

Thomas Puls

# Alternative Antriebe und Kraftstoffe

Was bewegt das Auto von morgen?

Thomas Puls

# Alternative Antriebe und Kraftstoffe

Was bewegt das Auto von morgen?

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 3-602-14718-5

978-3-602-14718-2

**Der Autor**

**Thomas Puls**, Dipl.-Volkswirt, geboren 1974 in Preetz in Holstein; von 1995 bis 2002 Studium der Volkswirtschaftslehre in Kiel und Stockholm; seit März 2002 im Institut der deutschen Wirtschaft Köln – Forschungsstelle Ökonomie/Ökologie; Referent im Arbeitsbereich „Verkehr und Umwelt“.

Herausgegeben vom Institut der deutschen Wirtschaft Köln

© 2006 Deutscher Instituts-Verlag GmbH  
Gustav-Heinemann-Ufer 84–88, 50968 Köln

Postfach 51 06 70, 50942 Köln

Telefon (02 21) 49 81-4 52

Telefax (02 21) 49 81-4 45

Internet: [www.divkoeln.de](http://www.divkoeln.de)

E-Mail: [div@iwkoeln.de](mailto:div@iwkoeln.de)

Druck: Hundt Druck GmbH, Köln

# Inhalt

Verzeichnis der Abkürzungen	4
<b>1 Einleitung</b>	7
<b>2 Staatliche Förderung</b>	10
<b>3 Bewertungskriterien</b>	11
3.1 Ökologische Faktoren	12
3.2 Ökonomische Faktoren	15
3.3 Effizienz	18
<b>4 Alternative Antriebe</b>	19
<b>5 Diesel und Benzin</b>	21
<b>6 Erdgas</b>	30
6.1 Compressed Natural Gas (CNG)	32
6.2 Gas to Liquids (GTL)	39
<b>7 Biokraftstoffe</b>	42
7.1 Biodiesel	48
7.2 Ethanol	54
7.3 Sunfuel (BTL)	63
<b>8 Elektrofahrzeuge</b>	68
<b>9 Wasserstoff</b>	70
<b>10 Brennstoffzellen</b>	82
<b>11 Zusammenfassung</b>	90
<b>Literatur</b>	94
<b>Kurzdarstellung / Abstract</b>	99

# Verzeichnis der Abkürzungen

## Verwendete Abkürzungen

- AFC** Alkalische Brennstoffzelle, ein Brennstoffzellentyp, der mit besonders geringer Temperatur arbeitet (vgl. Übersicht 3).
- BTL** Biomass to Liquids, ein auch als Sunfuel bekannter Biokraftstoff, der mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese aus jeglicher Biomasse hergestellt werden kann.
- CGH<sub>2</sub>** Unter hohem Druck stehender molekularer Wasserstoff.
- CNG** Compressed Natural Gas, unter hohem Druck stehendes Erdgas.
- dB(A)** Dezibel, eine bewertete Maßeinheit für Schall.
- EDR** Erdgasdampfpreformation, ein Verfahren zur Herstellung von molekularem Wasserstoff aus Erdgas.
- EJ** Exajoule, eine physikalische Einheit zur Messung von Arbeit. Ein EJ entspricht  $10^{18}$  (eine Million Billionen) Joule.
- ETBE** Ethyl Tertiär Butyl Ether, eine aus Ethanol herstellbare Flüssigkeit, die als Kraftstoffadditiv genutzt werden kann.
- FC** Fuel Cell, englisches Wort für Brennstoffzelle.
- FT** Fischer-Tropsch-Synthese, ein chemisches Verfahren, bei dem aus CO und H<sub>2</sub> beliebige Kohlenwasserstoffketten synthetisiert werden.
- GTL** Gas to Liquids, ein auch als Sunfuel bekannter Kraftstoff, der mithilfe der Fischer-Tropsch-Synthese aus Erdgas hergestellt wird.
- GWP** Global Warming Potential, ein Maß für die Treibhauswirksamkeit eines Gases. Das GWP von CO<sub>2</sub> ist gleich 1 gesetzt.
- LH<sub>2</sub>** Liquefied Hydrogen, Wasserstoff im flüssigen Aggregatzustand. Zur Herstellung muss Wasserstoff auf  $-253$  °C abgekühlt werden.
- LNG** Liquefied Natural Gas, im flüssigen Aggregatzustand gehaltenes Erdgas. Zur Herstellung muss Erdgas auf  $-161$  °C abgekühlt werden.
- LPG** Liquefied Petroleum Gas, ein Gemisch aus Propan und Butan, das bei geringem Druck in den flüssigen Aggregatzustand übergeht.
- MTBE** Methyl Tertiär Butyl Ether, eine aus Methanol herstellbare Flüssigkeit, die anstatt Blei als Klopfschutzmittel im Kraftstoff verwendet wird.

- PAFC** Phosphoric Acid Fuel Cell, ein relativ einfacher Brennstoffzellentyp (vgl. Übersicht 3).
- PEMFC** Proton Exchange Membran Fuel Cell, ein Brennstoffzellentyp, der als besonders geeignet für den Einsatz als Fahrzeugantrieb gilt (vgl. Übersicht 3).
- RME** Raps Methyl Ester, die heute gängige Form des Biodiesels, bei der Rapsöl die Rohstoffbasis darstellt.
- SOFC** Solid Oxide Fuel Cell, ein Hochtemperaturbrennstoffzellentyp (vgl. Übersicht 3).
- TJ** Terajoule, eine physikalische Einheit zur Messung von Arbeit. Ein TJ entspricht einer Billion Joule.
- VKM** Verbrennungskraftmaschine, konventionelle Otto- und Dieselmotoren.
- WTT** Well to Tank, beschreibt die systematische Erfassung aller Effekte der Kraftstoffbereitstellung vom Bohrloch bis zum Fahrzeugtank.
- WTW** Well to Wheel, beschreibt die systematische Erfassung aller Effekte der Kraftstoffbereitstellung vom Bohrloch bis zur Bewegung der Reifen.

### **Chemische Nomenklatur**

- C** Kohlenstoff.
- CH<sub>4</sub>** Methan, ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, das den Hauptbestandteil von Erdgas bildet. Methan ist ungiftig, stellt jedoch ein bedeutendes Treibhausgas dar.
- CO** Kohlenmonoxid, ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, das den Sauerstofftransport im Körper unterbrechen kann. Aufgrund seiner Giftigkeit gilt CO als Schadstoff.
- CO<sub>2</sub>** Kohlendioxid, ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, das bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Stoffen entsteht. Kohlendioxid ist ein natürlicher Bestandteil der Luft und nicht giftig. Es ist daher kein Schadstoff. Doch es absorbiert einen Teil der Wärmestrahlung der Sonne, weshalb es zu den Treibhausgasen zählt.
- CO<sub>2eq</sub>** Kohlendioxidäquivalente, ein Maß für die Klimawirksamkeit einer Gasmenge. Das Klimapotenzial wird mit Hilfe des GWP in einer CO<sub>2</sub>-Menge ausgedrückt, um alle Treibhausgase in einer Einheit erfassen zu können.

- H** Wasserstoff, mit nur einem Proton und einem Elektron das kleinste und leichteste Element im Periodensystem.
- H<sub>2</sub>** Molekularer Wasserstoff.
- NO<sub>x</sub>** Stickoxide, Sammelbegriff für Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen. Stickoxide entstehen bei Verbrennungsprozessen. Manche Formen gelten als Reizgas. NO<sub>x</sub> sind ferner an der Entstehung von Ozon, Partikeln, saurem Regen und Smog beteiligt und gelten daher als Schadstoffe.
- N<sub>2</sub>O** Distickstoffoxid, ein auch als Lachgas bekanntes farbloses Gas, das zeitweilig als Narkosemittel eingesetzt wurde. N<sub>2</sub>O ist nicht giftig, aber ein starkes Treibhausgas.
- O<sub>2</sub>** Molekularer Sauerstoff.
- SO<sub>2</sub>** Schwefeldioxid, ein farbloses, stechend riechendes, giftiges Gas, das bei der Verbrennung schwefelhaltiger Stoffe entsteht. In größeren Konzentrationen schädigt es die Bronchien und Lungen. Zudem trägt es zum sauren Regen bei und gilt daher als Schadstoff.

# 1

## Einleitung

Ein massiver Anstieg der Rohstoffpreise prägte die Entwicklung der Weltwirtschaft in den letzten Jahren. Einen besonders großen Einfluss hatte der Höhenflug des Ölpreises. Der Preis pro Barrel (159 Liter) bewegt sich seit längerem an der 60-US-Dollar-Grenze. Mittelfristig könnte der Preis des „Schwarzen Goldes“ nach Ansicht mancher Experten noch deutlich steigen. Die hohen Preise haben eine Vielzahl von Gründen, die sich über die gesamte Versorgungskette erstrecken. Auf der einen Seite haben Anschläge, politische Unruhen, Streiks und Wirbelstürme das Angebot verknappt. Auf der anderen Seite ist die Nachfrage deutlich gestiegen. Insbesondere China steigerte seinen Ölverbrauch ganz erheblich. Die Folge ist, dass die weltweiten Erdölförderkapazitäten voll ausgelastet sind. Gleiches gilt für die Transport- und Raffineriekapazitäten. Es kommt noch erschwerend hinzu, dass die Erdölpreise durch massive Spekulationen weiter in die Höhe getrieben wurden. Zieht man zudem in Betracht, dass in den neunziger Jahren etwa dreimal so viel Erdöl verbraucht wurde wie neue Vorkommen entdeckt wurden (Brown, 2004, 28), so kommt man zu dem beunruhigenden Schluss, dass die Zeit des billigen Erdöls wohl unwiederbringlich dem Ende entgegengeht.

Vom hohen Ölpreis besonders betroffen ist der Straßenverkehr, der zu 98 Prozent vom Erdöl als Treibstoffbasis abhängig ist. Aufgrund dieser starken Abhängigkeit hat der Anstieg der Ölpreise dazu geführt, dass die Suche nach alternativen Treibstoffen und Antrieben in den Fokus des öffentlichen Interesses gerückt ist. Heute kommt noch eine Vielzahl von Treibstoffen und Antrieben als Zukunftskonzept in Frage, wobei sich jedoch manche der heute stark geförderten Alternativen bei genauerer Betrachtung als weniger geeignete Option erweisen. Es ist festzuhalten, dass bislang keines der alternativen Antriebs- und Treibstoffkonzepte gegenüber den konventionellen Benzin- und Dieselmotoren einen spürbaren Vorteil aufweist. Die Hauptprobleme der Alternativen liegen in ihren unverhältnismäßig hohen Bereitstellungskosten im Vergleich zu den konventionellen Kraftstoffen, die allerdings heute noch durch Steuersubventionen ausgeglichen werden können. Ein weiteres Grundproblem liegt darin, dass die meisten alternativen Treibstoffe nicht das notwendige Mengenpotenzial besitzen, um die bestehenden Treibstoffe ersetzen zu können. Entgegen der landläufigen Meinung ist auch die Umweltbilanz mancher alternativer Kraftstoffe eher durchwachsen. Eine wirklich massenmarkttaugliche Alternative fehlt bislang, die bestehenden Alternativsysteme können nur Nischen ausfüllen oder aber in Form von Untermischungen den Verbrauch von erdölbasierten Treibstoffen verringern.



Dennoch verdienen die laufenden Forschungen bezüglich alternativer Antriebe und Treibstoffe höchste Priorität, denn die Sicherung von preiswerter Mobilität ist eine wesentliche Voraussetzung für die Erhaltung des gesellschaftlichen Wohlstands in den Industrienationen. Die Auswahl einer ökologisch und ökonomisch tragbaren Alternative zu Benzin und Diesel hat große Bedeutung für die Zukunft, denn sie wird ganz wesentlich den Preis künftiger Mobilität bestimmen. Individuelle Mobilität muss auch in Zukunft für breite Bevölkerungsschichten erschwinglich bleiben. Das wird nur möglich sein, wenn die Alternativen in ausreichender Menge bereitgestellt werden können. Das ist einer der Eckpfeiler der anstehenden Entscheidung über den Treibstoff der Zukunft. Allerdings darf die Betrachtung der denkbaren Alternativen nicht auf den Preis an den Tankstellen verengt werden, denn eine so starke Umstellung in der Automobilindustrie wird auch einen extrem hohen Investitionsbedarf in Erzeugungs- und Versorgungsinfrastruktur auslösen. Gleiches gilt für andere Branchen, die als Zulieferer auftreten, etwa den Maschinenbau. Neben den ökonomischen Folgen, welche die Auswahl einer neuen Energiequelle für den Straßenverkehr mit sich bringt, sind bei der Entscheidung als zweiter Eckpfeiler die ökologischen Auswirkungen zu beachten. Eine langfristige Ausweitung der Treibhausgas- und Schadstoffemissionen gegenüber dem Status quo wäre inakzeptabel und gesellschaftlich nicht vermittelbar. Aufgrund der Schlüsselstellung von Straßenverkehr und Automobilindustrie für Ökonomie und Ökologie sollte der gesamte Entscheidungsprozess unter dem Primat „Do it once – do it right!“ stehen, damit die Umstellung auf einen alternativen Kraftstoff mit möglichst wenig Reibungsverlust vonstatten gehen kann.

Egal für welchen Treibstoff man sich in Zukunft entscheidet, es wird in absehbarer Zeit zu bedeutenden Veränderungen im gesamten Mobilitätssektor kommen. Zwar werden Pkw und Lkw ihre dominante Stellung behalten, doch die Umstellung der Energieversorgung des Straßenverkehrs wird eine kleine wirtschaftliche Revolution auslösen. Bedeutende Wertschöpfungsketten werden sich neu ausrichten müssen, denn die alternativen Kraftstoffe unterscheiden sich zum Teil erheblich von den etablierten. Zudem wird die Bedeutung des Treibstoffverbrauchs der Fahrzeuge für den Autofahrer und die mobile Gesellschaft weiter wachsen. Die Situation erinnert an die Zeit, als das benzinbetriebene Auto seinen Siegeszug antrat und das Pferd als Garanten der individuellen Mobilität verdrängte. Doch es ist eine der wenigen Gewissheiten des Lebens, dass Veränderungen zahlreiche Bedenkenträger auf den Plan rufen, die nachweisen, dass die Alternativen nicht funktionieren oder zu teuer sind. Ein vor über 130 Jahren in den USA verfasster Text über die beginnende technische Revolution im Verkehrssektor illustriert diese Veränderungsängste sehr anschaulich:

„Eine neue Energiequelle mit dem Namen Benzin ist von einem Bostoner Ingenieur erzeugt worden. Dieser Brennstoff wird nicht unter einem Kessel verbrannt, sondern explodiert im Zylinder eines Motors. (...) Die Gefahren sind doch offensichtlich. Benzin in den Händen von Leuten, die vor allem an Profit interessiert sind, stellt eine Feuer- und Explosionsgefahr erster Klasse dar. Pferdelose, von Benzin angetriebene Kutschen können Geschwindigkeiten von 14 oder sogar 20 Meilen pro Stunde erreichen. Die Bedrohung, die von solchen Fahrzeugen ausgeht, die durch unsere Straßen rasen und unsere Atmosphäre vergiften, verlangt nach einer gesetzlichen Antwort, auch wenn die militärischen und ökonomischen Implikationen überwältigend sind. (...) Im Übrigen sind die Herstellungskosten des Benzins jenseits der Finanzkraft unserer privaten Industrie. (...) Außerdem werden durch diese Entwicklung unsere Pferde überflüssig. Dadurch wird unsere Landwirtschaft ruiniert!“<sup>1</sup>

In gewisser Weise stellt auch diese Analyse einen Bedenkenträgertext dar, denn aus heutiger Sicht ist Euphorie in Bezug auf die möglichen alternativen Treibstoffe und Antriebe nicht angebracht. Gerade die ökologisch vielversprechendsten Alternativen sind objektiv betrachtet noch weit von der Marktreife entfernt und die eingeführten Stoffe sind oft schlechter als ihr Ruf. Bei den folgenden Betrachtungen wird versucht, auf Basis des heutigen Kenntnisstands über chemische Eigenschaften, technische Potenziale und daraus resultierende Kostenstrukturen eine Einschätzung über die Eignung verschiedener Treibstoffe und Antriebskonzepte zu geben. Der Wert dieser Betrachtungen muss dabei weniger in konkreten Zahlen als in einer konsistenten Abwägung der Alternativen gesehen werden, da sich viele Aspekte aufgrund des technischen Fortschritts und der Entwicklung der Ölpreise im Fluss befinden. Es wird von einer Evolution in der technischen Entwicklung ausgegangen. Technische Revolutionen, etwa die Nutzbarmachung der Kernfusion, würden das Bild massiv verändern, sind jedoch absolut unvorhersagbar. Die Ausführungen beziehen sich primär auf den europäischen Pkw-Verkehr. In anderen Weltregionen könnten sich aufgrund anderer Kostenstrukturen und Anforderungen andere Optima ergeben. Gleiches gilt auch für den Lkw- und den Busverkehr. Aufgrund gänzlich anderer Anforderungs- und Betreiberstrukturen bieten sich hier unter Umständen ganz andere Antriebskonzepte an als im Pkw-Verkehr. Diese unterschiedlichen Anforderungen zu berücksichtigen und dennoch den Aufbau paralleler Versorgungsinfrastrukturen oder die Bildung eines Flickentepichs von nur regional nutzbaren Antriebskonzepten zu verhindern, ist eine zentrale Herausforderung an Politik und Industrie.

---

<sup>1</sup> Zitiert nach Pehnt, 2002, 60 f.

# 2

## Staatliche Förderung

Alle aus heutiger Sicht ernsthaften Alternativen haben inzwischen das Stadium der Grundlagenforschung verlassen. Bei der nun anstehenden – und teilweise bereits laufenden – Markteinführung spielen staatliche Subventionen auf der ganzen Welt eine wichtige Rolle, auch wenn es noch nicht absehbar ist, welches Konzept sich durchsetzen wird. Bei der heutigen Förderung spielt jedoch die tatsächliche ökonomische und ökologische Zukunftsfähigkeit häufig eine untergeordnete Rolle. Dadurch wird die Suche nach der geeignetsten Alternative erschwert, da teilweise Technologien und Treibstoffe subventioniert werden, die weder ökonomische noch ökologische Vorteile gegenüber dem Status quo aufweisen und somit kaum als zukunftstaugliche Alternativen gelten können.

In Europa sind vor allem die Vorgaben der EU zu berücksichtigen (Tabelle 1). Diese hat an ihre Mitgliedstaaten den Auftrag formuliert, bis zum Jahr 2020 bestimmten alternativen Kraftstoffen einen Anteil von insgesamt 23 Prozent am Gesamttreibstoffverbrauch einzuräumen. Ob diese Vorgaben geeignet sind, einen zukunftstauglichen Treibstoff zu identifizieren und zielgenau zu fördern, ist jedoch fraglich. Zunächst einmal lösen sie umfassende Steuersubventionen aus, denn die Förderung besteht in vielen EU-Ländern vor allem in weitgehenden Befreiungen von der Mineralölsteuer. So ist in Deutschland derzeit für alle Biokraftstoffe noch keine Mineralölsteuer fällig, Erdgas ist sogar bis 2020 von 80 Prozent der Mineralölsteuer befreit. Da mit dieser Subventionierung die deutlichen Kostennachteile gegenüber den konventionellen Diesel- und Ottokraftstoffen überkompensiert werden, erhoffen sich Politiker von diesen Maßnahmen einen Absatzboom.

### EU-Zielwerte für alternative Kraftstoffe

Tabelle 1

Anteile am Kraftstoffverbrauch in Prozent

	2005	2010	2020
Biogene Kraftstoffe	2,00	5,75	8,00
Wasserstoff	0,00	0,00	5,00
Erdgas	0,00	2,00	10,00
Insgesamt	2,00	7,75	23,00
nachrichtlich: EU-Kraftstoffverbrauch in Millionen Tonnen Öleinheiten	318	338	379

Quelle: EU-Kommission, 2001

Mit dem im November 2005 zwischen CDU und SPD geschlossenen Koalitionsvertrag wird zumindest in Deutschland ein teilweiser Politikwechsel eingeleitet. Denn gemäß den dort gemachten Vorgaben soll die Steuerbefreiung für Biokraftstoffe durch eine Beimischungsverpflichtung ersetzt werden. Auch wenn in der Koalition noch umstritten ist, ob die Aufhebung der Steuerbefreiung auch für reine Biokraftstoffe gelten

soll, macht diese Maßnahme doch sehr deutlich, dass eine Steuerbefreiung in Zeiten knapper Kassen auch sehr schnell verschwinden kann. Alternativen, deren Marktfähigkeit nur über steuerliche Begünstigung hergestellt werden kann, sollten von daher mit äußerster Skepsis betrachtet werden. Immerhin würde das Erreichen der von der EU vorgegebenen Marktanteile unter Beibehaltung der Steuerbefreiungen allein in Deutschland Einnahmenverluste für den Fiskus von bis zu 10 Milliarden Euro bedeuten. Ob eine Begünstigung unter diesen Umständen aufrechterhalten werden kann, darf mit Recht bezweifelt werden.

Die EU steht aber mit ihrem Ansinnen, den Anteil alternativer Kraftstoffe am Gesamtverbrauch zu erhöhen, auf der Welt keineswegs allein da. So hat der Gouverneur des US-Bundesstaats Kalifornien, Arnold Schwarzenegger, angekündigt, noch in seiner Amtszeit in seinem Staat eine Versorgungsinfrastruktur mit Wasserstoff aufzubauen (Hydrogen Highway). Ein ähnliches Vorhaben verfolgt auch die japanische Regierung für den Großraum Tokio, in dem bis 2010 etwa 50.000 Kraftfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb fahren sollen. Sowohl die USA als auch Japan planen, Wasserstoff als Energieträger im Straßenverkehr in den kommenden Jahren mit mehreren Milliarden US-Dollar zu fördern. Auch die EU setzt langfristig auf Wasserstoff und fördert die Wasserstoffforschung, wenn auch deutlich weniger als die anderen Triadestaaten. Doch auch Entwicklungsländer fördern den Einsatz alternativer Kraftstoffe. In diesen Ländern ist das Interesse allerdings weniger darauf gerichtet, eine langfristige Alternative zu konventionellen Kraftstoffen zu schaffen, als vielmehr darauf, durch den Einsatz heimischer Rohstoffe weniger Devisen für den Kauf von Rohöl einsetzen zu müssen. Ein Beispiel dafür ist Brasilien. In dem südamerikanischen Land besteht seit langem eine Vorschrift, nach der Ottokraftstoff mit 30 Prozent heimischem Ethanol verschnitten werden muss.

## 3

### Bewertungskriterien

Neue Antriebskonzepte müssen sich dem Wettbewerb der konventionellen Diesel- und Ottomotoren stellen, wenn sie sich am Markt behaupten sollen. Eine Aussage über Sinn oder Unsinn des Einsatzes verschiedener alternativer Treibstoffe und Antriebe muss sich an möglichst objektiven Bewertungskriterien orientieren. Dabei sind zunächst einmal zwei verschiedene Ebenen von Bewertungsmaßstäben zu unterscheiden. Auf der mikroökonomischen Ebene sind die Kriterien zusam-

mengefasst, von denen der einzelne Autofahrer seine Kaufentscheidung abhängig macht. Darunter fallen vor allem die Anschaffungs- und Unterhaltskosten eines Fahrzeugs, aber auch Fahrleistung, Kaltstartverhalten, Allwettertauglichkeit und Ähnliches spielen eine Rolle. Die Kriterien der mikroökonomischen Ebene sind für die Fahrzeugbauer von größter Bedeutung, da sie über den Absatz und damit über den wirtschaftlichen Erfolg eines Konzepts bestimmen werden. Allerdings werden die aus einzelwirtschaftlicher Sicht wohl entscheidenden Betriebskosten durch staatliche Eingriffe determiniert.

Dies ist einer der Gründe, warum trotz der Bedeutung der Kriterien der mikroökonomischen Ebene im Folgenden die Argumente der makroökonomischen Ebene im Mittelpunkt stehen werden. Darunter fallen die gesellschaftlichen Anforderungen an einen alternativen Treibstoff beziehungsweise ein alternatives Antriebskonzept. Diese Kriterien sind für eine Beurteilung der langfristigen Zukunftsfähigkeit einer Alternative wichtiger als die vom subjektiven Nutzenkalkül bestimmten Kriterien der mikroökonomischen Ebene. Im Prinzip zerfallen die makroökonomischen Bewertungskriterien in drei Gruppen, ökologische Kriterien, ökonomische Kriterien und die Synthese aus diesen beiden Gruppen – die Frage nach der Effizienz. Effizienz sollte im Endeffekt das entscheidende Kriterium bei der Wahl einer neuen Antriebsmethode für den motorisierten Individualverkehr sein. Eine rein auf Effektivität ausgerichtete Betrachtung, die sich auf das Erreichen von Spitzenwirkungsgraden konzentriert und dabei die entstehenden einzel- und gesamtwirtschaftlichen Kosten ignoriert, birgt das Risiko, dass eine Alternative befürwortet wird, die in keiner Weise massenmarktauglich ist und daher bestenfalls wirkungslos bleibt. Die Effizienzbetrachtung muss möglichst umfassend gestaltet werden. Das bedeutet, dass sowohl der gesamte Weg von der Bereitstellung der benötigten Primärenergieträger bis zur Bewegung des Autoreifens (Well to Wheel) zu betrachten ist als auch die Möglichkeit der alternativen Verwendung von knappen Rohstoffen, beispielsweise in der Verstromung oder der chemischen Weiterverarbeitung. Erst eine solche Gesamtbetrachtung schafft den Rahmen, um den optimalen Treibstoff der Zukunft zu ermitteln.

### **3.1 Ökologische Faktoren**

Die Umweltverträglichkeit eines neuen Antriebs oder Treibstoffs ist zwangsläufig ein entscheidendes Kriterium bei seiner Beurteilung. Immerhin stehen die Umweltfolgen des Straßenverkehrs schon seit Jahrzehnten unter kritischer Beobachtung. Ein neuer Treibstoff, der in seiner Umweltbilanz hinter die bestehenden Systeme zurückfällt, kann kaum als tragfähig angesehen werden. Als Maßstab für die Umweltverträglichkeit bieten sich vor allem die Emissionen von Klimagasen

und Schadstoffen über den gesamten Lebensweg eines Treibstoffs (Well to Wheel) an. Hinzu können weitere Kriterien kommen wie etwa Lärmemissionen oder der mit einem Antriebskonzept verbundene Ressourcenverbrauch.

Da es bei der Bekämpfung der bekannten gesundheitsschädlichen Schadstoffe wie etwa Kohlenmonoxid (CO) oder Benzol bereits große Erfolge gegeben hat (siehe Kapitel 5), spricht vieles dafür, dass es in Zukunft vor allem die klimarelevanten Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sein werden, die in Europa das ökologische Anforderungsprofil an einen Treibstoff der Zukunft bestimmen werden. Im Prinzip ist die Erstellung einer Bedeutungshierarchie unter den Fahrzeugemissionen wissenschaftlich ein wenig fragwürdig. Aufgrund der Dominanz der Klimaproblematik im gesellschaftlichen Diskurs scheint sie aber vertretbar zu sein. Die in Kohlenstoffdioxidäquivalenten (CO<sub>2eq</sub>) gemessenen Emissionen von Treibhausgasen werden ebenso wie die verschiedenen Schadstoffemissionen im Wesentlichen durch den eingesetzten Treibstoff determiniert (Wurster et al., 2002a). So sind beispielsweise die bei der Erzeugung einer bestimmten Energiemenge anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen vor allem vom Mengenverhältnis der Wasserstoff- (H) und Kohlenstoffatome (C) im Brennstoff abhängig. Je größer der H/C-Quotient eines Stoffs ausfällt, desto weniger CO<sub>2</sub> entsteht durch seine Verbrennung pro erzeugte Energieeinheit. Von den fossilen Brennstoffen hat Erdgas den günstigsten H/C-Quotienten mit einem Wert von etwa vier. Mineralöl kommt auf einen Quotienten von etwa zwei, Kohle erreicht einen Wert von etwa 0,5.

Es ist in diesem Zusammenhang zu betonen, dass CO<sub>2</sub> und die anderen Klimagase nicht per se als Schadstoffe oder gar Klimakiller qualifiziert werden können. Im Gegenteil, der in Tabelle 2 aufgeschlüsselte natürliche Treibhauseffekt ist die Grundlage allen Lebens auf der Erde. Ohne ihn betrüge die Durchschnittstemperatur auf dem Erdball gerade einmal -15 °C (Jacobson, 2002, 310 f.). Nach Ansicht vieler Klimaforscher hat sich dieser natürliche Treibhauseffekt seit dem Ende des 19. Jahrhunderts um 0,6 bis 0,8 °C verstärkt, was sie auf die mit hoher Wahrscheinlichkeit von Menschen verursachten zusätzlichen Emissionen der in Tabelle 2 aufgeführten Substanzen zurückführen. Wie dort ersichtlich ist, sind einige Gase bedeutend klimaaktiver als das CO<sub>2</sub>. Diese Stoffe werden vom heutigen Straßenverkehr in der Well-to-Wheel-Betrachtung nur in relativ geringen Mengen emittiert. Sie können bei der Nutzung bestimmter alternativer Treibstoffe verstärkt anfallen, beispielsweise bei der Bereitstellung von Erdgas (Methan) oder Biodiesel (N<sub>2</sub>O). Dies macht deutlich, dass die Bewertung der Klimafreundlichkeit eines Treibstoffs nicht auf das CO<sub>2</sub> beschränkt werden darf. Stattdessen müssen auch die anderen anfallenden Treibhausgase entsprechend ihrem Global Warming Potential (GWP) berücksichtigt werden. Zudem muss betont werden,

dass es aus Klimasicht irrelevant ist, an welchem Ort (Ausnahme: Emission in der Stratosphäre) oder gar in welchem Sektor der Volkswirtschaft die Emissionen von CO<sub>2eq</sub> anfallen. Von Bedeutung ist lediglich die globale Emissionsmenge. Daher ist beispielsweise auch die Begründung, dass der Straßenverkehr 20 Prozent der CO<sub>2</sub>-Einsparungen zu leisten habe, da sein Anteil an den Emissionen in Deutschland etwa in dieser Größenordnung liegt, wissenschaftlich gesehen unsinnig. Aus ökonomischer Sicht müssten die politisch vorgegebenen Emissionsreduktionen von Klimagasen stattdessen anhand ihrer Vermeidungskosten auf die Emittenten verteilt werden, um eine effiziente Lösung zu erreichen. So wäre es in Bezug auf die Reduktion von CO<sub>2eq</sub>-Emissionen wohl deutlich effizienter, alte Kohlekraftwerke in den Entwicklungsländern zu modernisieren, als aus den modernen Motoren noch 1 bis 2 Prozent Effizienzsteigerung herauszuholen.

## Kenngrößen treibhauswirksamer Spurengase in der Atmosphäre

Tabelle 2

Treibhausgas	Temperaturanstieg in °C <sup>1</sup>	Lebensdauer in Jahren	GWP <sup>2</sup>	Jährlicher Zuwachs in Prozent
Wasserdampf (H <sub>2</sub> O)	20,6	–	–	–
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	7,2	5–200	1	0,4–1,7
Bodennahes Ozon (O <sub>3</sub> )	2,4–2,7	0,1–0,5	1.800–2.000	0,5–2,0
Distickstoffoxid (N <sub>2</sub> O)	1,4	100–170	150–290	0,2–0,4
Methan (CH <sub>4</sub> )	0,8	9–90	20–63	0,75–1,7
FCKW (CHF <sub>3</sub> , CF <sub>4</sub> )	–	16–50.000	3.500–17.000	3,0–7,0
Schwefelhexafluorid (SF <sub>6</sub> )	–	3.200	23.900	–

<sup>1</sup> Durch natürliches Treibhausgas; <sup>2</sup> Das Global Warming Potential (GWP) ist ein Maß für die Treibhauswirksamkeit eines Gases. Das GWP von CO<sub>2</sub> ist gleich 1 gesetzt und dient damit als Maßeinheit für andere Gase. Bei der Bestimmung des GWP-Wertes eines Gases werden hauptsächlich seine Verweildauer in der Atmosphäre und insbesondere seine Fähigkeit zur Wärmeisolierung berücksichtigt;

Quellen: Gruden, 1999, 15; Globus, 2001

Neben den Klimagasen spielen auch die Stickoxide (NO<sub>x</sub>) eine besondere Rolle, da sie zur Versauerung der Umweltmedien Luft, Wasser und Boden beitragen und die Bildung von bodennahem Ozon fördern, das neben seiner Eigenschaft als Reizgas aufgrund seines hohen GWP auch einen Beitrag zum Treibhauseffekt leistet ([www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)). Zudem konnten die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Verkehrs noch nicht in dem Ausmaß gesenkt werden, wie es bei den anderen Schadstoffen der Fall ist. Das in letzter Zeit in der Öffentlichkeit viel diskutierte Thema Ruß/Feinstaub sollte hingegen zumindest in Deutschland mittelfristig keine Rolle mehr spielen, da die deutsche Automobilindustrie bereits zugesagt hat, ab 2008 Dieselfahrzeuge nur noch mit Partikelfiltern auszuliefern, und es sich bereits heute zeigt, dass Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter auf dem Markt gefragt sind.

Allerdings wird es noch Jahre dauern, bis der Gesamtbestand der zugelassenen Kfz mit Filtern ausgerüstet ist, da das durchschnittliche Fahrzeug in Deutschland über acht Jahre alt ist, mit steigender Tendenz. Die lange Nutzungsdauer führt bei jeder technischen Neuerung dazu, dass sich diese erst mit einer erheblichen zeitlichen Verzögerung auf die Emissionen des Gesamtfahrzeugbestands auswirken kann. Diese zeitliche Verzögerung konnte man bereits bei der Einführung des Katalysators beobachten, welcher die Emissionen von anderen limitierten Schadstoffen wie CO, SO<sub>2</sub> oder Benzol weitgehend eliminiert hat. Gleiches gilt auch für den Benzinverbrauch, bei dem die Gesamtflotte um einige Jahre hinter den Neufahrzeugen hinterherhinkt.

