommen, soweit detaillierte Daten zur Verfügung stehen, Serien- und seriennahe Fahrzeuge zum Einsatz. Ansonsten werden Prototypen (ESF) und Fahrzeuge im Entwicklungsstadium (BZ-Fahrzeug) betrachtet.

3.1.1 *Verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge*

Als Basis-Referenzfahrzeug wird ein Volvo V40 Kombi betrachtet. Dieses Fahrzeug der Mittelklasse bietet zum einen ausreichend Platz für die Umrüstung auf alternative Antriebskonzepte, zum anderen ist es eines der ersten Serienfahrzeuge mit bivalentem LPG-Antrieb ab Werk.

Die Otto- und Dieselmotoren entsprechen dem aktuellen Stand der Technik, eine Umrüstung auf Erdgas- und Biodiesel-Betrieb ist unproblematisch. Alle Verbrennungsmotor-Fahrzeuge sind mit Handschalt-Getriebe ausgestattet.

3.1.2 *Elektrofahrzeug*

Als Elektrofahrzeug mit Batteriespeicher wurde der Ford e-Ka basierend auf dem Modell Ford Ka herangezogen. Hier handelt es sich um ein Demonstrationsfahrzeug, das an der Ford Forschungsstelle in Aachen (FFA) entwickelt wurde und mit einer neuartigen Lithium-Ionen-Traktionsbatterie ausgestattet ist.

3.1.3 *Brennstoffzellenfahrzeug*

Für den Prototypen eines Brennstoffzellen-Fahrzeugs wurden die Fahrzeugdaten eines Opel Zafira „HydroGen 3“ verwendet. Dieses Fahrzeug mit PEM-Brennstoffzelle und Flüssigwasserstofftank befindet sich noch in der Entwicklung, soll jedoch nach Herstellerangaben bereits in wenigen Jahren auf den Markt kommen.

Genauere Kenndaten zu den Referenzfahrzeugen sind in **Kapitel 5** in Tabellenform dargestellt.

3.1.4 *Ermittlung der Kenngrößen*

Die Endenergie-Verbrauchswerte des Elektro- und BZ-Fahrzeugs stammen z.T. aus eigenen Berechnungen basierend auf Herstellerangaben und Veröffentlichungen. Grundsätzlich sind diese Angaben bei Prototypen mit einer hohen Unschärfe behaftet, da sich in der Regel während der weiteren Fahrzeugentwicklung aufgrund der vorhandenen Optimierungspotenziale noch große Veränderungen einstellen.

Der zur Herstellung eines Fahrzeugs notwendige Energieaufwand trägt ebenfalls nicht unerheblich zum KEA des Fahrzeugs bei. Ausgehend von einem in /ZAE 95/ detailliert untersuchten und als sog. Standard-Mittelklasse-Pkw (Stand 1990) definierten Fahr-

zeug mit Ottomotor (Leergewicht 1.070 kg) wird der KEA_H der hier untersuchten Fahrzeug-Varianten anhand von Massenbilanzen und der Bewertung einzelner Baugruppen ermittelt.

Das Fahrzeuggewicht wird durch die Antriebsart und die Größe des Tanks/Energiespeichers wesentlich beeinflusst. Im Sinne eines möglichst nachvollziehbaren Vergleichs, wurde die Fahrzeugmodellierung unter der Prämisse durchgeführt, annähernd gleiche Rahmenbedingungen für die Nutzungsmöglichkeiten des Fahrzeugs zu schaffen. Dabei stößt man allerdings insbesondere beim Elektrofahrzeug durch die relativ geringe Reichweite schnell an Grenzen.

Die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Fahrzeugtypen bezüglich Alltagstauglichkeit, Anzahl der Sitzplätze, Gepäckraum, Reichweite, Kosten oder Höchstgeschwindigkeit ist daher nur bedingt gegeben.

3.2 Methodik zur ganzheitlichen energetischen Bewertung

Der Herstellungsprozess eines beliebigen Zielprodukts ist grundsätzlich mit Stoff- und Energieaufwendungen verbunden. Die Herstellung des Zielprodukts kann dabei mit Nebenprodukten, Emissionen und Reststoffen verbunden sein.

Insbesondere bei der Herstellung biogener Kraftstoffe fallen sog. Koppelprodukte an. Sie beeinflussen die ganzheitliche Bewertung erheblich und können in der Regel einer sekundären Nutzung als Brennstoff, Dünge- oder Futtermittel zugeführt werden.

Am Beispiel der Rapsölproduktion sei hier insbesondere das bei der Ernte anfallende Rapsstroh, sowie das bei der Rapsölgewinnung (Presse) zurückbleibende Rapsschrot (Rapskuchen) zu nennen. Während das Rapsstroh als organischer Dünger am Feld verbleibt und nicht bilanziert wird, wird der Rapskuchen meist als Tierfutter weiterverwendet.

Um die in diesen Nebenprodukten enthaltenen Energiemengen im Sinne einer ganzheitlichen energetischen Betrachtung zu berücksichtigen, sind unterschiedliche Betrachtungsansätze möglich. In Anlehnung an die Richtlinie VDI 4600 zur Ermittlung des kumulierten Energieaufwands werden folgende Bilanzierungsmethoden näher betrachtet.

3.2.1 Zielproduktorientierte Methode

Die Nebenprodukte werden gänzlich außer Acht gelassen, sofern keine wirtschaftliche Einsatz- oder Verwendungsmöglichkeit besteht und sie keine negativen energetischen Aufwendungen verursachen. Demnach werden sämtliche Aufwendungen entlang der Prozesskette dem Zielprodukt zugeschlagen.

Für das oben erwähnte Beispiel des Rapsöls verursacht das auf dem Feld verbleibende Rapsstroh keinen energetisch relevanten Aufwand oder Gewinn. Wird der Rapsschrot nach der Ölmühle dagegen nicht weiterverwendet und muss stattdessen entsorgt werden, so muss dieser Aufwand berücksichtigt werden.

Diese Methode stellt daher auch die Worst-Case-Betrachtung dar. Ihre Anwendung ist vom Erhebungs- und Rechenaufwand relativ einfach.

3.2.2 Gutschriftenmethode

Der Energieinhalt der Nebenprodukte wird dem KEA des Rapsöls gutgeschrieben, wobei vorausgesetzt wird, dass die Koppelprodukte genutzt werden können. Diese vollständige Nutzung wirkt sich somit positiv auf den KEA und den Bereitstellungsnutzungsgrad des Zielprodukts aus. Energiegewinn und Erntefaktor werden nicht berührt.

Die Koppelprodukte werden transparent einbezogen und der Rechenaufwand ist relativ gering.

3.2.3 Quantitative Methode

Bei der „Quantitativen Methode“ wird der Herstellungsaufwand auf alle Haupt- und Nebenprodukte nach gängigen Vergleichsgrößen (Massen, Heizwerte, Stoffmengen etc.) aufgeteilt. Dies bedeutet, dass ein Teil der Herstellungsaufwendungen immer auch den Nebenprodukten zugerechnet wird, weshalb diese Methode nur bei weiterverwendbaren /-verwertbaren Nebenprodukten sinnvoll ist.

Die „Substitutionsmethode“ findet hier keine Anwendung, weshalb auch nicht näher darauf eingegangen wird.

3.2.4 Angewandte Methodik

Bei den hier untersuchten Kraftstoffvarianten wird die „Zielproduktorientierte Methode“ als Grundlage der Bilanzierung dienen; bei der Herstellung von biogenen Kraftstoffen wird zum Vergleich zusätzlich die „Quantitative Methode“ angewandt und ausgewiesen. Dabei wird der Energieinhalt der Koppelprodukte als Vergleichsgröße herangezogen, da mit zunehmendem Absatz damit zu rechnen ist, dass die Nebenprodukte und Reststoffe hauptsächlich als Brennstoffe (wie auch das Zielprodukt) genutzt werden.

Bei der Stromerzeugung in Wärme- bzw. Kernkraftwerken, die zusammen über 90 % der gesamten Stromproduktion liefern, wird die entstehende Wärme im Regelfall nicht genutzt (Ausnahme: Nah- oder Fernwärmenetz, BHKW) und daher im Sinne der „Zielproduktorientierten Methode“ nicht bilanziert.

3.3 Bilanzraum

Im Sinne einer hinreichend genauen Analyse und der Verhältnismäßigkeit des Untersuchungsaufwands, auch im Hinblick auf die mögliche Genauigkeit einer derartigen Untersuchungen, ist die Definition der Bilanzgrenzen notwendig.

Bei der Kraftstoffbereitstellung (Bereitstellung der Rohstoffe, Kraftstoffgewinnung, Verteilung) werden hier alle energetischen Aufwendungen außer

- für die Straßeninfrastruktur,
- zur Herstellung und Entsorgung der Wirtschaftsgebäude,
- indirekte Aufwendungen zur Herstellung und Entsorgung von Betriebsmitteln,
- zur Herstellung und Entsorgung der Tankstellen und
- vorgelagerte Energieaufwendungen zur Herstellung des Maschinenparks

bilanziert.

Bei der Fahrzeugnutzung wird dagegen die Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt. Dazu zählen Straßenbau, -instandhaltung und -ausrüstung, Garagenbau, sowie Betriebsstoffe (z. B. Strom für die Straßenbeleuchtung, Winterdienst etc.). Außen vor bleiben der Bau, der Betrieb und sonstige Aufwendungen der Tankstellen. Bei Kraftstoffen, die ein hohes Maß an Verdichtungs-, Kühlungs-, Lagerungs- oder Verflüssigungsaufwand erfordern, sind diese Aufwendungen bereits dem Kraftstoff zugeschlagen (z. B. Verdichtung von Erdgas aus dem Nieder- und Mitteldruck-Gasnetz an der Tankstelle vor der Fahrzeugbetankung).

3.4 Referenz-Fahrzyklus

Als Testzyklus zur Bestimmung des Kraftstoff- bzw. Endenergieverbrauchs eines Fahrzeugs soll hier der aktuelle „Neue Europäeische Fahrzyklus“ (NEFZ), auch unter der englischen Bezeichnung EDC (European Driving Cycle) bekannt, herangezogen werden.

Der NEFZ bildet sich dabei aus einer Kombination von vier direkt hintereinander gefahrenen ECE-(Economic Commission for Europe)-Stadtfahrzyklen und einem Außerorts-Fahrzyklus (EUDC Extra Urban Driving Cycle).

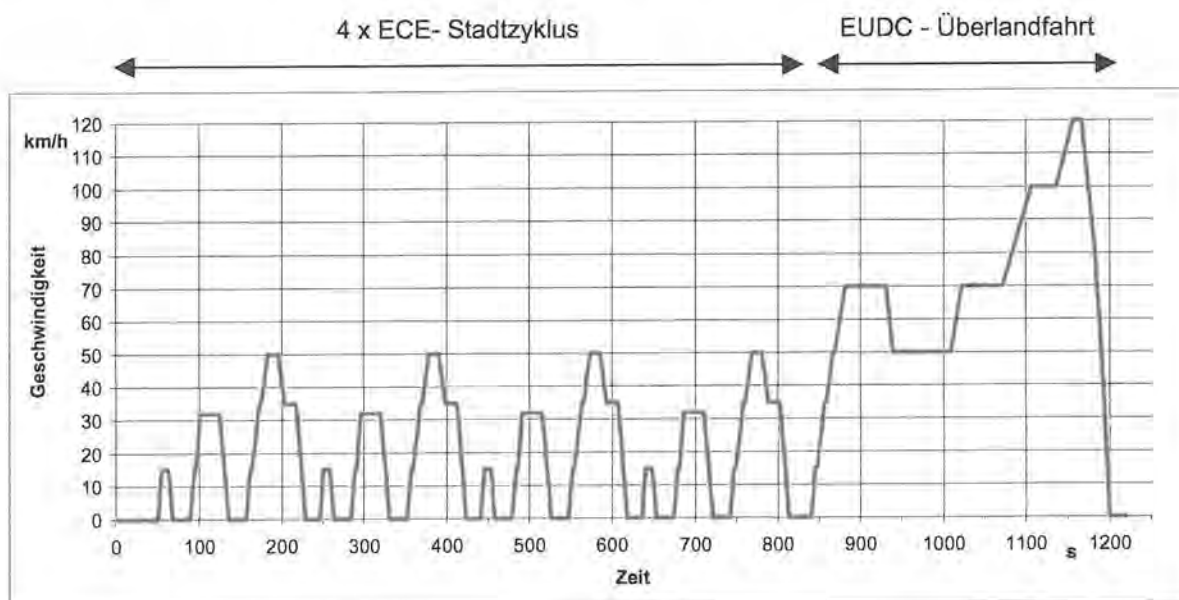


Abbildung 3-1: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ

Dabei werden innerorts Höchstgeschwindigkeiten von 50 km/h (im Mittel 18,7 km/h) und außerorts von 120 km/h (im Mittel 62,6 km/h) erreicht. Die Gesamtstrecke des NEFZ von rund 11 km wird dabei mit durchschnittlich 33,6 km/h zurückgelegt, wobei 25 % der Fahrzeit auf Wartezeiten mit Leerlauf (Ampelrotphasen) entfallen.

Veränderungen gegenüber dem „Drittmix“

Der sog. „Drittmix“ aus ECE-Stadtfahrzyklus (bei Warmstart) und 90 bzw. 120 km/h-Konstantfahrt wurde im Jahre 1996 durch EU-Richtlinie 93/116/EWG abgelöst.

Die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs ändert sich nach dem NEFZ dabei von gravimetrischen und volumetrischen Messungen zu einer Ermittlung der Kohlenstoffbilanz

(kohlenstoffhaltige Abgaskomponenten) als Berechnungsbasis. Zudem wird der NEFZ mit „kaltem“ Motor begonnen (im Gegensatz zur früheren EU-Richtlinie 91/411/EWG mit 40 Sek. Warmlaufphase im Leerlauf) und die Konstantfahrabschnitte durch den Außerorts-Fahrzyklus EUDC mit Spitzengeschwindigkeiten von 120 km/h ersetzt. Dies dient der beabsichtigten realitätsnäheren Nachbildung einer Fahrt aus der Stadt ins Umland.

Der energetische Verbrauchsunterschied zwischen dem NEFZ und dem „Drittmix“ liegt nach /KIR 96/ für Fahrzeuge mit Ottomotor bei durchschnittlich 7,6 %, bei Dieselfahrzeugen bei rund 8 % Mehrverbrauch.

4 Kraftstoffe für die mobile Anwendung

Bei der energetischen Bewertung eines Antriebskonzepts ist der zum Einsatz kommende Kraftstoff von bedeutendem Interesse. Ist beispielsweise die Herstellung eines Kraftstoffs mit hohen Aufwendungen verbunden, so kann ein Motor mit hohem Wirkungsgrad diesen Nachteil u. U. kompensieren. Daher müssen im Rahmen der ganzheitlichen Analyse die Bereitstellungsaufwendungen für den jeweiligen Energieträger mit berücksichtigt werden.

4.1 Energieträger und Erzeugung

Die untersuchten Kraftstoffe (inkl. Strom) können je nach ihrer Herkunft, der Gruppe der fossilen Kraftstoffe, der biogenen Kraftstoffe bzw. der regenerativ erzeugte Kraftstoffe zugeordnet werden.

Zum Teil ergeben sich prozessbedingt bei der Herstellung geringe Überschneidungen, da beispielsweise der aufgewendete Strom aus dem deutschen Kraftwerks-Mix zu kleinen Teilen von regenerativer Herkunft ist. Auch in biogenen Kraftstoffen steckt ein geringer Anteil fossiler Energie z. B. durch den Kraftstoffverbrauch der Traktoren für die Feldbearbeitung. Auch Energieträger wie Wasserstoff aus Windkraft enthalten folglich dem heutigen Strommix entsprechend einen gewissen Anteil fossiler Energie bedingt durch die Anlagenherstellung.

Folgende Energieträger wurden im Rahmen dieser Studie untersucht:

- Ottokraftstoff (Euro-Super, ROZ 95)
- Erdgas (CNG Compressed Natural Gas)
- Flüssiggas (LPG Liquified Petroleum Gas)
- Methanol:
 - Biogene Erzeugung aus Biomasse (durch Vergasung)
 - Großtechnische Reformierung von Erdgas
- Dieselkraftstoff
- Biodiesel / Rapsmethylester (RME):
 - Biogene Erzeugung aus Raps inklusive Bewertung der Koppelprodukte
 - Biogene Erzeugung aus Raps ohne Bewertung der Koppelprodukte
- Netzstrom (deutscher Strommix)
- Flüssigwasserstoff (LH₂):
 - Elektrolyse mit regenerativem Strom aus Windkraftanlagen
 - Großtechnische Reformierung von Erdgas

Zu den Berechnungen wurden u. a. folgende stoffspezifische Daten aus **Abbildung 4-1** verwendet.