Ein weiterer, nicht unerheblicher ökologischer Faktor ist der durch eine Umstellung des Straßenverkehrs verursachte Ressourcenverbrauch. So werden beispielsweise bei der Produktion eines Brennstoffzellenfahrzeugs große Mengen an Edelmetallen verbaut, die aufwendig gewonnen werden müssen. Aber auch der Energieaufwand der Fahrzeugproduktion kann stark variieren. So sind beispielsweise Drucktanks für gasförmige Treibstoffe in der Herstellung sehr aufwendig und erfordern auch den Einsatz von Verbundstoffen, die zum Teil nur mit großem Energieaufwand hergestellt werden können. Diese Zusatzaufwendungen sind bei der ökologischen Bewertung von Alternativen zu den konventionellen Antrieben ebenfalls zu berücksichtigen.

### **3.2 Ökonomische Faktoren**

Unter den ökonomischen Kriterien der makroökonomischen Ebene dominieren die langfristige Versorgungssicherheit und die Kosten einer Umstellung auf eine neue Energiequelle im Straßenverkehr.

Unter Versorgungssicherheit sind hierbei mehrere Aspekte zusammengefasst, die alle potenziellen Treibstoffe betreffen. Zunächst einmal stellt sich die Frage nach der physikalischen Verfügbarkeit, also nach der von einem Energierohstoff überhaupt vorhandenen Menge. Daraus lässt sich unter der Ceteris-paribus-Annahme bezüglich Nachfrage und Fördertechnik die so genannte statische Reichweite eines Energierohstoffs errechnen. Dies betrifft eigentlich nur die fossilen Brennstoffe, die heute in der Energieerzeugung dominieren, denn regenerative Energie ist rein physikalisch gesehen praktisch unbegrenzt vorhanden (Tabelle 3).

Der zweite Aspekt ist die technische Verfügbarkeit, also der Anteil der vorhandenen Menge, der heute auch nutzbar ist. Die Menge an Energierohstoffen, die zurzeit wirtschaftlich nutzbar ist, bezeichnen Geologen auch als Reserve, während die mit hoher Sicherheit identifizierten, aber zurzeit nicht wirtschaftlich nutzbaren Energierohstoffe als Ressourcen klassifiziert werden. Die Unterscheidung



## Globales Angebot und technisches Potenzial erneuerbarer Energien Tabelle 3

Globaler Endenergieverbrauch 1997 = 1

Energieart	Gesamtes physikalisches Angebot	Technisch nutzbar (Endenergie)	Derzeit genutzt (Endenergie)
Solarstrahlung	2.850	3,8	0,001
Windenergie	200	0,5	0,0003
Biomasse	20	0,4	0,14
Erdwärme	20	1,0	0,003
Meeresenergie	10	0,05	–
Wasserkraft	1	0,15	0,035
<b>Gesamt</b>	<b>3.100</b>	<b>5,9*</b>	<b>0,18</b>

\* Lesehilfe: Der derzeitige Endenergieverbrauch lässt sich 5,9-mal mit erneuerbaren Energien decken;

Quelle: Pehnt, 2002, 21

von Reserven und Ressourcen ist wichtig für das Verständnis der Verfügbarkeit, denn wenn beispielsweise die Preise für Rohöl steigen, werden Teile der Ressourcen zu Reserven, da sie nun ihre höheren Förderkosten (zum Beispiel bei Förderung in Permafrostgebieten) am Markt wieder hereinholen können. Dieser Mechanismus

hat zusammen mit einer kontinuierlichen Verbesserung der Fördertechnik zu dem Phänomen geführt, dass die Erdölreserven seit Jahrzehnten immer eine statische Reichweite von etwa 40 Jahren aufweisen.

Wie in Tabelle 3 ersichtlich, weisen die erneuerbaren Energien auch eine hohe technische Verfügbarkeit auf. Sie könnten den heutigen Energiebedarf 5,9-mal decken. Doch leider entspricht die Masse dieses technischen Potenzials eher der Definition einer Ressource. Der Anteil der Reserven ist aber gering, was sich in der in Tabelle 3 abgebildeten geringen Nutzung widerspiegelt. In Tabelle 4 sind für die fossilen Primärenergieträger die entsprechenden statischen Reichweiten von Reserven und Ressourcen zusammengefasst, welche die technische Verfügbarkeit dieser Stoffe widerspiegeln (Tabelle 4). Aus diesen Daten, die den heutigen Kenntnisstand bezüglich Vorkommen und Fördertechnik abbilden, ist abzulesen, dass die Erdölvorkommen noch für Jahrzehnte den Bedarf decken können. Damit kann aber keine Aussage über den künftigen Ölpreis getroffen werden, denn zumindest für das Erdöl ist in den nächsten 15 bis 20 Jahren damit zu rechnen, dass die Jahresproduktion das so genannte Fördermaximum überschreiten und danach aufgrund von geophysikalischen Gesetzmäßigkeiten zurückgehen wird (Rifkin, 2003, 26). In den europäischen und nordamerikanischen Fördergebieten ist dies bereits geschehen, in den USA schon vor über 30 Jahren. In Kombination mit der wachsenden Nachfrage aus den Schwellenländern wird dann ein bedeutender Nachfrageüberhang entstehen, der auf dem Weltmarkt durch Preissteigerungen ausgeglichen wird. Das Problem der Zukunft wird der Erdölpreis sein und nicht die Fördermenge. Die letzte Tonne Erdöl wird dagegen – allein schon aus Kostengründen – nie gefördert werden.

Spätestens seit der Erfindung der „Ölwaffe“ durch die OPEC ist der freie Zugang zu den Märkten der einzelnen Energieträger ebenfalls ein ganz entscheidendes Kriterium für die Verfügbarkeit. Diese quasi politische Form der Verfügbarkeit hat mit dem Irak-Krieg besonders stark an Aktualität gewonnen, da mit Ausnahme der Kohle alle fossilen Ener-

gieträger in politischen Spannungsgebieten konzentriert sind (Tabelle 5). Die Bedeutung von Produzenten aus politisch instabilen Regionen wird in der Zukunft sogar noch beträchtlich zunehmen (Degen/Maly, 2000). Hinzu kommt, dass eine politische Einschränkung der Verfügbarkeit von Energierohstoffen nicht von den Korrekturkräften des Marktes behoben werden kann. Dies führt dazu, dass unter dem Gesichtspunkt der Versorgungssicherheit heimische Primärenergiequellen den importierten Primärenergieträgern tendenziell vorzuziehen sind.

## Statische Reichweiten nicht erneuerbarer Primärenergieträger

Tabelle 4

in Jahren

	Erdöl	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Uran
Konventionelle Energierohstoffe					
Reserven	43	64	207	198	42
Ressourcen und Reserven	67	149	1.425	1.264	527
Konventionelle und nicht-konventionelle* Energierohstoffe					
Reserven	62	64	207	198	42
Ressourcen und Reserven	157	756	1.425	1.264	527

\* Ein Energierohstoff wird als nicht-konventionell bezeichnet, wenn er nicht mit konventionellen Methoden zu fördern ist. Die wichtigsten Formen nicht-konventioneller Energierohstoffe sind Ölsände und Methanhydrate;  
Quelle: BGR, 2003, 41

## Reserven nicht erneuerbarer Energierohstoffe 2001

Tabelle 5

Regionale Verteilung in Exajoule

Region	Erdöl		Erdgas		Kohle		Uran	Insgesamt
	Konventionell	Nicht-konventionell	Konventionell	Nicht-konventionell	Steinkohle	Braunkohle		
Europa	139	42	213	6	1.054	569	1	2.276
GUS	629	397	1.787	3	4.460	144	146	7.567
Afrika	470	21	375	–	917	–	78	1.881
Naher Osten	3.961	418	1.869	–	5	–	–	6.254
Asien/Australien	252	126	395	3	5.552	719	268	7.584
Nordamerika	354	1.297	240	48	5.198	522	133	7.900
Lateinamerika	546	460	224	–	480	–	18	1.984
<b>Welt</b>	<b>6.351</b>	<b>2.761</b>	<b>5.105</b>	<b>60</b>	<b>17.666</b>	<b>1.954</b>	<b>644</b>	<b>35.447</b>
EU-15	59	13	144	3	750	398	12	1.378
OPEC	4.741	837	2.326	3	108	38	–	8.053

Quelle: BGR, 2003, 25

Neben den verschiedenen Formen der Verfügbarkeit spielen die Kosten für die Umstellung des Straßenverkehrs mit all seinen vor- und nachgelagerten Branchen auf einen alternativen Antrieb oder Treibstoff eine entscheidende Rolle. Daher ist auch die Verfügbarkeit von so großer Bedeutung, denn ohne langfristige Versorgungssicherheit wird niemand die Investitionen in eine alternative Versorgungsinfrastruktur tätigen, die sich unter Umständen erst in Jahrzehnten rentieren würde (Hackenjös, 2000, 109). So gibt es für den Hoffnungsträger Wasserstoff ( $H_2$ ) Schätzungen, nach denen der Aufbau einer globalen Versorgungsinfrastruktur über eine Billion US-Dollar kosten würde (Pehnt, 2002, 76). Die Kosten der Versorgungsinfrastruktur werden entscheidend davon abhängen, wie viel von der bestehenden Infrastruktur weiter genutzt werden kann. In dieser Beziehung haben flüssige Treibstoffe einen deutlichen Vorteil gegenüber gasförmigen Treibstoffen, die unter hohem Druck gehalten werden müssen, um den relativ geringen volumenbezogenen Energiegehalt auszugleichen (Oertel/Fleischer, 2000).

Zudem können die Folgen einer Umstellung des Straßenverkehrs auf eine neue Energiequelle Strukturveränderungen in der gesamten Volkswirtschaft nach sich ziehen. Veränderte Rohstoffanforderungen und Fertigungsweisen können stark in Zulieferindustrien und den Maschinenbau ausstrahlen. Das Humankapital im Kfz-Handwerk könnte beispielsweise bei einer Umstellung auf Brennstoffzellen weitgehend entwertet werden. Ein weiterer Aspekt liegt darin, dass der Straßenverkehr mit anderen Sektoren um die neuen Energierohstoffe konkurrieren und aufgrund der hohen Zahlungsbereitschaft der Autofahrer diese Konkurrenten wohl teilweise auch verdrängen wird. Dieses würde zusätzliche Verschiebungen in der Volkswirtschaft auslösen. Da bei der Herstellung einiger alternativer Treibstoffe zusätzliche Kuppelprodukte entstehen, würde eine Großproduktion dieser Treibstoffe auch die Märkte dieser Kuppelprodukte total verändern, was sich beispielsweise am Preisverfall für Glycerin bereits beobachten lässt.

### 3.3 Effizienz

Wie eigentlich alle wirtschaftlich relevanten Entscheidungen sollte auch die Wahl eines alternativen Antriebs oder Kraftstoffs dem ökonomischen Prinzip folgen. Da die Annahme getroffen wurde, dass die Reduzierung der Emissionen von  $CO_{2eq}$  das ökologische Primärziel darstellt, gilt es nun, dieses Ziel mit möglichst geringen Kosten zu erreichen. Dabei sind die verschiedenen Formen der Verfügbarkeit und die zu erwartenden weiteren ökologischen Belastungen als stringente Nebenbedingungen zu werten. Auf dieser Basis stellt die umweltökonomische Effizienz eines Antriebs und Treibstoffs, gemessen in Vermeidungskosten pro Tonne  $CO_{2eq}$ , zunächst das Hauptentscheidungskriterium dar. Dieses Entschei-

dungskriterium wählt von den zur Verfügung stehenden Alternativen diejenige aus, die bei (annähernd) gleichen Reduktionen von umweltschädlichen Einflüssen des Straßenverkehrs mit den geringsten volkswirtschaftlichen Kosten verbunden ist. Zudem muss geprüft werden, ob der untersuchte Primärenergieträger nicht in einer alternativen Verwendung ein günstigeres Nutzen-Kosten-Verhältnis erreicht als beim Einsatz im Straßenverkehr (Ewe, 2004, 91). Dies betrifft insbesondere den Einsatz in der Stromerzeugung, die in Deutschland aufgrund des hohen Anteils der Kohle mit etwa 170 Tonnen  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{TJ}$  deutlich höhere Treibhausgasemissionen pro Leistungseinheit produziert als der Verkehr. Die Beachtung dieses Effizienzkriteriums ist vor allem für den Massenmarkt von besonderer Bedeutung, denn die bei der Vermeidung von Treibhausgasemissionen effektivsten Alternativen sind oftmals gleichzeitig die teuersten und für den Durchschnittsbürger wäre ihr Einsatz vollkommen unerschwinglich. Es kommt nicht von ungefähr, dass hoch effektive Konzepte, etwa die wasserstoffbetriebene Brennstoffzelle, bisher nur in Bereichen Verwendung finden, in denen Kosten eine untergeordnete Rolle spielen, zum Beispiel in den Mondlandefähren der Apollo-Missionen oder als innovativer Antrieb im U-Boot-Bau.

## 4

### Alternative Antriebe

Bei den möglichen Alternativen sind zunächst zwei Gruppen zu unterscheiden. In der deutlich kleineren Gruppe sind die alternativen Antriebe zusammenzufassen. Aus heutiger Sicht stehen eigentlich nur zwei Antriebskonzepte zur Wahl, nämlich die traditionelle Verbrennungskraftmaschine (VKM) oder ein elektrischer Antrieb. Eine weitere Möglichkeit stellt die Kombination dieser beiden Systeme in Form eines Hybridfahrzeugs dar. Andere Konzepte, wie etwa ein Gasturbinenantrieb oder der Stirlingmotor<sup>2</sup>, werden wohl auch in Zukunft keine Chance auf dem Markt haben. Beide Systeme haben den Vorteil, dass sie auf eine breite Palette an Energieträgern als Treibstoff zurückgreifen können.

So ist die VKM, die seit über 100 Jahren kontinuierlich weiterentwickelt wird, eines der ausgereiftesten Industrieprodukte überhaupt. Dennoch sehen Entwickler in ihr noch großes Entwicklungspotenzial. Sie erreicht vor allem im Volllastbereich

---

<sup>2</sup> Der Stirlingmotor ist eine Maschine, in der ein Gas in einem geschlossenen Motorraum erwärmt wird. Die durch Erwärmung entstehende Volumenänderung des Gases wird dabei auf einen Kolben übertragen. Das Gas wird danach abgekühlt und wieder komprimiert.

gute Wirkungsgrade, das heißt, dass ein hoher Anteil der im Treibstoff gebundenen Energie in nützliche Arbeit umgewandelt wird. Vor allem im Teillastbereich sind die Wirkungsgrade jedoch aufgrund thermodynamischer Gesetze (Carnot-Prinzip) deutlich geringer. Für die VKM spricht ferner, dass sich praktisch alle flüssigen Energieträger in der VKM verwenden lassen. Diese wiederum ermöglichen es, relativ große Energiemengen im Auto zu speichern.

Auch der Elektromotor ist seit langem bekannt. Sein wesentlicher Vorteil liegt in guten Wirkungsgraden im Teillastbereich (Stadtverkehr). Zudem ist er leise und verursacht keinerlei Abgase. Ein wesentlicher Nachteil liegt in der Problematik, die für seinen Betrieb notwendige Energie bereitzustellen, denn Elektrizität lässt sich nur relativ schlecht speichern. Die Speicherung in Batterien hat sich aufgrund der geringen gewichts- und volumenspezifischen Speicherfähigkeit als untaugliches Mittel für den Straßenverkehr erwiesen (Tabelle 6). Es wird notwendig sein, einen Energieträger im Fahrzeug zunächst in Strom und dann in Bewegung umzuwandeln. Durch diesen zusätzlichen Umwandlungsschritt geht aber zwangsweise Energie verloren und der Gesamtwirkungsgrad sinkt. In der Regel wird der Elektromotor in Kombination mit der Brennstoffzelle genannt, die diesen Umwandlungsschritt mit sehr hohen Wirkungsgraden umsetzen kann. Das reine Elektrofahrzeug, das seine Energie aus dem Stromnetz bezieht, spielt aus heutiger Sicht hingegen keine Rolle mehr.

<b>Energieinhalt von Kraftstoffen</b>						Tabelle 6	
pro Tonne und pro Kubikmeter							
<b>Massenspezifisch in kWh/t</b>							
Wasserstoff		Erdgas		Benzin/Heizöl	Steinkohle	Methanol	Batterien
33.500		13.800		12.000	8.150	5.450	10
<b>Volumenspezifisch in kWh/m<sup>3</sup></b>							
Wasserstoff		Erdgas		Benzin/Heizöl	Steinkohle	Methanol	Batterien
200 Bar	Flüssig	200 Bar	Flüssig				
600	2.380	2.000	5.800	11.000	12.000	4.300	100
Quelle: Pehnt, 2002, 64							

Die Bilanz der beiden wahrscheinlichen Antriebsalternativen wird im Wesentlichen von den eingesetzten Treibstoffen bestimmt. Die Spanne der in den genannten Antrieben einsetzbaren Treibstoffe reicht von konventionellen Erdölprodukten über aus Pflanzen gewonnene Biokraftstoffe bis zu gasförmigen Substanzen wie Erdgas oder Wasserstoff. Diese Stoffe unterscheiden sich bezüglich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften sehr stark voneinander. In der mobilen Anwendung hat vor allem die in einem Treibstoff gespeicherte volumenspezifische Energie große Bedeutung, da sie ganz wesentlich über die

Reichweite eines Kfz und das notwendige Tankvolumen entscheidet. Hier liegt auch ein großer Nachteil gasförmiger Treibstoffe. Diese weisen nur unter hohem Druck einen einigermaßen akzeptablen volumenspezifischen Energiegehalt auf, obwohl sie aufgrund ihres hohen Wasserstoffanteils eigentlich deutlich mehr Energie je Gewichtseinheit beinhalten als die aufgeführten Flüssigkeiten und Feststoffe. Das Erzeugen von hohem Druck kostet aber viel Energie, was die Bilanz aller gasförmigen Treibstoffe negativ beeinflusst. Zudem erhöhen sich die Kosten für Versorgungsinfrastruktur und Fahrzeugtanks exponentiell, wenn mit hohem Druck oder extremen Temperaturen gearbeitet werden muss. Im Folgenden wird eine breite Palette von möglichen Treibstoffen und Antriebskonzepten betrachtet, die von den heute gebräuchlichen Diesel- und Ottokonzepten über verschiedene Arten der Biokraftstoffe bis zu Elektrofahrzeugen und Brennstoffzellenantrieben reicht. Die Liste der behandelten Treibstoffe wurde auf Basis umfangreicher Literaturrecherchen erstellt. Sie erhebt zwar keinen Anspruch auf Vollständigkeit, deckt aber alle wesentlichen Alternativen ab.

## 5

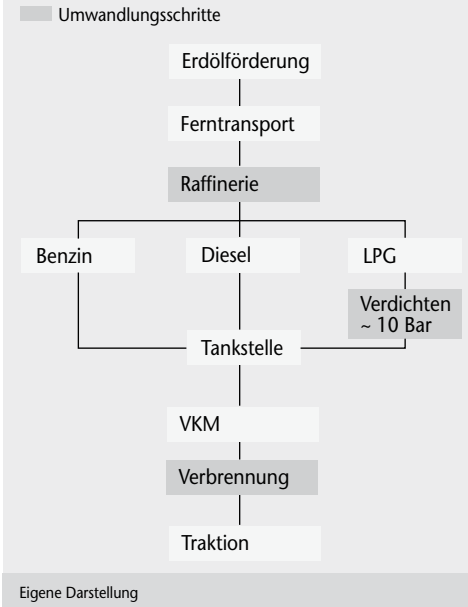
## Diesel und Benzin

Die seit über 100 Jahren gebräuchlichen erdölbasierten Kraftstoffe stellen den Benchmark dar, an dem sich jeder zukünftige Treibstoff messen lassen muss. Diese Kraftstoffe haben selbst bereits eine lange Evolution durchlaufen. Die heute an den Tankstellen angebotenen Kraftstoffe haben mit dem, was vor 100 Jahren in den Tank kam, außer dem Namen nicht mehr viel gemein.

Otto- und Dieselmotoren sind ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, Aromaten, Additiven und weiteren Stoffen. So enthält heutiger Dieselmotorkraftstoff etwa 500 Inhaltsstoffe, unter denen sich über 200 verschiedene Kohlenwasserstoffe befinden (Krüger, 2002, 34). Diesel- und Ottomotorkraftstoffe unterscheiden sich unter anderem durch ihr Brennverhalten und durch ihren Kohlenstoffgehalt. Diesel enthält mehr Energie pro Liter, aber eben auch mehr Kohlenstoffatome, weshalb auch die  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen bei der Verbrennung eines Liters Dieselmotorkraftstoff mit etwa 2,6 Kilogramm höher sind als bei der Verbrennung der gleichen Menge Ottomotorkraftstoff, bei der etwa 2 Kilogramm  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  entstehen.

## Well to Wheel: Erdöl

Abbildung 1



Der Weg vom Bohrloch zum Reifen ist beim Erdöl sehr geradlinig, wie Abbildung 1 zeigt. Der auch als Autogas bekannte Treibstoff LPG (Liquified Petroleum Gas) ist der Vollständigkeit halber in der Abbildung mit aufgeführt. Das vor allem in den Niederlanden verbreitete LPG ist ein Nebenprodukt der Benzinherstellung und erfüllt somit nicht die Anforderungen an einen Kraftstoff der Zukunft. Daher wird es im Folgenden auch nicht weiter behandelt. Ein großer Vorteil des im Schaubild skizzierten Versorgungssystems liegt darin, dass alle erdölbasierten Treibstoffe in der gleichen Anlage erzeugt werden können, die Umwandlung

des Rohöls also sehr gebündelt erfolgt. Zudem muss nur an einem Punkt der Versorgungskette ein energieintensiver Umwandlungsprozess stattfinden, bis der Fahrzeugtank erreicht ist. Anschließend findet ein Verbrennungsvorgang statt, dessen Wirkungsgrad durch das Carnot-Prinzip jedoch eingeschränkt wird. Die besten Wirkungsgrade werden heute in den Lkw-Motoren erzielt. Hier kann der Wirkungsgrad in naher Zukunft bei bis zu 40 Prozent liegen (Stromberger, 2003, 31). Die hohe Zahl von Inhaltsstoffen ist als einer der Nachteile von erdölbasierten Kraftstoffen zu sehen. So macht es die hohe Anzahl der Kohlenwasserstoffe schwierig, den Verbrennungsprozess zu optimieren. Andere Inhaltsstoffe wie die Aromaten sind schlicht unerwünscht und es ist das Ziel der Kraftstoffhersteller, diese mit immer besseren Herstellungsverfahren möglichst zu eliminieren, da sie ausschließlich den Schadstoffausstoß erhöhen. Weitere allgemein bekannte Nachteile liegen darin, dass sich die Fundorte des Erdöls in politischen Krisengebieten konzentrieren und dass der Preis des Erdöls mittel- und langfristig mit hoher Wahrscheinlichkeit weiter steigen wird.

Die fortlaufende Evolution der Motorentechnologie und der erdölbasierten Treibstoffe hat inzwischen einen aus ökonomischer, aber auch aus ökologischer Sicht beachtlichen Benchmark gesetzt, an dem sich die Alternativen messen

lassen müssen. Insbesondere bei der Vermeidung von gesetzlich limitierten Schadstoffen wurden erhebliche Erfolge erzielt (Petersen, 2003, 78 f.). Neben der Einführung des Katalysators in der zweiten Hälfte der achtziger Jahren spielten in den neunziger Jahren die neuen europäischen Abgasnormen (Euro 1–4) bei der Bekämpfung der Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs eine entscheidende Rolle. Durch die sukzessive Verschärfung der Grenzwerte werden die Euro-Normen auch in Zukunft diese Rolle ausfüllen können. Wie aus Tabelle 7 ersichtlich ist, wurden die Emissionsgrenzwerte für Schadstoffe seit Einführung der Euro-Normen erheblich gesenkt. So wurde beispielsweise der Grenzwert für Partikelemissionen von Dieselmotoren bereits um den Faktor sechs reduziert. Die EU-Kommission hat überdies bekannt gegeben, dass sie diesen Grenzwert im Zuge einer künftigen Euro-5-Norm noch einmal um den Faktor fünf reduzieren will.

## Derzeitige Abgasgesetzgebung für Pkw

Tabelle 7

	Euro-1	Euro-2	Euro-3	Euro-4
<b>Gültigkeit seit</b>	01.07.1992 (T) 01.12.1992 (E)	01.01.1996 (T) 01.01.1997 (E)	01.01.2000 (T) 01.01.2001 (E)	01.01.2005 (T) 01.01.2006 (E)
<b>Benzin-Pkw (g/km)</b>				
CO	3,34/3,88*	2,70	2,3	1,0
HC	0,66/0,77	0,341	0,20	0,10
NO <sub>x</sub>	0,49/0,57	0,252	0,15	0,08
HC + NO <sub>x</sub>	–	–	–	–
Partikel	–	–	–	–
<b>Diesel-Pkw (g/km)</b>				
CO	2,88/3,35	1,06	0,64	0,50
HC	–	–	–	–
NO <sub>x</sub>	0,78/0,91	0,57/0,73	0,50	0,25
HC + NO <sub>x</sub>	1,07/1,24	0,77/0,99	0,56	0,30
Partikel	0,14/0,18	0,08/0,10	0,05	0,025

T = Fahrzeug-Typzulassung; E = Fahrzeug-Erstzulassung;

\* Der niedrigere Wert gilt für die Typprüfung, der höhere Wert für die Serienprüfung;

Quelle: VDA, 2005, 137

Aber auch andere Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs gingen bereits deutlich zurück, wobei die besseren Kraftstoffqualitäten (bleifrei, schwefelarm) eine zentrale Rolle spielten. So konnten die Bleiemissionen vollständig eliminiert werden, da Blei durch ein neues Klopfschutzmittel ersetzt wurde. Das besonders gesundheitsschädliche Benzol sowie das Schwefeldioxid, das zum sauren Regen beitrug, sind aus den Autoabgasen ebenfalls so gut wie verschwunden. Die meisten Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs gingen seit 1979 um über 80 Prozent

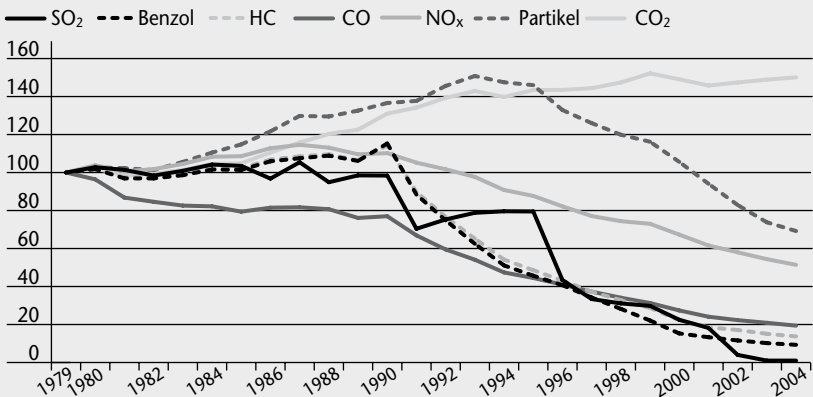


zurück (Abbildung 2). Dieser Rückgang ist eine beachtliche technische Leistung, da sich im gleichen Zeitraum die Fahrleistung mehr als verdoppelt hat und auch heute noch mehr als 16 Millionen Pkw der Emissionsklassen Euro-0 und Euro-1 unterwegs sind. Das entspricht gut einem Drittel des Gesamtbestands. Durch die Stilllegung dieser Fahrzeuge wäre nochmals eine deutliche Emissionsenkung möglich. Aufgrund des wachsenden Marktanteils von Dieselfahrzeugen und des starken Wachstums im fast ausschließlich mit Diesel betriebenen Straßengüterverkehr fallen die Emissionsminderungen bei den dieselspezifischen Schadstoffen Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Partikel in absoluten Mengen etwas geringer aus. Diese Tendenz wird auch durch die Altersstruktur der Dieselfahrzeuge verstärkt, denn 42 Prozent der heute zugelassenen Dieselfahrzeuge sind unterhalb der Emissionsklasse Euro-3 angesiedelt. Es stehen jedoch bereits erste Abgasnachbehandlungssysteme zur Verfügung, mit deren Verbreitung auch diese Emissionen deutlich gesenkt werden können (Partikelfilter, De-NO<sub>x</sub>-Katalysator). Sie kommen bereits in der neuen Generation von schweren Lkw zum Einsatz.

## Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland

Abbildung 2

1979 = 100



Quelle: Knörr et al., 2002

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs verdienen eine getrennte Betrachtung. Aufgrund der um 106 Prozent (DIW, 1981; 2005) gestiegenen Fahrleistung auf Deutschlands Straßen sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs seit 1979, dem Jahr der ersten Selbstverpflichtung der deutschen Automobilindustrie zur Verbrauchsreduktion, um etwa 50 Prozent angestiegen. Der Treibstoffverbrauch von Neufahrzeugen deutscher Hersteller ging hingegen beachtlich zurück – beim Pkw beispielsweise um gut ein Drittel pro 100 Kilometer. Allein zwischen 1990

und 2004 betrug der Rückgang 23 Prozent (VDA, 2005a, 129). Die unter Testbedingungen ermittelten Verbrauchsreduktionen schlagen jedoch nur teilweise auf die zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch, da zum einen die bereits beschriebene zeitliche Verzögerung bei der Emissionsentwicklung im Fahrzeugbestand eintritt und zum anderen die Fahrweise der Verkehrsteilnehmer im Test nur annäherungsweise abgebildet werden kann. Aus diesen Faktoren erklärt sich auch die Tatsache, dass die nach dem TREMOD-Modell ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Bestands mit etwa 200 Gramm je gefahrenen Kilometer deutlich über denen von Neufahrzeugen liegen (Knörr et al., 2002). Die Neufahrzeuge der europäischen Hersteller, die im Zuge einer Selbstverpflichtung zugesagt haben, die Emissionen je gefahrenen Kilometer bis 2008 auf 140 Gramm zu senken, emittierten 2003 im Durchschnitt noch 163 Gramm je gefahrenen Kilometer.

Nachdem die Schadstoffvermeidung bereits gut vorangekommen ist, steht die Effizienzsteigerung der Antriebe und damit die Senkung von Spritverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen ganz oben in der Prioritätenliste der Motorenentwickler. Es gibt Schätzungen, wonach sich der Treibstoffverbrauch durch konventionelle Verbesserungen noch einmal um bis zu 30 Prozent senken lässt, ohne auf energieaufwendige Komfort- oder Sicherheitselemente verzichten zu müssen. Allgemein wird angenommen, dass der Ottomotor noch höhere Optimierungsreserven hat als der Dieselmotor. Es ist zudem durchaus möglich, dass die beiden heutigen Motorentchnologien zu einer Mischform konvergieren werden, die dann die Vorteile der beiden Konzepte kombiniert (Steiger, 2001). Die Ansatzpunkte für eine konventionelle Optimierung sind recht vielfältig. Neben der weiteren Verbrennungsoptimierung bietet auch das Motormanagement Potenziale, beispielsweise indem der Motor in Leerlaufphasen abgeschaltet wird (Start-Stopp-Automatik). Weitere Ansatzpunkte sind in der Getriebetechnologie oder in der Gewichtsreduktion durch Einsatz neuer Materialien zu finden. Viel versprechend ist auch die Nutzung kleinerer, aber hoch aufgeladener Motoren (Downsizing). Weitere Potenziale finden sich bei der Reifen- und Schmieröhlentwicklung. Zudem liegt in der Fahrerausbildung ein wichtiger Ansatzpunkt, denn immerhin kann eine sparsame Fahrweise den Spritverbrauch um bis zu 30 Prozent senken.

Die konventionellen Antriebe verfügen nicht über ökologisches Verbesserungspotenzial, sondern setzen auch ökonomische Maßstäbe. Die eingeführten Kraftstoffe können in Deutschland auf ein extrem dichtes, wenn auch schrumpfendes Versorgungsnetz von etwa 15.000 Tankstellen zurückgreifen. Die Notwendigkeit, neue Versorgungsinfrastrukturen zu schaffen, entfällt. Auch die Produktpreise vor Steuern sind relativ gering. So beträgt der Nettopreis für einen Liter Superbenzin 32 Cent und für einen Liter Diesel 37 Cent. Der Anteil des Wareneinstands am

Zapfsäulenpreis beträgt nur etwa 20 Prozent ([www.aral.de](http://www.aral.de)). Den Löwenanteil am Treibstoffpreis machen mit knapp 73 Prozent die Steuern (Mineralöl-, Mehrwert- und Ökosteuer) aus. Der Staat wäre also theoretisch durchaus in der Lage, die von den Rohölmärkten kommenden Preissteigerungen für den Bürger zu kompensieren, selbst wenn sich der Rohölpreis noch einmal verdoppeln sollte. Allerdings wäre dies mit hohen Einnahmenverlusten verbunden. Im Gegensatz dazu wäre die Lage für viele Entwicklungsländer wesentlich kritischer, wenn es zu weiteren Preissteigerungen auf den Ölmärkten kommt.

Alles in allem bestehen verschiedene Möglichkeiten, um auch bei fortgesetzter Nutzung von erdölbasierten Treibstoffen den Primärenergieverbrauch im Fahrzeug zu reduzieren und die Schadstoffemissionen im Griff zu behalten. Es bietet sich noch ein recht beachtliches ökologisches Entwicklungspotenzial bei den konventionellen Antrieben. Allerdings ist dieses Potenzial nur mit einem erheblichen Kostenaufwand zu realisieren, da der technische Aufwand aufgrund des bereits sehr hohen Entwicklungsstands des Kfz ziemlich groß ist. Die Grenzvermeidungskosten für eine Tonne  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  werden in diesem Zusammenhang zurzeit auf etwa 200 Euro geschätzt. Damit liegen sie deutlich höher, als es in anderen Sektoren der Fall ist, beispielsweise bei der Stromerzeugung oder in den privaten Haushalten. Dieser Aspekt wird dadurch verdeutlicht, dass der Preis für ein europäisches Emissionszertifikat, der in etwa die Vermeidungskosten der teilnehmenden Anlagen abbilden sollte, zwischen 20 und 30 Euro gehandelt wird. Aus dieser Sicht wären die Gelder, die für eine weitere Emissionsminderung im Straßenverkehr aufgewendet werden müssen, in anderen Sektoren deutlich effizienter einsetzbar. Es kommt erschwerend hinzu, dass einige emissionsenkende Maßnahmen ziemlich eindeutig den mikroökonomisch definierten Kundenwünschen entgegenlaufen. Kleine Fahrzeuge mit kleinen Motoren (Downsizing) oder einer schlechteren Ausstattung (zum Beispiel ohne Klimaanlage), die dennoch in der Anschaffung relativ teuer sind, haben sich bereits in der Vergangenheit als Ladenhüter entpuppt. Aus makroökonomischer Sicht spricht einiges für eine längerfristige Weiternutzung des Erdöls als Primärenergieträger im Straßenverkehr. Damit entfallen die Kosten für den Aufbau einer neuen Infrastruktur. Hinzu kommen die relativ geringen Bereitstellungskosten der Rohstoffe, die trotz der galoppierenden Ölpreise der letzten Monate noch immer unter denen aller bekannten Alternativen liegen. Ein Gegenargument liefert allenfalls die Versorgungssicherheit, die sich in den nächsten zehn bis 20 Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit eher verschlechtern wird, da alles für einen hohen Nachfrageüberhang nach Erdöl in der Zukunft spricht. Alles in allem führen die vorhandenen ökologischen Potenziale und die trotz aller Preissprünge noch immer günstige Kostensituation zu einer so guten

Effizienz beim Einsatz von erdölbasierten Kraftstoffen, dass Erdöl noch lange der dominierende Primärenergieträger im Straßenverkehr sein wird.