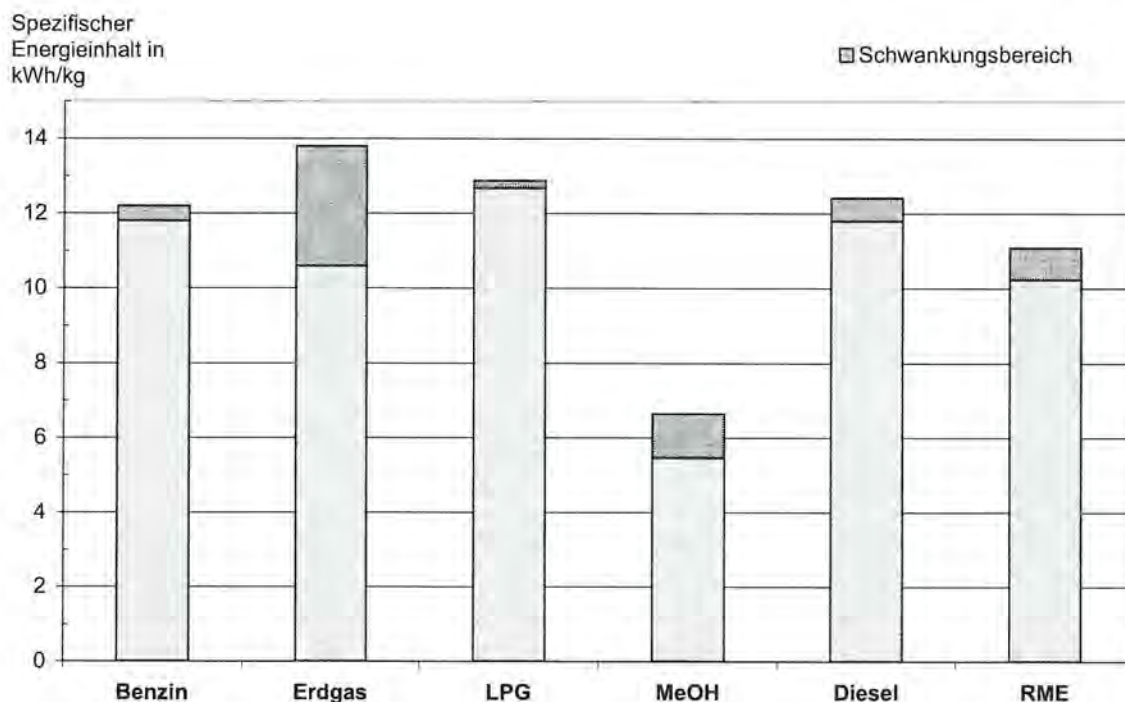


Abbildung 4-1: Spezifischer Energieinhalt ausgewählter Kraftstoffe (untere Heizwerte H_U)

Die Schwankungsbereiche spiegeln dabei die unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten am Markt wieder. Bei Erdgas bestimmt der Methangas-Anteil weitgehend den Heizwert, hier liegen die Werte für L-Gas und H-Gas als Grenzwerte vor. Bei Benzin wurden die Werte für Super- und Normalbenzin verwendet.

4.1.1 Ottokraftstoff (Euro-Super)

Als Kraftstoff für die Basisfahrzeug-Variante mit Ottomotor wird Euro-Super-Benzin (ROZ 95) betrachtet. Dieser Referenzkraftstoff ist momentan die gebräuchlichste Benzinsorte in Deutschland und weist im Gegensatz zu Normalbenzin steigende Marktanteile auf, da die heutigen High-Tech-Motoren immer höhere Ansprüche an die Kraftstoffqualität stellen.

Die Versorgung mit (Super-) Benzin ist nahezu überall gewährleistet und die Strukturen zur Herstellung, dem Transport und der Verteilung sind bewährt und optimiert. Als fossiler Treibstoff mit einem hohen Anteil an den verkehrsbedingten Emissionen sind Ottokraftstoffe durch den Gesetzgeber in Deutschland mit einem Steueranteil von insgesamt rund 75 % des Abgabepreises belastet. Damit liegen nach der 5. Stufe der Ökosteuerreform die Kraftstoffpreise für den Endverbraucher in Deutschland im europäischen Vergleich relativ hoch, momentan bei rund 1,11 Euro pro Liter Super-Benzin.

4.1.2 Erdgas (CNG)

Erdgas kann in modifizierten Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, hat sich aber bisher nicht gegenüber konventionellen Techniken durchsetzen können. Als fossiler Kraftstoff ist Erdgas ebenfalls nur limitiert vorhanden und trägt zur Emission von CO₂ bei.

Vorteilhaft gegenüber den konventionellen Kraftstoffen (Otto-, Dieselkraftstoff) ist zum einen die sauberere Verbrennung im Motor, die zur lokalen und überregionalen Luftreinhaltung beiträgt. Zudem ist Erdgas zum Antrieb von Verbrennungsmotoren in Fahrzeugen steuerlich begünstigt – es gilt bis zum Jahr 2020 der ermäßigte Steuersatz von 12,40 €/MWh – wodurch ein deutlicher Kostenvorteil gegenüber Benzin und Dieselmotoren resultiert. Die tatsächliche Ersparnis für den Fahrzeugnutzer ist allerdings maßgeblich vom Endenergieverbrauch des Fahrzeugs abhängig (vgl. **Kapitel 6.2.2**), der bei bivalenten Erdgasfahrzeugen meist über dem Verbrauch von benzinbetriebenen Motoren liegt.

Nachteilig ist das Fehlen eines flächendeckenden Versorgungsnetzes durch Erdgas-Tankstellen in Deutschland.

Der Erdgaspreis für den Endkunden liegt momentan bei etwa 0,56 bis 0,65 €/kg (1 kg handelsübliches Erdgas besitzt den Energieinhalt von etwa 1,54 Liter Super-Benzin). Daraus errechnet sich ein Vergleichspreis von rund 5 Ct/kWh /SWN 02/ für Erdgas gegenüber etwa 12 Ct/kWh für Super-Benzin. Durch diesen großen Preisvorteil amortisiert sich die zusätzliche Investition für die Umrüstung eines Pkw auf Erdgas-Betrieb – besonders bei hohen jährlichen Kilometerleistungen – meist in wenigen Jahren.

4.1.3 Autogas (LPG)

LPG (liquefied petroleum gas) bzw. Flüssig-/Autogas, wird beim Einsatz als Pkw-Treibstoff auch als Autogas bezeichnet und besteht aus Propan- und Butan-Gas in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen je nach Anwendungsgebiet und -region. LPG darf nicht mit flüssigem Erdgas (LNG Liquefied Natural Gas) verwechselt werden, das im Sprachgebrauch fälschlicherweise oft ebenfalls als Flüssiggas bezeichnet wird.

Flüssiggas fällt in der Raffinerie bei der atmosphärischen Destillation, also der ersten Verarbeitungsprozessstufe des Erdöls, zusammen mit Benzin, Kerosin (Petroleum) und Mitteldestillaten an. In einem weiteren Schritt werden in der Flüssiggas-Trennanlage Methan- und Ethananteile abgezogen und das Butan vom Propan getrennt. Flüssiggas besitzt einen unteren Heizwert von ca. 12,68 kWh/kg /BPA 67/, wobei das Mengenverhältnis von Propan zu Butan über den exakten Wert entscheidet. Butan besitzt einen um etwa 30 % höheren Heizwert als Propan, gleichzeitig liegt der Siedepunkt von Butan (unter Normaldruck) bereits bei etwa 0 °C, so dass besonders in Nordeuropa Probleme entstehen können. Daher werden in kälteren Regionen bevorzugt propandominierte und in südlicheren Ländern eher butandominierte Mischungen (wegen des geringeren Gasdrucks bei hohen Temperaturen) verwendet. Für Propan liegt der Dampfdruck für 0 °C Umgebungstemperatur bei 4,7 bar (vgl. DIN 51622).

Zudem ist Autogas fast schwefelfrei, verbrennt ohne Partikelemissionen und ist einfach zu transportieren. Der volumenspezifische Energieinhalt liegt unter dem von Benzin, so dass bei gleichem Energieverbrauch für konstante Reichweiten ein höheres Tankvolumen benötigt wird. Obwohl LPG eine höhere spezifische Dichte als Luft aufweist,

bestehen seit 1988 keine gesetzlichen Beschränkungen zur Nutzung von Tiefgaragen mit autogasbetriebenen Fahrzeugen mehr.

Der Preis für LPG liegt in Deutschland bei rund 0,50 bis 0,55 Euro pro Liter und damit noch deutlich unter dem – in Deutschland besonders niedrigen – Dieselpreis, da bis zum Jahr 2009 für LPG ermäßigte Steuern vom Gesetzgeber festgeschrieben wurden.

4.1.4 Methanol (MeOH)

Methanol eignet sich (wie auch Ethanol) sowohl für den Einsatz in Diesel- und Benzinmotoren, entweder als Reinkraftstoff oder als Mischung mit Diesel oder Benzin. Methanol ist zudem als Additiv in Benzin gebräuchlich und wird vorwiegend im Rennsport wegen seiner hohen Oktanzahl von rund 130 eingesetzt. Hier soll allerdings nur der Einsatz von Methanol als Reinkraftstoff betrachtet werden, da sonst kein eindeutiger Vergleich mit anderen Kraftstoffen gezogen werden kann. In beiden Fällen soll Methanol als Flüssigtreibstoff in einem umgerüsteten Ottomotor Anwendung finden.

Die Bereitstellung des Treibstoffs für die Einführung als Fahrzeugkraftstoff stellt kein Problem dar, da die chemische Industrie über ausreichende Produktionskapazitäten verfügt. Als Rohstoff dient dabei in erster Linie Erdgas. Zu einem CO₂-neutralen Brennstoff wird Methanol allerdings erst dann, wenn es aus Biomasse oder Abfällen produziert wird.

Methanol-Herstellung

Die Bereitstellung von Methanol soll hier anhand zweier Methoden betrachtet werden:

Die Kraftstoffherstellung soll zum einen durch **größentechnische Reformierung** aus Erdgas erfolgen. Dieses Verfahren ist bereits in der chemischen Industrie weit verbreitet und stellt keine neue technische Herausforderung dar. Die Produktionskapazitäten müssten bei der Einführung von Methanol in Serienfahrzeugen allerdings stark angehoben werden. Diese Methode ist die momentan konventionelle und kostengünstigere Methode.

Als zweite Methode wird die **MeOH-Herstellung aus Biomasse (Waldrestholz)** betrachtet. Grundsätzlich kann MeOH aus beliebiger Biomasse hergestellt werden, egal ob diese als Abfallprodukt anfällt (Waldrestholz, Biomüll, Feldstroh etc.) oder speziell für die MeOH-Gewinnung angebaut wird (Miscanthus, Weiden, Zuckerrüben etc.). Die Methanol-Herstellung erfolgt dabei in der Regel in drei Schritten, der Produktion von Roh-Synthesegas (u. a. CO, H₂) durch Vergasung des Ausgangsprodukts, der Konditionierung des Synthesegases und der eigentlichen Methanol-Synthese.

Als Reststoff nach der Vergasung von Waldrestholz bleibt nur Asche übrig, die hier nicht energetisch bilanziert wird, da keine Nutzungsmöglichkeit besteht (evtl. als Dünger), aber die Aufwendungen zur Beseitigung gleichfalls zu vernachlässigen sind.

Da die energetischen Aufwendungen zur Bereitstellung von Waldrestholz nur sehr geringe nicht-regenerative Anteile (Betriebsmittel für Schlepper, Transport, Hilfsenergiebedarf etc.) enthalten, kann hier mit einem relativ hohen Erntefaktor gerechnet werden. Der Nutzungsgrad der Methanol-Produktion wird nach /DER 99/ mit 38,5 % angegeben, inklusive Berücksichtigung der Betriebsmittel, jedoch ohne die Aufwendungen zur Bereitstellung der Biomasse und der Weiterverteilung des Methanols. Dieser relativ niedrige Wert erklärt sich durch die zusätzliche Verbrennung von Waldrestholz zur Er-

zeugung von Prozessdampf. In optimierten Konversionsanlagen können jedoch auch Nutzungsgrade von rund 58 % /DER 99/ erreicht werden, u. a. durch Veränderung der Vergasungstechnik oder Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung.

Toxizität

Methanol hat jedoch den Nachteil, dass es hoch toxisch ist und bereits bei Hautkontakt für den Menschen gefährlich sein kann. Bei Unfällen mit auslaufendem Methanol ist das Grundwasser stark gefährdet, da bereits geringste Mengen MeOH genügen, um große Mengen Wasser zu verseuchen. Zudem ist Methanol als korrosive Flüssigkeit nur unter besonderen Vorkehrungen zu handhaben. So muss zum Beispiel ein gasdichtes Tanksystem entwickelt werden, um das Austreten giftiger Dämpfe zu verhindern. Da Methanol Aluminium angreift, müssten in Zapfsäulen bestimmte Komponenten ausgetauscht werden. Auch viele der heute verwendeten Beschichtungs- und Dichtungsmaterialien vertragen sich nicht mit Methanol. Deshalb müsste jede Tankstelle einen neuen Untergrundtank für Methanol installieren. Es müsste zwar keine komplett neue Infrastruktur aufgebaut werden, doch es wären größere Umrüstungen nötig.

Indirekter Einsatz von Methanol

Als Alternative zum Einsatz in Verbrennungsmotoren könnte MeOH als Energieträger für die Reformierung zu Wasserstoff und Kohlendioxid dienen. Dies kann, wie in einigen Prototypen von Brennstoffzellen-Fahrzeugen angewandt, in einem On-Board-Reformer erfolgen. Da Methanol von seiner chemischen Struktur her weniger komplex ist als Benzin, lässt es sich einfacher in seine Bestandteile zerlegen. Ein Methanol-Reformer ist deshalb technisch weniger aufwendig als ein Benzin-Reformer und besitzt gegenüber diesem einen Entwicklungsvorsprung. Der Einstieg in die Brennstoffzellentechnologie ließe sich deshalb mit Methanol relativ zügig realisieren.

In Falle Methanol stellt sich die politische Frage, wie die zukünftige Energieversorgung aussehen soll. Wird in Methanol als Übergangslösung investiert, würde sich vermutlich der Einstieg in die Wasserstofftechnologie auf unbestimmte Zeit verzögern. Gleichzeitig könnte dadurch der Einsatz von Brennstoffzellen wie der PEM mit Reformer oder der DMFC (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle) beschleunigt werden.

Kraftstoffkosten

Die Preise für MeOH frei Tankstelle lassen sich mangels Angebot nicht genau bestimmen. Der Marktpreis für MeOH vergleichbar mit dem Ölpreis der Mineralölgesellschaften liegt bei etwa 145 Euro pro Tonne /RAS 02/. Zum Vergleich: Der Preis für eine Tonne Rohöl betrug Ende 2002 ca. 185 Euro.

4.1.5 Dieselkraftstoff

Dieselmotoren werden wie Ottomotoren als fossiler Energieträger großtechnisch in Raffinerien aus Erdöl gewonnen und ist somit als vollständig nicht-regenerativ anzusehen.

Beim Einsatz von Dieselmotoren in Verbrennungsmotoren entstehen eine Reihe von Luftschadstoffen, insbesondere in hohen Maßen Stickoxid-Emissionen. Hinzu kommt als Folge der Erhöhung der Einspritzdrücke (TDi, Common-Rail-Technik, Pumpe-Düse) eine Zunahme der Feinst-Partikel im Abgas. Dies ist ein negativer Nebeneffekt der dadurch erzielten Verbrauchssenkungen.

Dieselmotoren sind in Deutschland gegenüber Ottomotoren mit geringeren Steuersätzen belastet. Dieser Faktor ist ausschlaggebend dafür, dass Deutschland im internationalen Vergleich den höchsten Anteil an Dieselfahrzeugen am Kraftfahrzeugbestand besitzt.

Dieselmotoren kosten aktuell rund 0,91 Euro pro Liter und liegen damit rund 23 % unter dem Preis für Super-Benzin.

4.1.6 Biodiesel / Rapsmethylester (RME)

Eine Alternative zu konventionellem Diesel stellt Rapsmethylester dar. Dieser auch als Biodiesel bezeichnete Kraftstoff wird aus Raps gewonnen und in weiteren Umwandlungsverfahren (u. a. Umesterung) für den Einsatz in Dieselmotoren adaptiert. RME stellt derzeit einen der am weitesten verbreiteten biogenen Kraftstoffe dar.

Der Preisvorteil von RME gegenüber normalem Diesel von ca. 10 Cent pro Liter kompensiert in etwa den niedrigeren spezifischen Energiegehalt von RME, der im Fahrzeug zu einem volumetrischen Mehrverbrauch führt. Meist ergeben sich nur geringe Kostenvorteile, die sich nur bei Vielfahrern bemerkbar machen.

Dabei wird der vorhandene Preisvorteil, der im Gegensatz zu den deutlich höheren Produktionskosten von RME steht, durch die staatliche Subventionierung einerseits (weitgehende Befreiung von Steuern und Abgaben) sowie die hohe Besteuerung (Ökosteuern) von Dieselmotoren andererseits erreicht.

Die Bilanzierung des Bereitstellungsgrads von RME soll hier auf zwei Weisen geschehen. Dabei spielt die Nutzung der Koppelprodukte (Nebenprodukte, Reststoffe) aus der Weiterverarbeitung der Rapskörner eine entscheidende Rolle. Zur Bewertung soll die in **Kapitel 3.2.3** explizit dargestellte „Qualitative Bilanzierungsmethode“ Anwendung finden. Sofern für einen Reststoff keine Nutzungsmöglichkeit gefunden werden kann, fallen zudem Entsorgungsaufwendungen an.

4.1.7 Elektrische Energie

Ein wesentlicher Vorteil elektrischer Energie gegenüber konventionellen Kraftstoffen sind die vielfältigen Erzeugungsmöglichkeiten. Ein Elektrofahrzeug, das heute mit zum Großteil aus fossilen Brennstoffen gewonnenem Strom fährt, kann zukünftig genauso mit ausschließlich regenerativem Strom gespeist werden.

Ein Ausstieg aus der Kernenergie mit Substitution durch Gas- und Kohlekraftwerke, bzw. eine Forcierung der regenerativen Energien hätte erhebliche Auswirkungen auf den Primärenergieverbrauch und die CO₂-Bilanz eines ESF.

Der deutsche Strommix besitzt inklusive Verteilung frei Haushalt einen Bereitstellungsgrad von ca. 32 % (Stand 1999). Dies bedeutet, dass etwa das Dreifache an Primärenergieaufwand für die Bereitstellung von 1 kWh Strom anfällt. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich beim Elektrofahrzeug trotz deutlich niedrigerer Endenergieverbrauchswerte keine primärenergetischen Vorteile zu konventionellen Varianten.