## **Hybridfahrzeuge**

Eine besondere Möglichkeit zur Verbrauchsreduktion in Benzin- und Dieselfahrzeugen stellt die Hybridisierung dar. Streng genommen handelt es sich bei den Hybridmotoren, die neben der VKM auch über ein elektrisches Antriebssystem verfügen, nicht um einen alternativen Antrieb oder einen alternativen Treibstoff, sondern eher um ein Konzept zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs unter Beibehaltung der heutigen Treibstoffe.

Allerdings ist die Idee, VKM und Elektromotor in einem Fahrzeug zu kombinieren, keineswegs neu. Bereits im Jahr 1902 stellte Ferdinand Porsche den ersten Hybridwagen vor (Noreikat et al., 2000, 671). Dass sich das Konzept nicht durchsetzen konnte, lag vor allem an der komplexen Technologie, die Hybride in der Herstellung relativ teuer macht. Zudem sorgt die Notwendigkeit, zwei Energiespeicher und auch zwei Antriebsaggregate mitführen zu müssen, dafür, dass solche Fahrzeuge verhältnismäßig schwer sind, was sich vor allem im Volllastbetrieb bei Überlandfahrten negativ auf den Verbrauch auswirkt. Ein besonderer Vorteil der Hybridfahrzeuge liegt hingegen darin, dass der Elektromotor die VKM in den ungünstigen Beschleunigungsphasen unterstützen kann. Die Unterstützung durch den Elektromotor senkt den Verbrauch und damit auch sämtliche Emissionen des Fahrzeugs. Da die Hybride weiterhin auf Mineralöl als Primärenergieträger zurückgreifen, vermeiden sie zudem die Reichweitenprobleme der batteriegespeisten Elektroautos. Diese Vorteile der verschiedenen Hybridvarianten kommen vor allem im Stadtverkehr zum Tragen, denn dort wird die Motorleistung in 45 Prozent der Reisezeit überhaupt nicht benötigt.

Generell gilt es, verschiedene Hybridkonzepte zu unterscheiden. Zunächst einmal gibt es die Grundkonzepte des parallelen und des seriellen Hybridantriebs. Der serielle Hybridantrieb ist im Prinzip die einfachere Variante. Bei diesem Konzept wird die VKM als Stromgenerator genutzt, der eine Batterie speist, die wiederum einen Elektromotor antreibt. Die VKM selbst wird nicht direkt als Antrieb genutzt. Der Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass die VKM immer in ihrem optimalen Lastbereich betrieben werden kann, was Verbrauch und Schadstoffausstoß senkt. Der parallele Hybridantrieb hingegen kombiniert zwei voneinander unabhängige Antriebe in einem Fahrzeug, die beide an den gleichen Antriebsstrang angeschlossen sind. Damit können in verschiedenen Fahrsituationen verschiedene Antriebe genutzt werden, zum Beispiel der Elektromotor zum Anfahren und die VKM bei höheren Geschwindigkeiten. Auch eine

Unterstützung der VKM durch den Elektromotor bei hohen Geschwindigkeiten ist möglich, solange die Batterie geladen ist. Die eigentliche Energiequelle ist auch hier die VKM, allerdings lässt sich ein Teil der elektrischen Energie auch anderweitig gewinnen, beispielsweise durch Bremskraftrückgewinnung. Auch bei diesem Konzept wird versucht, die VKM vermehrt in den Lastbereichen zu betreiben, in denen ihre Stärken liegen, und sie in den kritischen Teillastbereichen durch den Elektromotor zu substituieren.

Den möglichen Grad der Substitution bestimmt dabei die Auslegung des Elektroantriebs, wobei sich im bisherigen Entwicklungsprozess drei verschiedene Größenklassen herausgebildet haben. Sie stellen im Prinzip die Anpassung des Hybridkonzepts an verschiedene Fahrzyklen dar, denn es besteht ein offensichtlicher Trade-off zwischen der Leistungsstärke des zusätzlichen Elektroantriebs auf der einen und dem Fahrzeuggewicht sowie der technologischen Komplexität auf der anderen Seite. Vereinfacht gesagt sollte also der mögliche Anteil des Elektroantriebs an der Antriebsleistung umso größer sein, je mehr das Fahrzeug im städtischen Stop-and-go-Verkehr eingesetzt wird. Denn dort kann es seine Verbrauchsvorteile am besten einsetzen und somit die ebenfalls mit dem Elektroanteil steigenden zusätzlichen Produktionskosten des komplexen Antriebsstrangs amortisieren.

Die schwächste Hybridvariante, der so genannte Mikrohybrid, verzichtet auf den Einbau elektrischer Antriebsaggregate und beschränkt sich stattdessen auf den Einsatz von Stromerzeugern, welche die chronisch ineffiziente Versorgung des Bordnetzes durch die Lichtmaschine teilweise substituieren und so Treibstoff sparen. Dieses System ist vergleichsweise leicht zu bauen und preiswert, spart aber auch nur verhältnismäßig geringe Treibstoffmengen ein. Die zweite Kategorie ist der Mildhybrid. Dabei wird die VKM durch ein kleines zusätzliches elektrisches Antriebssystem ergänzt. Dieses kann die VKM beim Anfahren oder bei Vollgasfahrten unterstützen, ist aber zu schwach, um das Fahrzeug allein zu bewegen. Das System erhöht das Fahrzeuggewicht und die Komplexität des Antriebsstrangs im Vergleich zum Mikrohybrid, kann aber in Fahrzyklen mit einem höheren Anteil von Stop-and-go-Verkehr mehr Treibstoff einsparen. Die dritte Variante ist der Vollhybrid. Vollhybride sind in der Lage, sich alternativ mithilfe eines Elektroantriebs fortzubewegen. Dementsprechend groß und schwer fallen damit auch die zusätzlichen Antriebskomponenten aus. Zudem stellt das Getriebe große Anforderungen an die Konstrukteure, da es zwei sehr unterschiedliche Antriebsleistungen kombinieren muss. Dafür kann der Vollhybrid teilweise emissionsfrei fahren, und auch die VKM kann verkleinert werden, da der starke Elektromotor bei Vollgasfahrten Unterstützung gewähren kann (Kok et al., 2005).

Wie bereits ausgeführt, werden die Einsparmöglichkeiten bezüglich des Treibstoffs und der Schadstoffemissionen beim Einsatz von Hybridantrieben durch den zugrunde liegenden Fahrzyklus des Nutzers und den Grad der Hybridisierung bestimmt. Grob geschätzt dürften die erreichbaren Verbrauchsminderungen etwa zwischen 15 und 30 Prozent des Gesamtverbrauchs liegen, wenn der Fahrzyklus der eingesetzten Hybridvariante entspricht. Die heute verfügbaren Hybridsysteme sind allerdings noch verhältnismäßig ineffizient. Da sie am Anfang ihrer Entwicklung stehen, haben die Ingenieure zunächst einmal darauf geachtet, die Komplexität der eingesetzten Technologie überschaubar zu halten. Es besteht noch ein deutliches Optimierungspotenzial, vor allem im Getriebebereich (Reik et al., 2005, 4). Da sich an der eigentlichen Verbrennung und dem eingesetzten Treibstoff nichts ändert, dürften sich der Treibhausgasausstoß und die Schadstoffemissionen in etwa parallel zum Treibstoffverbrauch entwickeln. Allerdings ist zu beachten, dass sich vor allem die Schadstoffemissionen auf kurzen Fahrten auch besser entwickeln können, da die gängigen Abgasnachbehandlungssysteme wie der Katalysator oder der Partikelfilter erst einmal Betriebstemperatur erreichen müssen, um ihre volle Wirkung zu erzielen.

Bislang sind nur relativ wenige Hybridfahrzeuge auf dem Markt. Der tatsächliche Umfang der Zusatzkosten in der Fahrzeugherstellung lässt sich ohne einen Einblick in die Kalkulationen der Herstellerfirmen nicht abschätzen. Die Zusatzkosten eines Mildhybrids liegen nach veröffentlichten Zahlen bei etwa 2.500 Euro im Vergleich zu einem normalen Benziner. Bei einem Vollhybrid dürfte der Unterschied noch deutlich größer sein und damit auch signifikant über den Herstellungskosten von Dieselmotoren liegen, mit denen sich bei größeren Anteilen von Überlandfahrten am Fahrzyklus ähnliche Verbrauchswerte erzielen lassen. Zusätzliche gesamtwirtschaftliche Kosten des Aufbaus von Versorgungsstrukturen entfallen hier.

Alles in allem ist festzuhalten, dass sich die Effizienz der Hybridisierung vor allem nach den Fahrgewohnheiten richtet. In Ländern wie etwa Japan mit einem sehr hohen Anteil von Stadtverkehr kann sich ein Vollhybrid viel eher rechnen als beispielsweise in Europa, wo deutlich mehr Überlandfahrten stattfinden. Hier könnte ein Dieselmotor ähnliche Leistungen erzielen. Einen Sonderfall stellt der weltgrößte Markt – die USA – dar. Da sich der US-Markt gegenüber dem Dieselmotor weiterhin skeptisch zeigt, erlebt die Hybridtechnologie dort zurzeit einen Nachfrageboom. Es ist vor allem die US-Nachfrage, die dazu führen wird, dass in den nächsten ein bis zwei Jahren wohl praktisch jeder Fahrzeughersteller auch Hybridfahrzeuge anbieten wird. Somit spricht vieles dafür, dass der Hybridantrieb sich in absehbarer Zeit aus seiner Nische verabschiedet und deutliche

Marktanteile erobert. Mit einem geschätzten Absatzpotenzial von 5 Prozent in den USA im Jahr 2008 kann der Hybridantrieb gerade in diesem traditionellen Hochverbrauchsland einen Beitrag dazu leisten, dass die vorhandenen Erdölreserven länger genutzt werden können, und damit den Anpassungszeitraum für den Übergang zu alternativen Treibstoffen verlängern.

## 6

## Erdgas

Erdgas ist ein brennbares Naturgas. Es besteht im Wesentlichen aus Methan ( $\text{CH}_4$ ). Der Methananteil kann je nach Quelle bis zu 98 Prozent betragen. Häufig enthält Erdgas auch größere Anteile von Ethan oder Propan, Schwefelwasserstoff und bis zu 9 Prozent Kohlendioxid. Gas mit geringeren Methananteilen muss vor der Verwendung einem Reinigungsprozess unterzogen werden, wobei das enthaltene  $\text{CO}_2$  in die Luft abgegeben wird. Erdgas findet sich häufig in den gleichen Gebieten wie Erdöl und es wird, zumindest kurz- bis mittelfristig, als möglicher alternativer Kraftstoff im Straßenverkehr gehandelt.

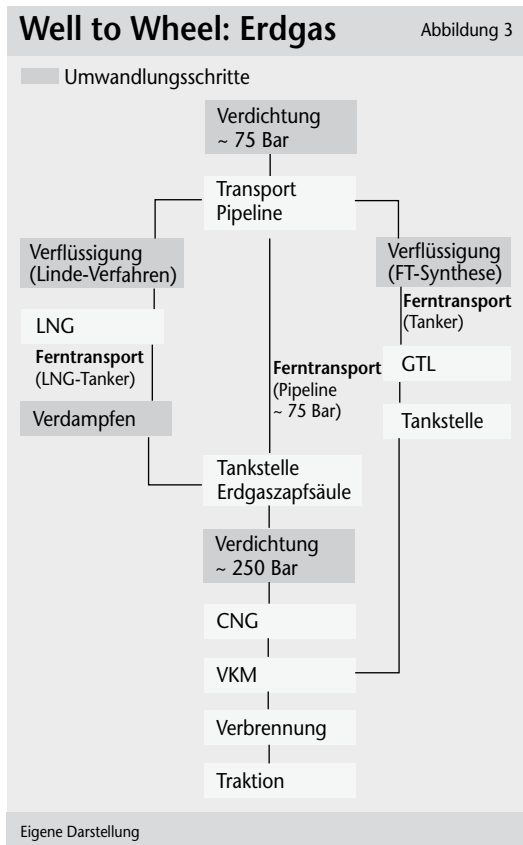
Die statischen Reichweiten von Erdgasreserven und -ressourcen sind größer, als dies beim Erdöl der Fall ist (Tabelle 4). Besonders groß ist der Unterschied der Reichweiten unter Berücksichtigung der nicht-konventionellen Vorkommen, die vor allem aus Methanhydrat (Methaneis) bestehen. Hierbei handelt es sich um von einem Käfig aus Wassermolekülen umschlossenes, hoch konzentriertes Methan. Ein Liter dieses Stoffgemischs enthält rund 165 Liter Methangas. Methanhydrat entsteht am Meeresboden ab einer Tiefe von 500 Metern bei Temperaturen von 2 bis 4 °C. Unter Normaldruck verdampft es umgehend, weshalb die Nutzung der Vorkommen mit heutiger Technologie praktisch nicht möglich und eine kostendeckende Nutzung auch nur schwer vorstellbar ist. Bei der höheren Reichweite der Erdgasvorkommen ist noch nicht eingerechnet, dass die Erdgasnachfrage für Strom- und Wärmeezeugung stark zunimmt. Allein in den USA befanden sich 2002 fast 300 neue Gaskraftwerke in der Bau- oder Planungsphase (Rifkin, 2002). Der Trend zum Gas ist auch in Deutschland spürbar, da moderne Gaskraftwerke mit Wirkungsgraden von bis zu 58 Prozent arbeiten, was deutlich über den Vergleichswerten der zurzeit in Deutschland dominierenden Braun- und Steinkohlekraftwerke liegt.

Deutschland bezieht zurzeit noch fast 70 Prozent seines Erdgases aus den westeuropäischen Förderfeldern, weitere 30 Prozent stammen aus Russland. Dieser Mix wird aber nicht zu halten sein, da gegen Ende dieser Dekade mit

einem Rückgang der europäischen Förderung bei wachsender Nachfrage zu rechnen ist. Die zusätzlichen Mengen werden mit großer Wahrscheinlichkeit aus Russland importiert werden müssen, da der Weltmarkt für Erdgas in nur wenige feste Lieferbeziehungen zerfällt. Dies liegt daran, dass im Falle des Erdgases der Pipeline-Ferntransport eine große Rolle spielt. Aufgrund der hohen Kosten des Pipelinebaus und der systembedingten Starrheit eines Rohrleitungsnetzes besteht eine starke wechselseitige Abhängigkeit von Lieferant und Abnehmer (Müller, 2003, 6).

Die Idee, Erdgas im Kfz einzusetzen, ist nicht besonders neu. Ein Gasmotor folgt im Wesentlichen den gleichen physikalischen Gesetzen wie ein normaler Benzinmotor. Allein in Argentinien fahren über eine Million Erdgasautos. Deren Boom war jedoch wesentlich von der argentinischen Pesokrise im Jahr 1998 beflügelt worden. Durch den Zusammenbruch des Pesos wurde das heimische Erdgas in Relation zum Importöl deutlich billiger. In Deutschland fahren zurzeit etwa 35.000 Erdgasfahrzeuge, die sich an 650 Tankstellen mit Treibstoff eindecken können. Trotz massiver steuerlicher Begünstigung und dem gleichzeitig großen Engagement der Gasversorger ist das Erdgasauto aber nach wie vor ein Nischenprodukt. Die noch 2002 von der Gasbranche genannte Zielgröße von 500.000 Erdgasfahrzeugen im Jahr 2010 scheint kaum erreichbar.

Um in einem Kfz mit seinem beschränkten Raumangebot in ausreichender Menge gespeichert werden zu können, muss Erdgas in jedem Fall „aufbereitet“ werden, da es in seinem Normalzustand einen zu geringen volumenspezifischen Energiegehalt





aufweist. Es gibt im Prinzip drei Möglichkeiten, den volumenspezifischen Energiegehalt von Erdgas so zu steigern, dass sich genug Energie in einem Fahrzeug speichern lässt, um eine markttaugliche Reichweite des Fahrzeugs zu garantieren (Abbildung 3). Die erste Option besteht darin, das Erdgas unter seinen Siedepunkt von  $-161\text{ °C}$  abzukühlen und zu LNG (Liquified Natural Gas) zu verflüssigen. LNG enthält etwa halb so viel Energie je Kubikmeter wie Benzin (Tabelle 6). Diese Technik wird zurzeit vor allem im Ferntransport per Schiff eingesetzt und spielt im Kfz keine Rolle. Die für den Straßenverkehr relevanten Optionen liegen in der Speicherung von Erdgas unter hohem Druck im Fahrzeug oder in einer chemischen Umwandlung zu GTL (Gas to Liquids). Da die verschiedenen Speichermethoden erhebliche Unterschiede aufweisen, soll nun gesondert auf sie eingegangen werden.

## 6.1 Compressed Natural Gas (CNG)

Zurzeit ist die Druckspeicherung die Standardtechnologie im Erdgasauto. Dabei wird das Erdgas unter einem Druck von etwa 250 Bar im Fahrzeug gespeichert. Auf diese Weise kann etwa ein Fünftel des volumenspezifischen Energiegehalts von Benzin erreicht werden. Das Druckgaskonzept wird derzeit von den Gasversorgern vor Ort stark gefördert, da es für sie einen zusätzlichen Absatzmarkt verspricht.

Das günstige H/C-Verhältnis von 4/1 führt dazu, dass Erdgas mit 56 Tonnen  $\text{CO}_2/\text{TJ}$  unter den fossilen Treibstoffen die geringsten direkten  $\text{CO}_2$ -Emissionen je erzeugte Energieeinheit verursacht. Sie liegen knapp 28 Prozent unter den Emissionswerten von Benzin oder Diesel, weshalb Erdgas trotz seiner fossilen Herkunft in der Regel zu den „sauberen“ Primärenergieträgern gezählt wird. Der Vergleich der direkten  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen von Benzin und Erdgas ist hier jedoch wenig zielführend, da mit den indirekten Treibhausgasemissionen der Versorgungskette und Kfz-spezifischen Anwendungsproblemen weitere Faktoren auf die Emissionsbilanz in der Well-to-Wheel-Betrachtung einwirken. Einen großen Einfluss auf diese Bilanz haben beispielsweise die während des Ferntransports auftretenden indirekten  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen. Darunter fallen etwa der Energieaufwand für den Ferntransport und die Druckspeicherung des Gases, aber auch Methanemissionen, die durch Leckagen an Pipelines anfallen können (Dreier/Tzschentschler, 2000, 531 f.).

Anders als bei den direkten  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen, die vor allem von den chemischen Eigenschaften des eingesetzten Energieträgers bestimmt werden, sind für die Quantifizierung der indirekten Emissionen die getroffenen Annahmen über Bezugsquellen und die Verluste an Methangas während des Ferntransports

entscheidend. Bei der heutigen Versorgungsstruktur werden die indirekten  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen des Erdgastransports vom Öko-Institut auf etwa 12,5 Tonnen/TJ geschätzt, womit sie nur unwesentlich höher liegen als beim Erdöl, bei dem der Wert etwa bei 10 Tonnen  $\text{CO}_2$ /TJ liegt (Gemis, 1994; 1998; 2002). Dieser Wert ist aber nicht unumstritten. So errechnete Fichtner (2001) einen deutlich höheren Wert, während Lechtenböhmer et al. (2004) einen etwas geringeren Wert ermittelten.

Diese Berechnungen betreffen allerdings nur den Status quo, bei dem das Erdgas über verhältnismäßig kurze Strecken transportiert werden muss. Da die westeuropäischen Gasvorkommen klein sind, wird die wachsende Nachfrage immer stärker über russisches Erdgas befriedigt werden müssen. Dann muss das Erdgas in Zukunft eine um mehrere Tausend Kilometer längere Strecke zurücklegen, als es heute der Fall ist, wodurch zwangsweise auch der Energieaufwand und damit die  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen für den Transport ansteigen. So laufen allein in Russland an den zwei für den Export nach Europa wichtigsten Erdgasfernleitungen Kompressoren mit einer Gesamtleistung von fast 20.000 Megawatt, um den Transport aufrechtzuerhalten. Von daher ist die folgende Betrachtung der indirekten Emissionen von russischem Erdgas bei der Bewertung der mittelfristigen Zukunftsfähigkeit des Erdgases als Treibstoff zielführender als eine Beschreibung des Status quo.

Die aus dem für den Transport von den russischen Fördergebieten bis zur deutschen Grenze nötigen Energieverbrauch resultierenden zusätzlichen  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen lassen sich nicht genau quantifizieren. Lechtenböhmer et al. (2004) geben hierfür einen Mittelwert von 8,0 Tonnen  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /TJ an. Das Öko-Institut berechnete mit dem Gemis-Modell einen Wert von 13,6 Tonnen  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /TJ. Diese Mengen sind den direkten Emissionen der Erdgasverbrennung hinzuzurechnen, was den Emissionsvorsprung des Erdgases deutlich reduziert, da die indirekten  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen der erdölbasierten Treibstoffe geringer sind. Es muss jedoch auch festgehalten werden, dass die indirekten  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen des Erdgasferntransports keine fixe Größe darstellen und im Zuge einer Erneuerung des Kompressorenbestands durchaus sinken können.

Gleiches gilt für den klimaschädlichen Methanaustritt, der mit dem Ferntransport von Erdgas verbunden ist. Diese Verluste entstehen in der Regel durch fehlerhafte Dichtungen in den Kompressorstationen. Da es sich somit eher um schleichende Verluste als um große Leckagen handelt, sind sie auch kaum lokalisierbar beziehungsweise behebbar. Von daher spricht vieles dafür, dass diese Leitungsverluste auch in absehbarer Zukunft weiter auftreten werden. Normalerweise liegen die Methanverluste in einer Größenordnung von 0,7 bis 1,5 Prozent der Fördermenge. Da die russischen Exportpipelines – ohne inner-

russische Verteilungsnetze – in den letzten Jahren modernisiert wurden, liegen die Methanverluste nach neueren Untersuchungen mit etwa 1 Prozent in einer akzeptablen Größenordnung.

Wie in Tabelle 2 dargestellt wurde, sind Methanemissionen aufgrund ihres im Vergleich zu CO<sub>2</sub> recht hohen GWP nicht unkritisch. Klimaforscher geben für Methan je nach Emissionsort einen Umrechnungsfaktor von Methan zu CO<sub>2</sub> zwischen 20 und 63 an. Das IPCC rechnet in seinen neuesten Klimamodellen mit dem Faktor 23 um. In der Studie von Lechtenböhmer et al. wurden die Methanverluste aus dem Erdgastransport von Sibirien bis zur deutschen Grenze im Mittelwert mit zusätzlichen Emissionen von 4,7 Tonnen CO<sub>2eq</sub>/TJ erzeugte Energie angesetzt. Der vom Öko-Institut ermittelte Wert lag mit 8,2 Tonnen CO<sub>2eq</sub>/TJ bedeutend höher.<sup>3</sup> In der Addition aller Faktoren ergeben sich für den Ferntransport aus Russland Emissionsaufschläge, die zwischen 13,4 Tonnen CO<sub>2eq</sub>/TJ (Lechtenböhmer et al., 2004, 28) und 22,8 Tonnen CO<sub>2eq</sub>/TJ (Öko-Institut) liegen.<sup>4</sup> Legt man den optimistischeren Wert zugrunde, so schrumpft der Emissionsvorteil des russischen Erdgases gegenüber dem Öl unter Berücksichtigung der indirekten Emissionen von fast 30 Prozent auf 18 Prozent frei Grenze zusammen. Eine ältere Studie (Fichtner, 2001) ermittelt unter Einbeziehung der indirekten Emissionen sogar einen Emissionsnachteil für russisches Erdgas gegenüber erdölbasierten Brennstoffen.

Außer durch die zusätzlichen CO<sub>2eq</sub>-Emissionen des Ferntransports wird die Klimabilanz des Erdgases auch noch durch einige fahrzeugspezifische Faktoren verschlechtert. Hierbei sind vor allem zwei Faktoren zu beachten. Das erste Problem liegt in der notwendigen Verdichtung des Gases im Fahrzeugtank. Der Energieverbrauch des Verdichtungsvorgangs hängt stark von den eingesetzten Kompressoren und Erdgasqualitäten ab. Unter ungünstigen Umständen kann die zur Verdichtung von 1 Bar auf 250 Bar nötige Energiemenge etwa 3,5 Prozent<sup>5</sup> der im Erdgas enthaltenen Energiemenge (Heizwert) entsprechen. Die bei der Erzeugung dieser Energiemenge anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen dann auf die indirekten Emissionen aufgeschlagen werden. Ein Sonderproblem stellen Tankstellen dar, die in großer Entfernung von bestehenden Erdgasnetzen liegen, wie es beispielsweise bei vielen Autobahntankstellen der Fall ist. Da es sich nicht lohnen würde, diese an ein Pipelinenetz anzuschließen, muss die Belieferung mit weiteren energieaufwendigen Zwischenschritten wie zum Beispiel dem Transport in flüssiger Form erfolgen.

---

<sup>3</sup> In diesen Studien wurde noch mit dem alten IPCC-Faktor von 21 gerechnet.

<sup>4</sup> Das Öko-Institut rechnet im Gegensatz zu Lechtenböhmer et al. auch die Emissionen der Verteilung in Deutschland mit ein. Die daraus resultierenden zusätzlichen Emissionen sind aber eher gering.

<sup>5</sup> Berechnet mit der adiabatischen Kompressionsgleichung realer Gase.

Ein weiterer Faktor liegt in der Motorenkonstruktion. Anders als beispielsweise in der Stromerzeugung erzielt Erdgas in der mobilen Anwendung keinen besseren Wirkungsgrad als erdölbasierte Kraftstoffe. Tatsächlich benötigen Erdgasmotoren bislang noch einen höheren Einsatz von Primärenergie als die konventionellen Motoren, um die gleiche Leistung zu erreichen. Bei heutigen monovalenten Motoren, die auf Erdgasverbrennung ausgerichtet sind und nur im Notfall mit Benzin betrieben werden können, beträgt der zusätzliche Primärenergiebedarf bis zu 5 Prozent. Bivalente Fahrzeuge, die primär auf Benzinbetrieb ausgerichtet sind, können im Erdgasmodus sogar einen bis zu 20 Prozent höheren Energiebedarf haben. Der Mehrverbrauch gegenüber den bestehenden Motorenkonzepten könnte in Zukunft durch eine Weiterentwicklung der Erdgasmotoren allerdings noch verringert werden. In welchem Ausmaß, lässt sich an dieser Stelle jedoch nicht quantifizieren. Zudem muss berücksichtigt werden, dass Erdgasfahrzeuge einen Druckgastank benötigen, der bis zu 100 Kilogramm mehr wiegt als ein Benzintank. Eine Erhöhung des Fahrzeuggewichts führt aber auch automatisch zu einem höheren Verbrauch. Außerdem verbraucht die Herstellung eines solchen Drucktanks recht viel Energie. In der Addition können bereits die konstruktionsbedingten Faktoren den direkten Emissionsvorteil von CNG annullieren. So kommen Nylund et al. (2004, 42 f.) in ihrer Untersuchung beispielsweise zu dem Ergebnis, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen von CNG-betriebenen Bussen im Durchschnitt 3 Prozent höher waren als die der ebenfalls getesteten Dieselsebuse. Allerdings waren große Emissionsunterschiede je nach Konstruktionsprinzip der Erdgasmotoren zu beobachten. Daher ist dieses Ergebnis nur begrenzt auf den gesamten Bestand an Erdgasfahrzeugen übertragbar. Hier ist auf der Basis der vorliegenden Daten mit einer CO<sub>2eq</sub>-Reduktion von knapp über 10 Prozent zu rechnen. Insgesamt bleiben die Treibhausgasmindepotenziale beim Einsatz von CNG jedoch sehr überschaubar (Kolke et al., 2003).

In jedem Fall weist CNG sehr gute Werte bei den Schadstoffemissionen auf. Nach Angaben der Adam Opel AG lässt sich der Ausstoß von Kohlenmonoxid (CO) um bis zu 75 Prozent, von Kohlenwasserstoffen (HC) um bis zu 80 Prozent und von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) um 70 Prozent verringern, wenn statt erdölbasierter Kraftstoffe Erdgas eingesetzt wird. Die Feinstaubemissionen entsprechen in etwa denen eines Dieselfahrzeugs mit Partikelfilter. Da CO und HC kaum noch ein Problem darstellen, bleiben vor allem die geringeren NO<sub>x</sub>-Emissionen als relevanter Vorteil des Erdgasfahrzeugs übrig. In Anbetracht dessen, dass voraussichtlich ab 2010 in der EU ein strenger Grenzwert für NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in der Umgebungsluft gelten wird, macht dieser Vorteil den Einsatz von Erdgasfahrzeugen in Ballungsgebieten interessant. Gerade beim Verkehr in dicht besiedelten

Gebieten kommt noch ein weiterer Vorteil des Erdgasmotors zum Tragen: Dieser ist nämlich deutlich leiser als vergleichbare Otto- und Dieselmotoren. Da in etwa bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h die Motorengeräusche über die Fahrgeräusche dominieren, spricht dies ebenfalls für einen Einsatz von Erdgas im urbanen Umfeld.

Aus ökonomischer Sicht ist zu beachten, dass die 80-prozentige Mineralölsteuerbefreiung von CNG dazu führt, dass Erdgas für den Autofahrer finanziell interessant ist. Der Tankstellenpreis von einem Kilogramm Erdgas liegt bei rund 70 Cent, was in etwa einem Benzinpreis von 50 Cent entsprechen würde. Dem stehen höhere Anschaffungskosten gegenüber, die bei einem Pkw in etwa zwischen 1.500 und 3.500 Euro liegen. Überdies wird das Tankstellennetz zunehmend dichter. Aus der Sicht eines Autofahrers rechnet sich der Umstieg auf CNG dann, wenn er relativ viel fährt und dabei in gut versorgten Gebieten bleiben kann. Zudem sollten die Fahrten eher kurz sein, da die Reichweite einer Tankfüllung geringer ist, als es bei den konventionellen Treibstoffen der Fall ist. Dieses Profil macht Erdgas zum Beispiel für Taxen, Busse und Müllwagen hoch wirtschaftlich. Für die Erdgasversorger handelt es sich hingegen noch um ein reines Zuschussgeschäft. Mit einem durchschnittlichen Besatz von heute 50 Kfz pro Erdgastankstelle ist ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich. Diese Quote müsste mindestens um den Faktor zehn erhöht werden, damit sich der Betrieb von CNG-Tankstellen rechnet. Aus diesem Grund versuchen viele Versorger, durch die Vergabe von Tankgutscheinen einen Absatzmarkt aufzubauen. Da der jährliche Verbrauch eines Erdgasfahrzeugs in etwa dem eines Einfamilienhauses entspricht, erhoffen sich die Versorger trotz der hohen Anlaufkosten auf mittlere Frist ein gutes Geschäft.

Diese Aussage kann aber nicht einfach auf die makroökonomische Ebene übertragen werden, da die heutigen Preisvorteile das Ergebnis von steuerlicher Subventionierung und Marktfördermaßnahmen der Erdgasversorger sind. Rechnet man die Steuern heraus, liegt der Abgabepreis von CNG über dem von Benzin oder Diesel. Ein zunehmender Erfolg von Erdgasfahrzeugen würde mit sinkenden Mineralölsteuereinnahmen bezahlt werden. Da der Bund auf diese krisensicheren Einnahmen von knapp 41 Milliarden Euro nicht verzichten kann, ist die Aufrechterhaltung des Steuervorteils im Falle des massenhaften Einsatzes von Erdgasfahrzeugen weder wahrscheinlich noch finanzpolitisch nachhaltig. Ebenso wenig ist damit zu rechnen, dass die Erdgasversorger CNG mittelfristig unter ihren Selbstkosten abgeben werden. Man könnte nun erwarten, dass sich der Preisvorteil des Erdgases zumindest in Zeiten hoher Ölpreise weiter erhöht. Doch dies trifft nicht zu. Stattdessen bleibt der Preisabstand zumeist relativ konstant. Der

Grund dafür liegt vor allem darin, dass es für einen so wichtigen Rohstoff wie Erdgas keinen unabhängigen Marktpreis gibt. Der Gaspreis ist vielmehr an den Preis des Konkurrenzprodukts Rohöl gekoppelt. Diese Konstruktion, die unter anderem den langfristigen Lieferverträgen geschuldet ist, verhindert eine echte marktwirtschaftliche Konkurrenz der beiden Stoffe. Ein Marktgleichgewicht dieser unvollkommenen Substitute kann sich so nicht einstellen.

Damit gilt es, die Frage nach den Kosten zu stellen. Wie jeder gasförmige Energieträger benötigt CNG eine speziell auf seine Bedürfnisse zugeschnittene Verteilungs-, Speicher- und Tankinfrastruktur. Vom bestehenden Treibstoffversorgungsnetz sind eigentlich nur die vorhandenen Immobilien nutzbar. In vielen europäischen Regionen existiert ein relativ gut ausgebautes Netz an Gasleitungen, das in der Lage wäre, die im Straßenverkehr zusätzlich benötigten Gasmengen zu transportieren. In diesen Gebieten würden die nötigen Investitionen in Gasleitungen eher gering ausfallen. Lediglich lokale Anschlüsse wären zu legen. Da jedoch ein echter Treibstoff der Zukunft zumindest in allen EU-Staaten weitgehend flächendeckend verfügbar sein müsste, kann es zu erheblichen regionalen Unterschieden bei den Investitionskosten kommen. Da die zu erwartende Nachfrage aus dem Verkehr auch bei Umsetzung der EU-Vorgabe von 10 Prozent Marktanteil zu gering wäre, um den Bau eines komplett neuen Netzes zu rechtfertigen, müsste die Versorgung in den noch unversorgten Gebieten durch den Umweg über LNG sichergestellt werden – mit den entsprechenden negativen Folgen für Kosten und Klimabilanz des CNG. Auch die Betriebskosten eines Verteilernetzes liegen beim Erdgas je Energieeinheit deutlich über den Vergleichswerten von Erdölprodukten (Müller, 2003, 8).