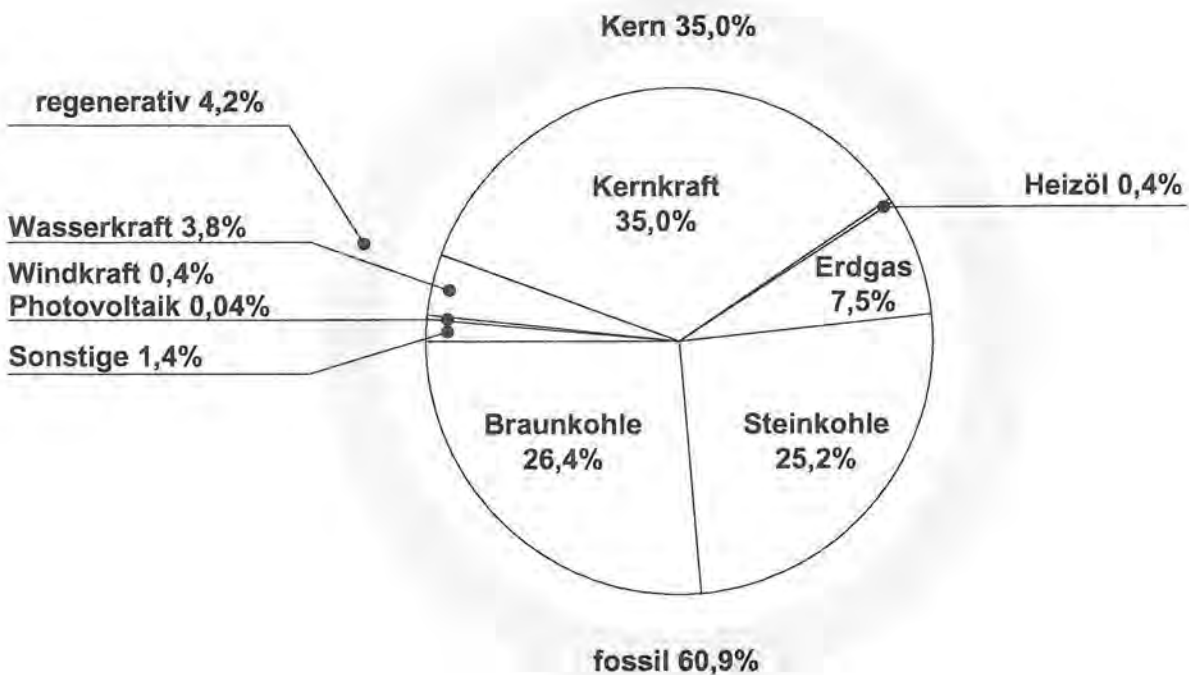


Abbildung 4-2: Erzeugung des Netzstroms in Deutschland nach Energiequellen, Stand 1999 /FFE 02/

Der Strombezug zur Aufladung der Traktionsbatterie stellt die Kraftstoffkosten für das ESF dar. Für Endkunden beträgt der Preis je kWh Strom etwa 16 Cent /FFE 02/. Für Kunden mit Sonderverträgen (Nachstrom etc.) oder Großkunden wie Industrieunternehmen können die Stromkosten auch deutlich niedriger liegen.

4.1.8 Wasserstoff (H_2)

Flüssiger oder gasförmiger Wasserstoff wird oftmals bereits als der Energieträger der Zukunft gehandelt, da er fast schadstofffrei umwandelbar (bei der Verbrennung entsteht fast ausschließlich Wasserdampf), regenerativ und durch Elektrolyse aus Wasser einfach herzustellen ist. Ein weiterer Vorteil von Wasserstoff als Energieträger ist, wie bei der Stromerzeugung, die Vielzahl möglicher Erzeugungswege. Die wichtigsten Pfade wurden bereits in /WIB 00/ detailliert untersucht und anhand ihrer Bereitstellungsnutzungsgrade und Kosten bewertet. Dabei wurde zwischen fossilen (inkl. Kernkraft) und regenerativen Erzeugungswegen unterschieden.

Abbildung 4-3 zeigt die wichtigsten Bereitstellungspfade für Wasserstoff in Deutschland:

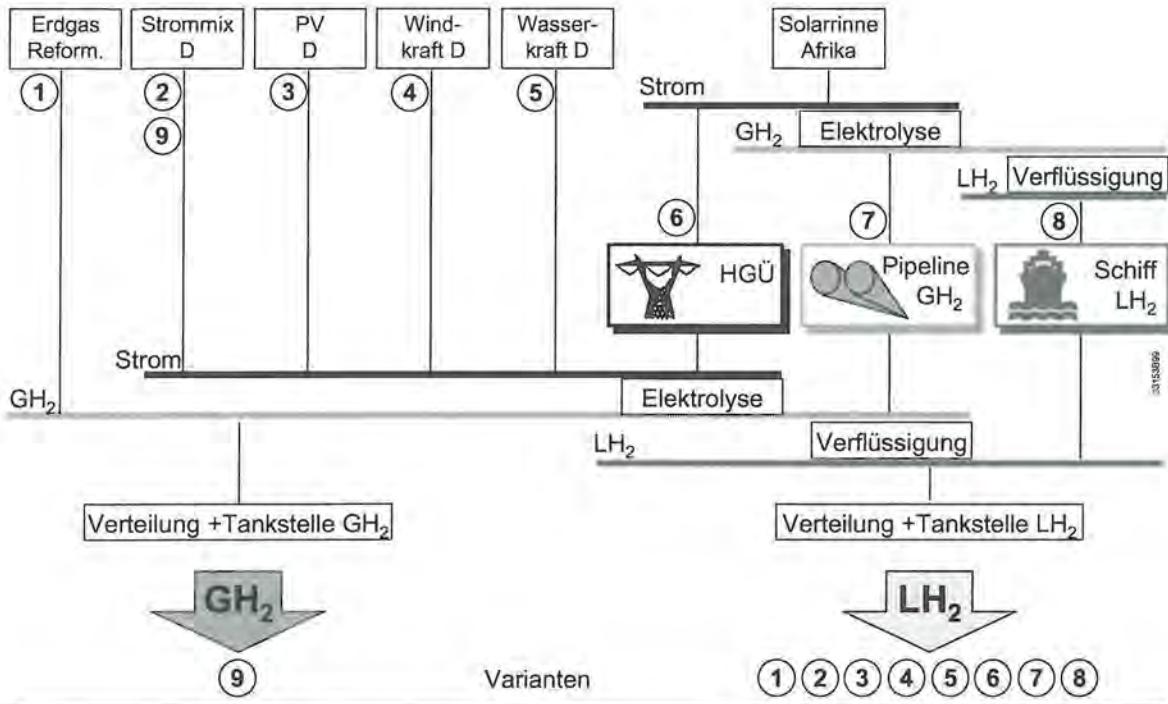


Abbildung 4-3: Prozessketten zur Wasserstoffbereitstellung / WIB 00/

Aus ökologischer Sicht neben einer rationellen Anwendung ist der durch die Bereitstellung verursachte KNRA ausschlaggebend, der in **Abbildung 4-4** für die oben veranschaulichten Pfade dargestellt ist.

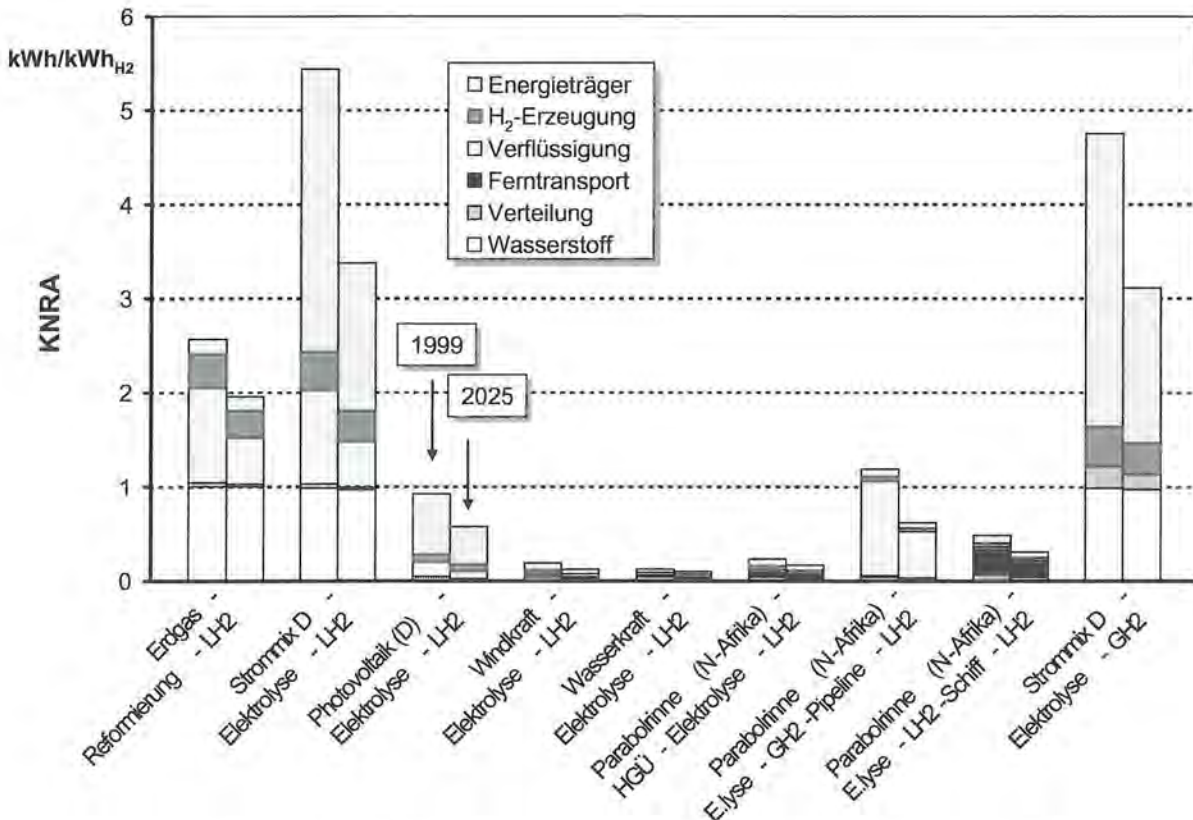


Abbildung 4-4: KNRA verschiedener Wasserstoffbereitstellungspfade / WIB 00/

Betrachtete Herstellungspfade für Wasserstoff

Unter den regenerativen Bereitstellungspfaden stellten die Erzeugung aus Wasser- und Windkraftstrom mittels Elektrolyse aus primärenergetischer Sicht die beste Lösung dar. Unter den konventionellen (fossilen) Erzeugungsmethoden ist die Reformierung von Erdgas zu Wasserstoff energetisch deutlich rationeller als die Erzeugung durch Elektrolyse mittels Strom aus dem deutschen Kraftwerks-Mix, der bislang von fossilen Energieträgern dominiert wird und relativ hohe Umwandlungsverluste aufweist. Die großtechnische LH₂-Erzeugung beispielsweise in sog. „Peak-Shaving-Anlagen“ vermeidet kostenintensive Leistungsspitzen und ermöglicht bessere Wirkungsgrade

Als in dieser Studie näher zu untersuchende Wasserstoff-Bereitstellungsketten für den mobilen Einsatz wurden daher einerseits die großtechnische Reformierung von Erdgas, als heute am meisten praktizierte Methode, sowie die Elektrolyse von Wasser mit Windkraftstrom gewählt, da sich im Bereich der Windkraft im Gegensatz zur Wasserkraft noch hohe Ausbaupotenziale finden.

Zu einer flächendeckenden Versorgung mit Wasserstoff in ausreichendem Maße wäre allerdings der Aufbau einer vollständig neuen Infrastruktur notwendig. Bis dahin ist die Erzeugung und der Transport von Wasserstoff vergleichsweise kostenintensiv und die Verfügbarkeit als Fahrzeugtreibstoff nicht gegeben.

4.2 Primärenergetischer Bereitstellungsaufwand der Kraftstoffe

Der Bereitstellungsaufwand der untersuchten Kraftstoffe erfolgt in Form des spezifischen KEA bzw. dessen Kehrwert, dem Bereitstellungsnutzungsgrad (b). Diese Kennzahlen enthalten alle vorgelagerten Prozessketten und verbinden damit bei fossilen Kraftstoffen die Aufwendungen für die Exploration und Erschließung von Lagerstätten, die (Weiter-)Verarbeitung, den Transport und die Lagerung / Speicherung, sowie stoffliche (Abdampf-)Verluste und Hilfsenergieverbräuche.

Bei den biogenen Kraftstoffen ist der herstellungsbedingte Primärenergieaufwand in der Regel höher, als bei fossilen Kraftstoffen. Dies beruht auf der Tatsache, dass biogene Kraftstoffe erst durch aufwendige Prozesse (Umesterung, Vergasung etc.) umgewandelt oder synthetisiert werden müssen, während fossile Energieträger bereits in Rohform zur weiteren Verarbeitung (Reinigung, Raffination etc.) bereitstehen. Im Grunde ist daher nicht der KEA die ausschlaggebende Größe zur Bewertung der Umweltverträglichkeit, sondern der KNRA, bzw. der „kumulierte regenerative Aufwand“ (KRA), da regenerative Energie im Allgemeinen zur Genüge und kostenlos in verschiedenen Formen zur Verfügung steht und aus einem, auf endliche Sicht, geschlossenem Stoffkreislauf stammt. **Tabelle 4-1** zeigt die verschiedenen Aufwendungen zur Bereitstellung der untersuchten Energieträger im Vergleich.

Tabelle 4-1: *KEA und Bereitstellungsnutzungsgrad b der betrachteten Energieträger*

Energieträger	Spez. KEA	b in %
Super-Benzin	1,169	85,6
Erdgas (CNG)	1,200	83,3
Flüssiggas (LPG)	1,136	88,1
Methanol aus Erdgas	1,703**	58,7
Methanol aus Waldrestholz	3,105**	32,2
Dieselmotortreibstoff	1,118	89,4
RME ohne KOP*	2,171**	46,1
RME inkl. KOP*	1,361**	73,5
Strom BRD-Mix	3,109	32,2
Flüssigwasserstoff (LH ₂) aus Erdgas	1,807**	55,3
Flüssigwasserstoff (LH ₂) aus Windkraft (Elektrolyse)	1,677**	59,6

* energetische Bewertung der Koppelprodukte (Gutschrift)

** /IFE 02/

In **Abbildung 6-2** in **Kapitel 6.2.2** werden zudem die Bereitstellungsnutzungsgrade und die Endenergieverbräuche der einzelnen Kraftstoff-/Fahrzeug-Kombinationen gegenübergestellt.

Grundsätzlich ist meist die Wirtschaftlichkeit der entscheidende Faktor, ob sich ein Energieträger auf Dauer etabliert oder nicht. Dabei fungiert immer mehr die wirtschaftspolitische Weichenstellung als Steuerungsinstrument durch die (möglichst zukunftsorientierte) Besteuerung der Energieträger.

5 Untersuchte Antriebssysteme

Knapp 16 % (Stand 2002) der in Deutschland zugelassenen Pkw werden mit Dieselmotor betrieben und ein großer Teil davon käme entsprechend für die Umrüstung auf Biodiesel (RME) in Frage, während die 84,3 % /KBA 02/ Otto-Pkws prinzipiell für bivalenten Betrieb mit den hier betrachteten alternativen Kraftstoffen geeignet wären und damit ein wesentlich höheres Nachrüstpotenzial darstellen. Technisch möglich aber aufwendiger und daher unwirtschaftlicher ist die Umrüstung von Dieselmotoren auf Erdgas- oder Methanol-Betrieb.

Grundsätzlich lässt sich qualitativ die Aussage treffen, dass nachträglich auf Erdgas-Betrieb umgerüstete oder bivalent betriebene Fahrzeuge (Retrofit) gegenüber monovalenten und vom Hersteller direkt für den alternativen Kraftstoff optimierten Fahrzeugen (OEM Original Equipment Manufacturer) vom Endverbrauch her ungünstigere Werte aufweisen.

Die hauptsächlich in den 90er Jahren favorisierten hybriden Antriebssysteme, d. h. die Kombination eines Elektro- und eines Verbrennungsmotors in einem Fahrzeug, sind heute weniger von Interesse, da langfristig die Spezialisierung auf ein Antriebskonzept angestrebt wird, das gegenüber den Hybriden deutliche Gewichts-, Wartungs- und Kostenvorteile aufweist. Als grundlegende Motorvarianten sollen hier deshalb ein Ottomotor, ein Dieselmotor (Selbstzünder) und ein Elektromotor (3-Phasen-Asynchronmotor) zum Einsatz kommen.

Die untersuchten Varianten werden im Folgenden detailliert dargestellt.

5.1 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor

Für die aktuell gebräuchlichste Motorvariante, den Ottomotor, sollen der Einsatz verschiedener Kraftstoffe und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch untersucht werden. Dabei wird zusätzlich zur Basisvariante mit Super-Benzin der Verbrennungsmotor mit Erdgas (CNG), Flüssiggas (LPG) und Methanol betrieben. Dazu sind z. T. erhebliche Anpassungen an Motor, Steuerung und Peripherie notwendig. Beim Selbstzündermotor (Dieselmotor) wird zusätzlich zu konventionellem Dieselmotor der Einsatz von Biodiesel (Rapsmethylester) in umgerüsteten Fahrzeugen betrachtet.

5.1.1 Referenzfahrzeug

Die technischen Daten des Referenzfahrzeugs Volvo V40 in der Basisversion mit Ottomotor sind in **Tabelle 5-1** dargestellt:

Tabelle 5-1: *Kenndaten des Basisfahrzeugs Volvo V40
(Herstellerangaben /VOL 02/)*

Volvo V40	
Basismodell	Volvo V40 1,8i (Kombi)
Leergewicht ¹	1.295 kg
Abmessungen (l * b * h)	4,52 * 1,72 * 1,42
Fahrleistungen	
Höchstgeschwindigkeit	200 km/h
Beschleunigung (0 –100 km/h)	10,5 s
Reichweite ²	870 km
Verbrauch (NEFZ)	6,9 l/100km
Motor	
Typ	1,8 l - Ottomotor, Direkteinspritzung, 4 Zylinder, 16 Ventile
max. Leistung	90 kW / 122 PS
max. Drehmoment	174 Nm

¹ in Basisausstattung, ohne Fahrer und Gepäck

² Rechenwert, NEFZ-Verbrauchswerte vorausgesetzt

5.1.2 Ottomotor mit Euro-Super-Benzin

Marktdurchdringung

Rund 84 % /KBA 02/ der zugelassenen Fahrzeuge in Deutschland sind heute benzinbetrieben. Setzt man als Ziel eine kurzfristige Markteinführung alternativer Kraftstoffe voraus, so liegt hier das größte Potenzial durch Nachrüstung des Pkw-Bestands mit Ottomotor. Die Sinnhaftigkeit einer solchen Aktion aus energetischer Sicht hinsichtlich Ressourcenschonung und Vermeidung von Treibhausgasemissionen wird in dieser Studie untersucht.