Die höchsten Kosten würden beim Einsatz von CNG jedoch durch den Investitionsbedarf an den Tankstellen entstehen. Speicherung und Verdichtung von Erdgas würden dort hohe Investitionskosten und auch steigende Betriebskosten verursachen. Die Angaben über die Investitionskosten schwanken zwischen 150.000 und einer Million Euro, wobei der Mittelwert etwa bei 250.000 Euro liegt. Der Grund für diese großen Unterschiede liegt darin, dass die Kosten im Wesentlichen von der Auslegung der Gasspeicher und der Kompressoren abhängen, wobei vor allem die Kompressoren sich als Kostentreiber erweisen. Es besteht jedoch weitgehend Einigkeit darüber, dass sich nur große CNG-Tankstellen wirtschaftlich rechnen werden, da neben den hohen Investitionskosten auch die Betriebskosten recht hoch sind. Die zusätzlichen Betriebskosten sind relativ schwer zu kalkulieren, da sie stark von den Kapitalkosten für die Investitionen und vom Strompreis abhängen. Hinzu kommen zusätzliche Wartungs- und Ausbildungskosten (WEN Consulting, 2004, 7 f.). In der CONCAWE-Studie werden die

zusätzlichen Betriebskosten pro Tankstelle mit 60.000 Euro pro Jahr angegeben, wobei die Stromkosten noch nicht berücksichtigt sind. Diese Zusatzkosten können sich allerdings beim Auftreten von Economies of Scale noch verringern.

Die statische Reichweite von Erdgasreserven und -ressourcen ist nach heutigem Kenntnisstand mit 149 Jahren etwa doppelt so groß wie die des Öls. Es ist allerdings möglich, dass sich diese Reichweiten verschieben werden, da die Nachfrage nach Erdgas wohl noch stärker steigen wird, als dies beim Rohöl der Fall sein wird. Da zudem die nicht-konventionellen Vorkommen an Öl (Tabelle 4) bereits heute technisch nutzbar sind, können sich die dynamischen Reichweiten dieser Primärenergieträger mittelfristig weiter annähern. Aus versorgungspolitischer Sicht sind mittelfristig eher geringe Vorteile durch den Einsatz von CNG als Treibstoff zu erkennen, denn auch die Erdgasvorkommen sind in wenigen Gebieten konzentriert, die weitestgehend mit den Ölförderländern identisch sind, da Erdöl und Erdgas ähnliche geologische Voraussetzungen benötigen. Die heute dominierenden Nordseequellen werden mittelfristig durch russische Vorkommen ersetzt werden müssen. Das Gleiche trifft auch auf die Erdölversorgung zu. Von Vorteil ist zurzeit noch, dass beim Erdgas eine wechselseitige Abhängigkeit mit Russland besteht. Europa ist durch über 5.000 Kilometer lange Pipelines mit den großen Erdgasvorkommen in Westsibirien verbunden. Diese Versorgungswege, über die in Zukunft der Großteil der europäischen Erdgasimporte laufen wird, sind eine Hinterlassenschaft der Sowjetunion. Sie konnten in den siebziger Jahren ohne Rücksicht auf die Kosten gebaut werden. Unter heutigen Umständen wäre der Bau dieser Pipelines vermutlich nicht mehr realisierbar. Während die Europäer aufgrund dieses Erbes aus der Sowjetzeit derzeit einen recht exklusiven Zugriff auf die russischen Erdgasquellen haben, ist mittelfristig damit zu rechnen, dass die Schwellenländer Asiens mit Europa in direkte Konkurrenz um diese Gasvorkommen treten werden. So gesehen wird die Abhängigkeit der Europäer vom Lieferanten Russland vermutlich wachsen, während die Abhängigkeit des Kremls vom europäischen Absatzmarkt sinken wird.

Einen einigermaßen konkreten Wert für die Vermeidungskosten je Tonne  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  anzugeben ist naturgemäß schwer, da der Wert stark von den zugrunde liegenden Szenarioannahmen wie der Marktdurchdringung und den künftigen Effizienzsteigerungen von Gasmotoren abhängt. Lediglich ein ungefährer Richtwert von 250 bis 500 Euro lässt sich aus den vorliegenden Studien ableiten. So geben Degen und Maly (2002) einen Wert von 286 Euro/Tonne  $\text{CO}_2$  an, während in der CONCAWE-Studie eine Spanne von 256 bis 460 Euro errechnet wurde. Damit liegen die Vermeidungskosten in der Tendenz recht hoch. Unbestreitbar sind hingegen die Vorteile, welche die geringeren Schadstoffemissionen mit sich bringen. Im

Hinblick auf die in der EU herrschende Immissionspolitik spricht daher vieles dafür, reine Stadtfahrzeuge mit CNG-Antrieben auszustatten, da im Stadtbetrieb die Vorteile des CNG voll zum Tragen kommen und die Infrastrukturkosten in den Ballungsräumen tendenziell gering sind. Somit weist CNG als Nischentreibstoff vor allem für kommunale Fahrzeuge wie etwa Müllaster oder Busse spürbare Vorteile auf, da diese in der Regel auf eine zentralisierte Kraftstoffversorgung zurückgreifen können und im Dieselmotorbetrieb aufgrund ihrer Fahrzyklen sehr hohe Schadstoffemissionen haben. Dadurch werden die hohen Investitionskosten für CNG-Versorgungsstrukturen im Rahmen gehalten. Aber auch für viel genutzte Stadtfahrzeuge wie Taxen bietet sich der Erdgasbetrieb an. In diesem Rahmen kann CNG einen beschränkten, aber dennoch sinnvollen Beitrag zur Diversifizierung der Primärenergieträger im Straßenverkehr leisten und bei der Reduktion der Schadstoffemissionen in den Ballungsgebieten helfen.

## 6.2 Gas to Liquids (GTL)

Die Nutzung von GTL ist im Vergleich zum CNG-Pfad relativ neu. Das Grundprinzip der GTL-Herstellung ist zwar bereits seit 80 Jahren bekannt, doch erst die steigenden Ölpreise machten die großtechnische Anwendung interessant. Obwohl die ersten Premiumkraftstoffe mit GTL-Beimischung bereits im Markt sind, ist die veröffentlichte Datenlage im Vergleich zum CNG-Pfad noch recht dürftig.

Bei der GTL-Herstellung wird Erdgas mit Hilfe der 1922 entwickelten Fischer-Tropsch-Synthese chemisch umgewandelt. Dieses Syntheseverfahren lässt sich im Prinzip auf jeden Kohlenwasserstoff anwenden. Bekanntestes Beispiel für die Anwendung des Verfahrens dürfte die Herstellung von Treibstoff aus Braunkohle im Zweiten Weltkrieg gewesen sein, aber auch Pflanzenmasse lässt sich mit diesem Verfahren umwandeln (siehe Kapitel 7.3). Das aus Erdgas hergestellte GTL ist ein sehr reiner und hochwertiger Energieträger, der nur wenige verschiedene Kohlenwasserstoffe enthält. GTL bleibt unter Umgebungsbedingungen flüssig und enthält mehr volumenspezifische Energie als Benzin. Aufgrund seiner chemischen Eigenschaften kann es problemlos mit erdölbasierten Treibstoffen gemischt werden, wodurch es die bestehenden Verteilersysteme komplett mitbenutzen kann. Die Nutzung von Erdgas in Form von GTL wird von den Unternehmen favorisiert, die in der Ölförderung tätig sind, da sie mit dem GTL Erdgas vermarkten können, das bei der Ölförderung auf abgelegenen Feldern anfällt und bisher mangels kostendeckender Nutzungsmöglichkeiten ganz einfach abgefackelt wird ([www.shellglobalsolutions.com](http://www.shellglobalsolutions.com)). Dieses Abfackeln ist vor allem am Persischen Golf und in Westafrika weit verbreitet und stellt eine große Verschwendung von Primärenergie dar, weil die beim Abfackeln freigesetzte Energie ungenutzt bleibt.



Wird Erdgas in Form von GTL verwendet, kommt es zu deutlichen Unterschieden zum beschriebenen CNG-Pfad. GTL ist ein flüssiger Kraftstoff, daher entfällt der Energieaufwand zur Druckspeicherung, ebenso entfallen die Probleme mit einer möglicherweise geringeren Effizienz von Gasmotoren. Zudem würde GTL nahe an den Quellen hergestellt und danach auf denselben Versorgungswegen transportiert werden wie die erdölbasierten Kraftstoffe. Die Sondereffekte des Pipeline-Ferntransports im Vergleich mit den konventionellen Kraftstoffen entfallen. Allerdings würde die Wertschöpfung damit auch in den Fördergebieten stattfinden. Somit bleiben zwei Punkte auf dem GTL-Pfad, die zu Emissionsunterschieden gegenüber konventionellen Kraftstoffen führen können.

Der erste Aspekt betrifft die direkten Emissionen. Da GTL einen höheren Wasserstoffgehalt aufweist als die erdölbasierten Treibstoffe, verursacht es auch geringere direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen. In einem Flottentest der Volkswagen AG wurde im Vergleich zum Diesel eine Minderung der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 4 Prozent ermittelt. Der zweite emissionsrelevante Unterschied zu den konventionellen Kraftstoffen liegt im eigentlichen Herstellungsprozess. Benzin und Diesel werden hergestellt, indem die im Erdöl enthaltenen Kohlenwasserstoffe zunächst nach Größe „sortiert“ und anschließend in kleinere Moleküle aufgespalten werden. Die GTL-Herstellung setzt hingegen darauf, kleine Moleküle zu größeren Kohlenstoffketten zusammenzusetzen. Die Auswirkungen dieses grundlegend verschiedenen Produktionsprozesses sind bislang kaum untersucht. In einer Studie im Auftrag von Shell (PWC, 2003) wird jedoch festgestellt, dass die GTL-Produktion etwa 29 Prozent mehr Primärenergie benötigt, als dies bei der Herstellung einer vom Heizwert vergleichbaren Menge Diesel in einer normalen Raffinerie der Fall wäre. Die CO<sub>2eq</sub>-Emissionen der Herstellung und Verteilung von GTL (Well to Tank) liegen laut dieser Studie um 15 Prozent über denen des Dieselmotorkraftstoffs. Der Unterschied ist geringer als beim Primärenergieeinsatz, da die Prozessenergie zur GTL-Produktion fast exklusiv aus Erdgas gewonnen wird, während in den gängigen Raffinerien Erdöl genutzt wird. Zusammen mit den geringeren direkten Emissionen bleibt also ein Emissionsnachteil bestehen. Allerdings sind weitere Sondereffekte zu beachten, die schwer zu quantifizieren sind. Dazu zählt beispielsweise, dass in der GTL-Produktion keine Schweröle anfallen, die zurzeit häufig als Treibstoff für Schiffsdiesel dienen. Zudem wird angenommen, dass GTL den Motorenentwicklern aufgrund seiner chemischen Reinheit weitere Effizienzsteigerungen gestattet. Im Prinzip wäre es mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese möglich, den entstehenden Kohlenwasserstoff exakt an die Anforderungen eines bestimmten Motors anzupassen. Damit ließe sich der Verbrennungsprozess sowohl von der Motoren- als auch von der Kraftstoffseite her

neu optimieren, was zurzeit aufgrund der Vielzahl der im Kraftstoff enthaltenen Stoffe nicht möglich ist. Es wird geschätzt, dass die möglichen Effizienzsteigerungen bis zu 15 Prozent des Treibstoffverbrauchs einsparen könnten. Unter Einbeziehung dieser Effekte kann der GTL-Prozess laut der PWC-Untersuchung auch Emissionsvorteile von etwa 10 Prozent aufweisen. Zieht man die Praxis des Abfackelns in Betracht, könnte GTL in puncto CO<sub>2eq</sub>-Emissionen durchaus als eine deutliche Entlastung interpretiert werden. Denn die mit dem GTL-Einsatz verbundenen CO<sub>2eq</sub>-Emissionen fallen auch im Status quo an, aber ohne jede Nutzung der entstehenden Energie. Im GTL-Fall wird zumindest ein Teil dieser Energie genutzt, um erdölbasierte Kraftstoffe und ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ersetzen. Diese Entlastung würde jedoch bei jeder energetischen Nutzung dieses Erdgases anfallen und ist nicht auf den GTL-Pfad beschränkt.

Beim Einsatz von GTL-Kraftstoff fallen aufgrund seiner Reinheit und der besseren Verbrennung ebenso wie bei der CNG-Nutzung weniger Schadstoffe an, als es bei den heute gängigen Treibstoffen der Fall ist. Die Emissionsvorteile bleiben jedoch bei den wichtigsten Schadstoffen hinter denen des Einsatzes von Druckgas zurück. Ein Flottentest in Berlin ergab Reduktionen zwischen 6,4 Prozent (NO<sub>x</sub>) und 91 Prozent (CO). Zudem entstehen bei der Produktion von GTL weniger Schadstoffe als in einer Raffinerie, da der Rohstoff deutlich reiner ist.

Während die Kosten für die Errichtung einer Versorgungsinfrastruktur für CNG vergleichsweise hoch sind, weist GTL diesbezüglich erhebliche Vorteile auf. GTL benötigt lediglich Produktionsanlagen, deren Bau sich nach Angaben von Shell ab einem dauerhaften Ölpreis von mindestens 18 US-Dollar pro Barrel Rohöl rechnet. Eine solche Anlage mit einer Tagesproduktion von 140.000 Barrel GTL wird zurzeit in Katar gebaut. Das ohne staatliche Zuschüsse realisierte Projekt hat ein Investitionsvolumen von über fünf Milliarden US-Dollar. Bis zum Jahr 2011 soll die weltweite Produktionskapazität auf über 700.000 Barrel pro Tag gesteigert werden. Da für GTL-haltige Premiumkraftstoffe zurzeit ein Aufschlag von etwa zehn Cent verlangt wird, spricht alles dafür, dass die Produktion zumindest kostendeckend ist. Es ist zudem zu beachten, dass GTL nicht in den Genuss einer Steuerreduktion kommt und sich damit ohne staatliche Subventionierung am Markt durchsetzen muss. Da die bestehende Versorgungsinfrastruktur weitgehend mitgenutzt werden kann (Untermischung) und praktisch alle Kfz GTL-haltigen Kraftstoff nutzen können, entfallen die hohen Investitions- und Markteinführungskosten.

Ebenso wie beim Einsatz von CNG bleiben auch die ökologischen Vorteile der GTL-Nutzung in einem leicht überschaubaren Rahmen. Der Hauptvorteil liegt aus ökologischer Sicht bei verringerten Schadstoffemissionen, wobei die

Emissionsverminderungen hinter denen des CNG zurückbleiben. Allerdings sind die mit dem GTL verbundenen Investitionskosten im Vergleich mit CNG gering. Die verhältnismäßig niedrigen Investitionskosten und die Tatsache, dass GTL in jedem heutigen Motor eingesetzt werden kann, führen dazu, dass es den größten Effekt hätte, wenn es in smoggeplagten Städten wie Neu-Delhi, Mexiko-Stadt oder Kairo eingesetzt würde. Die hohen Ölpreise und die chemischen Eigenschaften des GTL ermöglichen es zudem, dass GTL – anders als CNG – zumindest in den Industriestaaten ohne jede Subvention zur Diversifizierung der Primärenergiebasis des Verkehrs beitragen kann. Allerdings dürfte auch beim GTL das Substitutionspotenzial nicht allzu groß sein. Gleiches gilt für die langfristige Verfügbarkeit von GTL, die nur geringe Vorteile gegenüber konventionellen Kraftstoffen aufweist. Das führt zu dem Schluss, dass auch GTL tendenziell ein Nischenprodukt bleiben wird, wahrscheinlich in Form einer Untermischung in Premiumkraftstoffen. In dieser Funktion kann es dazu beitragen, den Erdölverbrauch etwas zu drosseln. Eine Zukunft als eigenständige Kraftstoffoption erscheint hingegen zurzeit eher unwahrscheinlich.

## 7

### Biokraftstoffe

Bereits während der Ölkrisen der siebziger Jahre führten die hohen Ölpreise dazu, dass weltweit darüber nachgedacht wurde, fossile Primärenergieträger durch Biomasse zu substituieren (Berrisch, 1993, 1). Diese Ideen wurden aber aufgrund der anschließend relativ schnell fallenden Ölpreise und der auftauchenden Umsetzungsprobleme in den meisten Staaten bald wieder verworfen. Heute könnte jedoch in der Tat eine Renaissance der Biomasse als Energiequelle bevorstehen. Die Voraussetzungen sind deutlich günstiger als vor 30 Jahren. Die Ölpreise werden sich vermutlich dauerhaft auf hohem Niveau bewegen, die Technologien wurden weiterentwickelt und aufgrund der Klimaproblematik sprechen neue Argumente für die weitgehend CO<sub>2</sub>-neutrale Biomasse. Hinzu kommt auch eine starke politische Unterstützung, die sich zum Beispiel in dem EU-Ziel manifestiert, bis zum Jahr 2010 immerhin 5,75 Prozent des Kraftstoffverbrauchs in der EU aus Biokraftstoffen zu decken.

Bioenergieträger können aus einer Vielzahl biogener Ressourcen hergestellt werden. Diese müssen entweder gezielt in der Land- und Forstwirtschaft erzeugt werden oder als Bioabfälle in bestehenden Verarbeitungsprozessen anfallen. Die

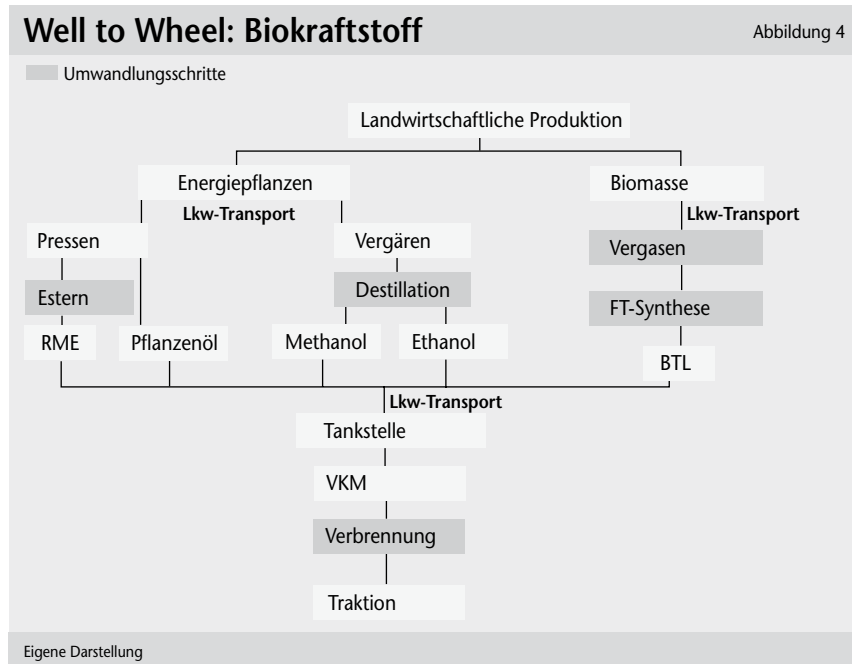
Biomasse kann in eine Vielzahl verschiedener Kraftstoffe umgewandelt werden. Sie ist genau genommen nichts anderes als in Form von Kohlenwasserstoffketten gespeicherte Sonnenenergie und die Umwandlung in einen Kraftstoff kopiert quasi die natürliche Entstehung von Erdöl. Allerdings muss der Mensch etwas effizienter sein als die Natur, die für die Entstehung von einem Liter Öl etwa 20 Tonnen Pflanzenmasse verbraucht hat. Biomasse ist zudem die einzige Form der erneuerbaren Energien, die bereits in gespeicherter Form vorliegt und daher zeitlich frei einsetzbar ist. Die als Elektrizität anfallende Wind- oder Solarenergie muss hingegen aufgrund fehlender Speichermöglichkeiten immer sofort verbraucht werden. Ein weiterer Vorteil der Biomasse besteht darin, dass sie der „Alleskönner“ unter den erneuerbaren Energien ist. Sie ist zur Herstellung von Strom, Wärme und Kraftstoff geeignet, was dazu führt, dass die Biomasse 2004 mit einem Anteil von etwa 2,3 Prozent am deutschen Primärenergieverbrauch (davon: Strom 0,6 Prozentpunkte, Wärme 1,4 Prozentpunkte und Kraftstoff 0,3 Prozentpunkte) gut zwei Drittel der in Deutschland genutzten erneuerbaren Primärenergieträger ausmacht (Auer, 2005, 3).

Die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten könnten aber dazu führen, dass eine harte Konkurrenz um den Rohstoff entsteht, was zwangsläufig seinen Preis in die Höhe treiben würde. Daraus folgt ein noch weiterer Vorteil der Nutzung von Biomasse. Durch die Eröffnung eines zusätzlichen Geschäftsfelds mit guten Ertragsaussichten ergeben sich auch neue Perspektiven für die europäische Landwirtschaft. Dies würde eine Änderung der heutigen Subventionspraxis vereinfachen, womit sich auch Marktchancen für die Entwicklungsländer eröffnen könnten, die von einer durch den Einsatz von Biokraftstoffen steigenden Nachfrage nach Agrarprodukten profitieren, da sie mit ihrem großen Potenzial an billigen Arbeitskräften die meisten Biokraftstoffe vermutlich günstiger herstellen können als Industrieländer. Von daher könnten die Biokraftstoffe einen nachhaltigen Beitrag zur Entwicklungspolitik leisten. Voraussetzung wäre jedoch ein freier Handel mit Biokraftstoffen. Doch dies scheint zurzeit wenig wahrscheinlich, da die Förderung von Biokraftstoffen in den Industrieländern zumeist als Teil der eigenen Agrarpolitik verstanden wird. Diese Sichtweise führt dazu, dass sich im Bereich der Biokraftstoffe bereits protektionistische Tendenzen in Form von Zöllen entwickeln.

Der Umstieg auf Biomasse eröffnet auf den ersten Blick die Chance, gleich mehrere Fliegen mit einer Klappe zu schlagen. Trotz ihrer Vorteile muss jedoch beachtet werden, dass es sich bei der Biomasse nicht um ein Perpetuum mobile handelt, das alle Energieprobleme der Welt lösen kann. Biomasse ist erneuerbar, aber nicht unerschöpflich. Ihr Einsatz muss unter Berücksichtigung der jeweiligen

Regenerationsraten der genutzten Pflanzen nachhaltig gestaltet werden, um die bestehenden Potenziale zu erhalten. Je breiter die Rohstoffbasis der einzelnen Biokraftstoffe ist, desto größer dürfte auch ihr langfristiges Mengenpotenzial ausfallen, denn dem massenhaften Anbau einzelner Pflanzen in Monokulturen sind durch das Ökosystem relativ enge Grenzen gesetzt.

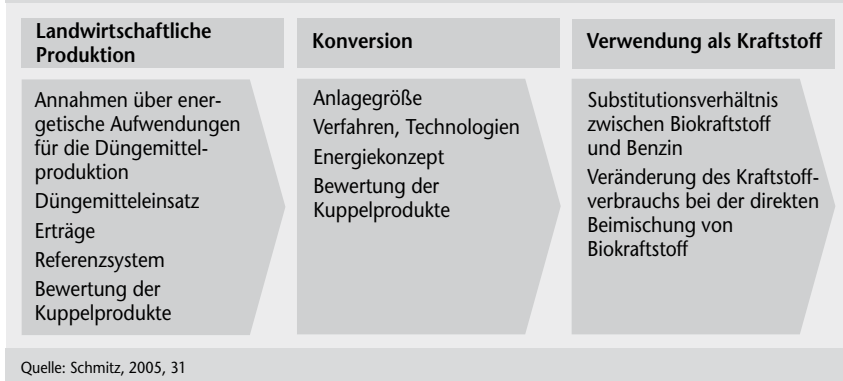
Für eine Betrachtung der ökologischen und ökonomischen Potenziale von Biokraftstoffen ist es zunächst notwendig festzuhalten, dass es unzählige denkbare Biokraftstoffketten gibt, die je nach verwendeten Pflanzen, geographischem Erzeugungsort, Anbau- und Verarbeitungsmethoden oder auch Transportwegen in ihrer Ökobilanz sehr unterschiedlich ausfallen. Aber auch die Mengen- und Kostenpotenziale können sehr uneinheitlich sein. So untersuchten Quirin et al. (2004) in einer Metastudie allein 109 verschiedene Biokraftstoffketten. Im Folgenden werden sich die Ausführungen vor allem an den in Abbildung 4 skizzierten Kraftstoffketten orientieren. Da Biodiesel (RME), Ethanol und Sunfuel (BTL) die wohl größte Rolle in der nahen Zukunft spielen werden, bleiben die genaueren Ausführungen auf diese Stoffe beschränkt. Methanol und reines Pflanzenöl hingegen scheinen aufgrund der chemischen Eigenschaften weniger geeignet zu sein als die oben genannten Stoffe. So ist Methanol, das in Dieselmotoren eingesetzt



werden kann, auch in kleineren Mengen hochgiftig und auch verhältnismäßig aggressiv gegenüber Kunststoffen. Pflanzenöl hingegen macht beispielsweise aufgrund seiner hohen Viskosität Probleme und weist zurzeit eine schlechtere Klimabilanz auf als das Konkurrenzprodukt Biodiesel.

Bei allen Ausführungen zu Biokraftstoffen ist zu beachten, dass die Untersuchungsergebnisse zu ökonomischen und ökologischen Folgen ihres Einsatzes erheblich voneinander abweichen können. Diese Unterschiede sind unvermeidlich, weil sich die zugrunde liegenden Annahmesets (Produktionspreise, Regenerationsraten, Kuppelprodukte usw.) kaum harmonisieren lassen (Übersicht 1). Trotz dieser Probleme lassen sich aus den bekannten Studien Tendenzaussagen ableiten, die praktisch für jeden Biokraftstoff gelten. Es wird fast immer ein Vorteil bei den  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen bilanziert. Dies ist vor allem auf den annähernd geschlossenen Kohlenstoffkreislauf der Biokraftstoffe zurückzuführen. Da jedoch die Emissionen von sehr klimaaktiven Treibhausgasen wie etwa Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) oder auch die durch die energieaufwendige Produktion von Dünger anfallenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen sehr unterschiedlich erfasst werden (sie entfallen, wenn Biomasse aus Reststoffen genutzt wird), bestehen bei den Untersuchungsergebnissen zur Klimafreundlichkeit von Biokraftstoffen erhebliche Bandbreiten, obwohl die gleichen Kraftstoffketten betrachtet werden. Die Folge ist, dass die Angaben zur Klimawirksamkeit der Biokraftstoffe zwar relativ richtungssicher sind, aber der Umfang dieser Wirkungen kaum quantifizierbar bleibt.

## **Einflussfaktoren auf die Treibhausgasbilanzierung der Biokraftstofferzeugung und -verwendung** Übersicht 1



Während es relativ viele Untersuchungen zu den Klimafolgen des Einsatzes von Biokraftstoffen gibt, sind die weiteren Umweltfolgen in Form von Ver-

sauerung, Eutrophierung<sup>6</sup> oder Bildung von bodennahem Ozon (Photosmog) deutlich seltener untersucht worden. Die bekannten Untersuchungen bilanzieren richtungssicher Nachteile der Biokraftstoffe in Bezug auf die Versauerung des Bodens und die Eutrophierung, während über den Photosmog meist keine Aussage möglich ist. Aus denselben Gründen wie bei den Klimafolgen ergeben sich auch bei der Betrachtung der sonstigen Umweltfolgen erhebliche Bandbreiten, sodass eine Quantifizierung wenig aussagekräftig bleibt. Der wohl wichtigste treibende Faktor bei der im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen eher schlechten Bilanz der Biokraftstoffe ist der Einsatz von Stickstoffdünger im Pflanzenbau, der den „Motor des Pflanzenwachstums“ darstellt. Die Gabe von Stickstoffdünger führt zu einem deutlich gesteigerten Pflanzenwachstum je Hektar, aber eben auch zu deutlich erhöhten Emissionen von Schadstoffen wie etwa  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  oder  $\text{N}_2\text{O}$ . Zudem ist beim Einsatz von Biokraftstoffen der Naturschutz zu beachten. Ein Biokraftstoff, der nur aus einer Pflanze hergestellt wird, benötigt große Monokulturen, um eine ausreichende Verfügbarkeit zu erreichen. Aus der Sicht des Naturschutzes ist er daher einem Kraftstoff unterlegen, der aus diversifizierter Pflanzenmasse hergestellt werden kann.

Ebenso wie die bilanzierten Umwelteffekte weisen auch die vorliegenden Kostenschätzungen für den Einsatz von verschiedenen Biokraftstoffen erhebliche Bandbreiten auf. Allerdings ist auch dort eine eindeutige Tendenz auszumachen. Die Bereitstellungskosten, also die Kosten für Produktion, Konversion und Distribution von Biokraftstoffen, liegen in den bekannten Studien durchweg höher als bei fossilen Brennstoffen. Um diesen Kostennachteil zu kompensieren, sind alle Biokraftstoffe in Deutschland derzeit noch von der Mineralölsteuer befreit. Da die im Folgenden betrachteten Alternativen allesamt unter konventionelle Treibstoffe mischbar sind, können die Kosten für den Aufbau einer neuen Tankstelleninfrastruktur entfallen, wenn auf den Einsatz in Reinform verzichtet wird. Es muss jedoch klargestellt sein, dass jeglicher Kostenvergleich nur eine Momentaufnahme darstellen kann. Die entscheidenden Determinanten für einen solchen Vergleich – der Ölpreis, die Rohstoffpreise und die Konversionstechnologie – sind beständig in Bewegung. Dennoch lässt sich mit ziemlicher Sicherheit sagen, dass die Biokraftstoffe heute noch einen beträchtlichen Kostennachteil aufweisen. Nach Schätzungen der DB Research müsste bei gegebener Technologie der Ölpreis auf etwa 100 US-Dollar je Barrel steigen, damit die hierzulande produzierten Biokraftstoffe, deren Herstellungskosten in etwa zwischen 50 und 80 Cent pro Liter liegen, wettbewerbsfähig werden (Auer, 2005, 1).

---

<sup>6</sup> Der Begriff Eutrophierung bezeichnet einen Anstieg der Nährstoffzufuhr, meist in Gewässern.

Während die höheren Bereitstellungskosten einen Nachteil der Biokraftstoffe darstellen, ist das Bild in Bezug auf die Verfügbarkeit gemischt. Auf der einen Seite steht das große Plus, dass die Biokraftstoffe aus heimischen Primärenergieträgern hergestellt werden können und deren Gebrauch somit die Abhängigkeit von den krisenanfälligen Erdölstaaten verringern würde. Als positiver Nebeneffekt der heimischen Produktion könnten auch zusätzliche Arbeitsplätze in der Landwirtschaft und der Treibstoffproduktion entstehen. Schätzungen reichen hier von 16 bis zu 26 neuen Arbeitsplätzen je 1.000 substituierte Rohöleinheiten (Ohlhoff, 2002). Andererseits besteht bei der Verfügbarkeit der Biokraftstoffe auch ein Kardinalproblem in Bezug auf die technische Verfügbarkeit, denn die Anbaufläche in Deutschland und Europa reicht nicht aus, um die Masse der Erdölimporte durch Biokraftstoffe ersetzen zu können. Allerdings schwanken die Potenzialschätzungen recht stark, da die Ergiebigkeit pro Hektar des eingesetzten Biokraftstoffs sehr unterschiedlich ist. Es ist aber davon auszugehen, dass bereits für das Erreichen des EU-Ziels von 5,75 Prozent Marktanteil der Biokraftstoffe im Jahr 2010 zwischen 14 und 27 Prozent der Anbaufläche der EU-25 eingesetzt werden müssten (Quirin et al., 2004, 36).

Durch diesen hohen Flächenbedarf muss die verstärkte Nutzung von Biokraftstoffen fast zwangsläufig mit Naturschutzziele oder dem Ausbau des flächenintensiven Ökolandbaus bei der Lebensmittelproduktion in Konflikt geraten. Aufgrund dieser Knappheit an Boden spielt bei der Bewertung von Biokraftstoffen auch der jeweilige Hektarertrag eine entscheidende Rolle. Aber auch die Option, dieses Knappheitsproblem durch freien Welthandel und eine stärkere Öffnung der Märkte für landwirtschaftliche Produkte zu mildern, gehört auf die politische Agenda. Zudem versteckt sich hier ein weiteres generelles Problem der Biokraftstoffe, nämlich die im Vergleich zur stationären Nutzung der Biomasse geringe Nutzenergieausbeute, die in der Strom- und Wärmeerzeugung deutlich besser ist. Der Vorteil der stationären Anwendung liegt darin begründet, dass die Biomasse im Rohzustand genutzt wird und somit auf Konversionschritte verzichtet werden kann, die zwangsweise den Wirkungsgrad der eingesetzten Biomasse reduzieren. Darüber hinaus ist es möglich, die anfallende Wärme zu nutzen, was in der mobilen Anwendung weitgehend ausgeschlossen ist.

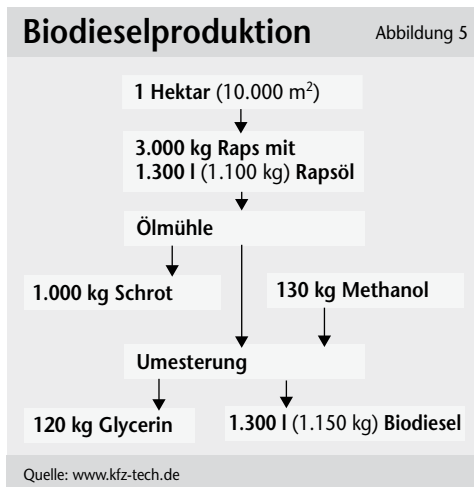
Da sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Potenziale der Biokraftstoffe kaum quantifizierbar sind, bleibt die Frage nach ihrer Effizienz weitgehend offen. Bei dem entscheidenden Kriterium, den Vermeidungskosten pro Tonne  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , reichen die Spannweiten in der Literatur von einer Win-Win-Situation mit negativen Kosten bis zu Werten von 10.000 Euro bei der Ethanolgewinnung aus Kartoffeln.



## 7.1 Biodiesel

Biodiesel ist ein Kraftstoff, der aus pflanzlichen und tierischen Fetten gewonnen werden kann. Chemisch gesehen handelt es sich um einen Fettsäuremethylester. Genau genommen ist der handelsübliche Biodiesel ein an die Bedürfnisse der Motorentechnologie angepasstes Pflanzenöl. In seinem Zündverhalten und seiner Viskosität ähnelt er konventionellem Diesel und kann bis zu einem Anteil von 5 Prozent problemlos mit diesem gemischt werden. Anders als der fossile Kraftstoff ist Biodiesel von Natur aus schwefelfrei. Zudem enthält er weder Benzol noch andere Aromaten und ist biologisch abbaubar. Biodiesel enthält jedoch etwa 10 Prozent weniger Energie pro Liter als der fossile Treibstoff und ist auch chemisch aggressiver als sein fossiles Gegenstück. In Reinform kann Biodiesel daher manche Dichtungsmaterialien im Motor zerstören.

Bei der Herstellung von Biodiesel können nur die ölhaltigen Pflanzenteile (in der Regel die Samen) genutzt werden, um Pflanzenöl zu pressen. Die restlichen Pflanzenteile müssen als Kuppelprodukt vermarktet werden. Das gewonnene Pflanzenöl wird dann in einem einfachen chemischen Prozess unter Zugabe von Methanol (und Wärmeenergie) zu Biodiesel umgewandelt. Hierbei fällt Glycerin als Kuppelprodukt an (Abbildung 5). Als Rohstoff wird in Deutschland zumeist Rapsaat genutzt, da diese mit 40 Prozent (Kaltschmitt et al., 2003) einen für unsere Breiten hohen Ölgehalt hat. Der aus Raps hergestellte Biodiesel wird auch als RME (Raps Methyl Ester) bezeichnet.



Biodiesel (RME) ist ein zutiefst europäisches Produkt, da weltweit eher auf Ethanol als Biokraftstoff gesetzt wird. In der EU-25 ist RME Marktführer unter allen Biokraftstoffen mit einem Marktanteil von gut 80 Prozent bei einer Jahresproduktion von fast zwei Millionen Tonnen und einer Produktionskapazität von 2,4 Millionen Tonnen, die zurzeit stark erweitert wird (EU-Kommission, 2005, 41). Mehr als die Hälfte des europäischen RME wird in Deutschland hergestellt

und in Deutschland spielt sich in den letzten Jahren auch der Großteil des stürmischen Wachstums der RME-Produktion ab (Tabelle 8). Insgesamt hat sich die

europäische RME-Produktion seit dem Jahr 2000 verdreifacht, obwohl nur elf Staaten an der Produktion beteiligt sind und der ehemalige Marktführer Frankreich seit dem Jahr 2001 seine RME-Produktion zurückfährt.

Dabei ist der deutsche RME-Boom der letzten Jahre vor allem auf zwei Faktoren zurückzuführen. Zunächst einmal konnte die Kraftstoffqualität, die zuvor noch äußerst schwankend war, stark verbessert werden. Diese Schwankungen hatten viele Fahrzeughersteller veranlasst, keine RME-Freigabe für ihre Fahrzeuge zu gewähren. Aber noch weitaus wichtiger war

das Inkrafttreten der so genannten Untermischungsverordnung, die einen Beitrag der Bundesregierung zum Erreichen des EU-Ziels von 5,75 Prozent Biokraftstoffeinsatz bis 2010 (2 Prozent in 2005) darstellt. Seit dem 1. Januar 2004 dürfen nun bis zu 5 Prozent steuerfreies RME bereits bei der Treibstoffherstellung untergemischt werden. Da diese Möglichkeit von den Mineralölversorgern gut angenommen wurde und derzeit ein Nachfrageüberhang besteht, werden noch weitere Kapazitäten in Deutschland aufgebaut. Durch die Realisierung mehrerer Großprojekte wird erwartet, dass sich die deutsche Produktionskapazität bis zum Jahr 2006 auf etwa zwei Millionen Tonnen nahezu verdoppeln wird. Vermutlich ab dem 1. Juli 2006 wird die Steuerbefreiung durch eine Beimischungsverpflichtung ersetzt, was eine weiterhin hohe Nachfrage garantieren sollte.

In der ökologischen Bilanzierung ist RME ein typischer Vertreter der Biokraftstoffe. Praktisch alle zuvor gemachten Aussagen treffen auf RME zu. Zudem sind die Aussagen zu RME relativ gut belegt, da dieser Biokraftstoff in den letzten 15 Jahren intensiv untersucht wurde. Im Laufe dieser Zeit haben sich manche Parameter ein wenig zugunsten des RME verschoben. Dennoch wird er von den meisten Wissenschaftlern als ökologisch eher fragwürdige Alternative zu fossilen Kraftstoffen eingestuft.

## Biodieselproduktion in der Europäischen Union

Tabelle 8

Land	Jahresproduktion in Tonnen		Veränderung in Prozent
	2003	2004	
Deutschland	715.000	1.035.000	44,8
Frankreich	357.000	348.000	-2,5
Italien	273.000	320.000	17,2
Dänemark	41.000	70.000*	70,7
Tschechische Republik	70.000	60.000*	-14,3
Österreich	32.000	57.000	78,1
Slowakei	0	15.000	-
Spanien	6.000	13.000	116,7
Großbritannien	9.000	9.000	0,0
Litauen	0	5.000	-
Schweden	1.000	1.400	40,0
<b>EU-25</b>	<b>1.504.000</b>	<b>1.933.400</b>	<b>28,6</b>

\* Die Angaben für Dänemark und die Tschechische Republik weisen eine Fehlerquote von +/- 10 Prozent auf;  
Quelle: EU-Kommission, 2005, 42

Bezüglich der Treibhausgasemissionen wird in der Literatur richtungssicher ein Emissionsvorteil gegenüber fossilem Diesel ausgewiesen. In der WTW-Analyse fällt dieser Emissionsvorteil mit einer Bandbreite von 0,5 bis 3 Tonnen CO<sub>2eq</sub> pro Hektar eingesetzte Anbaufläche und Jahr allerdings relativ bescheiden aus, obwohl es sich um einen annähernd geschlossenen Kohlenstoffkreislauf handelt (Quirin et al., 2004, A35). Der relativ geringe Wert hängt vor allem mit dem Herstellungsprozess zusammen. So ist beispielsweise zu beachten, dass das zur Produktion des RME notwendige Methanol heutzutage zu 90 Prozent aus fossilem Erdgas hergestellt wird. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Entstehung von klimaschädlichem Lachgas (N<sub>2</sub>O) beim Rapsanbau. Die Lachgasemissionen betragen in etwa 12 Gramm N<sub>2</sub>O pro eingesetztes Kilogramm Stickstoffdünger (Gärtner/Reinhardt, 2003, 10 f.), was aufgrund des hohen Klimapotenzials von Lachgas einer CO<sub>2</sub>-Emission zwischen 1,8 und 3,5 Kilogramm entspricht, und Raps benötigt eher viel Düngung. Von entscheidender Bedeutung für die Gesamtbeurteilung der WTW-Treibhausgasbilanz von RME – und damit auch für seine Klimabilanz je eingesetztes Hektar Boden – ist zudem die Berücksichtigung der anfallenden Kuppelprodukte. Die Gutschriften dafür können einen Großteil der bilanzierten Einsparungen ausmachen, beispielsweise wenn Rapsschrot anstatt importierter Sojabohnen als Futtermittel eingesetzt wird oder wenn aus fossilen Stoffen synthetisiertes Glycerin durch das bei der RME-Produktion anfallende Glycerin ersetzt werden kann. Das Umweltbundesamt schätzt, dass die Treibhausgaseinsparung gegenüber Dieselmotorkraftstoff zwischen 20 und 80 Prozent liegen kann, je nachdem welche Lachgasemissionen und welche Nutzung der Kuppelprodukte unterstellt werden. Das Gesamtpotenzial bleibt allerdings in jedem Fall relativ gering, da die Einsparmöglichkeiten je eingesetzte Flächeneinheit Ackerboden und die für den Rapsanbau verfügbare Ackerfläche zu gering sind, um einen größeren Effekt zu erzielen.

Während die Treibhausgasbilanz in der Regel positiv für RME ausfällt, werden in Bezug auf die weiteren ökologischen Kriterien richtungssicher ökologische Nachteile für RME gegenüber fossilem Dieselmotorkraftstoff bilanziert. Aufgrund der deutlich geringeren Zahl von Untersuchungen und der unterschiedlichen Herangehensweisen in diesen Studien sind diese Zahlen allerdings noch schlechter zu quantifizieren, als es bei den Treibhausgasen der Fall ist. In der Frage der Versauerung stellt es sich im Detail so dar, dass RME in der WTW-Betrachtung Emissionsvorteile bei Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) aufweist, aber bei den Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>) schlechter abschneidet als fossiler Diesel. Es sind vor allem die Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion der Biomasse, welche die schlechte Bilanz verursachen. Gleiches gilt im Problemfeld Eutrophierung.

Auch hier bestimmt die landwirtschaftliche Komponente ganz maßgeblich das Ergebnis, das richtungssicher auf einen höheren Nährstoffeintrag durch RME-Nutzung hinweist. Der ökologische Vergleich von RME und fossilem Diesel fällt dementsprechend nur dann eindeutig aus, wenn RME aus Abfallstoffen gewonnen wird. Es ist jedoch festzustellen, dass RME in den letzten Jahren einige ökologische Vorteile eingebüßt hat (Ostermeier, 2002). Da auch fossiler Diesel heute weitgehend schwefelfrei ist, sind die Vorteile bei den SO<sub>2</sub>-Emissionen nahezu verschwunden und auch die bestehenden Vorteile bei den Partikelemissionen von fast 50 Prozent fallen im Zuge der zunehmenden Verbreitung von Partikelfiltern nicht mehr ins Gewicht. Im Gegenteil, es gibt sogar Anzeichen dafür, dass RME in Reinform mit der Filtertechnologie inkompatibel sein kann. Insgesamt kann man beim RME-Einsatz ebenso viele ökologische Nachteile wie Vorteile sehen. Eine ökologische Gesamtbewertung ist daher eine reine Frage der Gewichtung. Gemäß der zuvor getroffenen Aussage, dass die Klimafolgen eines Treibstoffs höher zu bewerten sind als die weiteren Umweltauswirkungen, wäre bei RME demnach ein kleiner ökologischer Vorteil gegenüber dem Status quo zu bilanzieren.

RME ist in Deutschland inzwischen sehr weit verbreitet. Der reine RME wird an etwa 1.900 Tankstellen vertrieben, und durch die Untermischung bereits in den Raffinerien ist der Biodiesel inzwischen praktisch in jedem Dieselfahrzeug präsent. Die weiteren Kosten für den Aufbau einer Versorgungsinfrastruktur beschränken sich somit auf den (zurzeit erfolgenden) Ausbau der Produktionsstätten und fallen daher gering aus. Dennoch folgt RME auch in der Frage der Kostensituation dem zuvor beschriebenen Muster. Seine Bereitstellungskosten (je nach Herstellungsort zwischen etwa 70 Cent und 1 Euro pro Liter) liegen deutlich über denen des fossilen Diesels. Die Bundesregierung kalkuliert mit Bereitstellungskosten von 76 Cent vor Steuern (Tabelle 9). Damit liegen die Bereitstellungskosten deutlich über denen von fossilem Diesel, die trotz der Rekordölpreise nur bei etwa 43 Cent vor Steuern liegen.

Dass RME in Reinform dennoch günstiger ist als der fossile Diesel, verdankt er somit lediglich seiner derzeit noch geltenden Steuerbefreiung, denn der Steueranteil am Dieselpreis liegt bei über 60 Prozent (69,2 Cent). Zudem wird auch der Rapsanbau in Europa

### Biodieselpreise in Deutschland

Tabelle 9

	Preiskomponenten in Cent/Liter
Rapsöl frei Ölmühle	49
Raffination	4
Veresterung abzüglich Glyceringutschrift	7
Logistik	8
Sonstige	8
Summe (ohne MwSt.)	76
Tankstellenpreis 30. KW*	96,4

\* Biodiesel als Reinkraftstoff,  
Quelle: UFOP, 2005

mit einer Flächenprämie subventioniert. Es ist jedoch durchaus fraglich, ob die steuerliche Bevorteilung mittelfristig bestehen bleibt. Erste Überlegungen, eine Teilbesteuerung auf RME einzuführen, gab es in der Bundesregierung bereits vor der Bundestagswahl 2005, da die Gewinnmarge beim Verkauf von RME recht deutlich über dem Vergleichswert von fossilem Diesel zu liegen schien. Sollte die Steuerbefreiung reiner Biokraftstoffe – wie im Koalitionsvertrag festgelegt – entfallen, dürfte der reine RME schnell vom Markt verschwinden. Gleichwohl stellt sich nicht die Frage nach der langfristigen Überlebensfähigkeit der RME-Produktion. Denn obwohl die Bereitstellungskosten heute noch etwa doppelt so hoch sind wie bei fossilem Diesel, wird die geplante Beimischungspflicht den Absatz der Branche sichern, wenn auch auf Kosten der Autofahrer.

Das Kostensenkungspotenzial in der RME-Bereitstellung wird in der Literatur als gering eingeschätzt. Der Produktionsprozess besteht aus einer sehr einfachen chemischen Reaktion, deren Prinzip schon sehr lange bekannt ist und auch als komplett erforscht gilt. Weitere Verbesserungen werden kaum erwartet. Damit bliebe vor allem die Möglichkeit, den Einkaufspreis der Rohstoffe zu senken. Der Preis für eine Tonne Rapsöl beträgt etwa 610 Euro – mit stark steigender Tendenz (Stand: 39. KW 2005). Auch hier dürfte eher wenig Kostensenkungspotenzial vorhanden sein, da sich die Rapsproduktion nur noch in begrenztem Umfang steigern lässt. Gleiches gilt für das im Produktionsprozess benötigte Methanol. In der Tat hängen die weiteren Preispotenziale sehr stark von der Preisentwicklung der Kuppelprodukte ab (Abbildung 5). Vor allem bei dem für die betriebswirtschaftliche Tragfähigkeit der RME-Produktion wichtigen Glycerin ist jedoch ein Preisverfall zu erwarten, da mit der Ausweitung der RME-Produktion große Mengen auf den Markt geworfen werden, während die Nachfrage aus der chemischen Industrie eher konstant bleibt. Die Absatzmöglichkeiten von Rapsschrot als Futtermittel hängen hingegen an der weiteren Entwicklung der Landwirtschaft, aber die zu erwartende Angebotserweiterung wird auch dort tendenziell die Preise senken.

Neben der Kostensituation spielt die Verfügbarkeit bei der Bewertung von RME als zukunftstauglichem Kraftstoff eine wichtige Rolle. Wie bei jedem Biokraftstoff hängt das physische Potenzial auch bei RME vor allem vom Hektarertrag und der eingesetzten Fläche ab. Die Angaben zum Hektarertrag sind recht schwankend. Es kann wohl davon ausgegangen werden, dass bei der RME-Herstellung ein Nettoenergiegewinn von etwa 1.500 bis 1.900 Öleinheiten je Hektar produziert werden kann. Manche Studien gehen aber von einem deutlich geringeren Wert aus. Demgegenüber sind die einsetzbaren Flächen sehr gut abzuschätzen. Im Jahr 2004 wurde in Deutschland auf knapp 1,3 Millionen Hektar Raps angebaut, was knapp 10 Prozent der Gesamtackerfläche entspricht. Da Raps eine anspruchsvolle

Pflanze ist, die in einem mehrjährigen Fruchtwechsel angebaut werden muss, ist die tatsächlich nutzbare Anbaufläche deutlich eingeschränkt. Die absolute Obergrenze dürfte bei etwa drei bis vier Millionen Hektar liegen. Eine relativ große Einigkeit zeigt sich in der Literatur bezüglich des Substitutionspotenzials von Diesel durch RME. Bei maximaler Ausdehnung der Anbaufläche hat RME das Potenzial, 2,5 bis 3 Prozent des derzeitigen Treibstoffverbrauchs zu decken (vgl. Ohlhoff, 2002). Das geringe Substitutionspotenzial spricht eindeutig gegen den großflächigen Einsatz von RME. Einen Vorteil hat RME jedoch zumindest hinsichtlich seiner Verfügbarkeit, nämlich dass er aus heimischen Rohstoffen hergestellt werden kann und somit einen Beitrag zur Versorgungssicherheit leistet. Zudem sichert RME heimische Arbeitsplätze. Allerdings ist der Arbeitsplatzeffekt mit etwa 20.000 Jobs im Jahr 2004 nicht besonders groß.

Aufgrund der schlechten Vergleichbarkeit der verschiedenen Studien zum Thema RME und der bereits thematisierten großen Bandbreite bezüglich der ökologischen Vorteile von Biodiesel bleibt auch die Untersuchung der Vermeidungskosten für Treibhausgase wenig aussagekräftig. Laut Quirin et al. (2004) liegt die Bandbreite der Vermeidungskosten in den von ihnen erfassten Studien zwischen 20 und 1.600 Euro pro Tonne CO<sub>2eq</sub>. Hieraus lässt sich beim besten Willen keine Entscheidungsgrundlage ableiten. Auf der Habenseite steht beim Biodiesel, dass er heute etwa 900.000 Tonnen fossilen Diesel im Jahr substituiert. Aber gemessen an dem dafür nötigen Einsatz an Ressourcen und Förderung ist der RME-Einsatz doch relativ ineffizient. Der aus den in Deutschland heimischen Ölpflanzen hergestellte Biodiesel würde nur dann eine mittelfristige Existenzberechtigung haben, wenn sich der Ölpreis mindestens verdoppelt, und auch dann ist sein Mengenpotenzial eigentlich zu gering, um die hohe Förderung zu rechtfertigen.

Diese Bilanz mag anders aussehen, wenn beispielsweise die afrikanische Ölpalme als Rohstoffbasis genutzt würde, die im Vergleich zu den hierzulande üblichen Ölpflanzen etwa die zehnfache Menge Öl je Hektar produzieren kann. In diesem Fall würde aber wiederum der Vorteil des heimischen Rohstoffs entfallen. Alles in allem vereinigt RME geringe ökologische Potenziale mit nicht marktfähigen Bereitstellungskosten. Aus diesem Grund kann RME am ehesten als Beimischung zu konventionellem Dieselmotorkraftstoff einen Beitrag zur Diversifizierung der Energieversorgung des Straßenverkehrs leisten. Er kann also genutzt werden, um die Reichweite der Erdölreserven zu steigern, aber für einen echten Kraftstoff der Zukunft sind die Potenziale des RME eigentlich zu gering. Diese kritische Position wird auch von ökologisch orientierten Institutionen wie dem Umweltbundesamt unterstützt (Kolke et al., 2003).

## 7.2 Ethanol

Ethanol ist ein bei normaler Umgebung flüssiger Alkohol, der seit mindestens 7.000 Jahren von Menschen hergestellt wird. Ethanol, das zumeist schlicht als Alkohol bezeichnet wird, entsteht, wenn zucker- oder stärkehaltige Stoffe von Bakterien oder Hefen zersetzt werden. Bei diesem auch als Fermentation bekannten Prozess lassen sich Flüssigkeiten mit einem Ethanolgehalt von etwa 15 Prozent herstellen. Bei höheren Ethanolkonzentrationen sterben die Hefen und Bakterien ab. Soll Ethanol als Kraftstoff in Reinform oder als Untermischung eingesetzt werden, so muss die Reinheit des Stoffs beträchtlich gesteigert werden. Um dies zu erreichen, werden ethanolhaltige Flüssigkeiten destilliert (gebrannt). In diesem seit dem Mittelalter bekannten Verfahren wird die Flüssigkeit durch starkes Erhitzen verdampft und anschließend unter Ausnutzung der verschiedenen Siedepunkte der enthaltenen Komponenten separiert. Auf diese Weise lässt sich Ethanol mit einem maximalen Reinheitsgrad von 95,6 Prozent produzieren, das unter anderem auch als Kraftstoff eingesetzt werden kann. Dabei entspricht ein Liter Ethanol bezüglich des Energiegehalts etwa 0,65 Liter Ottokraftstoff. Setzt man reines Ethanol als Kraftstoff ein, so liefert der Motor aufgrund der gegenüber Ottokraftstoff höheren Oktanzahl etwa 10 Prozent mehr Leistung, aber auch der Verbrauch erhöht sich um gut 30 Prozent (Schmitz, 2005, 118). Die guten Eigenschaften des Ethanols als Kraftstoff sind seit langem bekannt: So war schon das legendäre Ford-T-Modell auf Ethanol als Kraftstoff ausgelegt und in Brasilien werden seit den dreißiger Jahren in großem Maßstab Ethanolbeimischungen vorgenommen.

Ethanol ist im Prinzip mit Ottokraftstoff frei mischbar, während dagegen eine Beimischung zu Dieselmotorkraftstoff nur unter Beigabe von Additiven möglich ist. Allerdings müssen die Fahrzeuge auf den Ethanolbetrieb entsprechend ausgelegt sein, wenn sie mit reinem Ethanol oder mit hohen Beimischungen fahren sollen. In Südamerika werden inzwischen von allen Herstellern so genannte Flexible Fuel Vehicles (FFV) angeboten, deren Motorelektronik jedes Mischungsverhältnis erkennt und den Motor entsprechend einstellt. In Europa verhindern bislang die strengen Kraftstoffnormen, dass Beimischungen von mehr als 5 Prozent erfolgen können (EU-Kommission, 2005, 46). Dennoch haben sich deutsche Hersteller Ende 2005 verpflichtet, alle Neufahrzeuge aus ihrer Produktion für eine Ethanolbeimischung von 10 Prozent auszurüsten. Neben der Anpassung der Motoren ist es auch möglich, das Ethanol an die Motoren anzupassen, indem man es in ETBE (Ethyl Tertiär Butyl Ether) umwandelt. Allerdings verbraucht der dafür notwendige chemische Prozess einen weiteren Teil der im Ethanol vorhandenen Energiemenge.

Ethanol ist weltweit gesehen der dominierende Biokraftstoff. Die Hauptverbreitungsgebiete sind Brasilien und die USA, aber asiatische Länder wie Japan und Südkorea interessieren sich auch zunehmend für Ethanol als Kraftstoff. In Europa erreicht Ethanol unter den Biokraftstoffen lediglich einen Marktanteil von 20,5 Prozent. Der Grund für die bisher geringe Marktdurchdringung in Europa liegt unter anderem an der verhältnismäßig ungünstigen Rohstoffsituation. Die heimischen Pflanzen wie Weizen, Roggen und Zuckerrübe enthalten viel weniger umwandelbaren Zucker als beispielsweise das in Brasilien vorherrschende Zuckerrohr und stellen zusätzlich deutlich größere Ansprüche an Bodenqualitäten und Düngung. Dennoch erzielt die Ethanolproduktion auch in Europa inzwischen erhebliche Wachstumsraten (Tabelle 10). Die Produktionsschwerpunkte liegen dabei in Südeuropa, wo der größte Teil des Ethanols anschließend in ETBE umgewandelt wird. Während in den meisten Ländern Großanlagen die Ethanolproduktion dominieren, herrscht in Deutschland infolge des Branntweinmonopols noch eine sehr kleinteilige Produktion vor. Zurzeit profitiert auch die deutsche Ethanolbranche von der Untermischungsverordnung für Biokraftstoffe, denn die heute zulässige Beimischung von 5 Prozent Ethanol zum Ottokraftstoff eröffnet den Herstellern ein erhebliches Marktpotenzial. Daher gingen in den neuen Bundesländern im Laufe des Jahres 2005 mehrere Großanlagen mit einer Kapazität von über 420.000 Tonnen in Betrieb.

Bei der Beurteilung der ökologischen Vorteile von Ethanol im Vergleich mit Ottokraftstoff ist zu beachten, dass in den letzten zehn Jahren beachtliche Fortschritte bei der Optimierung des Produktionsprozesses erzielt wurden. Noch in den neunziger Jahren ermittelten praktisch alle Untersuchungen eine äußerst negative Bilanz für den Einsatz von Ethanol anstelle von Ottokraftstoff. Seitdem wurden die Produktionsprozesse stark verbessert. Dieser kräftige technische und organisatorische Fortschritt hat aber auch zur Folge, dass die vorliegenden

## Produktion von Ethanol und ETBE<sup>1</sup> in der Europäischen Union

Tabelle 10

in Tonnen

	2003		2004	
	Ethanol	ETBE	Ethanol	ETBE
Spanien	160.000	340.800	194.000	413.200
Frankreich	82.000	164.250	102.000	170.600
Schweden	52.000	0	52.000	0
Polen	60.430	67.000	35.840	–
Deutschland	0	0	20.000	42.500
Ethanolverkauf durch die EU-Kommission <sup>2</sup>	70.320	–	87.200	–
<b>EU-25</b>	<b>424.750</b>	<b>572.050</b>	<b>491.040</b>	<b>626.300</b>

<sup>1</sup> ETBE: Ethyl Tertiär Butyl Ether; <sup>2</sup> Im Rahmen des gemeinsamen Weinmarktmanagements kauft die EU-Kommission auf dem europäischen Markt Wein und verkauft daraus gewonnenes Ethanol;  
Quelle: EU-Kommission, 2005, 46

die Produktionsprozesse stark verbessert. Dieser kräftige technische und organisatorische Fortschritt hat aber auch zur Folge, dass die vorliegenden



Untersuchungsergebnisse zur Klimabilanz des Ethanoleinsatzes eine erhebliche Varianz aufweisen, da sie oft auf unterschiedlichen Technologien und Rohstoffen basieren. Einen möglicherweise entscheidenden Durchbruch stellt dabei ein in Kanada entwickeltes Verfahren dar, mit dem sich unter Nutzung von gentechnisch behandelten Enzymen erstmals auch aus Cellulose Ethanol gewinnen lässt. Dadurch kann der Hektarertrag an Ethanol beachtlich gesteigert werden, da praktisch die gesamte Pflanzenmasse verwertbar wird. Bisher konnten nur die zucker- und stärkehaltigen Teile genutzt werden, in der Regel also nur die Fruchtkörper. Im Jahr 2004 nahm das erste Werk seine Tätigkeit auf, das Ethanol aus Stroh gewinnt. Aber auch in anderen Bereichen der Bereitstellungskette sehen Experten noch Optimierungspotenzial. So könnte nach Ansicht der Saatgutindustrie durch gezielt auf die Ethanolproduktion gezüchtete Pflanzen noch einmal eine Steigerung des Ethanolertrags um bis zu 10 Prozent erreicht werden (Schmitz, 2005, 58 f.).

Der entscheidende Faktor für die Klimaverträglichkeit der Ethanolnutzung liegt jedoch in der Herkunft der Prozessenergie und in der Verwendung der Kuppelprodukte. Wie Tabelle 11 zeigt, liegen die  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen der Ethanolproduktion je nach Quelle der Prozessenergie weit auseinander. Wird auf fossile Prozessenergie zurückgegriffen, ergeben sich bei der Bereitstellung von Ethanol im Mittel mehr als dreimal so hohe  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen, wie dies bei Ottokraftstoff der Fall ist. Werden hingegen regenerative Energieträger genutzt, etwa das bei der Fermentierung anfallende Biogas oder die Pflanzenrestmasse, so nähert sich der Emissionsmittelwert von Ethanol stark an den Wert von Benzin an. In der Nutzungsphase des Treibstoffs fallen beim Ottokraftstoff zusätzliche  $\text{CO}_2$ -Emissionen an, während das bei der Verbrennung von Ethanol emittierte  $\text{CO}_2$  klimaneutral ist und daher nicht in die kumulierten Emissionen einzurechnen ist. Unter Berücksichtigung der  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen der Vorketten (Düngung, Transport) errechnen sich je nach Produktionsart des Ethanols Einsparungen zwischen 0,8 und 1,5 Kilogramm  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  je Liter Ethanol und ein Primärenergieüberschuss von bis zu 23 Megajoule. Dabei handelt es sich wohlgerne um Mittelwerte, die aus den vorliegenden Studien abgeleitet wurden. Unter den aktuelleren Studien zum Thema Ethanol schwanken die ermittelten Einsparungen an  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen zwischen 0,5 Kilogramm  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  pro Liter bei der Ethanolgewinnung aus Weizen und 2,2 Kilogramm  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  bei der Verwendung von Zuckerrohr als Rohstoffbasis.

Diese Spitzenwerte sind jedoch in Europa aufgrund der klimatischen Bedingungen nicht zu erreichen. In Deutschland liegen die maximalen Einsparungen derzeit bei etwa 1,5 Kilogramm  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  pro Liter Ethanol (Zuckerrübe). In einer flächenbezogenen Betrachtung resultiert daraus in etwa eine Einsparbandbreite von

drei bis elf Tonnen CO<sub>2eq</sub> pro Hektar und Jahr beim Einsatz von Zuckerrüben als Rohstoffbasis (vgl. Quirin et al., 2004, A21). In der flächenbezogenen Betrachtung tritt zudem zutage, dass ETBE in der Regel eine deutlich bessere Klimabilanz aufweist als das reine Ethanol. Der Grund dafür

liegt darin, dass ETBE den Einsatz des chemisch eng verwandten MTBE (Methyl Tertiär Butyl Ether) im Kraftstoff überflüssig macht. MTBE hat vor einigen Jahren Blei als Klopfschutzmittel im Kraftstoff abgelöst und damit erst den Einsatz von Katalysatoren ermöglicht. Allerdings ist die Herstellung von MTBE so energieaufwendig, dass seine Substitution durch ETBE zu deutlichen Einsparungen an CO<sub>2eq</sub>-Emissionen führt. Aufgrund dieses Sonderfaktors beträgt das flächenbezogene Einsparpotenzial von ETBE 6 bis 23 Tonnen CO<sub>2eq</sub> pro Hektar und Jahr. So gesehen hätte ETBE aus Zuckerrohr derzeit die beste Treibhausgasbilanz. ETBE hat zudem noch einen weiteren Vorteil, denn es kann bis zu einem Anteil von 15 Prozent unter Benzin gemischt werden, ohne dass eine technische Anpassung notwendig wird. Der untermischbare Anteil ist also deutlich höher als bei reinem Ethanol.

Auch beim Ethanol sind die weiteren Umweltfolgen eines Einsatzes eher schlecht untersucht und die bislang vorliegenden Ergebnisse divergieren sehr stark. So liegen beispielsweise die angenommenen Düngemittelaufsätze und damit auch die daraus resultierenden Effekte um den Faktor drei auseinander. Dies betrifft beispielsweise die Lachgasemissionen (N<sub>2</sub>O) oder die Eutrophierungseffekte infolge von Stickstoffemissionen. Grundsätzlich decken sich die Ergebnisse aber mit denen anderer Biokraftstoffe, indem richtungssicher ein Nachteil für Ethanol gegenüber Ottokraftstoff in Bezug auf die Eutrophierung und die Versauerung bilanziert wird. Wie immer trifft dies aber nur für Biokraftstoff aus Anbaumasse zu, während dagegen Reststoffe nicht mit diesen Nachteilen behaftet wären.

## Bereitstellung und Nutzung von Benzin und Bioethanol

Tabelle 11

Alle Angaben beziehen sich auf den Energieinhalt von einem Liter Ethanol (21,2 MJ)	Benzin	Ethanol	
		Mittelwert: fossile Energieträger	Mittelwert: nicht ausschließlich fossile Energieträger
<b>Bereitstellung</b>			
Treibhausgasemissionen in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten	0,33 kg	1,1 kg	0,4 kg
<b>Nutzung</b>			
Treibhausgasemissionen in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten	1,53 kg	–	–
<b>Kumuliert</b>			
Treibhausgasemissionen in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten	1,86 kg	1,1 kg	0,4 kg
Primärenergieaufwand	26,1 MJ	14,1 MJ	3,0 MJ

Quelle: Schmitz, 2005, 119

In den letzten Jahren hat die Ethanolproduktion weltweit geboomt. In vielen Ländern wurden Förderprogramme aufgelegt, um den Einsatz von Ethanol als Kraftstoff zu fördern. Auch Deutschland hatte diesen Weg beschritten und Ethanol bis 2009 von der Mineralölsteuer befreit. Ende 2005 wurde die erste Ethanol-tankstelle in Betrieb genommen. Damit wurde die Ethanolnutzung einzelwirtschaftlich interessant. Aber Ethanol wird von der Umstellung von der steuerlichen Bevorteilung auf eine Beimischungspflicht betroffen sein. Allerdings dürften die Auswirkungen gering sein, denn anders als RME ist Ethanol in Deutschland kaum in Reinform erhältlich und auch Fahrzeuge mit FFV-Motor werden hierzulande noch nicht vertrieben. Damit beschränken sich die Einsatzmöglichkeiten von Ethanol wie bereits vor der Gesetzesänderung praktisch auf die Beimischung des steuerfreien Ethanols unter konventionellen Kraftstoff. Eine Verwendung von reinem Ethanol ist weiterhin nicht absehbar. Ob dies Auswirkungen auf den Tankstellenpreis hat, ist aber nicht quantifizierbar.

Die flächendeckende Förderung verstellt den Blick darauf, dass die gesamtwirtschaftlichen Nutzen- und Kosteneffekte einer verstärkten Ethanolnutzung im Straßenverkehr nur schwer zu quantifizieren sind. Schon die Bereitstellungskosten von Ethanol hängen von vielen externen Faktoren und politischen Entscheidungen ab. Ein Beispiel dafür ist die zulässige Ethanolkonzentration im Kraftstoff. Solange sich diese unterhalb von 5 Prozent bewegt, können die bestehenden Verteilungssysteme problemlos weitergenutzt werden, aber bei höheren Konzentrationen fallen Anpassungskosten in der Versorgungsinfrastruktur und den Kraftfahrzeugen an, wobei die Anpassungskosten mit dem Konzentrationsgrad des Ethanols steigen. Allerdings kann eine weitere Verbreitung der FFV-Technik diese Anpassungskosten wiederum begrenzen. Da in absehbarer Zeit aber zumindest in Europa kaum mit Beimischungen über 5 Prozent zu rechnen ist, kann dieser Teil der Bereitstellungskosten von Ethanol weitgehend vernachlässigt werden. Zudem wollen die weltweit tätigen Autobauer ihre Produkte bereits heute auf Benzinbeimischungen von bis zu 10 Prozent auslegen.