Die konventionelle Ottomotor-Variante dient hier als Referenz für die Bewertung aller anderen Antriebssysteme. Dabei wird, um den neuesten Stand der Technik darzustellen, ein Fahrzeug mit Benzin-Direkteinspritzung betrachtet.

Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren konnte in den letzten Jahren durch die Einführung der Direkteinspritzung weiter reduziert werden. Der Trend zu steigenden Motorleistungen und höheren Fahrzeuggewichten kompensiert allerdings die Verbrauchseinsparungen teilweise.

Emissionen

Durch fortschrittliche Katalysatortechnik sind die Emissionen von Ottomotoren heute auf einem sehr niedrigen Niveau. Neufahrzeuge entsprechen heute in der Regel den Anforderungen der Euro4-Norm und sind damit bis Ende 2005 steuerfrei gestellt.

5.1.3 Ottomotor mit Erdgas (CNG)

Marktdurchdringung

Bundesweit sind heute rund 14.000 Fahrzeuge mit Erdgas-Antrieb ausgestattet, meist in bivalentem Betrieb, d. h. die Motoren können auch mit Benzin betrieben werden. In Europa sind es insgesamt ca. 430.000, davon allein 370.000 in Italien. Größtes momentanes Hindernis einer Marktdurchdringung von CNG-Fahrzeugen ist das Fehlen eines flächendeckenden Tankstellennetzes in Deutschland; bisher bieten ca. 350 Tankstellen im Bundesgebiet CNG an. /EWI 02/, /GAS 03/

Nach heutigen Erkenntnissen besteht keine Gefahr durch die im Fahrzeuginnenraum (bzw. Kofferraum) untergebrachten Druckgasbehälter. Die Gasflasche ist sogar eines der stabilsten Teile im Fahrzeug bezüglich der mechanischen Belastbarkeit.

Negativ auf die Akzeptanz wirkt allerdings der hohe Platzbedarf der Gasflasche (meist für 60 oder 80 Liter CNG), die bei Kompaktklasse-Fahrzeugen entweder anstatt der Rücksitzbank (nur noch 2 Sitzplätze) oder im Kofferraum (kaum mehr Zuladung möglich) untergebracht wird. Außerdem bedeutet dieser zweite Speicher an Bord ein Mehrgewicht von etwa 100 kg. Bei Mittelklasse-Limousinen mit Stufenheck, Kombis oder Vans stellt die Unterbringung des Erdgas-Speichers dagegen kein besonderes Hindernis dar. In größeren Fahrzeugen werden zur Erhöhung der Reichweite durch den allgemein höheren Endenergieverbrauch auch zwei Gasflaschen installiert.

Bivalenter Betrieb

Bivalente Erdgasfahrzeuge werden heute bereits von vielen namhaften Automobilherstellern angeboten. Es ist anzumerken, dass bivalente Fahrzeuge im Benzin-Modus gegenüber ihres monovalenten Pendanten einen etwas höheren Kraftstoffverbrauch aufweisen /VOL 02/.

Erdgasfahrzeuge sind gleichermaßen für den Betrieb mit Biogas geeignet, das ebenfalls einen hohen Anteil an Methan (ca. 50...75 %, Rest CO₂) enthält.

Umrüstkosten

Die Umrüstung eines Fahrzeugs von Benzin auf CNG-Betrieb kostet je nach Modell ca. 2.500 bis 3.500 Euro; die Umrüstung wird dabei teilweise von CNG-Tankstellenbetreibern durch die Vergabe von Tankgutscheinen unterstützt.

Kraftstoffverbrauch

Aus der Analyse einiger momentan auf dem Markt befindlicher bivalenter Erdgasfahrzeuge von namhaften Herstellern (Volvo, Ford, Opel etc.) geht hervor, dass im Erdgas-Betrieb rund 15 % mehr Energie bezogen auf die Fahrstrecke verbraucht werden. Einsparpotenziale finden sich bei der Optimierung auf monovalenten Erdgas-Betrieb, allerdings fehlt dazu zurzeit noch das ausreichend engmaschige Tankstellennetz in Deutschland.

Der Volvo V40 verbraucht im Erdgas-Betrieb rund 6 kg Erdgas pro 100 km. Bei der Angabe von Verbrauchswerten in kg pro 100 km beziehen sich die meisten Hersteller auf das sog. H-Gas mit 97 % Methangehalt.

Emissionen

Die Emissionen eines CNG-betriebenen Pkw's sind gegenüber denen eines Benzin-betriebenen um ca. 25 % (für CO₂) und fast 90 % (für andere Luftschadstoffe) reduziert. Die Euro4-Abgasnorm wird dabei erfüllt, d. h. bis Ende 2005 fallen keine Kfz-Steuern an.

5.1.4 Ottomotor mit Autogas (LPG)

Marktdurchdringung

Im europäischen Ausland (Italien, Polen, Niederlande, Frankreich etc.) ist LPG (Liquefied Petroleum Gas), besser unter dem Namen „Autogas“ bekannt, bereits als Standardkraftstoff weit verbreitet. In Italien fahren bereits über 1,2 Mio. Pkw mit Autogas. Derzeit sind in Deutschland rund 12.000 bivalente Autogas-Fahrzeuge im Einsatz, die an den rund 400 /GAS 03/ öffentlichen Tankstellen im Bundesgebiet betankt werden können /IAC 02/. Bis zum Jahr 2010 sollen über 1.000 Tankstellen eine annähernd flächen-deckende Versorgung gewährleisten. Die LPG-Antriebstechnik ist wegen der geringeren Schadstoff-Emissionen um rund 80 % /IAC 02/ gegenüber Benzin-Betrieb bereits bei Hallen-Gabelstaplern weit verbreitet.

Weitere Gründe für die höhere Marktdurchdringung sind zum einen die leichtere Speicherfähigkeit bedingt durch den niedrigeren Siedepunkt von LPG, wodurch es bereits bei relativ niedrigen Drücken oder relativ hohen Temperaturen verflüssigt.

Des Weiteren wird der Drucktank für Autogas in der Regel bis 10 bar betrieben (80 bar Grenzbelastung), während Erdgastanks für über 200 bar ausgelegt werden müssen und damit entsprechend schwerer und teurer sind. Auch die Formgebung des Tanks ist damit stark eingeschränkt.

Zudem fallen bei LPG vergleichsweise geringe energetische Verluste bei der Betankung an, da das CNG zur Betankung aus dem ND-Gasnetz (1, 4 od. 16 bar Vordruck) hoch verdichtet werden.

Letztlich ist der finanzielle Aufwand für eine Erdgasbetankungsanlagen daher auch deutlich höher als für LPG-Betankungsanlagen, die mit ca. 12.500 bis 20.000 Euro Anschaffungskosten auch für kleinere Firmenflotten, Speditionen oder öffentliche Verkehrsbetriebe erschwinglich sind.

Umrüstkosten

Sowohl Otto- als auch Dieselfahrzeuge können prinzipiell auf LPG-Betrieb umgerüstet werden, allerdings ist zurzeit nur die Umrüstung von Otto-Pkws wirtschaftlich sinnvoll. Die Umrüstung eines Großserien-Pkw mit Benzinmotor kostet dabei zwischen 1.750 und 2.500 € /IAC 02/ je nach Fahrzeugmodell, amortisiert sich aber abhängig von der Fahrleistung in wenigen Jahren. Bei der Umrüstung werden ein Druckbehälter (zwischen 35 und 120 Litern), ein Steuergerät mit Druckregler, Mischgerät und Absperrventil sowie ein Umschalter für den Wechsel zwischen Gas und Benzin im Fahrzeug installiert.

Bivalenter Betrieb

Wie bei Erdgas-Fahrzeugen können fast alle Autogas-Fahrzeuge bivalent betrieben werden. Über einen Schalter im Cockpit kann dabei zwischen den Kraftstoffen gewählt werden. Geht einer der Kraftstoffe zur Neige, schaltet die Kraftstoffregelung automatisch auf den anderen Kraftstoff um. Durch dieses bivalente System mit zwei Kraftstoff-tanks lassen sich entsprechend hohe Reichweiten erzielen.

Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch ist stark abhängig vom Entwicklungsstand des LPG-Fahrzeugs und damit auch von der Qualität der nachträglichen Umrüstung. Zurzeit gibt es auf dem deutschen Markt keine Flüssiggasfahrzeuge direkt vom Hersteller, jedoch vertreiben einige namhafte Hersteller, darunter Volvo, Fiat, Renault (PSA), Ford, Saab, Opel und diverse japanische Produzenten, LPG-Fahrzeuge in Frankreich, Italien oder den Niederlanden.

Das Model Volvo V40 mit bivalentem Autogas-Antrieb und moderner Multipoint-Einspritzung dient in dieser Studie als Referenzfahrzeug, da es sich um einen typischen Vertreter der Mittelklasse(-Kombis) handelt, der sowohl als Flüssiggas-, Benzin- und Diesel-Variante mit vergleichbaren Leistungen und Nutzungsmöglichkeiten angeboten wird und sich daher zum energetischen Vergleich der Antriebskonzepte eignet. Durch die Wahl eines Kombi wird zudem der Platzverlust durch Zusatztanks ohne wesentlichen Nutzwertverlust kompensiert. Beim Volvo V40 wird zusätzlich zum 60 Liter Benzintank ein 40 Liter LPG-Tank platzsparend in der Reserverad-Mulde untergebracht, wodurch die Durchlademöglichkeit erhalten bleibt.

Der Verbrauch im LPG-Betrieb liegt laut Erfahrungsberichten von LPG-Fahrzeughaltern um ca. 5 bis 30 % über dem Benzinverbrauch, wobei ältere nachgerüstete Fahrzeuge, die nicht dem neuesten Stand der Technik entsprechen, hier die obere Grenze markieren. Grundsätzlich bestehen auch beim Einsatz von LPG noch hohe Optimierungspotenziale, die F&E der Automobilhersteller konzentriert sich jedoch in der Regel mehr auf die konventionellen Techniken, bzw. auf die Entwicklung von Fahrzeugen mit Wasserstoff-Antrieb.

Der volumetrische Mehrverbrauch des Fahrzeugs im LPG-Betrieb (Volvo V40 1,8 Bi-Fuel: 10,4 l/100km) gegenüber dem Benzin-Betrieb liegt bei etwa 26 %. Endenergetisch liegen die Verbräuche dagegen etwa auf demselben Niveau, bedingt durch den niedrigeren spezifischen Energieinhalt von LPG gegenüber Benzin.

Im Vergleich mit dem modernen Direkteinspritzer-Motor ergibt sich jedoch ein energetischer Mehrverbrauch von rund 20 %.

Zudem sind im LPG-Betrieb geringe Leistungseinbußen von bis zu 10 % möglich, so hat der Volvo V40 im LPG-Modus nur 87 kW/117 PS gegenüber 90 kW/122 PS im Benzin-Betrieb /VOL 02/. Dieser Leistungsverlust macht sich allerdings nur bei den Maximalgeschwindigkeiten bemerkbar, da der verbesserte Drehmomentverlauf im LPG-Betrieb eine gleichwertige Beschleunigung bietet.

LPG bietet insgesamt beim Einsatz als Pkw-Kraftstoff Potenziale zur Reduktion der streckenabhängigen Betriebskosten, da zwar der Verbrauch ansteigt, jedoch der Preis für Flüssiggas deutlich unter dem Benzinpreis liegt.

Emissionen

Der CO₂-Ausstoß bei LPG-Betrieb ist um ca. 15 % /LAC 02/ geringer gegenüber Benzinmotoren. Die Euro4-Norm wird durch den niedrigen Schadstoffgehalt (Partikel, Benzole, Ruß, NO_x) im Abgas sogar unterschritten, wodurch sich die Kfz-Steuerbelastung erheblich reduziert.

Zudem trägt die weiche Verbrennung des LPG durch geringe Lärmemissionen und Motorschonung zur Senkung von Wartungskosten und Akzeptanz von LPG als Kraftstoff bei.

5.1.5 Ottomotor mit Methanol

Methanol kann grundsätzlich wie auch Ethanol in Diesel- und Ottomotoren als Kraftstoff verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur der aussichtsreichere Einsatz in Ottomotoren untersucht.

Marktdurchdringung

In den USA wurden besonders in Kalifornien in den 80er und 90er Jahren diverse Versuche zur Einführung von Methanol-Fahrzeugen unternommen; dabei wurden mehr als 15.000 sog. FFVs (Flexibel Fuel Vehicles) von namhaften Herstellern (u. a. VW) produziert. Einziger Serien-Pkw war der Ford Taurus FFV, der allerdings 1998 eingestellt wurde /LBS 02/. Methanol wurde dabei meist als sog. M-85, d. h. als Mischung aus 85 % Methanol und 15 % Benzin eingesetzt, es konnte aber auch mit reinem Benzin gefahren werden, wenn kein MeOH verfügbar war. Der Methanolabsatz ist allerdings rückläufig.

Trotz einiger erfolgreicher Feldversuche auch in Deutschland aus den 70er und 80er Jahren wird Methanol heute in erster Linie als Brennstoff für DMFCs (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle) oder PEM-Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reformier anstatt im direkten Einsatz in Verbrennungsmotoren untersucht.

Umrüstkosten

Derzeit gibt es keine Umrüst-Kits für Benzinfahrzeuge auf Methanol-Einsatz auf dem Markt, da hier größerer Anpassungsmaßnahmen am Fahrzeug (größerer Tank, Einsatz MeOH-resistenter Materialien, konstruktive Änderungen am Einspritzsystem etc.) erforderlich sind.

Kraftstoffverbrauch

Der Einsatz von Alkoholkraftstoffen (Methanol, Ethanol) führt bei dafür optimierten Motoren zu Erhöhung des Wirkungsgrads und der Maximalleistung des Motors (bis ca. 20 %), da die höhere Oktanzahl eine erhebliche Erhöhung der Verdichtung zulässt. Der Energieverbrauch sinkt dabei gegenüber Benzinmotoren um 15 bis 20 % /DER 00/. Dies beruht auf der Senkung der Wärmeverluste durch die Herabsetzung der Verbrennungstemperatur, die durch die Verdunstungskälte des teilweise noch flüssig eingespritzten Kraftstoffs erfolgt. Der erreichbare Wirkungsgrad von MeOH-Verbrennungsmotoren wird mit ca. 26 % /LBS 02/ etwa gleich hoch wie der von zukünftigen Dieselmotoren abgeschätzt.

Emissionen

Die CO₂-Emissionen sinken durch den Einsatz von Methanol insgesamt um etwa 60 % gegenüber konventionellen Ottomotoren im Benzin-Betrieb /DER 00/.

5.1.6 Turbo-Dieselmotor mit konventionellem Dieselkraftstoff

Marktdurchdringung

Knapp 16 % /KBA 02/ der zugelassenen Pkw auf deutschen Straßen fahren mit Diesel, sogar mehr als ein Drittel /IAC 02/ der Neuwagen besitzen Dieselmotoren. Der Anteil von Dieselfahrzeugen auf dem PKW-Weltmarkt liegt dagegen bei nur 5 % und stellt damit ein Nischenprodukt dar. Lediglich auf wenigen Märkten mit politisch niedrig angesetztem Dieselpreis (zur Kompensation der hohen Kraftfahrzeugsteuer auf Dieselfahrzeuge) erreicht er höhere Anteile. In Ländern in denen Benzin und Diesel gleich viel kosten (z. B. in den USA, Japan oder der Schweiz), entscheiden sich nur wenige Käufer für Dieselfahrzeuge.

Kraftstoffverbrauch

Der Dieselmotor besitzt in der Regel einen volumetrischen Verbrauchsvorteil von 15 bis 20 % gegenüber dem Benziner. Dieses Verhältnis blieb durch die technischen Fortschritte beider Motorentypen (Direkt-Einspritzung, Pumpe-Düse, Turboaufladung etc.) in etwa erhalten.

Der in dieser Studie betrachtete Common-Rail-Dieselmotor mit Direkt-Einspritzung aus dem Volvo V40 leistet 85 kW/115 PS und verbraucht rund 5,4 l/100 km im NEFZ.

Emissionen

Klimarelevant ist jedoch die CO₂-Menge im Abgas. Hier produziert der Diesel ebensoviel Emissionen wie der Ottomotor, während ein Liter Benzin bei der Verbrennung ca. 2,32 kg CO₂ erzeugt, emittiert ein Dieselmotor pro Liter aufgrund der höheren Dichte von Diesel und des Kohlenstoffgehaltes 2,63 kg CO₂. Damit wird pro Liter Diesel 13,4 % mehr CO₂ ausgestoßen als pro Liter Benzin. Der CO₂-Vorteil liegt somit nur noch bei 2 bis 7 % /FFE 02/.

5.1.7 Turbo-Dieselmotor mit Biodiesel

Marktdurchdringung

An rund 1.000 der etwa 16.000 öffentlichen Tankstellen in Deutschland /NDR 00/ - vor allem in ländlichen Regionen – wird Biodiesel angeboten.

Einige Hersteller bieten bereits einzelne Biodiesel-taugliche Fahrzeuge ab Werk an, darunter v.a. Fahrzeuge des VW-Konzerns, Volvo und Mercedes-Benz.

Umrüstkosten

Grundsätzlich lassen sich fast alle Diesel-Pkw ohne großen Aufwand auf RME-Betrieb umrüsten (Umrüstsätze ab ca. 100 Euro plus Einbau). Da RME aggressiver ist als Mineralöl-Diesel, wird das Kraftstoffsystem mit RME-beständigen Werkstoffen ausgestattet. Ein Einsatz in herkömmlichen, nicht für RME freigegebenen Dieselfahrzeugen ist nicht zu empfehlen.

Bei Frost kann die Viskosität von RME zu hoch werden, so dass zusätzlich normaler Diesel beigemischt werden muss oder komplett auf Mineralöl-Diesel umgestiegen werden muss. Hiervon sind in Europa in erster Linie die nördlichen Länder und Alpenregionen betroffen.