Von zentraler Bedeutung sind in der Kostenbetrachtung somit die Produktions- und Konversionskosten, die im Wesentlichen den Ethanolpreis bestimmen. Dieser ist leider schwer zu prognostizieren, da er von vielen externen Einflüssen abhängt und die industrielle Herstellung von Ethanol in Europa erst am Anfang ihrer Entwicklung steht. Besonders wichtig sind in diesem Zusammenhang der Zuckerpreis, die Ernteerträge für konvertierbare Pflanzen wie Zuckerrüben oder Zuckerrohr sowie Importzölle und Steuern auf Ethanol (Henke, 2005, 31).

Wie schon erwähnt, bewegt sich zurzeit einiges im Bereich der Konversionstechnik, was die Angabe von konkreten Herstellungskosten stark erschwert. Es

lässt sich jedoch mit großer Sicherheit sagen, dass die Voraussetzungen für die massenhafte Ethanolproduktion in Europa im Vergleich mit anderen Teilen der Welt verhältnismäßig ungünstig sind (Tabelle 12). Die Kostensituation der europäischen Ethanolproduktion ist vor allem aufgrund der relativ teuren Rohstoffe und der geringeren Hektarerträge schlechter als etwa in den USA oder Brasilien. Die in Tabelle 12 angegebenen Gesamtkosten von 0,63 bis 0,72 Euro pro Liter Benzinäquivalent liegen mehr als 50 Prozent über den derzeitigen Bereitstellungskosten von Ottokraftstoff. Andere Schätzungen sehen für Deutschland im besten Fall Kosten von etwa 50 Cent pro Liter Benzinäquivalent, wobei jedoch Werte zwischen 80 und 90 Cent als realistischer angesehen werden (Henke et al., 2003). In den USA liegen die Herstellungskosten (Mais: 0,39 Euro; Cellulose 0,43 Euro) deutlich niedriger, aber immer noch über denen von Benzin. In Brasilien liegen die Kosten sogar unter denen für konventionellen Kraftstoff.

## Produktionskosten von Bioethanol: Deutschland und USA im Vergleich

Tabelle 12

Euro pro Liter\*

Produktionskapazität	Deutschland		USA	Kostendifferenz
	50 Millionen Liter	200 Millionen Liter	53 Millionen Liter	
Pflanzenbasis	Zuckerrübe		Mais	
Rohstoffkosten	0,28	0,28	0,17	0,11
Kuppelprodukt-Gutschrift	0,06	0,06	0,06	0,00
Netto-Rohstoffkosten	0,22	0,22	0,11	0,11
Arbeitskosten	0,03	0,008	0,02	-0,012-0,01
Weitere Herstellungs- und Energiekosten	0,15	0,14	0,08	0,06-0,07
Kapitalkosten	0,08	0,05	0,03	0,02-0,05
<b>Gesamtkosten pro Liter Ethanol</b>	<b>0,48</b>	<b>0,42</b>	<b>0,26</b>	<b>0,16-0,22</b>
<b>Gesamtkosten pro Liter Benzinäquivalent</b>	<b>0,72</b>	<b>0,63</b>	<b>0,39</b>	<b>0,24-0,33</b>

\* Wechselkurs vom 24. August 2005: 1 Euro = 1,23 US-Dollar;

Quelle: FO Licht, 2003

Auf Basis einer Betrachtung der reinen Herstellungskosten wäre also eine groß angelegte Nutzung von Ethanol als Kraftstoff in Europa kaum zu rechtfertigen. Zudem ist zu beachten, dass die Kuppelprodukte der Ethanolproduktion in Europa (vor allem Viehfutter) nur begrenzt zu vermarkten sind. Bei einer deutlichen Produktionsausweitung ist ein Preisrutsch wahrscheinlich, der die Bereitstellungskosten weiter erhöhen könnte. Die weiteren Nutzeneffekte eines

verstärkten Ethanoleinsatzes, wie etwa Arbeitsplätze in der Landwirtschaft oder verminderter Devisenbedarf, wurden bisher nicht untersucht. Auch für die tendenziell preistreibende Wirkung auf Lebensmittel aufgrund der Flächenkonkurrenz liegen keine belastbaren Daten vor.

Außer nach dem zu erwartenden Anstieg der Bereitstellungskosten stellt sich die Frage nach den vorhandenen Substitutionspotenzialen von Ethanol. Dabei ist festzuhalten, dass die Rohstoffbasis in Deutschland und Europa im Gegensatz zu den großen Produzenten USA und Brasilien sehr begrenzt ist. Zum einen ist die hierzulande primär als Rohstoff genutzte Zuckerrübe eine recht anspruchsvolle Pflanze und zum anderen ist die Ackerfläche im dicht besiedelten Europa nur begrenzt erweiterbar. Damit ist auch die zukünftige Verfügbarkeit von Ethanol eingeschränkt. Tendenziell steht die Ethanolproduktion in Europa in Bezug auf den Flächenbedarf günstiger da, als es beim RME der Fall ist. Der Grund dafür ist eine deutlich höhere Ausbeute je eingesetztes Hektar Land, die bei Zuckerrüben etwa bei 5.500 Liter Ethanol je Hektar liegt. Insgesamt ist das Substitutionspotenzial von Ethanol im hohen einstelligen Prozentbereich einzuordnen. Allerdings schwanken die Angaben in den verschiedenen Studien aufgrund der bereits angesprochenen Vergleichbarkeitsprobleme stark. Szenariorechnungen der Internationalen Energieagentur (IEA) sehen einen Flächenbedarf von 5 Prozent der gesamten Ackerfläche in Europa, um im Jahr 2010 einen Anteil von 5 Prozent am Absatz von Ottokraftstoff zu erreichen (IEA, 2004, 123 f.). Andere Einschätzungen liegen allerdings deutlich höher.

Aufgrund des augenfälligen Standortnachteils in Europa fällt die Option ins Auge, Ethanol aus Ländern mit günstigeren Standortbedingungen zu importieren. Damit würde zwar der grundsätzliche Vorteil der Nutzung eines heimischen Primärenergieträgers entfallen, aber die Zahl der potenziellen Lieferanten und ihre politische Stabilität versprechen auch in diesem Fall eine Verbesserung der Versorgungssicherheit. Der Import von Ethanol aus Brasilien oder eventuell auch aus afrikanischen Staaten hätte zudem einen positiven entwicklungspolitischen Nebeneffekt. Der Handel würde sowohl die Kostensituation von Ethanol als auch seine Ökobilanz verbessern und zudem einigen Entwicklungsländern neue Märkte eröffnen. Es zeigt sich allerdings, dass der Wille, diese Möglichkeiten zu nutzen, in Europa nur wenig ausgeprägt ist. Der fast schon traditionelle Agrarprotektionismus tritt auch im Bereich des Ethanols zutage, sodass heute relativ hohe Zölle auf den Ethanolimport erhoben werden, um die europäischen Produzenten zu schützen. Der Zoll beträgt zurzeit fast 20 Cent pro Liter, was den Kostennachteil der heimischen Produktion weitgehend ausgleicht. Auch andere Industrieländer wie die USA und Kanada erheben Schutzzölle. Damit werden die

durch internationalen Handel möglichen Effizienzvorteile verschenkt. Denn das Dilemma besteht darin, dass die Ethanolförderung eher als Teil der nationalen Agrarpolitik denn als Element einer weltweiten Klimapolitik verstanden wird. Auch die geplante Ersetzung der steuerlichen Begünstigung von Biokraftstoffen durch eine Beimischungsverpflichtung spricht für diese Sichtweise. Allerdings kommt der Weltmarkt langsam in Bewegung, da zunehmend asiatische Länder (vor allem Japan und Südkorea) nach Substitutionsmöglichkeiten für Ölimporte suchen und sich für das günstige Import-Ethanol öffnen, während sie gleichzeitig eigene Kapazitäten aufbauen (China und Indien). In Anbetracht des weltweiten Benzinverbrauchs stellt die Welt-Ethanolproduktion derzeit allerdings nur eine sehr beschränkte Ausweichmöglichkeit dar.

Aufgrund der großen Spannweiten bei der Einsparung von Klimagasen in den vorliegenden Untersuchungen und der hohen Kostenvarianz im Rahmen der Ethanolbereitstellung ist es auch in diesem Fall recht spekulativ, einen Wert für die durchschnittlichen Vermeidungskosten als Effizienzmaßstab anzugeben. Neuere Untersuchungen sehen die Vermeidungskosten in Europa bei mindestens 200 Euro pro Tonne, wobei dieser Wert bei ungünstigeren Begleitumständen auf gut 600 Euro pro Tonne steigen kann (Henke, 2005, 24). Ältere Untersuchungen geben auch schon einmal Höchstwerte von bis zu 1.000 Euro an (Wurster et al., 2002b, Abschnitt 0–8). Für Import-Ethanol dürften die Vermeidungskosten hingegen in einer Größenordnung von etwa 50 Euro pro Tonne CO<sub>2eq</sub> liegen. Insgesamt erweist sich Ethanol im Vergleich mit RME als die günstigere Variante der Biokraftstoffe. Allerdings bleibt das Kardinalproblem bestehen, dass der Einsatz der landwirtschaftlich erzeugbaren Biomasse in stationären Anwendungen deutlich effizienter wäre als die mobile Nutzung im Kraftfahrzeug.

### **Das Beispiel Brasilien**

Brasilien ist der weltgrößte Ethanolproduzent und kann inzwischen auf eine mehr als siebzigjährige Tradition beim Einsatz von Ethanol als Kraftstoff zurückblicken. Im Zuge der ersten Ölkrise legte Brasilien das weltweit erste große Ethanolförderprogramm (Proálcohol) auf. Dieses Programm war ein großer Erfolg. Bereits Ende der achtziger Jahre war der Ethanolabsatz größer als der von Benzin, da verstärkt reine Ethanolfahrzeuge verkauft wurden. Später ging der Marktanteil des Ethanols zurück, aber seit der Einführung der FFV-Technologie und aufgrund der hohen Ölpreise zieht der Ethanolabsatz in Brasilien wieder an.

Die brasilianische Ethanolproduktion unterscheidet sich heute in ihrer Umwelt- und Kostenbilanz signifikant von der europäischen (Übersicht 2). Das

## Ethanolproduktion: Brasilien und Deutschland im Vergleich

Übersicht 2

	Brasilien	Deutschland
<b>Rohstoffe</b>	Zuckerrohr	Getreide (Weizen, Roggen, Triticale), Zuckerrüben, Kartoffeln
<b>Produktionskapazität</b>	ca. 17 Millionen m <sup>3</sup>	ca. 300.000 m <sup>3</sup> in 2004 ca. 900.000 m <sup>3</sup> in 2005
<b>Produktion 2003</b>	14,4 Millionen m <sup>3</sup>	ca. 280.000 m <sup>3</sup>
<b>Produktionskosten</b>	ca. 0,20–0,25 US-Dollar/Liter, bei schlechteren Anlagen bis 0,30 US-Dollar/Liter	ca. 0,45–0,50 Euro/Liter
<b>Nettoenergiegewinn</b>	18 Megajoule/Liter	Derzeit etwa 7 Megajoule/Liter; mit neuen Technologien zwischen 15,7 und 21,3 Megajoule/Liter
<b>Treibhausgas- einsparung</b>	2–2,8 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/ Liter Ethanol	Derzeit zwischen 1 und 1,5 kg; mit neuen Technologien zwischen 1,5 und 2,14 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente

Quelle: Schmitz, 2005, 23

liegt zunächst an der Rohstoffbasis. Zuckerrohr ist eine genügsame Pflanze, die mit wenig Düngung und Schädlingsbekämpfung auskommt. Zurzeit wird Zuckerrohr auf etwa 5,6 Millionen Hektar angebaut, was etwa 10 Prozent der heute genutzten landwirtschaftlichen Fläche entspricht. Zwischen 700.000 und 1 Million Landarbeiter finden hier Arbeit. Nach als konservativ bezeichneten Schätzungen des brasilianischen Landwirtschaftsministeriums ließe sich diese Anbaufläche auf 90 Millionen Hektar steigern. Der Zuckerrohranbau ist in der Region um São Paulo im Süden des Landes konzentriert, da die Ernterträge im Norden nur etwa halb so hoch sind wie dort. Zuckerrohr hat sich als geeignetste Pflanze für die Ethanolproduktion erwiesen. Die Pflanzenmasse verteilt sich zu etwa gleichen Teilen auf Zucker, Stroh und faserige Komponenten (Bagasse). Die Bagasse wird heute dazu genutzt, die Prozessenergie zur Zucker- und Ethanolherstellung zu gewinnen, das Stroh wird entweder als Dünger genutzt oder bei der Ernte abgefackelt. Es handelt sich also um einen weitgehend geschlossenen Kreislauf in der Produktion mit einer entsprechend guten Ökobilanz. Mit den zuvor bereits beschriebenen neuen Produktionsverfahren könnte auch das Stroh zur Produktionssteigerung verwertet werden. Zu der hohen Ergiebigkeit des Zuckerrohrs und der energetischen Autarkie der Ethanolproduktion kommt noch hinzu, dass Land und Arbeit in Brasilien günstig sind. So verdient ein Landarbeiter in der Zuckerrohrproduktion etwa 200 US-Dollar im Monat. In der Addition führt dies dazu, dass brasilianisches

Ethanol der wohl einzige Biokraftstoff ist, der in der Herstellung bereits heute billiger als Benzin ist. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass der Ethanolpreis sowie die angebotene Menge sehr stark von externen Faktoren beeinflusst werden. So sorgen die witterungsabhängigen Erntemengen, der Zuckerpreis und der Ölpreis für ein schwer abzuschätzendes Marktumfeld und damit für volatile Preise.

### 7.3 Sunfuel (BTL)

Das auch als Sunfuel bekannte BTL (Biomass to Liquids) ist der Newcomer unter den Biokraftstoffen. Die Herstellung ist noch in der Erprobungsphase, weshalb sich die ökologischen und ökonomischen Aspekte der BTL-Nutzung bisher kaum bilanzieren lassen. Außer zu Testzwecken ist BTL bislang nicht im Markt, es handelt sich vielmehr eher um ein experimentelles Produkt. Dennoch verdient BTL große Aufmerksamkeit, denn die bisherigen Tests deuten darauf hin, dass BTL eine große Zukunft haben könnte. Beim BTL handelt es sich im Prinzip um den gleichen Stoff, der bereits im Abschnitt über GTL (Kapitel 6.2) beschrieben wurde. Auch der Produktionsprozess ist teilweise identisch. Das Neue an BTL ist lediglich, dass anstelle von fossilem Erdgas jegliche Form von Pflanzenmasse als Rohstoffbasis genutzt wird und es damit weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral ist. Grob gesagt kann durch das zugrunde liegende Herstellungsverfahren aus jeder bestehenden Kohlenwasserstoffkette ein ziemlich genau spezifizierter anderer Kohlenwasserstoff hergestellt werden. Das Ergebnis des Prozesses ist ein sehr reiner Kraftstoff mit hohem Energiegehalt und praktisch ohne schadstoffbildende Bestandteile. Die im BTL enthaltenen Kohlenwasserstoffe und damit auch die Verbrennungseigenschaften des BTL lassen sich im Produktionsprozess sehr genau festlegen. Der Einsatz dieser Designerkraftstoffe eröffnet die Möglichkeit, den Verbrennungsprozess sowohl von der motortechnischen als auch von der Kraftstoffseite her zu optimieren und damit den Verbrauch und die Schadstoffbildung zu reduzieren. Diese Möglichkeit ist bislang kaum gegeben, da sich die Zusammensetzung der fossilen Kraftstoffe im Raffinationsprozess deutlich schlechter regeln lässt, als es bei den der BTL-Produktion zugrunde liegenden Syntheseverfahren der Fall ist (Kohler, 2005, 28 f.). Aufgrund dieser Eigenschaften wird BTL von Fahrzeugherstellern als wichtige strategische Option für die nächsten 20 Jahre angesehen.

Der BTL-Produktionsprozess ist im Vergleich zu dem der etablierten Biokraftstoffe ziemlich komplex. Er beruht im Wesentlichen auf einer mehrstufigen thermochemischen Umwandlung der Pflanzenmasse in ein Synthesegas, aus



dessen Bestandteilen mit Hilfe der Fischer-Tropsch-Synthese der gewünschte Kraftstoff erzeugt wird. Während der Syntheseprozess ziemlich gut erforscht ist, befinden sich unterschiedliche Konzepte der Biomassevergasung noch in der vorindustriellen Erprobung (für einen Überblick über diese Ansätze siehe Schütte, 2005). Exemplarisch sei an dieser Stelle das Carbo-V-Verfahren der Firma Choren genannt, das zumindest in Deutschland den derzeit führenden Ansatz darstellen dürfte. Bei diesem Verfahren wird die zuvor getrocknete Biomasse zunächst bei 400 bis 600 °C verschwelt. Dabei entstehen teerhaltige Gase und Holzkohle. In einem zweiten Schritt werden die im Gas enthaltenen Kohlenwasserstoffe bei 1.400 bis 1.500 °C in CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O zerlegt. Die mineralischen Bestandteile des Schwelgases fallen als Schlacke aus, die als Baumaterial verwendet werden kann. Das gewonnene Synthesegas wird anschließend noch gereinigt und das Verhältnis von CO und H<sub>2</sub> nachjustiert. Aus dem so behandelten Gas wird dann mithilfe geeigneter Katalysatoren der gewünschte Kraftstoff synthetisiert (vgl. Keppeler et al., 2005, 155 f.). Eine nach diesem Verfahren arbeitende Vorführanlage mit einer Kapazität von etwa 215.000 Tonnen ist in der Projektplanung ([www.choren.de](http://www.choren.de)). Mit dem Aufbau dieser Anlage wird die Schaffung und Sicherung von knapp 700 Arbeitsplätzen verbunden sein.

Wie alle Biokraftstoffe ist BTL in der Nutzung CO<sub>2</sub>-neutral. Im Vergleich zu RME und Ethanol treten jedoch zwei gravierende Unterschiede auf, die auch Einfluss auf die Klimabilanz von BTL nehmen. Zum einen basiert BTL auf einem relativ komplexen und auch energieintensiven Konversionsprozess. Der energetische Wirkungsgrad dürfte bestenfalls 60 Prozent erreichen, zurzeit sind 50 Prozent ein realistischer Wert (Vogel et al., 2005, 70). Insgesamt verbraucht die BTL-Produktion etwa doppelt so viel Energie, wie es bei der Raffination von fossilem Diesel gegenwärtig der Fall ist. Dies macht deutlich, dass die Herkunft der Prozessenergie und die Rohstoffbasis für die ökologische Einordnung von BTL entscheidend sind. Ein weiterer wichtiger Aspekt liegt in den Transportweiten der Rohstoffe. Da diese volumen- und gewichtsmäßig deutlich umfangreicher sind als die Transporte des BTL, spricht aus ökologischer Sicht vieles für eine eher dezentrale Produktionsweise. Ein Rohstoffeinzugsgebiet von 200 Kilometer Durchmesser dürfte aus ökologischer und betriebswirtschaftlicher Sicht (Steiner-Weber-Theorem) die Obergrenze darstellen.

Als Rohstoff für die BTL-Produktion kommt im Prinzip jede Pflanzenmasse infrage. Aus heutiger Sicht scheint Holz die größten Vorteile zu bieten. Immerhin fallen in den sich zurzeit ausdehnenden deutschen Waldflächen jedes Jahr gut 20 Millionen Festmeter Holz an, die unter anderem für BTL genutzt werden könnten. Diese Menge ließe sich durch den Anbau von schnell wachsenden,

aber genügsamen Bäumen deutlich erhöhen. In Deutschland wäre die Pappel besonders geeignet, in nördlicheren Breiten eher Weiden und in mediterranen Gebieten der Eukalyptus. Ein besonderer Vorteil des BTL liegt darin, dass auch jegliche Form der Begleitflora mitgenutzt werden kann. Daher können für BTL deutlich schonendere Anbaumethoden eingesetzt werden, als es bei den etablierten Biokraftstoffen der Fall ist. So könnten Mischkulturen genutzt werden, die den Pestizid- und Herbizideinsatz deutlich verringern (Tschimpke, 2005, 45). Zudem können Pflanzen eingesetzt werden, die einen geringen Düngerbedarf haben. Das wiederum hält die Lachgasemissionen und den für den Pflanzenanbau nötigen Energieinput gering.

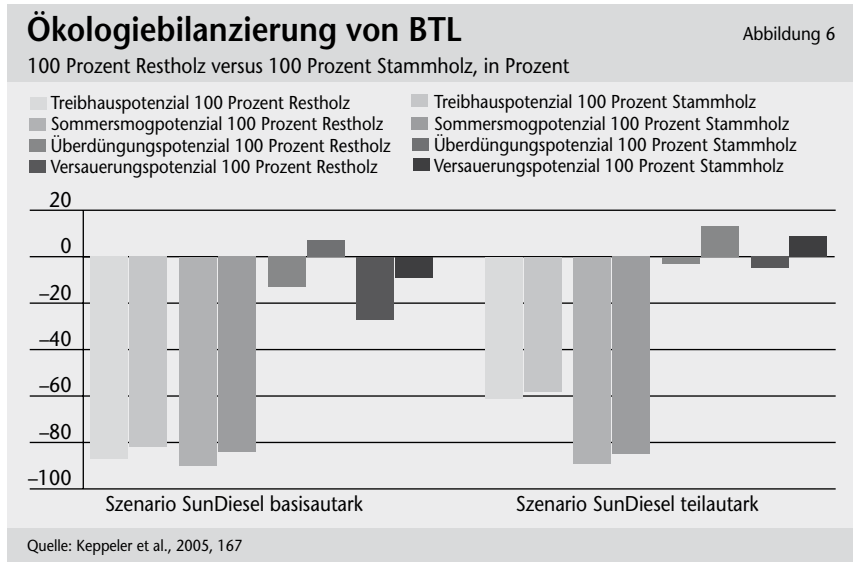
In der Nutzungsphase des BTL macht es sich positiv bemerkbar, dass der synthetisierte Kraftstoff keine schadstoffbildenden Komponenten wie Schwefel oder Aromaten enthält. Dementsprechend lassen sich im Vergleich zum normalen Kraftstoff beim Einsatz von reinem BTL in heute gängigen Motoren bereits Emissionsreduktionen bei gesundheitlich bedenklichen Schadstoffen wie etwa Rußpartikeln von über 20 Prozent erreichen. Zudem lässt sich dieser Effekt erzielen, ohne die  $\text{NO}_x$ -Emissionen zu erhöhen, was normalerweise passieren würde, wenn die Partikelemissionen innermotorisch gesenkt würden (Herrmann et al., 2005, 146). Gerade im Hinblick auf die zu erwartende Verschärfung der Immissionsgrenzwerte für Partikel und  $\text{NO}_x$  stellt dies einen deutlichen Vorteil dar.<sup>7</sup> Doch auch in der Bereitstellungskette weist die Reinheit des BTL ökologische Vorteile auf. So ist der Eintrag von BTL in das Ökosystem, beispielsweise beim Untergang eines BTL-Tankers, aus ökologischer Sicht weitgehend unproblematisch.

Da BTL noch weitgehend in der vorindustriellen Erprobung steckt, gibt es bislang auch kaum Ökobilanzen zum BTL. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Ökobilanzierung eines nach dem Carbo-V-Verfahren hergestellten BTL im Vergleich zum konventionellen Diesel dargestellt, wobei sowohl verschiedene Grade der energetischen Autarkie der BTL-Produktion als auch verschiedene Arten der Rohstoffversorgung modelliert wurden. Im Autarkieszenario wird angenommen, dass die Prozessenergie und auch die benötigten Betriebsstoffe – wie Sauerstoff und Stickstoff – in der Anlage selbst erzeugt werden. Das Teilautarkieszenario hingegen geht davon aus, dass die Betriebsgase aus konventioneller Herstellung zugekauft und Teile der Energie aus dem Stromnetz bezogen werden. Zudem wurde die Bilanz in beiden Szenarien einmal für die Verwendung von Restholz und einmal für die Nutzung von extra angebautem Holz erstellt (Keppeler et al., 2005, 166 f.). Vor allem im Bereich der Klimabilanz zeigt sich die große

---

<sup>7</sup> Für genauere Informationen zum Trade-off zwischen Partikel- und Stickoxidemissionen siehe zum Beispiel Herrmann et al., 2005.

Bedeutung der Prozessenergiequelle. Im Autarkieszenario können beim reinen Einsatz von Restholz CO<sub>2eq</sub>-Einsparungen von 87 Prozent erreicht werden. Beim Einsatz von extra angebaute Stammholz sinken die Einsparungen lediglich um 5 Prozentpunkte auf 82 Prozent. Im Szenario Teilautarkie werden hingegen lediglich Einsparungen von 61 Prozent (Restholz) beziehungsweise 58 Prozent (Stammholz) erreicht. In Bezug auf Versauerungs- und Überdüngungseffekte stellen sich erwartungsgemäß ähnliche Ergebnisse ein, wie sie auch bei den etablierten Biokraftstoffen auftreten.



Auch BTL kann gegenüber konventionellem Diesel vor allem dann richtungs-sicher Vorteile aufweisen, wenn auf Reststoffe als Rohstoffbasis zurückgegriffen werden kann, während sich bei Rückgriff auf extra angebaute Biomasse zumeist Nachteile in dieser Kategorie einstellen. Aufgrund der tendenziell genügsameren Pflanzenbasis fallen die möglichen Nachteile aber geringer aus, als es bei den etablierten Biokraftstoffen der Fall ist. Variiert man statt der Rohstoffbasis die Transportweiten der Rohstoffe, ergibt sich ein sehr ähnliches Bild. Die Ergebnisse zeigen, dass BTL gerade in Bezug auf Klimagase ein beachtliches Einsparpotenzial besitzt, wobei aber die Herkunft von Prozessenergie und Betriebsstoffen eine wichtige Rolle spielt. In Bezug auf die weiteren Ökokriterien wie etwa Eutrophierung und Versauerung hängt das Ergebnis der Bilanzierung stark von der verwendeten Rohstoffbasis ab. In Anbetracht der benötigten Menge an Alternativkraftstoff und der seit der Einführung des Erneuerbare-Energien-Ge-

setzes (EEG) weitgehend geräumten Restholzmärkte sollten jedoch vor allem die Ergebnisse für Stammholz beachtet werden. Selbst im ungünstigsten der untersuchten Fälle scheint BTL noch ein signifikantes Potenzial zur Entlastung der Umwelt zu besitzen. Allerdings ist die Datenlage noch schwach, da es kaum miteinander vergleichbare Untersuchungen zum Thema BTL gibt.

Da BTL zurzeit weder industriell produziert noch am Treibstoffmarkt gehandelt wird, fällt es relativ schwer, Aussagen über die Kosten der BTL-Nutzung zu treffen. Zudem ist unklar, wie BTL in Zukunft vom Staat gefördert werden wird. Einerseits müsste auch BTL von der Streichung der Steuerbefreiung auf Biokraftstoffe in Deutschland betroffen sein. Andererseits formuliert die neue Koalition ebenfalls die Absicht, die Markteinführung von BTL gezielt zu fördern. Aus Sicht der Autofahrer würde eine Steuerbefreiung allein aus Betriebskostengründen vorteilhaft sein. Aber auch wenn man von den heute noch kaum kalkulierbaren Zapfsäulenpreisen abstrahliert, weist BTL zumindest aufgrund der chemischen Eigenschaften keine Schwachpunkte auf, die seine Massenmarkttauglichkeit aus Konsumentensicht beschneiden würden.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht spielen vor allem die Bereitstellungskosten für BTL und sein Mengenpotenzial eine Rolle. Hier zeigt sich ein relativ positives Bild. Zwar liegen die Angaben zu den Produktionskosten in der Literatur mit einer Spannweite von 40 Cent bis 1,50 Euro pro Liter tendenziell über denen der etablierten Biokraftstoffe, aber sowohl der Entwicklungsstand als auch die Komplexität des Produktionsprozesses lassen vermuten, dass erhebliches Verbesserungspotenzial besteht. Im Vergleich der Bereitstellungskosten von BTL zu RME und Ethanol fallen im Wesentlichen zwei Unterschiede in der Kostenstruktur ins Auge, die in der Tendenz gegenläufig sind. Eindeutig kostensteigernd wirkt sich die teilweise experimentelle Konversionstechnologie aus, die zudem deutlich aufwendiger ist als bei den etablierten Biokraftstoffen. Demgegenüber sorgt die Möglichkeit, in der BTL-Produktion auf eine diversifizierte Rohstoffbasis zurückgreifen zu können, dafür, dass dieser bedeutende Kostenblock deutlich geringer ausfällt. Die Addition der beiden Effekte führt dazu, dass die Rohstoffkosten in einer großen BTL-Produktionsanlage nur 40 bis 50 Prozent der Produktionskosten ausmachen werden. Bei der Produktion von RME und Ethanol liegt der Anteil der Rohstoffkosten hingegen deutlich über 80 Prozent der Gesamtkosten (Lüke, 2005, 52). Da die BTL-Produktion zudem nicht von den Ernteerträgen einiger weniger Pflanzen abhängt, dürften die Rohstoffkosten nicht nur dauerhaft geringer, sondern auch weniger volatil als bei den anderen Biokraftstoffen sein. In Bezug auf die Verteilungsinfrastruktur sind praktisch keine Zusatzkosten zu erwarten, da BTL mit dem konventionellen Diesel mischbar ist. Allerdings wäre

eine Untermischung von mehr als 20 Prozent mit den derzeit in Deutschland und Europa geltenden Kraftstoffnormen nicht vereinbar.

Der Hauptvorteil von BTL liegt jedoch in seinem verhältnismäßig hohen Mengenpotenzial. Nach Ansicht von Pflanzenzüchtern könnten künftig Erträge von bis zu zwölf Tonnen BTL je Hektar und Jahr erreichbar sein. Aber schon heute liegen die erzielbaren Mengen über denen von RME und Ethanol. Die hohen Hektarerträge bewirken, dass BTL nach Angaben aus der Automobilindustrie langfristig ein Substitutionspotenzial von bis zu 25 Prozent des Kraftstoffs in der EU-25 erreichen kann. Selbst für das dicht besiedelte Deutschland gehen Experten davon aus, dass in Zukunft zwischen 8 und 16 Prozent des Kraftstoffverbrauchs mit BTL gedeckt werden könnten (Vogel et al., 2005, 79 f.). Damit liegt das Mengenpotenzial dieses heimischen Kraftstoffs deutlich über dem der vergleichbaren Biokraftstoffe.

Eine Effizienzbetrachtung in Form von Vermeidungskosten pro Tonne  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  ist aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums von BTL wenig zielführend. Es ist jedoch festzuhalten, dass BTL der einzige Biokraftstoff mit einem deutlichen Substitutionspotenzial ist. Die Bereitstellungskosten dürften hingegen zurzeit höher liegen als bei RME, Ethanol oder gar konventionellem Kraftstoff. Allerdings liegt hier auch noch erhebliches Verbesserungspotenzial. Summa summarum sprechen die bisherigen Ergebnisse dafür, dass BTL von seinem Potenzial her für eine zukünftige Nutzung der am besten geeignete Biokraftstoff ist. Allerdings ist nicht damit zu rechnen, dass BTL in der kurzen Zeit, also vor 2010 in signifikanter Menge auf den Kraftstoffmarkt kommen wird.

## 8

## Elektrofahrzeuge

Über kaum ein alternatives Antriebskonzept besteht unter den verschiedenen Stakeholdern so große Einigkeit wie über das batterieelektrische Fahrzeug. Nach Ansicht praktisch aller Experten ist dieses Konzept sowohl ökonomisch als auch ökologisch eine Sackgasse. Dies ist das vorläufige Endergebnis eines langen Konkurrenzkampfs zwischen batterieelektrischen Antrieben und der heute absolut dominanten Verbrennungskraftmaschine (VKM). Immerhin fuhr das erste bekannte batterieelektrische Auto bereits im Jahr 1888, und zunächst galt diese Antriebsart im Vergleich mit der VKM als die zukunftssträchtigere. Allerdings zeichnete sich bereits damals ab, dass das Speichermedium Batterie das entscheidende Problem dieser Technologie darstellen würde.

In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts erfuhr das batterieelektrische Konzept im Zuge der frisch entbrannten Umweltdiskussion neue Beachtung. Man versprach sich davon vor allem ökologische Vorteile. Inzwischen ist jedoch klar geworden, dass diese Hoffnung trug. Der große Vorteil von Elektrofahrzeugen liegt darin, dass sie keine lokalen Abgasemissionen verursachen. Das bedeutet jedoch nicht, dass sie abgasfrei wären. Stattdessen fallen ihre Emissionen bei der Stromerzeugung an. Überspitzt formuliert fährt ein Elektroauto in Deutschland vor allem mit Kohle- und Atomstrom. In Bezug auf die Treibhausgasbilanz ist besonders der Kohleanteil kritisch, der die dem Elektroauto zuzurechnenden Emissionen auf etwa 170 Tonnen  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{TJ}$  verbrauchte Energie erhöht. Erschwerend kommt hinzu, dass Flottenversuche gezeigt haben, dass der Primärenergieverbrauch der Elektroautos 1,5- bis viermal so hoch liegt wie bei den Vergleichsfahrzeugen (IFEU, 1996). In der Addition ergaben sich bezüglich der Klimagase deutliche Emissionsnachteile gegenüber den mineralölbasierten Kraftstoffen. Das Gleiche gilt auch für die Untersuchung der Versauerungseffekte. Demgegenüber ergaben sich Vorteile in den Bereichen Eutrophierung und Sommersmog. An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass diese Bilanz nur in Deutschland gilt. In Ländern mit hohen Anteilen von Wasserkraft (zum Beispiel Schweden) oder Atomkraft (zum Beispiel Frankreich) würden diese Nachteile entfallen. Generell haben Elektrofahrzeuge, zumindest bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, Vorteile bei den Lärmemissionen in Höhe von bis zu 4 dB(A).

Die Verbreitung von Elektroautos ist vor allem am Speichermedium gescheitert – genauer gesagt an der mangelhaften volumen- und gewichtsspezifischen Speicherfähigkeit der Batterien, wie sie in Tabelle 6 dargestellt ist. Bleiakkus sind zwar sehr zuverlässig, aber sie sind auch groß und schwer. Zurzeit fahren Elektrofahrzeuge nur etwa 100 Kilometer mit einer Batterieladung, danach müssen sie mehrere Stunden aufgeladen werden. Damit sind die Fahrzeuge kaum abzusetzen, ihre Eigenschaften entsprechen nicht den am Markt artikulierten Anforderungen der Autofahrer. Zudem sind Elektroautos in der Anschaffung deutlich teurer als konventionelle Fahrzeuge. Insgesamt sind sie nur als Nischenprodukt in Kleinstserie absetzbar. Als einziger nennenswerter ökonomischer Vorteil von Elektroautos bleibt die Möglichkeit bestehen, diversifizierte Primärenergieträger zu nutzen, da das Elektroauto den herrschenden Strommix mitbenutzen kann. Dieses Plus reicht aber nicht aus, um ein echtes Argument für die Elektroautos darzustellen. Da zudem kein großer Sprung in der Batterietechnologie zu erwarten ist (Jürgens et al., 2002), haben eigentlich alle großen Fahrzeughersteller die Entwicklung von Elektroautos eingestellt. Lediglich Konzeptstudien werden noch verfolgt.

Dass die Elektroautos noch nicht völlig aus den Entwicklungsabteilungen verschwunden sind, verdanken sie vor allem der kalifornischen Umweltgesetzgebung. Diese schreibt allen Herstellern vor, dass sie auch emissionsfreie Fahrzeuge im Angebot haben müssen, wenn sie im großen Absatzmarkt Kalifornien aktiv sein wollen (Volkswagen AG, 2004, 56). Zudem existiert ein weiterer Nischenmarkt für Spezialfahrzeuge, die in besonders abgassensensitiven Bereichen eingesetzt werden. Als Beispiel dafür seien Gabelstapler in Lagerhallen oder Fahrzeuge für den Einsatz unter Tage genannt. Da batteriegestützte Elektroautos weder ökologisch noch ökonomisch Vorteile aufweisen, hatte die kalifornische Gesetzgebung auch zur Folge, dass sich viele Hersteller einer anderen Form der Speicherung von elektrischer Energie im Fahrzeug zuwandten, nämlich dem Wasserstoff. Dieser ist sowohl in einer VKM als auch als Stromquelle für einen Elektromotor einsetzbar, wenn eine Brennstoffzelle als Wandler benutzt wird.

## 9

## Wasserstoff

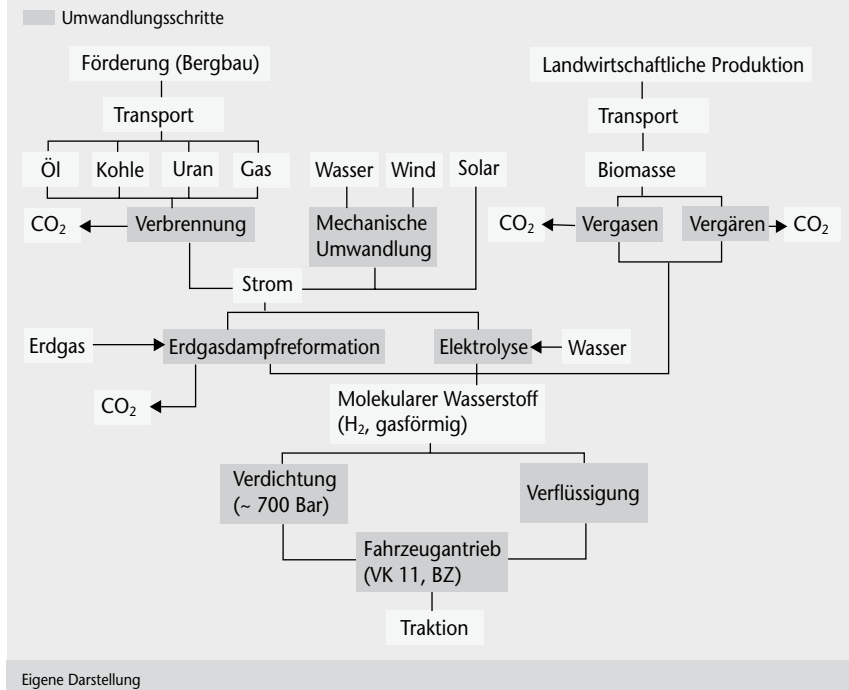
Immer wenn das Thema alternative Antriebe diskutiert wird, steht über kurz oder lang der Wasserstoff im Zentrum des Interesses. Der als Visionär bekannte Schriftsteller Jules Verne sah bereits im 19. Jahrhundert im Wasserstoff die „Kohle der Zukunft“, wie man es in seinem 1874 erschienenen Buch „Die geheimnisvolle Insel“ nachlesen kann. Außer den Visionären trauen aber auch viele Wissenschaftler dem im Jahr 1766 entdeckten Wasserstoff das Potenzial zu, in der Nachfolge von Holz, Kohle und Öl das vierte Energiezeitalter der Menschheit einzuläuten. Der molekulare, gasförmige Wasserstoff ( $H_2$ ) wird in der langen Frist auch von den Beratergremien der Bundesregierung als Treibstoff im Straßenverkehr favorisiert. Molekularer Wasserstoff kann sowohl in einer konventionellen VKM verbrannt als auch in einer Brennstoffzelle in elektrischen Strom umgewandelt werden (siehe Kapitel 10) und wäre somit relativ flexibel einsetzbar. Neben seinen variablen Nutzungsmöglichkeiten besitzt der molekulare Wasserstoff einen weiteren bedeutenden Vorteil: Er kann nie knapp werden oder gar ausgehen, denn atomarer Wasserstoff (H) ist das mit Abstand am häufigsten vorkommende Element. Nach neueren Schätzungen bestehen 75 Prozent der Masse des Universums aus Wasserstoff, das entspricht etwa 90 Prozent aller Atome (Rifkin, 2002). Doch gibt es in dieser Mengenbetrachtung einen Wermutstropfen. Der atomare Wasserstoff ist hoch reaktiv und liegt daher fast immer in gebundener Form vor, beispielsweise

als Holz, Kohle, Erdgas oder Öl. Aber auch der Mensch besteht zu großen Teilen aus gebundenem Wasserstoff. Als Treibstoff für VKM oder Brennstoffzellen käme jedoch vor allem der reine molekulare Wasserstoff ( $H_2$ ) infrage. Dieser kommt aber in der Natur praktisch nicht vor. Lediglich etwa 0,08 Prozent des irdischen Wasserstoffs liegen in der gut nutzbaren molekularen Form vor.

Es ist jedoch möglich, molekularen Wasserstoff mithilfe verschiedener Verfahren industriell herzustellen, wobei es in jedem Fall nötig ist, Energie in den Herstellungsprozess hineinzustecken. Dabei zeigt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen Wasserstoff und fossilen Brennstoffen. Molekularer Wasserstoff ist ein Sekundärenergieträger. Er stellt eine Form der Energiespeicherung dar und ähnelt insofern eher einer Batterie. Die eigentliche Energiegewinnung findet mithilfe von Primärenergieträgern wie etwa dem Sonnenlicht oder fossilen Brennstoffen statt. Es gibt verschiedene Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff. Prinzipiell lässt er sich aus zahlreichen chemischen Verbindungen extrahieren, wenn ausreichend Energie in Form von Wärme oder Elektrizität eingesetzt wird. Diese Energie kann wiederum aus einem breiten Spektrum von Primärenergieträgern

## Well to Wheel: Wasserstoffbereitstellung

Abbildung 7





gewonnen werden, das von fossiler Kohle über Biomasse bis zum Sonnenlicht reicht. So gesehen kann bei einer denkbaren Bereitstellung von Wasserstoff als Kraftstoff auf eine variable Rohstoffbasis zurückgegriffen werden, was die Abhängigkeit von einem einzelnen Energieträger und seinen Herkunftsgebieten entsprechend ausschließt. Die mögliche Bereitstellungskette von Wasserstoff wird in Abbildung 7 skizziert, wobei ersichtlich wird, dass Wasserstoff auch auf Basis der in Europa heimischen Rohstoffe wie Kohle, Wasser und Wind produziert werden kann. Die notwendigen Ressourcen wären theoretisch vorhanden.

Eines der bekanntesten Verfahren zur Produktion von  $H_2$  ist die Elektrolyse. Bei diesem Verfahren werden jeweils zwei Wassermoleküle durch die Zufuhr von elektrischem Strom in ein Sauerstoffmolekül ( $O_2$ ) und zwei Wasserstoffmoleküle ( $H_2$ ) zerlegt. Ein Teil der bei diesem Vorgang eingesetzten Energie kann durch Verbrennung des gewonnenen Wasserstoffs oder durch seine Umwandlung in einer Brennstoffzelle zurückgewonnen werden. Allerdings sind bei beiden Umwandlungsprozessen Energieverluste unvermeidlich. Da die Elektrolyse sehr stromintensiv ist, wird sie derzeit kaum im großen Maßstab genutzt. Das gängigste Verfahren zur Wasserstoffproduktion ist die Erdgasdampfpreformation (EDR). Bei diesem Verfahren wird allerdings fossiles Erdgas verbraucht, und es kommt praktisch zu den gleichen  $CO_2$ -Emissionen wie bei der Erdgasverbrennung, da die Kohlenstoffatome des Erdgases zusammen mit den Sauerstoffmolekülen der Umgebungsluft  $CO_2$  bilden.<sup>8</sup> Eine weitere Quelle für  $H_2$  ist die Chlorchemie, bei der das Gas als Abfallprodukt anfällt (Pehnt, 2002, 65 f.). Die weltweite Produktionsmenge von  $H_2$  liegt etwa zwischen 500 und 600 Milliarden Kubikmetern, davon werden 98 Prozent aus fossilem Erdgas gewonnen.

Das größte Problem bei der Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff liegt aber nicht in der relativ energieintensiven Produktion, sondern in seiner Speicherung. Wasserstoff ist das kleinste und leichteste Element im Periodensystem. Dennoch enthält es je Masseinheit eine konkurrenzlos große Energiemenge, wie in Tabelle 6 abzulesen ist. Doch leider hat gasförmiger Wasserstoff unter Normaldruck eine sehr geringe Dichte, was dazu führt, dass die für die Speicherung in einem Fahrzeug entscheidende volumenspezifische Energiedichte äußerst gering ist. Dies stellt vor allem bei dem begrenzten Raumangebot eines Fahrzeugs ein erhebliches Problem dar. Deshalb wird mit verschiedenen Speicherformen experimentiert, die jedoch alle äußerst aufwendig sind. Die gängigste Methode ist die Hochdruckspeicherung. Allerdings wird es notwendig sein, mit viel höherem

---

<sup>8</sup> Eine  $CO_2$ -freie Alternative zur Wasserstoffgewinnung aus Erdgas stellt das Kvaerner-Verfahren dar, bei dem Methanmoleküle ( $CH_4$ ) mit einem Plasmabrenner getrennt werden. Aufgrund der hohen Temperaturen des Plasmas ( $\sim 1.600\text{ }^\circ C$ ) bilden die Kohlenstoffatome dabei reine Aktivkohle statt  $CO_2$ .

Druck zu arbeiten als etwa beim Erdgas, um eine ausreichende Energiemenge in einem Fahrzeug zu speichern. Etwa 700 Bar dürfte die Untergrenze für die Druckspeicherung sein, um eine konkurrenzfähige Reichweite von Wasserstofffahrzeugen zu gewährleisten. Bedingt durch den deutlich höheren Druck im Fahrzeugtank werden die bereits im Falle von CNG beschriebenen Probleme der Bereitstellung von Druckgas noch deutlich verschärft. Doch selbst mit einem Druck von 700 Bar dürfte der Anteil des energetisch nutzbaren Wasserstoffs am Gesamtgewicht des gefüllten Speichers inklusive des Eigengewichts des Tanks signifikant unter 4 Prozent liegen (Stromberger, 2003).

Auch flüssiger Wasserstoff enthält – bezogen auf sein Volumen – nur einen Bruchteil der Energiemenge von Benzin. Seine Speicherung ist zudem eine technische Herausforderung, da Wasserstoff auf  $-253\text{ °C}$  gekühlt werden muss, um flüssig zu bleiben. Eine höhere Speicherdichte lässt sich beispielsweise mit Metallhydriden erreichen, die bis zu 4 Prozent ihres Eigengewichts an Wasserstoff aufnehmen können. Dieses im U-Boot-Bau angewandte Verfahren ist jedoch für den Fahrzeugbereich nicht geeignet. Eine letzte Option stellen so genannte Nanoröhren dar. In Laborversuchen ließen sich mit diesem experimentellen Verfahren bis zu 8 Prozent des Eigengewichts an Wasserstoff speichern (Ciraci/Yildirim, 2005). Diese Technik steckt allerdings noch in einem frühen Laborstadium, an einen Einsatz ist bestenfalls langfristig zu denken, wenn sich die Laborergebnisse in die Praxis übertragen lassen sollten. Es ist somit zurzeit kein zu vertretbaren Kosten einsatzfähiges Speicherverfahren für Wasserstoff erkennbar, das die Energiedichte der konventionellen Kraftstoffe erreicht. Neben dem Dichteproblem bereiten auch die weiteren Eigenschaften des Wasserstoffs Probleme. Ein Wasserstoffspeicher würde aus sehr komplexen Materialien bestehen müssen. Normaler Stahl beispielsweise ist weitgehend ungeeignet, da der Wasserstoff die meisten gängigen Stahlsorten versprödet oder im Laufe der Zeit einfach durch sie hindurchdiffundieren kann.

Mit dem Wasserstoff verbinden die meisten Menschen das Bild vom emissionsfreien Fahren, doch diese Vorstellung erfasst nur einen Teil der Wasserstoffwirtschaft. In einer Tank-to-Wheel-Betrachtung ist ein Wasserstofffahrzeug zwar emissionsfrei. Egal ob der Wasserstoff in einer VKM verbrannt oder in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt wird, aus dem Auspuff kommt eigentlich nur Wasserdampf – es entstehen keine Treibhausgase und auch Luftschadstoffe sind de facto eliminiert. In dieser Betrachtungsweise weist der Wasserstoff eine wohl unschlagbare Ökobilanz auf, da er praktisch keine direkten Emissionen verursacht. Zwar äußern einige Wissenschaftler Bedenken hinsichtlich klimatischer Folgen hoher Wasserstoffverluste in der Bereitstellungskette, doch diese

Befürchtungen werden nur von wenigen Forschern geteilt (Witthuhn, 2004, 98). Aber die schöne heile Welt der praktisch emissionsfreien Wasserstoffwirtschaft ist leider nur ein Zerrbild, denn die indirekten Emissionen der Wasserstoffbereitstellung werden dabei ignoriert.

Wie bereits beschrieben, kommt molekularer Wasserstoff in der Natur praktisch nicht vor, er muss unter Einsatz von Energie erst erzeugt werden. Vor allem die Herstellung von Wasserstoff mit Hilfe der Elektrolyse aus Wasser ist äußerst stromintensiv. Zudem erreicht sie bestenfalls einen Wirkungsgrad von 65 bis 70 Prozent. Ein Drittel der eingesetzten elektrischen Energie geht bei diesem Produktionsverfahren verloren. Da aber alle bei der Erzeugung der eingesetzten elektrischen Energie anfallenden Emissionen der produzierten Menge Wasserstoff zuzuschlagen sind, liegen die diesem zuzurechnenden Emissionen je Einheit gespeicherte Energie zwangsläufig gut 50 Prozent über denen des verwendeten Stroms. Da überdies die in der Stromerzeugung anfallenden Treibhausgase und Schadstoffemissionen dem Wasserstoff als indirekte Emissionen anzurechnen sind, hängt dessen Ökobilanz untrennbar von der Herkunft des elektrischen Stroms ab. Wird ausschließlich regenerative Energie verwandt, bleiben die Treibhausgasemissionen praktisch bei null. Wird jedoch beispielsweise der stark von Kohlekraftwerken geprägte heutige deutsche Strommix mit einem Emissionswert von etwa 170 Tonnen  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{TJ}$  zugrunde gelegt, so würde Wasserstoff selbst bei einem Wirkungsgrad der Elektrolyse von 70 Prozent allein im Herstellungsprozess mit indirekten Emissionen von rund 240 Tonnen  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{TJ}$  belastet. Dabei sind die aufwendige Verteilung des Wasserstoffs und seine Rückumwandlung in Energie noch gar nicht berücksichtigt.

Demnach stehen die tatsächlichen Treibhausgasemissionen des Wasserstoffs eigentlich in keinem vertretbaren Verhältnis mehr zu den Emissionen von konventionellen Kraftstoffen, die Well to Wheel etwa im Bereich von 85 Tonnen  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{TJ}$  liegen. Bei der Erdgasdampfpreformation liegt der Wirkungsgrad der Wasserstoffherstellung mit 90 Prozent deutlich über dem der Elektrolyse. Dennoch liegen auch hier die Treibhausgasemissionen deutlich über denen einer energetischen Verwertung des Erdgases und nahe an den WTW-Emissionen von Benzin und Diesel (Bossel et al, 2003, 34). Die Herstellung von Wasserstoff aus nicht-regenerativer Energie wäre somit aus ökologischer Sicht alles andere als vorteilhaft, wenn die in Kapitel 3 definierten Bewertungsmaßstäbe zugrunde gelegt werden.

Neben der energieintensiven Herstellung machen auch die weiteren Elemente der Bereitstellungskette von Wasserstoff Probleme, die im landläufigen Bild der „sauberen“ Wasserstoffwirtschaft zumeist nicht berücksichtigt werden. Aufgrund des geringen volumenspezifischen Energiegehalts von Wasserstoff muss dieser

nach der Herstellung – wie es auch beim Erdgas der Fall ist – zum Transport und zur Nutzung „aufbereitet“ werden. Dies kann entweder über eine massive Komprimierung oder über eine Verflüssigung erfolgen. Wählt man die Komprimierung von gasförmigem Wasserstoff, so wird dafür ein beträchtlicher Teil der im Gas gespeicherten Energiemenge aufgewendet werden müssen, wobei der Energiebedarf des Kompressors mit dem zu schaffenden Druck steigt. Im Vergleich mit Erdgas muss Wasserstoff deutlich stärker verdichtet werden, um eine akzeptable Fahrzeugreichweite erreichen zu können, da sein volumenspezifischer Energiegehalt geringer ist. Dementsprechend kostet der Vorgang auch deutlich mehr Energie. Die Angaben zum Energiebedarf schwanken in der Literatur etwas, aber es ist davon auszugehen, dass bei einer Hochdruckspeicherung von 700 Bar fast 18 Prozent der im Wasserstoff gespeicherten Energiemenge verbraucht werden.<sup>9</sup> Diese Energie muss erneut aus dem bestehenden Strommix bereitgestellt werden, was mit entsprechenden indirekten CO<sub>2eq</sub>-Emissionen verbunden ist. Bei einer Verflüssigung schwanken die Verluste mit der Anlagengröße, aber selbst in Großanlagen dürften sie über 25 Prozent liegen. Wasserstoffkritische Autoren halten bei heutiger Technologie eher 40 Prozent Verlust für einen realistischen Wert (Bossel et al., 2003, 13).

Beim Transport und der Lagerung von Flüssigwasserstoff sind weitere Verluste unvermeidlich. Aufgrund physikalischer Gegebenheiten kommt es zu sogenannten Abdampfverlusten, das heißt, ein Teil des flüssigen Wasserstoffs verdampft und muss aus Sicherheitsgründen aus dem Tank entfernt werden, wenn er nicht verbraucht wird. Diese Verluste variieren je nach Tankgröße, können aber bei einem Fahrzeugtank in der Größenordnung von 3 bis 4 Prozent pro Tag liegen (Burns et al., 2002). Für den Pipelinetransport von Wasserstoff lassen sich äquivalente Überlegungen zu denen in Kapitel 6.1 (CNG) anstellen. Allerdings stehen hier praktisch keine Untersuchungen über Leckagen und Energieaufwand zur Verfügung, da es nur sehr kleine Wasserstoffpipelinesetze gibt. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Wasserstoffpipelines mit einem höheren Druck betrieben werden müssen, um die gleiche Energiemenge zu transportieren wie eine Erdgaspipeline gleichen Durchmessers. Ferner dürften die Leckageverluste aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff höher sein. In der Endabrechnung sehen wasserstoffkritische Autoren Energieverluste von 65 bis 75 Prozent in der Bereitstellungskette von Wasserstoff. Demnach müsste also bis zu viermal so viel elektrische Energie aus dem Stromnetz entnommen werden, wie nachher im Fahrzeugtank in Form von Wasserstoff ankommt. Anschließend

---

<sup>9</sup> Berechnet nach der adiabatischen Kompressgleichung realer Gase.

entstehen bei der Nutzung der im Wasserstoff gespeicherten Energie durch VKM oder Brennstoffzelle weitere Umwandlungsverluste, die je nach Antriebskonzept sehr unterschiedlich sein können. Für eine Wasserstoff-VKM gilt ein Wirkungsgrad von 50 Prozent als langfristig realisierbar, eine Brennstoffzelle kann dagegen höhere Wirkungsgrade erreichen (Kapitel 10).

Da in der gesamten Wasserstoffbereitstellungskette große Mengen Strom verbraucht werden, treten die tatsächlichen Treibhausgas- und Schadstoffemissionen eines Wasserstofffahrzeugs nicht in Form von direkten Emissionen am Auspuff auf, sondern als indirekte Emissionen bei der Erzeugung des Prozessstroms. Damit wird der Anteil emissionsfreier Primärenergieträger an der Stromerzeugung zur entscheidenden Bewertungsgrundlage für die Ökobilanz von Wasserstoff. Eine Abschätzung der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Emissionen für verschiedene Methoden der Wasserstoffproduktion ist in Abbildung 8 dargestellt. Zudem wurde nach Szenarien unterschieden, in denen der Wasserstoff zentral in Großanlagen oder vor Ort an der Tankstelle erzeugt wird. Es zeigt sich auch da sehr deutlich, dass nur der im Elektrolyseverfahren mit Hilfe regenerativen Stroms erzeugte Wasserstoff die hohen ökologischen Erwartungen erfüllen kann, die mit dem Energieträger Wasserstoff verbunden werden. Die anderen Verfahren bleiben in der Emissionsbilanz signifikant hinter dem Benchmark der konventionellen Kraftstoffe zurück.

Doch gerade das ökologisch betrachtet effektivste Verfahren wird in der nahen Zukunft mit Abstand das unrealistischste bleiben. Denn auch wenn der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix wächst, ist in den nächsten 50 Jahren eine rein regenerative Stromversorgung selbst in Deutschland eher unwahrscheinlich. Zudem gibt es auch fast keine Elektrolysekapazitäten, um Wasserstoff zu produzieren. Diese müssten erst aufgebaut werden. Für eine langfristige Einführungsphase wird man daher auf Wasserstoff zurückgreifen müssen, der mit ökologisch deutlich weniger vorteilhaften Methoden hergestellt wird. Die „Ökologisierung der Wasserstoffproduktion“ kann nur in einem langfristigen Prozess erfolgen. In den nächsten zehn bis 15 Jahren ist vom Wasserstoff demnach jedoch keine Verbesserung der Klimabilanz des Verkehrs zu erwarten.

In der ökonomischen Betrachtung gilt es zunächst zu konstatieren, dass sich Wasserstoff aufgrund seiner stofflichen Eigenschaften stärker von den konventionellen Kraftstoffen unterscheidet als alle anderen Alternativen, die in diesem Rahmen diskutiert werden. Aufgrund dieser Unterschiede kann auch die derzeitige Infrastruktur praktisch nicht für die Bereitstellung von Wasserstoff genutzt werden.<sup>10</sup> Dies gilt für die komplette Bereitstellungskette und beginnt bereits

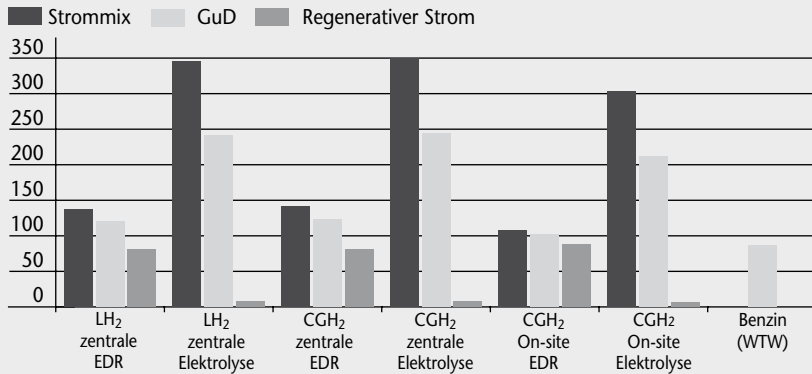
---

<sup>10</sup> Eine Ausnahme stellen die Immobilien der Tankstellen dar.

# CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung von flüssigem (LH<sub>2</sub>) und gasförmigem Wasserstoff (CGH<sub>2</sub>)

Abbildung 8

bei Verwendung zentraler und dezentraler Versorgungskonzepte sowie verschiedener Produktionsverfahren (EDR, Elektrolyse) und Quellen für Prozessenergie, Angaben in Tonnen je Terajoule



GuD = Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk; On-site = Herstellung in den einzelnen Tankstellen;  
 Lesehilfe: LH<sub>2</sub>/zentral/EDR = Nutzung von Flüssigwasserstoff, wobei die Wasserstoffproduktion durch zentrale Anlagen mit Hilfe der Erdgasdampfpreformation erfolgt;  
 Quellen: Stromberger 2003, 92; eigene Berechnungen

mit den Produktionskapazitäten. Die in den letzten Jahren stark expandierende Weltjahresproduktion an Wasserstoff beträgt 500 bis 600 Milliarden Kubikmeter, in Deutschland werden etwa 20 bis 30 Milliarden Kubikmeter hergestellt. Davon kommen aber nur etwa 4 Prozent in den Handel, der Rest wird umgehend in Produktionsprozessen verbraucht, zu einem großen Teil bei der Herstellung von Stickstoffdünger. Zur Problemverdeutlichung: Der gesamte deutsche Straßenverkehr hat gegenwärtig einen Energieverbrauch, der in etwa dem Energiegehalt von 220 Milliarden Kubikmetern Wasserstoff entsprechen würde (Reitzle, 2003). Die Produktionskapazitäten müssten also im Laufe der Einführung von Wasserstoff als Treibstoff vervielfacht werden.

Da der meiste Wasserstoff in den gleichen Industriekomplexen verbraucht wird, in denen er auch produziert wird, bestehen kaum Versorgungsnetze. Zwar existieren in einigen Regionen kleinere Pipelinenetze, zum Beispiel ein etwa 240 Kilometer umfassendes Netz im Ruhrgebiet, aber der gehandelte Wasserstoff wird meist in flüssiger Form mit Lkw verteilt. Diese Methode ist für die großen Mengen, die mit einer Treibstoffversorgung verbunden wären, kaum vorstellbar. Die hohen Kosten einer Flüssigwasserstoffbereitstellung sprechen ebenso wie die hohen energetischen Verluste gegen eine solche Wasserstoffbereitstellung. Auch eine Nutzung der bestehenden Erdgaspipelines ist weitgehend ausgeschlossen,

da aufgrund der unterschiedlichen chemischen Eigenschaften von Wasserstoff und Methan die Einleitung von mehr als 10 Prozent Wasserstoff nicht ratsam ist (Fischdick/Nitsch, 2002). Die Verteilungsinfrastruktur müsste also komplett neu erstellt werden.

Das Gleiche gilt für die notwendige Betankungs- und Lagerungsinfrastruktur. In der ganzen Welt gibt es nur eine Hand voll Wasserstofftankstellen. Im Oktober 2003 betrug ihre Zahl gerade einmal 70, wobei vor allem Japan und die USA versuchen, diese Zahl langsam zu erhöhen. Die geringe Anzahl der Wasserstofftankstellen ist neben der geringen Zahl von Wasserstofffahrzeugen sehr stark auf die hohen Kosten für eine solche Anlage zurückzuführen. Solange der Wasserstoff nicht an jeder Tankstelle vor Ort produziert wird, muss eine Wasserstofftankstelle entweder über Kryotanks für Flüssigwasserstoff oder sehr starke Drucktanks und entsprechend leistungsfähige Kompressoren verfügen, um den Treibstoff lagern zu können. Zudem sind aufwendige Betankungsanlagen erforderlich, die entweder auf Hochdruck oder auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt ausgelegt sind. Außerdem sind aufgrund der Zündfähigkeit von Wasserstoff-Luft-Gemischen ganz erhebliche Sicherheitsvorkehrungen nötig. Insgesamt sind die Betankungsanlagen für Wasserstoff deutlich aufwendiger als jene Technologie, die heute an Tankstellen verwendet wird. So kostete die Zapfsäule für Flüssigwasserstoff am Münchner Flughafen gut 18 Millionen Euro und für den Preis eines Kryotanks in einem Fahrzeug kann man sich zurzeit noch einen Sportwagen kaufen (Pehnt, 2002, 79). Für den Aufbau einer Betankungsinfrastruktur in Deutschland gehen die Kostenschätzungen in die Richtung von 12 bis 20 Milliarden Euro. Damit ließe sich hierzulande ein einigermaßen flächendeckendes Tankstellennetz von etwa 2.000 Wasserstofftankstellen aufbauen (Ewe, 2004, 92).

Gerade in der Anfangsphase der Wasserstoffwirtschaft würden sich die notwendigen Investitionen in die Versorgungsinfrastruktur auf mehrere Tausend Euro pro zugelassenes Wasserstofffahrzeug belaufen. Aufgrund der hohen Investitionskosten kann der Aufbau einer Bereitstellungsinfrastruktur von der Herstellung zum Fahrzeugtank (Well to Tank) nur sehr langfristig erfolgen. Ein Zeitraum von 15 bis 20 Jahren erscheint zurzeit einigermaßen realistisch, wobei in der Produktion aus Kostengründen zunächst die Wasserstoffgewinnung aus der EDR dominieren und die Verteilung in flüssiger Form über Lkw erfolgen müsste. Erst bei einer großen Marktdurchdringung macht der Aufbau von Pipelines ökonomisch gesehen Sinn. Wenn Wasserstoff der Treibstoff der Zukunft werden soll, ist es von daher unumgänglich, jetzt mit dem Ausbau der Infrastruktur zu beginnen. Dies wird aber nur möglich sein, wenn die potenziellen Investoren eine sehr langfristige Planungssicherheit garantiert bekommen. Zumindest die Staaten der Triade

sollten sich möglichst bald auf den Wasserstoff als langfristige Treibstoffoption festlegen, um diese Sicherheit zu gewährleisten. Angesichts der hohen Umstellungskosten sollten zudem Überlegungen angestellt werden, wie die Einführung des Wasserstoffs in den Kraftstoffmarkt von staatlicher Seite unterstützt werden kann. Um einen gleitenden Übergang von erdölbasierten Kraftstoffen zum Wasserstoff zu ermöglichen, müssen grundlegend neue Bereitstellungsinfrastrukturen aufgebaut werden, erst in der Folge wird Wasserstoff preislich konkurrenzfähig gegenüber den konventionellen Kraftstoffen sein. Ein erster Schritt in diesem Zusammenhang könnte eine garantierte Steuerbefreiung für Wasserstoff bis mindestens 2025 sein.

Der für den Autofahrer entscheidungsrelevante Abgabepreis von Wasserstoff würde ohne Subventionierung vor Steuern langfristig vier- bis fünfmal so hoch sein, wie es bei den konventionellen Kraftstoffen der Fall ist. Zurzeit werden die spezifischen Wasserstoffkosten<sup>11</sup> bei Nutzung der EDR auf etwa 1,80 Euro pro Liter Benzinäquivalent und bei Verwendung der Elektrolyse auf etwa 2,80 Euro pro Liter Benzinäquivalent geschätzt (Stromberger, 2003, 161 f.). Um dennoch einen wirtschaftlich tragfähigen Besitz von etwa 500 Wasserstofffahrzeugen je Tankstelle zu erreichen, wird der Staat in der Einführungsphase von Wasserstoff flankierende Maßnahmen ergreifen müssen, bis eine kritische Menge von zugelassenen Wasserstofffahrzeugen erreicht ist. Neben den reinen Abgabepreisen des Treibstoffs haben auch Sicherheitsaspekte großen Einfluss auf die Fahrzeugwahl der Autokäufer. Wasserstofffahrzeuge haben ein schlechtes Image in Bezug auf die Sicherheit, da sich potenzielle Autokäufer noch an Knallgasexperimente im Chemieunterricht erinnern werden oder gar das brennende Luftschiff „Hindenburg“ vor Augen haben, wenn sie an Wasserstoff denken. Dieses Image ist jedoch unverdient. Crash-Tests, wie sie zum Beispiel von der Universität Miami durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass Wasserstofffahrzeuge sogar sicherer sind als konventionelle Autos. Dieses Ergebnis erklärt sich unter anderem durch die anspruchsvollen Wasserstofftanks, die mit Abstand den stabilsten Teil eines Fahrzeugs darstellen würden und bei Unfällen kaum zu beschädigen wären.

Einen wichtigen ökonomischen Vorteil besitzt der Wasserstoff jedoch bereits heute, und der liegt in den verschiedenen Formen der Verfügbarkeit. Theoretisch ist Wasserstoff unbegrenzt vorhanden. Doch aufgrund der bereits beschriebenen Kapazitäts- und Kostenprobleme erfüllt er bis auf Weiteres allenfalls die Kriterien einer Ressource. Langfristig gesehen besitzt er jedoch das Potenzial, zur Diversifizierung der Primärenergieträger beizutragen und somit die Abhängigkeit

---

<sup>11</sup> Unter der Annahme, dass in der Bereitstellung ausschließlich regenerativer Strom verwendet wird.



von den politisch instabilen Ölförderländern und dem volatilen Ölpreis zu vermindern, denn er kann zumindest theoretisch ausschließlich mithilfe heimischer Energieträger gewonnen werden.