Kraftstoffverbrauch

Der Endenergieverbrauch liegt auf dem Niveau des konventionellen Dieselmotors, allerdings steigt der volumetrische Verbrauch durch den etwas geringeren spezifischen Energieinhalt des RME entsprechend an.

Emissionen

Die direkten Emissionen bei der Verbrennung von RME in Dieselmotoren sind vergleichbar mit der konventionellen Variante. Die Karzinogenität der Partikel ist laut verschiedener Studien geringer als bei Dieselmotoren.

5.2 Elektrofahrzeug

5.2.1 Referenzfahrzeug

Hier soll ein vom Ford Forschungszentrum Aachen (FFA) in Zusammenarbeit mit dem französischen Batterienhersteller SAFT entwickeltes ESF betrachtet werden.

Der Ford e-Ka wurde in erster Linie als sog. Technologieträger, als Demonstrationsfahrzeug entwickelt, das das momentan technisch Machbare aufzeigt. Eine finanzielle Wirtschaftlichkeit ist bei Prototypen nicht gegeben, da die Investitionskosten in erheblichen Größen erreichen.

Dem heutigen Stand der Technik entsprechend kommt im Ford e-Ka ein Lithium-Ionen-Akku als die momentan aussichtsreichste Batterietechnik für den mobilen Einsatz zur Anwendung. Dieser Batterietyp zeichnet sich vor allem durch eine relativ hohe Energiedichte aus, die bei Elektrofahrzeugen besonders wichtig ist, da sie das Verhältnis von Reichweite und Fahrzeuggewicht maßgeblich beeinflusst. Der Akku ist aufgeteilt auf drei versiegelte Tröge, wovon einer sich im Motorraum befindet, die zwei weiteren jeweils direkt vor und hinter der Hinterachse.

Des Weiteren wurde das Fahrzeug durch Einsatz von High-Tech-Materialien (Hylite, Aluminium) und durch Reifen mit geringem Rollwiderstand verbrauchsoptimiert.

Alle Nebenaggregate werden ebenfalls elektrisch betrieben (z. B. elektro-hydraulische Bremskraftverstärker, Batterie- und Innenraumheizung, elektrische Servolenkung, DC-DC-Wandler für das 12V-Bordnetz etc.).

Aus Platz- und Gewichtsgründen wurde auf ein Reserverad verzichtet.

Momentan befinden sich die zwei gebauten Prototypen im Langzeit-Alltagstest, um die Haltbarkeit und Leistungsfähigkeit des Akkus zu testen. Hier gab es bisher nach ca. zwei Jahren keine Anzeichen auf Verringerung der Kapazität.

Die technischen Daten dieses auf Basis eines Ford Ka aufgebauten Fahrzeugs sind in **Tabelle 5-2** dargestellt:

Tabelle 5-2: *Kenndaten des Referenz-Elektrofahrzeugs Ford e-Ka / FFA 02/*

Ford e-Ka	
Basismodell	Ford Ka
Leergewicht Basisfahrzeug	890 kg
Leergewicht Elektrofahrzeug	1.134 kg
Fahrleistungen	
Höchstgeschwindigkeit	130 km/h (elektrisch abgeregelt)
Beschleunigung (0 –100 km/h)	12,7 s
Reichweite*	181 km
Motor	
Typ	3-Phasen-Asynchron-Motor
max. Leistung	65 kW/88 PS
Drehmoment	190 Nm
Batterietechnik	
Typ	Lithium-Ionen-Akku (180 Zellen, 30 Module)
Gewicht	280 kg (inkl. Tröge und Klimatisierung)
Energieinhalt	28,0 kWh (bei Entladung bis DOD 90%)
max. Ladeleistung	6,8 kW (bei Rekuperation etwas höher)
Ladedauer (0-100%)	6...8 h (Schnellladung in 4 h möglich)
Energiedichte	126 Wh/kg bzw. 197 Wh/dm ³

*im NEFZ am Prüfstand (exklusive Verbrauch der Nebenaggregate)

Obwohl der e-Ka nicht als Mittelklasse-, sondern als Kompaktklasse-Fahrzeug einzuordnen ist, bewegt sich sein Gewicht sogar leicht über dem Niveau des Standard-Mittelklasse-Pkw (Stand 1990) nach /KIR 96/ mit 1070 kg.

5.2.2 Marktdurchdringung

Die Entwicklung von rein elektrisch betriebenen Pkws mit Batteriespeicher ist in den letzten Jahren von Seiten einiger Automobilhersteller zugunsten von Forschungsprojekten mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen stark reduziert worden. Dies ist hauptsächlich auf das Fehlen von konkurrenzfähigen Elektrostraßenfahrzeugen zurückzuführen. Die Ursachen sind hauptsächlich in einer Reihe noch ungelöster technischer Probleme, wie der geringen Reichweiten durch die relativ niedrige spezifische Energiedichte der Traktionsbatterien, sowie den hohen Kosten, zu finden.

Durch den Einsatz neuer Batterietechniken wie der Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ion-Akkus) kann nun die Reichweite erhöht und das Batteriegewicht verringert werden. Allerdings wurde dieser Batterietyp bisher fast ausschließlich in portablen Applika-

tionen (z. B. Handys, Kameras) eingesetzt. Prototypen von Traktionsbatterien auf Lithium-Ionen-Basis sind daher noch sehr teuer. Hier müsste eine eventuelle spätere Serienproduktion zu einer erheblichen Kostenreduktion führen, um Li-Ion-Akkus wirtschaftlich in Elektrofahrzeuge implementieren zu können. Nach heutiger Einschätzung wird es aber nicht zu mit VM vergleichbaren Kosten führen.

Daher werden ESF mittelfristig auf Nischenanwendungen beschränkt bleiben, wie den Einsatz in Naturschutzgebieten, Innenstädten oder in-door-Applikationen, wo jeglicher lokaler Schadstoffausstoß zu vermeiden ist.

5.2.3 Traktionsbatterie

Lithium-Ionen-Akkumulatoren zeichnen sich durch eine sehr geringe Selbstentladung, hohe spezifische Energiedichten (ca. 120 Wh/kg) und ausreichend spezifische Leistung (bis ca. 200 W/kg) für den Einsatz als Traktionsbatterie aus. Wichtig ist vor allem auch die hohe Lebensdauer des Akkus von ca. 1000 Vollzyklen laut Hersteller SAFT aus Frankreich, die hier in etwa der Lebensdauer des Fahrzeugs mit 150.000 km Gesamtfahrleistung in zehn Jahren entsprechen. Zudem besitzen Li-Ion-Akkus keinen Memoryeffekt wie beispielsweise NiCd-Akkus, d. h. dass bei nur teilweiser Entladung die Kapazität irreversibel abnimmt. Bei Schnellladung kann der leere Akku in ca. vier Stunden vollständig geladen werden.

Die Traktionsbatterie des Ford e-Ka wird ständig durch ein eigens entwickeltes Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht, u. a. da Lithium-Ionen-Akkus sehr empfindlich auf Überladung reagieren. Diese ist ein Nachteil der Lithium-Ionen-Technik gegenüber anderer Batterietechniken, da das BMS auch einen (geringen) Eigenstromverbrauch besitzt. Weiterhin steuert das BMS den Ladungsausgleich zwischen den einzelnen Zellen, um den maximalen Ladezustand zu erreichen. Der zulässige Temperaturbereich liegt bei ca. 0 bis 55 °C, davon abhängig steigt die Kapazität der Batterie bis zu einer optimalen Betriebstemperatur an und bleibt auf diesem Niveau bis zur Maximaltemperatur /LIT 99/.

Das BMS sorgt bei Unterschreiten einer Außentemperatur von 4 °C für die Beheizung der Batterie, um eventuelle Schäden durch Frost zu vermeiden und ständige Verfügbarkeit zu gewährleisten. Härtetests haben jedoch gezeigt, dass die Batterie auch bei -10 °C noch entgegen der Herstellerangaben einsatzfähig ist, wenngleich mit geringerer Kapazität /FFA 02/.

Langfristig wird mit einer Kostenreduktion des Li-Ion-Akkus von derzeit noch etwa 1.250 €/kWh auf ca. 650 €/kWh gerechnet /LIT 99/. Die hier verwendete Batterie mit 28 kWh Speicherkapazität würde in Serienproduktion zukünftig immer noch etwa 18.200 € kosten und damit bereits auf dem Preisniveau heutiger konventioneller Kompaktklasse-Pkws liegen. Ein ESF wäre demnach etwa doppelt so teuer wie ein vergleichbares konventionell betriebenes Fahrzeug.

5.2.4 Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch wird beim ESF maßgeblich von folgenden drei Faktoren beeinflusst:

Fahrenergieverbrauch

Der eigentliche Energieverbrauch für den Vortrieb des Fahrzeugs hängt im Wesentlichen von Faktoren wie Fahrzeuggewicht, Roll- und Luftwiderstand, Wirkungsgrad des Antriebssystems und dem individuellen Fahrverhalten ab. Beim ESF trägt hier zur Verringerung des Fahrenergieverbrauchs die Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation) bei, die während der Fahrt bei Bremsvorgängen einen Teil der Bewegungsenergie in die Batterie zurückspeist und somit die Auswirkungen des individuellen Fahrverhaltens reduziert. Dabei wirkt der Motor als Generator.

Durch Reduktion des Fahrzeuggewichts kann durch hohen Kapital- und Energieaufwand zur Herstellung des Fahrzeugs der Endenergieverbrauch gesenkt werden. Da hier jedoch nur der energetische Aufwand vorverlagert wird, muss das Einsparpotenzial beim Einsatz von Leichtbauweise jeweils gesondert geprüft werden. Nach /AUD 93/ rechnet sich beispielsweise eine Aluminiumkarosserie erst ab hohen Laufleistungen, da der energetische Mehraufwand zur Herstellung enorm ist.

Um mit den übrigen hier untersuchten Varianten vergleichbare Alltagstauglichkeit und damit vor allem ausreichende Reichweiten zu bieten, sollte der Energieinhalt der Traktionsbatterie für mindestens 300 km ausgelegt sein. Bei dem streckenspezifischen Endenergieverbrauch von ca. 15,6 kWh/100km (inklusive der rekuperierten Bremsenergie) des Ford e-Ka unter Vernachlässigung zusätzlicher Energieverbraucher und zyklusbedingter Verluste (z. B. Lade-/Entladeverluste) wäre ein Speicherinhalt der Traktionsbatterie von mindestens 46,8 kWh nötig. Ganz abgesehen vom sehr hohen Preis wäre dieser Akku zur Realisierung einer Reichweite von 300 km zu schwer für den Einsatz in Mittelklasse-Fahrzeugen. Das zusätzliche Gewicht des Akkus würde zusätzlich tendenziell den Energieverbrauch weiter anheben und gleichzeitig die Reichweite senken.

Bereitstellungsnutzungsgrad des Ladestroms

In dieser Untersuchung wird die Traktionsbatterie mit Netzstrom aus dem deutschen Strommix aufgeladen. Alternativ wäre der Bezug von rein regenerativ erzeugtem Strom denkbar. Dies könnte die Energiebilanz des ESF deutlich verbessern, da regenerativer Strom in der Regel einen wesentlich höheren Bereitstellungsnutzungsgrad besitzt, der beim ESF mehr als 50 % der Energieaufwendungen während der Nutzungsphase verursacht.

Zyklusnutzungsgrad der Batterie

Durch Selbstentladung, Eigenverbrauch des BMS, Batterieklimatisierung und Lade-/Entladeverluste (Wärmeverluste am Innenwiderstand) des Li-Ion-Akkus treten nicht unerhebliche energetische Verluste auf. Die Höhe dieser Verluste hängt in starkem Maße von der Häufigkeit und Intensität der Nutzung ab, d. h. je höher die jährliche Fahrleistung des Fahrzeugs liegt, desto kleiner sind die Verluste im Verhältnis zur verbrauchten Fahrenergie. Diese Größe wird als Zyklusnutzungsgrad bezeichnet.

Hierbei spielt die durchschnittliche Außentemperatur der Nutzungsregion eine große Rolle, da davon die Energieaufwendungen für die Beheizung der Batterie während der Standphasen abhängen. Da der Akku vor Frost geschützt werden muss, ist insbesondere in Regionen mit häufigen Frostperioden, sofern kein beheizter Garagenstellplatz zur Verfügung steht, der Akku aus eigenem Antrieb oder aus dem Netz beheizt werden, um keinen Schaden zu nehmen und ständig einsatzbereit zu sein. Da der Akku alleine durch sein Gewicht von 280 kg eine bedeutende Wärmekapazität besitzt, ist hier ein bedeutender Energieeinsatz nötig. Der Anteil dieser Verluste am KEA_N kann dabei in Abhängigkeit der täglichen Fahrleistung deutlich im zweistelligen %-Bereich liegen /RÜG 96/.

Zum anderen benötigen Nebenaggregate wie die im ESF elektrische Innenraumbeheizung mangels ausreichender Abwärme des Motors oder eine Klimaanlage zusätzlich große Mengen an Strom, die entsprechend aus der Traktionsbatterie entnommen werden müssen. Dies würde die Reichweite des Fahrzeugs z. T. erheblich reduzieren. Um den Energieverbrauch der Nebenaggregate in Grenzen zu halten, sind ESF in der Regel nicht mit besonders energieintensiven Sonderausstattungen wie Klimaanlage oder Sitzheizung ausgerüstet. Die Nebenverbraucher werden hier pauschal mit 3 %-Punkten Anteil am Zyklusnutzungsgrad abgeschätzt (wie auch beim BZ-Fahrzeug).

Der Wert für den Zyklusnutzungsgrad soll hier nach /LIT 99/ mit 72,6 % für mittlere Nutzungsintensität abgeschätzt werden.

Im Einzelfall kann dieser Wert auch deutlich niedriger und damit ungünstiger liegen. Diese Verluste sind vergleichbar mit den Abdampfverlusten bei der Betankung und Speicherung von Flüssigwasserstoff (vgl. **Kapitel 4.1.8**).

Das individuelle Fahrverhalten fließt ebenfalls in den Zyklusnutzungsgrad ein; hier wird ein Fahrer angenommen, der die vom Hersteller angegebenen Verbrauchswerte im NEFZ erreicht.

5.2.5 Emissionen

Das Potenzial zur Treibhausgas-Reduktion durch Elektrofahrzeuge hängt im Wesentlichen vom Erzeugungsmix des verwendeten (Netz-) Stroms ab. Der Strombedarf in Deutschland wird zurzeit zu rund 5 % aus regenerativen Energiequellen gedeckt, so dass der deutsche Netzstrom bereits durchschnittlich rund 600 g/kWh_{el} an CO₂-Emissionen verursacht /FFE 02/.

Demgegenüber kann ein mit rein regenerativem Strom betriebenes ESF nahezu emissionslos eingesetzt werden.

5.3 Brennstoffzellen-Fahrzeug

5.3.1 Referenzfahrzeug

Hier soll ein Fahrzeug mit PEM-Brennstoffzelle und Flüssigwasserstoff (LH₂)-Tank betrachtet werden. Dabei werden die bisher veröffentlichten Daten des Prototypen Opel Zafira HydroGen verwendet.

Das 60 kW/82 PS starke und ca. 150 km/h schnelle BZ-Fahrzeug führt in einem zylinderförmigen, mit Glasfasermatten isolierten, Edelstahl-Tank rund 75 Liter flüssigen Wasserstoff mit sich und erreicht damit Reichweiten von ca. 400 km /OPE 01/.

5.3.2 On-Board-Speicherung von Wasserstoff

Insbesondere die On-Board-Speicherung von Wasserstoff ist weiterhin eine technische Herausforderung. Dabei bieten sich grundsätzlich zwei Speicherarten an.

Einerseits im flüssigen Aggregatzustand und somit deutlich höherer Energiedichte, andererseits als komprimierter Wasserstoff (CH_2) in Druckgastanks. Dabei ist der Speicherdruck der entscheidende Faktor für die verfügbare Energiemenge eines Tankinhalts und somit die Reichweite des Fahrzeugs.

Da Wasserstoff erst bei -253 °C in den flüssigen Aggregatzustand übergeht, muss ein geeigneter Flüssigwasserstoff-Tank besondere Isolationsvermögen besitzen oder für extreme Drücke ausgelegt werden. Dabei werden verschiedene Lösungsansätze verfolgt, vorwiegend doppelwandige, vakuumisolierte Edelstahl- oder Aluminium-Tanks, die zusätzlich durch dünne Aluminiumfolien den Tankinhalt gegen Wärmestrahlungseinträge schützen. Neueste Systeme arbeiten auch mit isolierenden Zwischenschichten aus flüssiger Luft oder Stickstoff unter Ausnutzung des Phasenübergangs.

Der unvermeidlich verbleibende Wärmeeintrag bedingt durch die hohe Temperaturdifferenz zwischen Tankinhalt und Umgebung bewirkt durch den verdampfenden Wasserstoffanteil eine stete Druckerhöhung im Tank, so dass ab ca. 2 bis 3 bar Überdruck das Wasserstoffgas über ein automatisches Ventil in die Umgebungsluft entspannt werden muss. Bei längeren Stillstandszeiten geht dadurch ein beachtlicher Teil des Tankinhalts verloren; diese sog. Abdampfverluste belaufen sich pro Tag auf etwa 1 % /UMI 02/ bzw. 1,5 bis 2 % /LIN 97/ des gesamten Tankinhalts. Die Verluste durch Abdampfen halten sich bei Flottenfahrzeugen mit täglicher Nutzung in vertretbaren Grenzen, können aber bei nur sporadisch genutzten (privaten) Pkws unwirtschaftliche Ausmaße erreichen.

Durch den Einsatz von Wasserstoff-Druckspeichern können diese Abdampfverluste vermieden werden. CH_2 besitzt gegenüber der Wasserstoffspeicherung in flüssiger Form jedoch den Nachteil, dass die Energiespeicherdichten bei Drücken von üblicherweise ca. 300 bar noch deutlich unter denen von LH_2 -Speichern liegen. Neue Drucktanks können mit Drücken bis 700 bar beaufschlagt werden und erreichen damit fast die gleichen Energiespeicherdichten wie Flüssigwasserstofftanks. Diese Speichermöglichkeit stellt durch den extrem hohen Druck aber gleichzeitig auch ein nicht unerhebliches Gefahrenpotenzial dar.

Teil dieser Studie ist zwecks Einschränkung der Variantenvielfalt nur die Speicherung von Flüssigwasserstoff.

5.3.3 Weitere Aspekte

Der Einsatzbereich, für den BZ-Fahrzeuge konzipiert werden, ist grundsätzlich nicht wie bei Elektrofahrzeugen bisher üblich, der rein innerstädtische Einsatz. BZ-Fahrzeuge sollen gerade zur Überwindung der Beschränkungen eines Batteriespeichers die-

nen und dementsprechend vergleichbare Reichweiten und Höchstgeschwindigkeiten (Leistungen) bieten wie konventionell angetriebene Pkws.

Durch die direkte Betankung mit Wasserstoff wird kein Reformer an Bord benötigt. Das hat den Vorteil, dass das Fahrzeuggewicht geringer ist und weniger Platz verbraucht wird.

Probleme bereitet den Herstellern momentan auch noch der Einsatz von BZ-Fahrzeugen bei Frost. Daher wird die Brennstoffzelle bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt beheizt. Die Lösung dieses Problems verspricht ein wasserfreier PEM-Stack, der in den nächsten Jahren verfügbar sein wird.

5.4 Rekuperation

Bei elektromotorisch betriebenen Fahrzeugen besteht die Möglichkeit, die beim Bremsen anfallende Energie zu nutzen. Dabei wird die Bewegungsenergie nicht wie beim normalen Bremsvorgang durch die mechanische Bremse in ungenutzte Wärme umgewandelt, sondern wird über den Elektromotor im Generatorbetrieb wieder in elektrische Energie in Strom umgewandelt. Im ESF wird die rekuperierte Bremsenergie in die Traktionsbatterie eingespeichert.

Beim BZ-Fahrzeug ist ggf. ein eigener Zwischenspeicher erforderlich, der in der Lage ist, die hohen, aber kurzfristigen Leistungen aufzunehmen. Für diesen Zweck wurden spezielle Kondensatoren, sog. Superkapazitor (SuperCaps), entwickelt. Diese Hochleistungs-Dünnschicht-Kondensatoren arbeiten als Pufferspeicher mit spezifischen Leistungsdichten bis ca. 1.000 W/kg und einer Energiedichte von nur 3 Wh/kg, allerdings ist ein zusätzlicher Leistungssteller erforderlich.

Alternative mechanische Speicher wie Schwungräder sind im Pkw aus Gewichtsgründen unvorteilhaft und werden nicht praktiziert.

In dieser Untersuchung ist nur das ESF mit einer Nutz-Bremse ausgestattet, die über den Motor/Generator direkt in die Traktionsbatterie rückspeist. Das BZ-Fahrzeug hat diese Funktion nicht. Erste Prototypen von BZ-Fahrzeugen benötigten noch eine Pufferbatterie, da die BZ die schnellen Lastwechsel des Antriebsmotors dynamisch nicht bedienen konnte. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der BZ-Technik konnte die Dynamik verbessert und somit auf einen zusätzlichen Batteriespeicher verzichtet werden. Damit entfiel auch die Möglichkeit, rekuperierte Bremsenergie zu speichern. Neuere Prototypen besitzen wieder kleinere Pufferbatterien für diesen Zweck.

Durch die Rekuperation von Bremsenergie können nach /ZAE 97/ je nach Fahrzyklus zwischen 4 % (NEFZ) und 23 % (ECE-Stadtfahrzyklus) der Fahrenergie eingespart werden. Dabei ist erwartungsgemäß beim Stadtzyklus mit hohem Stop-and-go-Anteil die rekuperierte Energie deutlich höher als bei Fahrten auf Landstraßen oder Autobahnen, wo die meiste Energie für die Aufrechterhaltung der Geschwindigkeit benötigt wird.

Beim Ford e-Ka werden im NEFZ sogar ca. 9,5 % /EKA 02/ der Fahrenergie aus Bremsenergie zurück gewonnen. Die zusätzlichen Herstellungs- und Wartungsaufwendungen für diese „Strombremse“ werden hier vernachlässigt.

Der Anteil der Rekuperation hängt im Allgemeinen stark vom Fahrzeuggewicht, der Speicherfähigkeit des Pufferspeichers, der Einstellung der Aktivierungsgrenzen und dem individuellen Fahrverhalten ab.

5.5 Platzbedarf

Durch die zum Teil stark differierenden Energiedichten der Kraftstoffe und speziellen Speicherbedingungen ist der Platzbedarf des Fahrzeugtanks (Speichers) sehr unterschiedlich. Die Größe des Tanks steht zusammen mit dem Endenergieverbrauch des Fahrzeugs in direkter Relation zur erzielbaren Reichweite, einer den Nutzwert stark beeinflussende Größe.

Auch die Komponenten des Antriebssystems können im Einzelfall eine starke Reduzierung der Nutzlast und des Platzangebots für Passagiere und Gepäck bedeuten.

Das Referenzfahrzeug Volvo V40 Kombi bietet in jeder Antriebsvariante noch genügend Platz für fünf Personen, wobei die maximale Zuladung und der Gepäckraum in einigen Fällen merklich reduziert werden.

Konventioneller Tank

Während herkömmliche Benzin- und Dieseltanks von der Formgebung relativ frei gestaltbar sind, muss bei Druckgastanks eine zylindrische oder zylinderähnliche Form erhalten bleiben, um gleichzeitig den Stabilitätsvorgaben und den Gewichtsbeschränkungen zu genügen. Dies schränkt die Einbauflexibilität ein.

CNG-Tank

Gerade bei Kompaktklasse-Pkws ist der Platzbedarf eines alternativen Antriebssystems mit entscheidend für den verbleibenden Nutzwert des Fahrzeugs. Beim Ford Ka mit Erdgas-Zusatztank entfallen beispielsweise entweder die hinteren beiden Sitzplätze (80 l-CNG-Flasche), bzw. fast der komplette Kofferraum (60 l-CNG-Flasche). Dies schränkt die Nutzungsmöglichkeiten des Fahrzeugs stark ein. Selbst bei größeren Kombis entfällt oft ein Großteil des nutzbaren Kofferraumvolumens und ggf. die Durchlademöglichkeit zum Transportieren sperriger Güter.

LPG-Tank

Praktisch dagegen ist die Möglichkeit, einen LPG-Tank in der Reserveradmulde unterzubringen (bis ca. 40 l), da heutzutage das Reserverad bereits in vielen Fahrzeugen durch ein Pannenspray unnötig geworden ist.

Wasserstoff-Tank

Auch die dickwandigen, vakuumisolierten Kryo-Tanks für flüssigen Wasserstoff haben durch das geforderte hohe Isolationsvermögen vorbestimmte, geometrisch optimale Formen einzuhalten, d. h. ein möglichst geringes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Daher wird auch in Zukunft der Brennstoffzellen-Antrieb, insbesondere wenn bei Methanol als Kraftstoff zusätzlich ein On-Board-Reformer benötigt wird, nur schwierig in Kompaktklasse-Pkws zu implementieren sein.

6 Kumulierter Energieaufwand

Unter der Bedingung der ganzheitlichen Betrachtung der fahrzeugspezifischen Energieaufwendungen sollen nun die einzelnen Lebenszyklen näher betrachtet werden. Dabei wird der Energieaufwand pro Fahrzeug mit der Gesamtfahrleistung über die Lebensdauer nach **Kapitel 3.1** betrachtet. Hierbei wird der im NEFZ ermittelte streckenabhängige Energieverbrauch auf die Fahrleistung hochgerechnet. Da der NEFZ im Betrieb mit einer Person (Fahrer) gemessen wird, wird im Weiteren in Anlehnung an die durchschnittliche Auslastung pro Fahrzeug von 1,4 Personen /BAH 02/ keine weitere Betrachtung über die maximale Zuladung oder das Fahrzeugleergewicht durchgeführt.

6.1 Fahrzeugherstellung

Der energetische Aufwand für die Fahrzeugherstellung KEA_H ist ein wesentlicher Faktor bei der Analyse des energetischen Gesamtaufwands über die Lebensdauer eines Fahrzeugs.

In den Herstellungsaufwand fließen grundsätzlich der Energieinhalt der verwendeten Materialien ab der Rohstoffebene inklusive Gewinnung und Verarbeitung ein, sowie die Energie zum Betrieb des Maschinenparks zur Herstellung des Fahrzeugs und der Komponenten. Des Weiteren fließen fertigungsbezogene Transportaufwendungen mit in den KEA_H ein, vernachlässigt werden aber indirekte Aufwendungen wie Herstellung und Entsorgung der Betriebsmittel, sowie Transporte außerhalb des Werks. Der Prozessenergiebedarf zur Herstellung eines Pkws im Automobilwerk hängt dabei maßgeblich von den Faktoren Fertigungstiefe und Auslastung der Kapazitäten ab. Im hier betrachteten Fall wird eine Auslastung von 100% angenommen. In der Regel liegt die Auslastung auch nicht unter 50 %, wodurch sich der spezifische Prozessenergieaufwand je Pkw um etwa 22 % erhöhen würde /ZAE 95/.

Zur Ermittlung des Herstellungsaufwands der einzelnen Fahrzeuge wurden auf Basis der Karosserie des Referenzfahrzeugs die geänderten Baugruppen (z. B. Antrieb, Tank) möglichst detailliert neu bewertet. Die energetischen Aufwendungen zur Herstellung von Rohstoffen wurden dabei nach /GAB 99/ sowie branchenüblichen (Durchschnitts-)Werten für Herstellung und Verarbeitung von Werkstoffen bilanziert.

Abbildung 6-1 zeigt den ermittelten KEA_H im Vergleich und in Relation zum jeweiligen Fahrzeuggewicht.

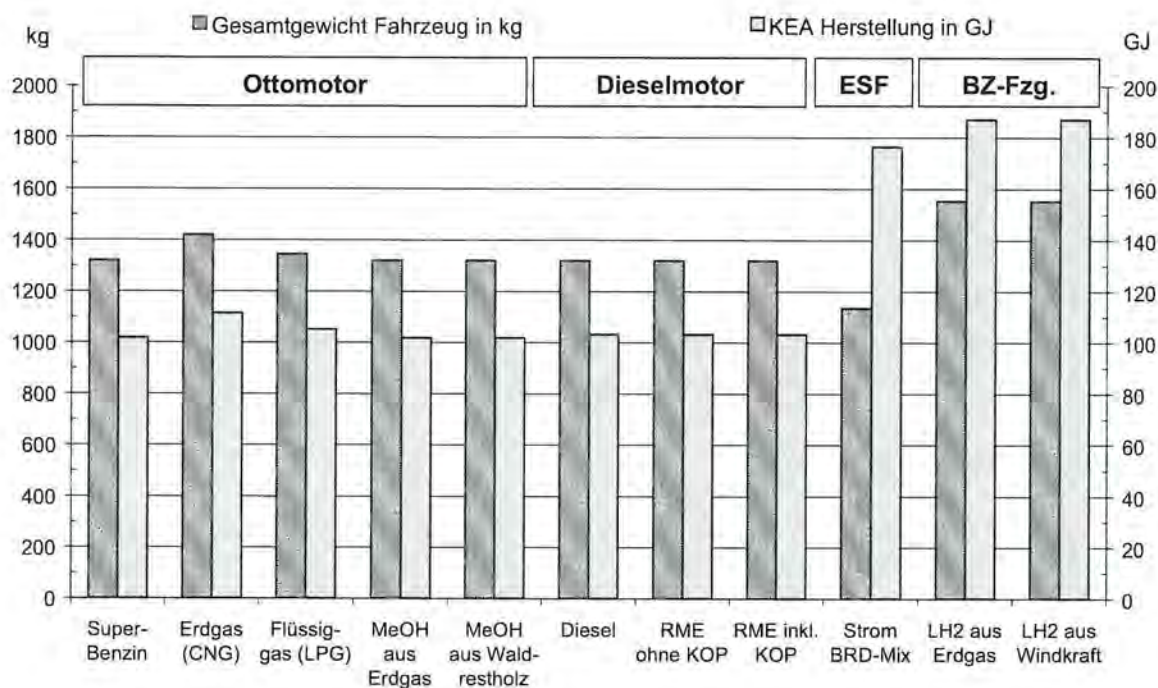


Abbildung 6-1: Fahrzeugleergewichte und KEA_H der untersuchten Antriebssysteme

6.1.1 Konventionelle Fahrzeuge

Bei konventionellen Pkws liegt der KEA_H im Verhältnis zur Fahrzeugmasse relativ niedrig, d. h. es wurden weniger energieintensive Materialien verwendet und der Prozessenergieaufwand hält sich in Grenzen. Der Anteil des KEA_H am gesamten Primärenergieaufwand über den Lebenszyklus liegt bei etwa 15 bis 20 %.

6.1.2 Elektrofahrzeug

Im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen liegt der absolute Herstellungsaufwand nach /DER 99/ bei Elektrofahrzeugen um rund 80 % höher. Der Anteil des KEA_H am Gesamtaufwand beträgt rund 30 % und beeinflusst damit deutlich die Energiebilanz des Antriebssystems. Insbesondere die schweren Traktionsbatterien benötigen einen erheblichen Energieaufwand zur Herstellung, vorwiegend durch die Verwendung von energieintensiven Materialien und Produktionsprozessen.

Im vorliegenden Fall ist das ESF (Ford e-Ka) rund 13 % leichter als das Basisfahrzeug Volvo V40 mit Ottomotor, der Herstellungsaufwand ist jedoch mit rund 176 GJ um fast 75 % höher. Dabei ist die Traktionsbatterie inklusive Nebenaggregaten und Steuer-elektronik mit rund 109 GJ der entscheidende Faktor, ihr Anteil am KEA_H des ESF beträgt fast 62 %. Diese Ergebnisse harmonisieren gut mit den Werten aus /DER 99/.

Muss die Batterie während der Lebensdauer des Fahrzeugs ein- oder mehrmals ausgetauscht werden, fließt dieser Aufwand in die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen während der Nutzungsphase ein. Der Li-Ion-Akku des Ford e-Ka ist nach /FFA 02/ auf

die Lebensdauer des Fahrzeugs ausgelegt, so dass kein weiterer Aufwand für Instandhaltungsmaßnahmen (Akku-Wechsel) entsteht.

Da bisher keine Studien über den Herstellungsaufwand von Li-Ion-Akkus zur Verfügung stehen und seitens der Hersteller aus Geheimhaltungsgründen keine Daten zugänglich sind, wurde der KEA_H eines NiMH-Akkus nach /FLE 99/ als Richtgröße verwendet und entsprechend skaliert.

6.1.3 Brennstoffzellen-Fahrzeug

Das BZ-Fahrzeug liegt bezüglich des Herstellungsaufwands mit rund 187 GJ etwas über dem ESF. Dabei spielt hier der BZ-Stack eine wesentliche Rolle, da dieser nach /PEH 02/ mit rund 56,8 GJ (31 %) und die BZ-Peripherie in Form von Wärmetauscher, Gasaufbereitung und Befeuchter mit weiteren 18,5 GJ (10 %) zu Buche schlägt. Setzt sich der Trend der letzten Jahre fort, so werden KEA_H und Gewicht von BZ-Fahrzeugen durch die intensiven Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten namhafter Automobilhersteller weiter sinken. Da sich diese Technologie noch im Entwicklungsstadium befindet, sind noch relativ hohe Optimierungspotenziale vorhanden.

6.1.4 Leichtbau

Die Verwendung von Leichtbau-Werkstoffen wie Aluminium, Magnesium oder Faserverbundwerkstoffe in Karosserie, Motor, Getriebe oder Felgen trägt zwar zur Senkung von Fahrzeugmasse und damit dem Kraftstoffverbrauch bei, diese Materialien erfordern aber in der Regel einen höheren energetischen Herstellungs- und Verarbeitungsaufwand /AUD 93/.

Die Karosserie bietet mit einem Anteil von 20...30 % /AUD 93/ am Fahrzeuggewicht das größte Einsparpotenzial. Als Beispiel kann der bei Audi praktizierte Karosserie-Leichtbau aus Aluminium genannt werden, mit einer Gewichtseinsparung von rund 38 % /AUD 93/ gegenüber einer Stahlkarosserie. Dabei steigt der Herstellungsaufwand der Karosserie um mehr als das Doppelte an. Dieser Effekt kann durch die Verwendung von Sekundäraluminium (Rezyklat) deutlich abgeschwächt werden.

Entgegen dem Trend des vermehrten Einsatzes von Leichtbau-Materialien steht der allgemeinen Trend zu steigenden Fahrzeuggewichten durch die Zunahme an sicherheitsrelevanter und komfortschaffender Ausstattung (z. B. Klimaanlage, Seitenaufprallschutz, Airbags etc.). Der Gewichtsanstieg des letzten Jahrzehnts konnte bisher noch nicht durch den vermehrten Einsatz von Leichtbau-Werkstoffen kompensiert werden, langfristig wird das Fahrzeuggewicht sich etwa auf heutigem Niveau einpendeln /ZAE 95/.

Dennoch hat eine Veränderung des Fahrzeuggewichts meist sog. sekundäre Maßnahmen zur Folge, die den Trend weiter verstärken. Das bedeutet, dass Maßnahmen zur Gewichtsreduktion sich weiter auf die Dimensionierung anderer Fahrzeugkomponenten auswirken und hier weitere Reduktionspotenziale eröffnen. Dabei kann einerseits ein leistungsschwächerer Motor (inkl. Getriebe und Kupplung) verwendet werden, andererseits können das Fahrwerk (Stoßdämpfer, Lager, Aufhängung etc.) und der Tank entsprechend schwächer bzw. kleiner ausgelegt werden. Diese Sekundäreffekte können nach /AUD 93/ mit weiteren 35 % des eingesparten Gewichts abgeschätzt werden. Gleiches gilt umgekehrt auch bei Gewichtszunahme.

Da der höhere KEA_H im günstigsten Fall durch einen entsprechend niedrigeren KEA_N überkompensiert wird, muss zusätzlich auf die möglichst vollständige Wiederverwertung der Werkstoffe nach der Fahrzeugslebensdauer Wert gelegt werden, um insgesamt die Energiebilanz positiv zu beeinflussen.

Insgesamt steigt der Herstellungsaufwand für Rohstoffe, Fertigungsprozesse und sonstige Verbräuche nach /ZAE 95/ um ca. 12 % bis 2010 durch den vermehrten Einsatz von energieintensiven Leichtbau-Werkstoffen an. Dem gegenüber stehen prozessbedingte, durch den rationelleren Energieeinsatz und technischen Fortschritt verursachte Energieeinsparungen von ca. 2 %, so dass sich der KEA_H mittelfristig um ca. 10 % erhöhen wird.

6.2 Nutzungsphase

Der Nutzungsphase eines Fahrzeugs werden verschiedene energetische Verbräuche zugerechnet, die direkt oder indirekt mit der Fahrzeugnutzung in Verbindung stehen. Dabei lässt sich ein fahrstreckenabhängiger Anteil am KEA aus dem Bereitstellungs-nutzungsgrad des Kraftstoffes und dem jeweiligen Endenergieverbrauch des Fahrzeugtyps ausweisen. Dieser Anteil ist weitestgehend von der Art und der Intensität der Nutzung, sowie weiterer Faktoren wie Zuladung, Fahrweise etc., abhängig.

Des Weiteren werden indirekte Aufwendungen dem Fahrzeug angerechnet, darunter Instandhaltungsmaßnahmen am Fahrzeug und infrastrukturelle Aufwendungen betreffend den Bau und Unterhalt des Verkehrsnetzes, die dem Fahrzeug anteilig angerechnet werden.

Die energieoptimierte Nutzungsdauer eines Pkw wird nach /ZAE 95/ mit ca. zehn Jahren und 150.000 km Gesamtfahrleistung angegeben und entspricht dem hier angesetzten Betrachtungszeitraum. Nach zehn Jahren Fahrzeugslebensdauer steigen die altersbedingten Instandsetzungsaufwendungen erheblich an, zudem entsprechen die Verbrauchs- und Emissionswerten des Fahrzeugs nicht mehr dem Stand der Technik.

6.2.1 Kraftstoffbereitstellung

Die Bereitstellung von Kraftstoff frei Tankstelle beinhaltet eine Reihe von Prozessketten. Dabei werden alle energetischen Aufwendungen von der Rohstoffgewinnung bis zur Verteilung an den Endverbraucher berücksichtigt. Zur Bilanzierung wird die in **Kapitel 3.2.1** dargestellte „Zielproduktorientierte Methode“ herangezogen.

Bei Kraftstoffen, deren Produktion mit dem Anfallen von sog. Koppelprodukten in bedeutender Höhe verbunden ist, wird die Nutzung dieser Koppelprodukte als gesonderter Fall betrachtet, wobei die „Quantitative Bilanzierungsmethode“ (vgl. **Kapitel 3.2.3**) mit der Bewertungsgröße Energieinhalt Anwendung findet.

6.2.2 Endenergieverbrauch der untersuchten Antriebsvarianten

Der Endenergieverbrauch ist im Wesentlichen von der Fahrzeugmasse, dem cw-Wert, sowie dem Nutzungsgrad der Antriebseinheit abhängig. Ein erhöhtes Fahrzeuggewicht beeinflusst den Verbrauch durch die höhere zu beschleunigende Masse und die höhere Rollreibung. Dabei spielt beim ESF mit Bremsenergieerückgewinnung das Gewicht eine geringere Rolle, da beim Bremsen nicht wie bei konventionellen Pkws die überschüssige

kinetische Energie vollständig verloren geht, sondern ein Großteil der zuvor aufgewendeten Energie in die Batterie rückgespeist wird.

Das individuelle Fahrverhalten und der Einsatzbereich des Fahrzeugs (Überland, Stadtverkehr, winterliche Straßenverhältnisse etc.) beeinflussen den Energieverbrauch eines Fahrzeugs erheblich. So kann bei Stadtfahrten mit hohem Stop-and-go-Anteil der Verbrauch insbesondere bei stärker motorisierten Fahrzeugen um mehr als das Doppelte höher liegen als bei Überlandfahrten. Zudem entfällt je nach Ausstattung des Fahrzeugs ein hoher Anteil des Energieverbrauchs auf die Zusatzaggregate (Innenraumheizung, Klimaanlage, Scheinwerfer etc.), die unvermindert weiter betrieben werden müssen. Darüber hinaus spielen vom Nutzungszyklus abhängige Verluste durch Selbstentladung der Batterie oder Abdampfverluste bei Wasserstoff-Kryo-Tanks eine Rolle.

Zur ganzheitlichen Bewertung eines Antriebskonzepts ist der streckenabhängige Energiebedarf in der Nutzungsphase (in kWh pro 100 km Fahrstrecke) von großer Bedeutung. Dieser spezifische Endenergiebedarf des Fahrzeugs wird mit dem zugehörigen Bereitstellungs-nutzungsgrad des Kraftstoffs, bzw. der elektrischen Energie verrechnet.

Der resultierende, direkt fahrstreckenabhängige Primärenergieaufwand trägt bei konventionellen Fahrzeugen unter den hier zugrunde liegenden Rahmenbedingungen zu rund 76 % zum gesamten KEA_N bei, der wiederum rund 83 % des gesamten KEA ausmacht.

Abbildung 6-2 zeigt den gesamten spezifischen Endenergieverbrauch (TTW: Tank to Wheel) der Fahrzeugvarianten sowie den Bereitstellungs-nutzungsgrad des jeweiligen Energieträgers.

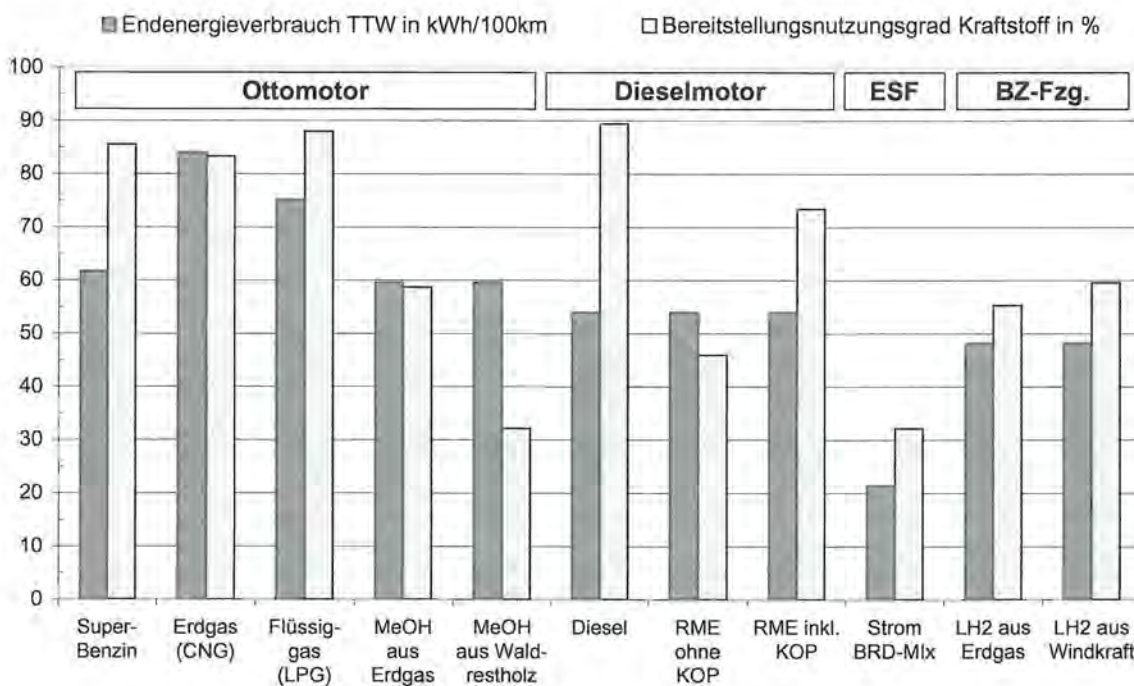


Abbildung 6-2: Endenergieverbrauch und Bereitstellungs-nutzungsgrad der untersuchten Antriebssysteme und Energieträger

Hier zeigt sich deutlich die Überlegenheit des Elektromotors bezüglich des Nutzungsgrades des Antriebsstrangs bzw. des Endenergieverbrauchs gegenüber den verbrennungsmotorischen Varianten. Dieser Vorteil wird durch den heute noch hohen Primärenergieaufwand (rund $3 \text{ kWh}_{\text{Prim}}$ pro $1 \text{ kWh}_{\text{End}}$) zur Strombereitstellung in Deutschland geschmälert.

Elektro-Antriebe benötigen keine nennenswerte Warmlaufphase, wohingegen Verbrennungsmotor-Varianten nach einem Kaltstart eine erhöhte innere Reibung (bevor das Motoröl seine Betriebstemperatur erreicht hat) und somit höhere Verbräuche aufweisen. Somit kann der Elektro-Antrieb sofort nach dem Start fast seine volle Leistung bei konstantem Wirkungsgrad entfalten. Letztlich ist hierfür das zugrunde gelegte Nutzungsprofil entscheidend - nach dem NEFZ wird mit kaltem Motor gestartet.

Tendenziell verbessern kurze Nutzungsintervalle die Bilanz von Brennstoffzellen- und Elektro-Antrieb gegenüber den konventionellen Antriebsarten; beim ESF sind die Selbstentladung und die nötige Klimatisierung der Batterie nicht so aufwendig, bei der BZ verringern sich die relativen Abdampfverluste aus dem LH_2 -Tank, sowie die ebenfalls notwendige Klimatisierung der BZ.

Beim VM sind entweder sehr kurze Betriebsintervalle, in denen der VM seine Temperatur behält, oder relativ lange Intervalle sinnvoll, wobei zwar mit kaltem Motor gestartet wird, die Fahrstrecke aber sehr lang und damit der relative Anteil der Kaltstartphase reduziert ist.

Grundsätzlich werden alle Varianten in der Standphase von der Außentemperatur mehr oder weniger beeinflusst. Es treten entweder Verluste durch Abdampfen von Wasserstoff, Aufwendungen zur Beheizung von Traktionsbatterien, oder Nutzungsgrad beeinflussende Kaltstartphasen beim VM auf.

6.2.3 Instandhaltung

Die Instandhaltungsmaßnahmen für ein Fahrzeug beinhalten Unfallreparaturen, Instandsetzungen, Inspektionen und Verschleiß am Fahrzeug. Im KEA_{Inst} sind der zur Herstellung und Entsorgung von Betriebsstoffen, Verschleißteilen und Ersatzteilen (z. B. Motoröl, Bremsen, Reifen) notwendige nichtenergetische Verbrauch sowie der gesamte Prozessenergieverbrauch (z. B. Energieverbrauch der Werkstatt) enthalten. Nach /ZAE 95/ wird der gesamte Instandhaltungsaufwand über die Lebensdauer des Basisfahrzeugs mit Ottomotor, Baujahr 1990, auf $54,0 \text{ GJ}$ abgeschätzt. Dieser Wert wird hier nach dem Gewichtsverhältnis der Fahrzeuge skaliert und für die einzelnen Antriebssysteme mit zusätzlichen Korrekturfaktoren für erhöhten Instandhaltungsaufwand bei bivalenten Antriebskonzepten, sowie bei den innovativen Technologien bewertet.

Bei herkömmlichen Elektrofahrzeugen mit Bleibatteriespeicher war bisher ca. alle zwei Jahre ein Batteriewechsel nötig, wodurch sich die Instandsetzungsaufwendungen durch die energieintensive Herstellung der Bleibatterie erheblich erhöhten. Die Lebensdauer des im Ford e-Ka verwendeten Li-Ion-Akkus entspricht laut Erwartungen des Herstellers der Lebensdauer des Fahrzeugs, so dass kein Austausch während des Produktlebenszykluses erfolgt.

6.2.4 Indirekte Energieaufwendungen

Zu den indirekten Energieaufwendungen zählen alle die Verkehrsinfrastruktur betreffenden Aufwendungen wie Garagenbau, Straßenbau und -instandhaltung, Betriebsstoffverbrauch für Räum- u. Streudienste im Winter, Straßenbeleuchtung und Ampelanlagen. Dieser Wert beinhaltet weiterhin die Absolutwerte für die Errichtung des bestehenden Straßennetzes in Deutschland, Fahrzeugzulassungsstatistiken, die durchschnittliche Nutzungsdauer der Straßen und wurde nach /ZAE 95/ zu rund 4,7 GJ pro Jahr und Fahrzeug angenommen.

Dabei wird dieser Wert für alle hier betrachteten Fahrzeugtypen entsprechend deren jährlichen Fahrleistung als gleich angenommen, da sich auch die Nutzungsprofile und die Fahrzeugmassen im Pkw-typischen Bereich befinden.

6.3 Fahrzeugentsorgung

Am Ende der Fahrzeuglebensdauer müssen alle Pkw nach heutiger Rechtslage vorschriftsmäßig durch ein lizenziertes Fahrzeugverwertungsunternehmen entsorgt werden. Dabei wird das Altfahrzeug weitestgehend demontiert und so ein hoher Prozentsatz der noch brauchbaren Teile entnommen, die als Gebrauchtersatzteile wieder in den Fahrzeugbestand eingebracht werden. Alle recyclingfähigen Materialien werden entnommen und gesondert einer Wiederverwertung zugeführt. Der Rest wird geschreddert und anschließend nach Materialien getrennt. So reduziert sich der Deponierungsaufwand von Resten auf ein Minimum, jedoch steigt der Kosten- und Energieaufwand für die Fahrzeugverwertung.

Energieaufwendungen und -gutschriften bei der Fahrzeugentsorgung sind bei konventionellen Fahrzeugen nach der herkömmlichen Bilanzierungsmethode für den gesamten KEA von untergeordneter Bedeutung. Insgesamt führt die Entsorgung allerdings immer zu einer geringen energetischen Gutschrift, wobei diese bei Fahrzeugen mit großen Batteriesystemen oder Brennstoffzelle, bzw. Fahrzeugen in Leichtbauweise entsprechend dem KEA_H deutlich höher liegt.

Die Fahrzeugentsorgung wird im Rahmen dieser Untersuchung daher nicht bewertet, zumal zum heutigen Zeitpunkt noch keine detaillierten, gesicherten Daten zum Recycling von Lithium-Ionen-Akkus oder Brennstoffzellen zur Verfügung stehen.

Eine einfache Abschätzung nach dem materialspezifischen Herstellungsaufwand, also ohne die benötigte Prozessenergie im Werk, sowie abzüglich der Aufwendungen für das Zerteilen, Schreddern, Separieren und Deponieren, sowie entsorgungsbedingte Transportaufwendungen, kann in weiteren Projektteilen folgen.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Betrachtet man den gesamten primärenergetischen Aufwand (KEA) über den Lebenszyklus eines Fahrzeugs, so erhält man die in **Abbildung 6-3** dargestellten streckenspezifischen Energieverbräuche der untersuchten Fahrzeug-/Antriebsvarianten.

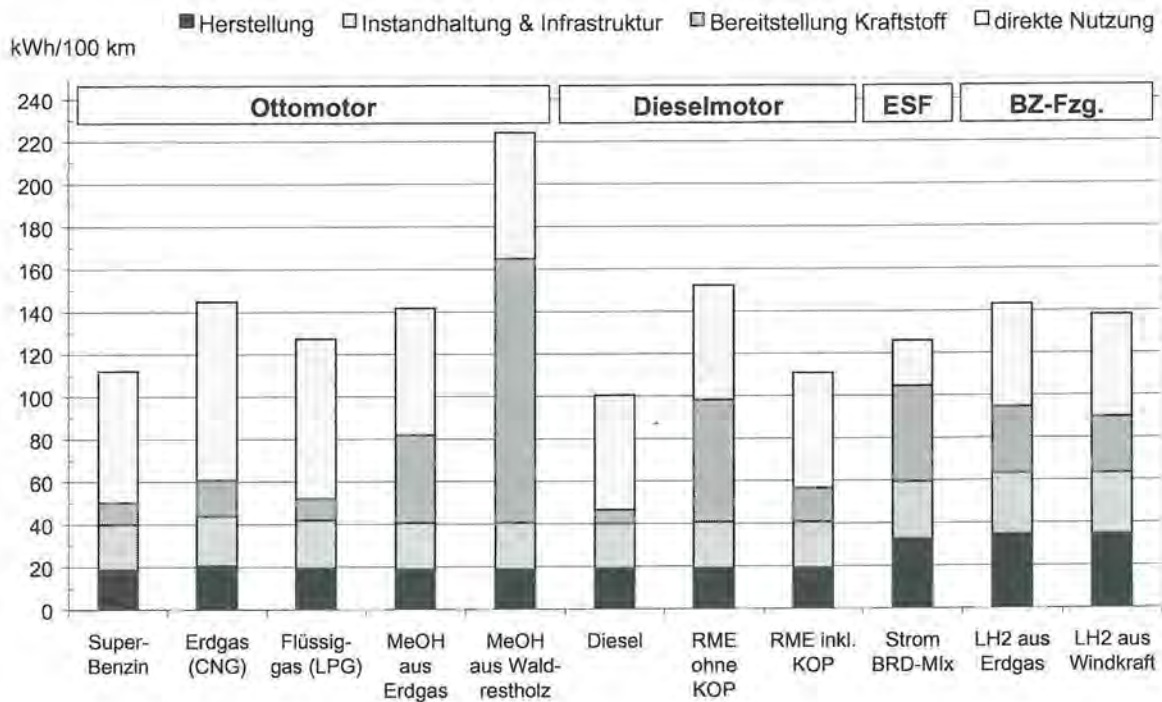


Abbildung 6-3: KEA der verschiedenen Antriebskonzepte über den Lebenszyklus

Die geringsten Aufwendungen fallen bei der Diesel-Variante an, bedingt durch ihren heutigen hohen Entwicklungsstand und den höchsten Kraftstoffbereitstellungsnutzungsgrad (89,4%) aller hier betrachteten Energieträger (vgl. hierzu auch **Tabelle 4-1**).

Beim ESF ist der hohe Herstellungsaufwand erkennbar, der die verbrauchsmäßigen Vorteile des Elektro-Antriebs größtenteils kompensiert.

Der KEA des BZ-Antriebs mit LH₂ aus Erdgas liegt zum gegenwärtigen Entwicklungsstand über dem der Benzin-Variante. Hier sind jedoch beträchtliche Optimierungspotenziale zu erwarten, da Wasserstoff durch eine Vielzahl von Erzeugungsmöglichkeiten bereitgestellt werden kann und somit z. B. durch den zukünftigen Einsatz regenerativer Energien mit einem deutlich niedrigeren KEA zur Bereitstellung des Wasserstoffs zu rechnen ist (vgl. Wasserstoff aus Windkraft).

6.4.2 Kumulierter Nicht-Regenerativer Aufwand (KNRA)

Reduziert man die ganzheitliche Betrachtung der primärenergetischen Aufwendungen auf die nicht-regenerativen Anteile, so ergibt sich die Gegenüberstellung aus **Abbildung 6-4**.

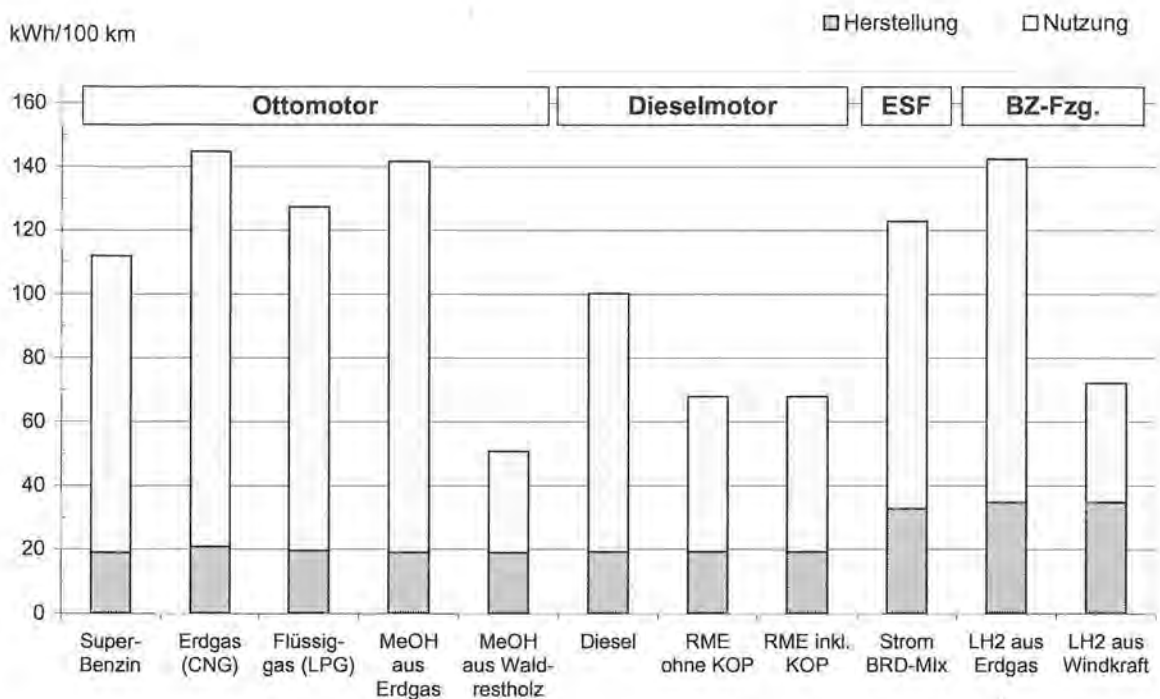


Abbildung 6-4: KNRA der verschiedenen Antriebskonzepte über den Lebenszyklus

Während die Variante mit Methanol aus Waldrestholz rein primärenergetisch bewertet sehr schlecht abschneidet (vgl. **Abbildung 6-3**), zeigt **Abbildung 6-4** die Vorteile beim Einsatz von MeOH, resultierend aus dem hohen Anteil regenerativer Energie bei der Kraftstoffherstellung.

Dagegen verändern sich die Werte der konventionellen Kraftstoffe durch deren fossile Herkunft und den zu vernachlässigenden Einsatz regenerativer Energien bei den Transport- und Verarbeitungsketten gegenüber den Werten aus **Abbildung 6-3** nicht merklich.

Die beiden RME-Varianten unterscheiden sich hier nicht, da die Koppelprodukte bei der RME-Produktion (hauptsächlich Rapsschrot) in der Regel als Tierfutter eingesetzt werden und damit im Wesentlichen nur regenerative Energie substituieren. Daher erfolgt auf den KNRA keine Anrechnung. Insgesamt liegen die RME-betriebenen Fahrzeuge trotzdem hinsichtlich des nicht-regenerativen Verbrauchs sehr günstig auf einem Niveau von nur rund 50 % gegenüber den Varianten mit Erdgas (CNG), bzw. MeOH oder LH₂ aus Erdgas.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alternative Energieträger wie MeOH und LH₂ grundsätzlich nur dann zu energetischen Vorteilen gegenüber den fossilen Kraftstoffen führen, wenn sie aus regenerativen Energiequellen erzeugt werden und nicht durch weitere Umwandlungsstufen aus fossilen Energien reformiert werden müssen. Erst dadurch lassen sich effektiv der Ressourcenverbrauch und der Treibhauseffekt reduzieren.

7 Fazit

Aus der hier durchgeführten Untersuchung lassen sich folgende Ergebnisse sowie Vor- und Nachteile der verschiedenen Antriebskonzepte aus energetischer Sicht darstellen:

- Der Herstellungsaufwand für die verschiedenen Systeme mit Verbrennungsmotor liegt ungefähr auf demselben Niveau, während Elektro- und BZ-Fahrzeuge deutlich energieintensiver in der Herstellung sind. Bei BZ-Fahrzeugen mit On-Board-Reformer würde sich der KEA_H weiter erhöhen.
- Eine Gewichtsreduktion bei der Fahrzeugkarosserie erhöht den Herstellungsaufwand erheblich, der während der Nutzungsphase erst durch hohe Laufleistungen kompensiert werden kann.
- Die Bereitstellungsaufwendungen der Energieträger beeinflussen den KEA des Antriebssystems maßgeblich.
- Flüssiger Wasserstoff zum Betrieb von Brennstoffzellen bringt aus ökologischer Sicht nur dann Vorteile, wenn er nicht aus Erdgas reformiert wird, sondern langfristig aus regenerativen Energiequellen (z. B. Elektrolyse mit Wind-, Wasserkraftstrom, Biomassevergasung etc.) erzeugt wird.
- Eine kurzfristig wirksame Verringerung der verkehrsbedingten Schadstoff-Emissionen kann nur durch die Umrüstung bestehender Ottofahrzeuge auf Erdgas- oder Flüssiggas-Betrieb mit relativ geringem finanziellen Aufwand bewirkt werden. Aus primärenergetischer Sicht wird dabei jedoch kein Vorteil erzielt.
- Der Einsatz von Biodiesel (RME) liegt bezüglich des Endenergieverbrauchs im Fahrzeug auf dem Niveau von konventionellem Dieselmotorkraftstoff. Durch den geringeren spezifischen Energieinhalt des RME ergibt sich allerdings ein erhöhter volumetrischer Verbrauch. Bei Nutzung der Koppelprodukte liegt der KEA der RME-Variante, bedingt durch den höheren Bereitstellungsaufwand für RME, geringfügig über der konventionellen Diesel-Variante. Der hohe Anteil an regenerativem Energieaufwand bei der RME-Herstellung hilft dabei fossile Energie einzusparen, da RME zu rund 75 % aus einem geschlossenen Kohlenstoff-Kreislauf stammt. Der Verbreitung von RME auf weite Marktsegmente sind jedoch durch die begrenzten Anbauflächen in Deutschland und die momentan nicht konkurrenzfähigen Kosten enge Grenzen gesetzt.

Als Kriterium zur Einführung alternativer Antriebskonzepte sind die Wirtschaftlichkeit und die Akzeptanz eines Fahrzeugs am Markt entscheidend. Welches Konzept sich in Zukunft durchsetzen wird, kann aus heutiger Sicht schwer prognostiziert werden, da auch politische und soziale Faktoren einen hohen Einfluss besitzen.

Soll ein Antriebssystem im großen Stil konventionelle Techniken ablösen, so muss die Verfügbarkeit des Energieträgers in hohen Mengen gewährleistet sein, sonst bleibt das System auf Nischenanwendungen beschränkt. Durch die Umrüstung von Dieselfahrzeugen auf den zusätzlichen Betrieb mit RME und die heimische Produktion des Kraftstoffes können zwar Arbeitsplätze im Inland (Landwirtschaft, Verarbeitung etc.) geschaffen werden, eine Einführung von RME auf weite Marktbereiche ist aber allein

durch die begrenzte Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Anbauflächen in Deutschland nicht möglich. Zudem sind die Produktionskosten so hoch, dass RME nur durch intensive staatliche Förderung konkurrenzfähig ist.

Bei Elektrofahrzeugen gibt weiterhin die Herkunft der elektrischen Energie den Ausschlag, ob primärenergetische Einsparungen erzielt werden können. Bei Einsatz von Netzstrom, der mit dem heutigen deutschen Strommix erzeugt wird, ergeben sich keine Energieeinsparungen gegenüber den konventionellen Antriebstechniken. Die Auswirkungen eines möglichen Ausstiegs aus der Kernenergie und teilweiser Substitution durch regenerative Energie (z. B. als Prognose für das Jahr 2030) hätten deutliche Auswirkungen auf die Ökobilanz des Elektrofahrzeugs. Ein theoretisch mit rein regenerativ erzeugtem Strom betriebenes ESF könnte somit zur Schonung von Ressourcen und Umwelt beitragen.

Bisher gibt es lediglich Konzepte für den Aufbau einer Wasserstoff-Energiewirtschaft (derzeit existieren drei Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland) als Grundlage für die Einführung von BZ-Fahrzeugen ohne On-Board-Reformer. Hierfür sind sehr hohe Investitionen, Unterstützung durch Politik und Wirtschaft sowie einiger Forschungsbedarf vonnöten. Durch die Möglichkeit, Wasserstoff regenerativ zu erzeugen, könnte hierdurch zukünftig eine Alternative zu fossilen Brennstoffen geschaffen werden.

Für den Endverbraucher zählen nach wie vor weniger der Primärenergieverbrauch, sondern vielmehr Faktoren wie Anschaffungskosten, Komfort, Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Alltagstauglichkeit als Grundlage für die Kaufentscheidung.

Solange alternative Antriebe diese allgemeine Erwartungshaltung nicht erfüllen, ist ein Durchbruch auf dem Markt eher unwahrscheinlich. Zudem muss zur Markteinführung bereits eine Grund-Infrastruktur vorhanden sein, um überhaupt eine Positionierung alternativer Kraftstoffe am Markt zu ermöglichen.

Die ganzheitliche Betrachtungsweise der untersuchten Antriebsvarianten bedarf daher weiterer Schritte. Dabei muss auf die Kosten, die Emissionen und weitere Rahmenbedingungen der Nutzung alternativer Antriebskonzepte detailliert eingegangen werden. Erst diese umfassende Betrachtung erlaubt aussagekräftige Prognosen für die weiteren Entwicklungen im Individualverkehr.

8 Verzeichnisse

8.1 Literatur

- AUD 93 Kawollek, R.: Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung der Aluminiumrohrkarosserie des Audi D2 unter Berücksichtigung der besonderen Verbindungstechniken, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 1993
- BAH 02 Presseinformation der Deutschen Bahn AG: Mobilitätsbilanz, www.bahn-net.de, 2002
- BPA 67 BP AG: Das Buch vom Erdöl - Eine Einführung in die Erdölindustrie, Reuter & Klöckner Vertragsbuchhandlung, Hamburg, 1967
- DER 99 Dreier, Th.: Biogene Kraftstoffe - Energetische, ökologische und ökonomische Aspekte, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE, Heft 38), TU München, 1999
- DER 00 Dreier, Th.: Ganzheitliche Systemanalyse und Potenziale biogener Kraftstoffe, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE, Heft 42), TU München, 2000
- EKA 02 Busch, R.; Schmitz, P.: Der e-Ka – Was ein modernes Elektrofahrzeug leisten kann, Symposium Elektrische Straßenfahrzeuge, Ford Forschungszentrum Aachen, 2002
- EWI 02 Tschaetsch, H.U.: Erdgas in den Tank – Tausend neue Erdgastankstellen, Zeitschrift EnergieWirtschaft (EW, Jg. 101, Heft 16), 2002
- FFA 02 Schmitz, P.: mündliche Information über den Ford e-Ka, Ford Forschungszentrum Aachen, 21.08.2002
- FFE 02 Duschl, A, et al.: Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie in Deutschland 1999, interne Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2002
- FLE 99 Fleissner, Th.: Primärenergetische Optimierung eines autarken Hybridfahrzeugs, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE, Heft 40), TU München, 1999
- GAB 99 Corradini, R.; Köhler, D.; Lilleike J.; Schwärzer, M.: Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Grundstoff-Bereitstellung, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), München, 1999
- GAS 03 Link vom Februar 2003: www.gas-tankstellen.info – AutoGas & Erdgas - Tankstellenverzeichnis
- IAC 02 Deutscher Verband Flüssiggas e.V. (DVFG): 1. Internationaler Autogas Congress - Dokumentation, Verlagsgesellschaft Flade & Partner mbH, München, 2002

- IFE 02 Tzscheutschler, P.: interne Studie am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 2002
- KBA 02 Kraftfahrt-Bundesamt Deutschland: Statistiken zum Kraftfahrzeugbestand in Deutschland, Flensburg (Internet: <http://www.kba.de>), 2002
- KIR 96 Kirchner, J.: Energieverbrauch und Schadstoffausstoß von alternativen Antriebskonzepten im Individualverkehr, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 1996
- LBS 02 Altmann, M. et al.: Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung, Ludwig Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, 2002
- LIN 97 Bracha, M.: Wasserstoff – ein sauberer Energieträger, Berichte aus Technik und Wissenschaft 75/1997, Linde AG, Höllriegelskreuth, 1997
- LIT 99 Schad, M.: Untersuchung von Lithium-Batteriespeichern im Hinblick auf den Einsatz in Kraftfahrzeugen, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 1999
- NDR 00 NDR 2: Die Zukunft im Tank – Alternativen zu Diesel und Benzin im NDR2-Test, NDR2-Service, Hamburg, 10/2000
- OPE 01 Opel Pressemitteilung: Brennstoffzellenstudie „HydroGen 3“ auf dem Weg zur Serienreife, Opel Suisse SA, Biel, 2001
- PEH 02 Pehnt, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik, Fortschritt-Berichte VDI (Reihe 6 Energietechnik, Nr.476), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V./ Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart, 2002
- RAS 02 Raschka, M.: Methanol als Energieträger in einem nachhaltigen Energiesystem?, Fachgebiet Energiesysteme, Veranstaltung „Neue Entwicklung auf den Energiemärkten“, 2002
- RÜG 96 ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH: Vergleichende Ökobilanz - Elektrofahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge, BMBF-Forschungsvorhaben (Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen), Heidelberg, 1996
- SWN 02 Stadtwerke Nord: Die Erdgastankstelle in Tidofeld, Internet: www.stadtwerke-norden.de/erdgas/erdgas.html, 2002
- UMI 02 Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen: Wasserstoff – Zukunftsstoff, Publikation im Internet (www.umweltministerium.bayern.de/aktuell/topthem/wasserst.htm), 2002
- VOL 02 Volvo Cars Nederland: Prijslijst S40/V40 Modeljaar 2003, Beest (Niederlande), 2002
- WIB 00 Angloher, J.; Dreier, Th.: Techniken und Systeme zur Wasserstoffbereitstellung - Perspektiven einer Wasserstoff-Energiewirtschaft (Teil 1), Koordinationsstelle der Wasserstoff-Initiative Bayern (wiba), München, 2000

- ZAE 95 Hoffmann, C.; Ebersperger, R.; Bauer, H.; Fleißner, T. et al.: Kumulierter Energieaufwand und energieoptimierte Nutzungsdauer von Pkws, Bayer. Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE)/ Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 1995
- ZAE 97 Bauer, H.; Immel, G.; Wabro, R.: Messtechnische Analyse des Energieverbrauchs eines Elektrostraßenfahrzeugs vom Typ Golf CitySTROMer A3, Bayer. Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE)/ Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 1997
- ZAE 99 Dreier, Th.; Saller, A.: Prozesskettenanalyse der Bereitstellung flüssiger und gasförmiger biogener Kraftstoffe, Bayer. Zentrum für angewandte Energieforschung e.V. (ZAE)/ Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), TU München, 1999

8.2 Abkürzungsverzeichnis

b	Bereitstellungsnutzungsgrad
BHKW	Block-Heiz-Kraftwerk
BMS	Batterie-Management-System
BZ	Brennstoffzelle
CNG	compressed natural gas (Erdgas)
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
ECE-Zyklus	Economic Commission for Europe (Stadtfahrzyklus)
ESF	Elektro-Straßenfahrzeug
FFVs	Flexibel Fuel Vehicles (für Alkohol-Kraftstoffe)
H ₂	Wasserstoff
H-Gas	High-Gas (Erdgas mit hohem Methan-Anteil)
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KEA _H	Kumulierter Energieaufwand der Herstellung
KEA _N	Kumulierter Energieaufwand der Nutzung
KEA _E	Kumulierter Energieaufwand der Entsorgung
KNRA	Kumulierter Nicht-Regenerativer Energieaufwand
L-Gas	Low-Gas (Erdgas mit niedrigen Methan-Anteil)
LH ₂	Flüssigwasserstoff
Li-Ion	Lithium-Ionen
LPG	liquefied petroleum gas (Autogas, Flüssiggas)
MeOH	Methanol
ND-Gasnetz	Niederdruck-Netz
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metall-Hydrid
OEM	Original Equipment Manufacturer (Hersteller)
PEM-BZ	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
RME	Rapsmethylester
VM	Verbrennungsmotor