Unter Effizienzgesichtspunkten betrachtet stellt Wasserstoff noch keine echte Alternative zu den konventionellen Kraftstoffen dar. Beim heutigen Stand der Technik führt die Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff nur dann zu geringeren CO<sub>2,eq</sub>-Emissionen, wenn er ausschließlich mit Hilfe von regenerativem Strom produziert wird. Wird hingegen der heutige Strommix zugrunde gelegt, würde Wasserstoff in der WTW-Betrachtung deutlich mehr Treibhausgase emittieren als ein konventioneller Kraftstoff (Abbildung 8). Ein positiver ökologischer Effekt der Wasserstoffnutzung im Fahrzeug hängt somit untrennbar mit dem Strommix seiner Prozesskette zusammen.

Doch dabei stellt sich schnell heraus, dass die besonders umweltfreundliche Variante der Wasserstoffbereitstellung gleichzeitig die mit Abstand teuerste ist, was die Effizienz des Verfahrens unter heutigen Gegebenheiten nachhaltig einschränkt. Die Vermeidungskosten werden beispielsweise in der CONCAWE-Studie (CONCAWE, 2004, 54) auf etwa 750 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> geschätzt. Demnach ist unter heutigen Bedingungen der ökologisch effektivste Weg aufgrund fast prohibitiv hoher Kosten nicht umsetzbar.

Doch selbst wenn der Anteil des Stroms aus regenerativen Energien signifikant gesteigert werden kann, spricht die Effizienzbetrachtung noch immer gegen den Einsatz dieser „Edelenergie“ in der Wasserstoffproduktion. Aufgrund der hohen Umwandlungsverluste in der Wasserstoffbereitstellung wäre es deutlich effizienter, den normalen Verbrauch mit Strom aus regenerativen Energien zu

## Regenerativer Strom/Wasserstoff: Effizienz- und Kostenverhältnisse für fortschrittliche Technologien

Tabelle 13

Regenerativer Strom: Erzeugung = 1,00

	Relative Nutzungsgrade (regenerativer Strom = 1,00)		Relative Kosten (regenerativer Strom = 1,00)	
	Nur Herstellung	Inkl. Langstrecken- transport	Nur Herstellung	Inkl. Langstrecken- transport
Strom	<b>1,00</b>	<b>0,90</b> (0,85–0,92)	<b>1,00</b>	<b>1,50</b> (1,30–1,70)
H <sub>2</sub> , gasförmig	<b>0,75</b> (0,70–0,80)	<b>0,65</b> (0,62–0,68)	<b>1,65</b> (1,50–1,80)	<b>1,90</b> (1,70–2,10)
H <sub>2</sub> , flüssig	<b>0,60</b> (0,57–0,63)	<b>0,52</b> (0,50–0,55)	<b>2,50</b> (2,30–2,80)	<b>4,00</b> (3,70–4,30)

Quelle: Nitsch, 2003, 22

decken. Ein entsprechender Effizienzvergleich wird in Tabelle 13 angestellt. Wegen der unvermeidbaren Energieverluste in der Wasserstoffbereitstellung liegt der Nutzungsgrad von regenerativem Strom in jedem Fall deutlich höher, als es bei dem mit seiner Hilfe erzeugten regenerativen Wasserstoff der Fall ist. Diese Betrachtung schließt nicht einmal den ökologisch bedeutsamen Aspekt ein, dass durch die Substitution einer aus Kohle gewonnenen Energieeinheit durch regenerative Energie deutlich mehr Treibhausgase eingespart werden als durch die Substitution von Benzin. Aber auch alle Kostenschätzungen sprechen gegen die Herstellung des mit regenerativer Energie erzeugten Wasserstoffs. So gesehen spricht das Effizienzkriterium erst für die Aufnahme einer umfassenden Wasserstoffproduktion, wenn die Stromerzeugung weitgehend auf erneuerbare Energien umgestellt ist.

Doch obwohl aus heutiger Sicht so vieles gegen den Wasserstoff spricht, hat er dennoch von allen alternativen Kraftstoffen langfristig die besten Chancen, die konventionellen Kraftstoffe abzulösen. Dafür sprechen gleich mehrere durchschlagende Argumente:

- Wasserstoff kann praktisch ohne jede Belastung der Umwelt bereitgestellt und verwendet werden, bei den anderen Alternativen ist dies nicht möglich.
- Wasserstoff kann in praktisch unbegrenzter Menge zur Verfügung gestellt werden. Alle anderen alternativen Kraftstoffe stoßen schnell an eine Mengenbeschränkung.
- Ist ein Wasserstoffsystem erst einmal etabliert, wird nie mehr der Zwang bestehen, eine Alternative zu suchen, da sich die Wasserstoffvorkommen der Erde nicht erschöpfen können, solange die Menschheit existiert.

Dies sind die Gründe dafür, warum sich praktisch alle Stakeholder im Straßenverkehr für den langfristigen Umstieg auf Wasserstoff aussprechen. Dieser kann aber nur erfolgen, wenn man eine ebenso langfristige Umstiegsstrategie entwickelt. Der enorme Investitionsbedarf erfordert zudem eine verlässliche Festlegung auf den Wasserstoff bereits jetzt, damit zumindest eine rudimentäre Bereitstellungsinfrastruktur zur Verfügung steht, wenn das Erdöl wirklich knapper wird. In Anbetracht eines weltweiten Investitionsbedarfs, der in die Billionen gehen kann, ist es unumgänglich, dass maßgebliche Länder und deren Regierungen ein klares Commitment in Form einer Festlegung auf den Wasserstoff als Treibstoff der Zukunft abgeben und Konzepte zur Förderung des Markteintritts von Wasserstoff erarbeiten. Der Förderhorizont wird dabei wohl mindestens das Jahr 2025 sein müssen, andernfalls werden die heute bereits notwendigen Investitionen tendenziell unterbleiben. Auch wenn es hart klingt: Es wird in Anbetracht des langfristigen Ziels eines praktisch emissionsfreien Verkehrs notwendig sein, in

der Anlaufphase die beschriebenen höheren Treibhausgasemissionen in Kauf zu nehmen, um die Energieversorgung des Straßenverkehrs langfristig sicherstellen zu können. Denn ohne einen langfristig funktionierenden emissionsarmen Straßenverkehr wäre mit massiven Wohlstandseinbußen in allen höher entwickelten Ländern der Erde zu rechnen.

## 10 Brennstoffzellen

Während Wasserstoff in den meisten Publikationen als die zukunftsfähigste alternative Energiequelle des Straßenverkehrs betrachtet wird, nimmt die Brennstoffzelle – im Englischen Fuel Cell (FC) – diese Position in der vergleichsweise sehr kleinen Gruppe der alternativen Antriebe ein. Zumeist werden Wasserstoff und Brennstoffzelle als Paketlösung für die langfristige Sicherung der individuellen Mobilität gesehen. Streng genommen handelt es sich bei der Brennstoffzelle allerdings nicht um einen Antrieb, sondern lediglich um einen elektrochemischen Energiewandler, der aus fossilen oder regenerativen Kraftstoffen Strom herstellt. Die eigentliche Traktion erfolgt im Brennstoffzellenauto durch einen Elektromotor. Dabei zeichnet sich eine Brennstoffzelle (FC) durch einen sehr hohen Wirkungsgrad aus, da sie – anders als die VKM – nicht erst den Umweg über die Wärmeerzeugung gehen muss, um Energie zu erzeugen (Jörissen/Garcke, 2000).

Eigentlich ist die Brennstoffzelle keine sehr neue Erfindung. In der Tat ist sie sogar älter als der Verbrennungsmotor, denn sie wurde bereits 1839 entwickelt. Lange fand sich jedoch kein passendes Einsatzgebiet für diese Technologie. Das änderte sich erst mit dem Apolloprojekt. Die Stromversorgung der Mondfähren erfolgte mit Hilfe von alkalischen Brennstoffzellen (AFC). Seitdem hat die Brennstoffzelle das Stadium der Grundlagenforschung weit hinter sich gelassen. Ein wesentlicher Treiber für die technische Entwicklung war bislang das Militär, denn eine Brennstoffzelle kann ihre Energie mit weniger Wärmeemissionen produzieren als eine VKM oder gar ein Atomreaktor und ist damit auch schwerer zu orten. Dennoch ist kaum abzuschätzen, wann die Brennstoffzelle als Energiewandler wirklich in den Massenmarkt eintritt, denn bisher waren alle Prognosen zu diesem Thema viel zu optimistisch (Metzner/Waschke, 2003, 64). In nächster Zukunft könnten die ersten Brennstoffzellen in portablen Anwendungen wie Handys oder Laptops Verwendung finden, allerdings wurde die Einführung solcher Geräte bereits mehrfach verschoben.

Eigentlich ist es falsch, von „der“ Brennstoffzelle zu reden. Es gibt mehrere recht unterschiedliche Varianten dieses Energiewandlers, die jedoch alle auf dem gleichen Funktionsprinzip beruhen (Übersicht 3). Allen gemeinsam ist, dass sie den Strom aus Wasserstoff herstellen. Diesen müssen sie je nach Auslegung entweder in Reinform oder aber in Form von gasförmigen Verbindungen zugeführt bekommen. Im Prinzip sind alle Brennstoffzellentypen ähnlich aufgebaut: Sie verfügen über eine Anode und eine Kathode, die durch einen Elektrolyten getrennt sind. Auch wenn die Funktionsweise bei allen Brennstoffzellentypen im Prinzip gleich ist, kommt es je nach verwendetem Elektrolyten zu unterschiedlichen elektrischen Wirkungsgraden, Betriebstemperaturen und Herstellungskosten. Von besonderer Bedeutung ist hier der Aspekt, dass mit steigender Betriebstemperatur der verschiedenen Brennstoffzellentypen die Anforderungen an die Reinheit des Brenngases und des Oxydanten zurückgehen. Aufgrund dieser Differenzen sind die aufgeführten Brennstoffzellentypen auch für unterschiedliche Anwendungen geeignet.

## Brennstoffzellentypen

Übersicht 3

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Arbeits-temperatur	Elektrischer Wirkungsgrad	Brenngas (Oxydant)
Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	Kalilauge	Raumtemperatur bis 90 °C	60–70 Prozent	H <sub>2</sub> (O <sub>2</sub> )
Membranbrennstoffzelle (PEMFC)	Protonleitende Membran	Raumtemperatur bis 80 °C	50–70 Prozent	H <sub>2</sub> (O <sub>2</sub> , Luft)
Direkt-Methanol-brennstoffzelle (DMFC)	Protonleitende Membran	Raumtemperatur bis 130 °C	20–30 Prozent	CH <sub>3</sub> OH (O <sub>2</sub> , Luft)
Phosphorsäure-brennstoffzelle (PAFC)	Phosphorsäure	180–220 °C	55 Prozent	Erdgas, Biogas, H <sub>2</sub> (O <sub>2</sub> , Luft)
Karbonatschmelzen-brennstoffzelle (MCFC)	Alkalicarbonat-schmelzen	620–660 °C	65 Prozent	Erdgas, Kohlegas, Biogas, H <sub>2</sub> (O <sub>2</sub> , Luft)
Oxidkeramische Brennstoffzelle (SOFC)	Yttriumstabilisiertes Zirkonoxid	800–1.000 °C	60–65 Prozent	Erdgas, Kohlegas, Biogas, H <sub>2</sub> (O <sub>2</sub> , Luft)

Quelle: <http://www.h-tec.com/education/ger> [Stand: 2005-10-25]

Für die mobile Anwendung im Auto muss ein Brennstoffzellensystem ein relativ enges Anforderungsprofil erfüllen (Übersicht 4). Aufgrund dieser Anforderungen scheidet die meisten Brennstoffzellentypen als Fahrzeugantriebe aus. So stellt die alkalische Brennstoffzelle (AFC) bei Kontakt mit der Umgebungsluft sehr rasch den Betrieb ein. Sie benötigt reinen Wasserstoff an der Anode und reinen Sauerstoff an der Kathode, um arbeiten zu können. Aufgrund dieser Empfindlichkeit ist sie für die Verwendung im Auto ungeeignet und wird auch in Zukunft auf abgeschlossene Systeme wie Raumfähren oder U-Boote beschränkt bleiben. Ebenso ungeeignet sind

die Hochtemperaturbrennstoffzellen (MCFC, SOFC). Diese stellen zwar kaum noch Reinheitsansprüche an die Umgebung, aber bedingt durch die hohe Temperatur, die sie zur Stromerzeugung benötigen, würde eine inakzeptable „Vorglühzeit“ benötigt werden, bis sich das Fahrzeug bewegt. Zudem wäre das Wärmemanagement im Fahrzeug kompliziert. Da diese Brennstoffzellentypen auch mit Erdgas betrieben werden können, bieten sie sich hingegen als Blockheizkraftwerke oder als Ersatz für Heizkessel an. Auch am Einsatz der SOFC-Technologie als Ersatz für die Lichtmaschine im Auto wird derzeit intensiv geforscht. Es ist allerdings zu erwähnen, dass der Betrieb einer Brennstoffzelle mit Erdgas zwangsläufig auch mit CO<sub>2eq</sub>-Emissionen verbunden ist. Die PAFC fällt gleichfalls als Fahrzeugantrieb aus, denn sie hat sich als nicht sehr haltbar erwiesen und das Mitführen von konzentrierter Säure im Auto würde Sicherheitsfragen aufwerfen. Zurzeit

werden einige PAFC als Notstromaggregate eingesetzt.

Als Fahrzeugantriebe eignen sich nur zwei Varianten. Die wahrscheinlichste Variante für den Einsatz der Brennstoffzellentechnologie als Fahrzeugantrieb ist die PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), denn diese erfüllt das bereits genannte Anforderungsprofil praktisch lückenlos. Lediglich das Wasser- und Wärmemanagement ist etwas problematisch. Denn zum einen muss eine PEMFC ständig feucht gehalten werden, was bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt dazu führt, dass die PEMFC Gefahr läuft einzufrieren. Zum anderen findet sich in einem Auto selten ein entsprechender Abnehmer für die in der Brennstoffzelle entstehende Wärme, die daher zumeist ungenutzt bleibt.

<b>Anforderungsprofil an Brennstoffzellen-Elektroantriebe</b>		Übersicht 4
<b>Zelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fester Elektrolyt</li> <li>– Hohe Leistungsdichte</li> </ul>	
<b>Stack</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe Leistungsdichte</li> <li>– Gute Wärmeabfuhr (Flüssigkeitskühlung)</li> </ul>	
<b>System</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schnelle Betriebsbereitschaft</li> <li>– Gutes dynamisches Verhalten (Laständerungsgeschwindigkeit)</li> <li>– Hoher Wirkungsgrad für Nettostromerzeugung</li> <li>– Bereitstellung elektrischer Energie im Standby-Modus</li> <li>– Geringe Stillstandsverluste</li> <li>– Hohe Erschütterungsunempfindlichkeit</li> <li>– Minimales Gefährdungspotenzial</li> <li>– Kostensenkungspotenzial: Stack und insbesondere Peripherie</li> </ul>	
<b>Kraftstoff</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe Energiedichte (Reichweite)</li> <li>– Langfristige Verfügbarkeit</li> <li>– Langfristig: nicht-fossile Basis</li> </ul>	
<b>Brenngaserzeugung an Bord</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe Kraftstoffvariabilität</li> <li>– Gutes dynamisches Verhalten</li> <li>– Geringe Beeinträchtigung des Wirkungsgrads für Nettostrom</li> </ul>	
<b>Fahrzeug</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohes Beschleunigungsvermögen (Leistungsspeicher)</li> <li>– Genügende Reichweite (Energiespeicher: Bremsenergie-Rückgewinnung und -Speicherung – Stop and go)</li> </ul>	

Quelle: Biedermann et al., 2003, 17 f.

## Funktionsweise einer PEMFC

Die PEMFC benötigt reinen Wasserstoff als Brenngas<sup>12</sup>, kommt aber mit Umgebungsluft als Oxydant aus. In dieser Brennstoffzelle läuft im Prinzip die chemische Umkehrung der Wasserstoffherstellung per Elektrolyse ab. Molekularer Wasserstoff ( $H_2$ ) ist durch eine Plastikmembran von dem in der Umgebungsluft enthaltenen Sauerstoff getrennt. Diese Stoffe würden nun gerne zusammen Wasser bilden, da dies eine energetisch günstige Reaktion ist, bei der Energie frei wird. Das ist aber nicht möglich, da die dazwischen liegende Membran so beschaffen ist, dass sie nur Protonen durchlässt, also Wasserstoffatome, die sich von ihrem Elektron ( $e^-$ ) getrennt haben. Daher spaltet sich der Wasserstoff an einer mit Platin beschichteten Anode in zwei Protonen ( $H^+$ ) und zwei Elektronen auf.<sup>13</sup> Während die Protonen durch die Membran diffundieren, nehmen die Elektronen den Umweg über einen elektrischen Leiter. An der Kathode treffen sie sich dann wieder und reagieren zusammen mit dem dort vorhandenen Sauerstoff zu Wasser, wobei Energie in Form von Wärme frei wird. Da sich die Elektronen bewegen, entsteht eine bewegte elektrische Ladung, was nichts anderes ist als Strom. Eine solche PEMFC ist nur etwa ein fünftel Millimeter dick. Damit sie eine ausreichend starke Spannung erzeugen kann, werden viele Zellen in Reihe geschaltet. Ein solches Bündel von Brennstoffzellen wird als Stack (Stapel) bezeichnet.

Die ökologischen Vorteile eines Brennstoffzellenfahrzeugs hängen ganz wesentlich mit dem verwendeten Treibstoff zusammen. Eine PEMFC läuft mit reinem Wasserstoff, daher sind auf sie alle Argumente anzuwenden, die bereits im vorhergehenden Kapitel diskutiert wurden. Auf eine erneute Auseinandersetzung mit der Ökobilanz dieses Treibstoffs wird daher verzichtet.

Wie jedes Fahrzeug, das auf molekularen Wasserstoff als Energieträger zurückgreift, ist auch ein Brennstoffzellenauto frei von lokalen Emissionen. Es entsteht lediglich Wasserdampf. Dass die Brennstoffzelle in der Diskussion um einen Antrieb der Zukunft einen so prominenten Platz einnimmt, liegt aber vor allem an ihrem hohen Wirkungsgrad. Beim Einsatz einer PEMFC kann bereits der elektrische Wirkungsgrad, also der Anteil der im Treibstoff gespeicherten Energie, der nach der Umwandlung in Form von Strom zur Verfügung steht, 60 bis 70 Prozent betragen. Wenn zudem die in der Brennstoffzelle entstehende Abwärme genutzt werden kann, überschreitet der Gesamtwirkungsgrad sogar

---

<sup>12</sup> Wird das Brenngas zum Beispiel mit Kohlenmonoxid verunreinigt, wird die Zelle „vergiftet“ und dadurch irreparabel beschädigt.

<sup>13</sup> Alternativ sind auch Beschichtungen aus Rhodium oder Palladium als Katalysator verwendbar.

90 Prozent. Dies ist jedoch in einem Fahrzeug kaum zu realisieren und daher sind die absoluten Spitzenwirkungsgrade eher in den stationären Anwendungen von Brennstoffzellen zu erreichen. Doch auch ohne Wärmenutzung hat die Brennstoffzelle in jedem Fall einen gewaltigen Effizienzvorteil gegenüber den heute gebräuchlichen Pkw-Motoren, deren Wirkungsgrad eher im Bereich zwischen 20 und 25 Prozent anzusiedeln ist (Pehnt, 2002, 107 f.).

Der bessere Wirkungsgrad zeigt sich besonders stark im Teillastbereich, der im Stadtverkehr dominiert. Allerdings wird die effizientere Nutzung des Treibstoffs in der Brennstoffzelle durch zwei Aspekte wieder etwas relativiert, sodass man die im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen vorhandenen Wirkungsgradvorteile nicht eins zu eins in ökologisch relevante Emissionsvorteile umrechnen kann. Zunächst einmal ist zu beachten, dass die Herstellung des Treibstoffs heute im Vergleich mit Benzin noch mit deutlichen ökologischen Nachteilen behaftet ist (Kapitel 9). Es kommt hinzu, dass eine PEMFC im Auto einige Strom verbrauchende Peripheriegeräte benötigt, was den Wirkungsgrad ebenfalls etwas reduziert. In diesem Zusammenhang sind vor allem Kompressoren zu nennen. In der Endabrechnung bleibt dennoch ein deutlicher Wirkungsgradvorteil für die Brennstoffzelle bestehen. Setzt man eine kleine Brennstoffzelle anstelle der Lichtmaschine zur Bordstromversorgung ein, lässt sich der Wirkungsgrad dieses Teilprozesses sogar mehr als verdoppeln. Dies wäre ein möglicher Einspareffekt, der in Anbetracht des ständig steigenden Strombedarfs der Fahrzeuge nicht unterschätzt werden sollte. Immerhin stieg der Stromverbrauch im Auto in den letzten 30 Jahren um gut 500 Prozent, und dieser Trend setzt sich weiter fort.

Infolge der effizienteren Treibstoffnutzung kann der Einsatz einer PEMFC als Antrieb also durchaus einen ökologischen Vorteil bedeuten, wenn die Treibstoffherstellung entsprechend organisiert ist. Zudem kann ein Brennstoffzellenfahrzeug sehr leise sein, da der Prozess der Energieerzeugung geräuschlos ist und auch die Elektromotoren sehr leise sind. Vor allem in Wohngebieten, in denen langsam gefahren wird, ist dies von Bedeutung. Dennoch bleiben die ökologischen Auswirkungen einer Umstellung des Straßenverkehrs von herkömmlichen Motoren auf Brennstoffzellen im Vergleich zu denen, die mit der Bereitstellung von Wasserstoff verbunden sind, eher gering.

Ganz anders stellen sich die ökonomischen Verhältnisse dar, denn die massenhafte Verbreitung von Brennstoffzellenfahrzeugen würde dazu führen, dass sich bedeutende Industriezweige enorm umstellen müssten. Zwar lassen sich die Auswirkungen derzeit kaum quantifizieren, aber einige Tendenzaussagen sind möglich. Diese deuten darauf hin, dass die Automobilbranche bei der Einführung von Brennstoffzellenautos vor drastischen Veränderungen steht.

Die Veränderungen würden die gesamte automobilen Wertschöpfungskette von der Herstellung bis zur Entsorgung betreffen. Während die in Kapitel 9 skizzierten Veränderungen der Versorgungskette vor allem vom eingesetzten Treibstoff abhängen, würde der Einsatz der Brennstoffzelle im Massenmarkt geradezu eine Revolution im Fahrzeugbau nach sich ziehen. Unter der Motorhaube hätte ein Brennstoffzellenauto nur noch wenig mit einem heutigen Fahrzeug gemein. Die Veränderungen beginnen bereits in der Automobilproduktion, denn ein Brennstoffzellenauto kann auf zahlreiche Bauteile verzichten, die heute in jedem Kfz Verwendung finden. Dies betrifft zunächst einmal die mechanischen Komponenten im Antriebsstrang (Demuß, 2000). Im Prinzip kann ein Brennstoffzellenauto komplett anders aufgebaut werden, denn sein Antriebssystem muss nicht wie bisher als massiver Block erstellt werden, sondern kann relativ frei im Fahrzeug verteilt werden. Wenn beispielsweise der gesamte Antrieb unterhalb der Fahrgastzelle montiert werden kann, ergeben sich ganz neue Möglichkeiten der Raumnutzung. Manche Hersteller haben dies bereits in Konzeptstudien demonstriert.

Doch auch wenn solche revolutionären Änderungen im Fahrzeugdesign noch Zukunftsmusik sind, bleibt doch festzuhalten, dass vor allem der Antriebsstrang eines Brennstoffzellenfahrzeugs ganz anders gestaltet ist als der eines konventionellen Autos, denn im Prinzip handelt es sich ja um ein Elektroauto. Praktisch alle Komponenten des Antriebsstrangs müssen entweder komplett neu konstruiert oder massiv abgewandelt werden, wenn sie in einem Brennstoffzellenauto zum Einsatz kommen sollen (Übersicht 5). Neben den bereits erwähnten Veränderungen in der

## Komponenten des PEM-Brennstoffzellenantriebs Übersicht 5

Strom- erzeugung	Steuerungs- und Sensortechnik	Motor- elektrik	Tank- anlage	Einfaches Getriebe	Einfache Abgasanlage	Größeres Kühlsystem
Brennstoff- zellenstack	Steuerung, Gaserzeugung	Traktions- motor	Hochdruck- tank ~ 700 Bar	Elektro- motor erfordert nur ein einstufiges Getriebe	Saubere Abgase benötigen keinen Katalysator	Höherer Kühlaufwand verlangt eine größere Dimensio- nierung
Gasver- sorgungss- system	Frequenz- umrichter für T-Motor	E-Motoren für Neben- aggregate	Neue Mate- rialien und Bauweisen			
Neue Techno- logie	Neue, komplexere Steuerung	Gleiche Techno- logie	Neues, an- spruchsvolleres Speicherkonzept			
<b>Neue Komponenten</b>				<b>Anpassung konventioneller Komponenten</b>		
<b>Betroffene Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs</b>						
<b>Verbren- nungs- motor</b>	<b>Motor- elektronik</b>	<b>Motor- elektrik</b>	<b>Tank- anlage</b>	<b>Getriebe</b>	<b>Abgas- anlage</b>	<b>Kühl- system</b>

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Geschka, 2003, Abbildung 19



Energieerzeugung und der Treibstoffspeicherung betreffen sie auch die gesamte elektronische Antriebssteuerung und das Abgassystem. Komponenten wie der Katalysator könnten entfallen, dafür müsste ein stärkeres Kühlsystem installiert werden. Völlig anders wäre das Getriebe zu konstruieren, das nur noch einstufig aufzubauen wäre, um die hohe Drehzahl des Elektromotors ( $>10.000$  U/min) auf die Antriebsräder umzusetzen. Eine Schaltung wäre unnötig. Insgesamt lassen sich bis zu 120 verschiedene Baugruppen identifizieren, die aus dem Fahrzeug verschwinden würden (Geschka, 2003, Tabelle 22). Die Mechanik im Fahrzeug würde an Bedeutung verlieren, die Elektronik wichtiger werden.

Solche Umwälzungen hätten zwangsläufig Auswirkungen auf die Automobilzulieferer, die in Deutschland immerhin fast 300.000 Menschen beschäftigen. Besonders die Zulieferer im Motorenbau müssten sich ganz neu aufstellen, wenn Brennstoffzellenfahrzeuge den Massenmarkt erobern sollten. Vor allem Betriebe, deren Kernkompetenz in der Metallverarbeitung liegt, könnten vom Markt verschwinden. Anbieter in den Bereichen Chemie und Elektronik würden hingegen tendenziell profitieren. Es zeichnet sich ab, dass ein Brennstoffzellenauto weniger Bauteile benötigen wird als ein konventionelles Fahrzeug. Diese wären dafür im Schnitt deutlich teurer. Das könnte zu spürbaren Konzentrationsprozessen in der traditionell mittelständisch geprägten Zulieferbranche führen (Wengel/Schirrmeister, 2000, 195 f.).

Gerade in einem Land wie Deutschland, in dem die Automobilindustrie ein bedeutender Wirtschaftszweig ist, würde eine solche Veränderung aber noch weitere Kreise ziehen. Wenn sich der Brennstoffzellenantrieb durchsetzte, würden beispielsweise Fertigungstechnologien wie das Drehen und Fräsen fast völlig aus dem Automobilbau verschwinden. Davon wäre wiederum der Maschinenbau massiv betroffen, für den die Automobilindustrie ein wichtiger Kunde ist. Eine derart umfassende Umstellung der Produktionsverfahren könnte daher nicht ohne entsprechende Anpassungsprozesse im Maschinenbau bleiben. Dies erweitert den Kreis der von den Veränderungen betroffenen Arbeitsplätze noch einmal erheblich.

Doch auch in den der eigentlichen Fahrzeugherstellung nachgelagerten Branchen erforderte das Brennstoffzellenauto Anpassungen. Besonders stark betroffen wäre das Kfz-Handwerk. Auf der einen Seite wird der Bedarf nach den Dienstleistungen dieser Branche zunehmen, denn der Autobesitzer wird an einem Brennstoffzellenauto kaum noch selbstständig Wartungen vornehmen können. Andererseits würde eine ganz neue Ausbildung im Kfz-Handwerk erforderlich. Gerade zu Beginn einer Markteinführung werden nur wenige Spezialwerkstätten vorhanden sein, die in der Lage sind ein Brennstoffzellenauto zu warten, was zu

einigen Engpässen führen kann. Dieser Engpass wird durch die notwendigen wie kostspieligen Sicherheitsvorkehrungen beim Umgang mit Hochdrucktechnologie noch einmal verstärkt werden.

Eine ähnliche Problematik ergibt sich für verkehrsnahen Dienstleister wie den TÜV oder Pannenhelfer. Auch dort wird die bestehende Ausbildung beim Umgang mit Brennstoffzellenfahrzeugen weitgehend wertlos sein. Dies wird den Aufbau eines entsprechend geschulten Personalbestands erfordern. Probleme werden sich für die Entsorgungsbranche ergeben. Vor allem die stark platinhaltigen Brennstoffzellen werden von Spezialisten ausgebaut und wiederverwertet werden müssen, da sich sonst Versorgungsengpässe beim Platin ergäben.

Überhaupt kann aus dem Platinbedarf bei der Produktion von Brennstoffzellen ein neuer Versorgungsengpass erwachsen, denn in einem Brennstoffzellenauto wird bislang gut und gerne die 50-fache Menge an Platin verbaut, die heute in einem konventionellen Fahrzeug benötigt wird.<sup>14</sup> Dieser Bedarf muss noch kräftig gesenkt werden, wenn die Brennstoffzelle den Massenmarkt erobern soll. Dabei sind weniger die weltweit vorhandenen Platinressourcen das Problem als vielmehr die deutlich geringere Reservemenge. Denn Platin kommt in abbauwürdigen Konzentrationen nur noch in Südafrika vor. Die Masse des Edelmetalls fällt bei der Buntmetallerzeugung als Nebenprodukt an. Um die Mengenverhältnisse zu verdeutlichen: Die Weltplatinförderung liegt unter 200 Tonnen pro Jahr – oder umgerechnet 6,11 Millionen Feinunzen –, und bereits heute gibt es einen Nachfrageüberhang, der auf bis zu 10 Prozent der gehandelten Menge geschätzt wird. Die Folge ist, dass der Platinpreis mit gut 1.040 US-Dollar pro Feinunze ([www.emvista.de](http://www.emvista.de) [2006-03-07]) bereits heute Rekordhöhen erreicht. Der Aufbau eines möglichst umfassenden Recyclingsystems wird von daher eine große Rolle bei der Einführung der Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb spielen müssen, denn die Platingewinnung ist nicht nur kostenintensiv, sondern auch ökologisch bedenklich. So sind beispielsweise einige der weltweit größten Emittenten von giftigem Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) Anlagen zur Platinproduktion.

Neben dem Platingehalt müssen auch die Herstellungskosten von Brennstoffzellen noch deutlich gesenkt werden, wenn sie den Verbrennungsmotor eines Tages ablösen sollen. Als Zielgröße wird in diesem Zusammenhang ein Kostensatz von etwa 50 Euro pro Kilowatt elektrische Leistung genannt. Dies entspricht in etwa den Herstellungskosten von Dieselmotoren. Doch bis dahin liegt noch viel Arbeit vor den Ingenieuren, denn Ende des letzten Jahrzehnts lagen die Kosten noch etwa um den Faktor 100 höher (Jörissen/Garche, 2000, 45 f.).

---

<sup>14</sup> In einem heutigen Kfz findet Platin im Katalysator Verwendung.

Die Effizienz der Brennstoffzelle ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur schwer einzuschätzen. Auf der einen Seite kann sie in Bezug auf den hohen Wirkungsgrad und das Fehlen von lokalen Emissionen punkten. Auch der tendenziell geräuschärmere Betrieb spricht für die Brennstoffzelle. Auf der anderen Seite sind die Kosten der Brennstoffzellenproduktion derzeit noch prohibitiv hoch. Es wird vermutlich noch viele Jahre dauern, bis die technische Entwicklung so weit vorangeschritten ist, dass die ersten Brennstoffzellenautos zu vertretbaren Preisen auf den Markt kommen. Wie eigentlich jede größere Innovation im Automobilbau wird wohl auch die Brennstoffzelle ihre Markteinführung zunächst in der Oberklasse erleben. Von dort aus kann sie dann in den Massenmarkt diffundieren. Nach bisherigen Erfahrungen dauert ein solcher Diffusionsprozess etwa zehn Jahre. Von daher ist es kaum realistisch, vor dem Jahr 2020 mit größeren Marktanteilen für Brennstoffzellenautos zu rechnen. Dies entspricht im Übrigen aber auch dem Zeitraum, der benötigt wird, um eine einigermaßen akzeptable Versorgung mit Wasserstoff aufzubauen. Vom Zeithorizont her ist die mit regenerativem Wasserstoff betriebene Brennstoffzelle ein langfristiges Zukunftsprojekt. Vieles spricht dafür, dass die Brennstoffzellentechnologie deutlich früher in den Bereichen der Strom- und Wärmeversorgung zum Einsatz kommen wird. Dort ist der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen aufgrund der möglichen Wärmenutzung noch einmal deutlich höher als in der mobilen Anwendung. Zudem können die stationären Brennstoffzellentypen auch mit Erdgas betrieben werden. Für diesen Brennstoff existiert bereits ein Verteilernetz und die Brennstoffzellen sind in der Produktion tendenziell billiger. Damit ist das Nutzen-Kosten-Verhältnis in der stationären Anwendung dem mobilen Einsatz auf absehbare Zeit überlegen.

## 11

## Zusammenfassung

Nach den hier präsentierten Überlegungen zu den alternativen Antrieben und Kraftstoffen liegt der Schluss nahe, dass Benzin und Diesel auch in absehbarer Zukunft die dominierenden Energieträger im Straßenverkehr bleiben werden. Die Alternativen sind zurzeit kaum in der Lage, den von den konventionellen Kraftstoffen gesetzten Benchmark zu erreichen. Diese etwas ernüchternde Erkenntnis beruht vor allem auf zwei Aspekten. Zunächst einmal sind die meisten denkbaren Alternativen von ihrem Mengenpotenzial her überhaupt nicht in der Lage, die Dominanz der erdölbasierten Kraftstoffe zu brechen. Dies gilt insbesondere für die

etablierten Biokraftstoffe; das BTL-Konzept könnte das Mengenproblem allenfalls mittelfristig lindern. Neben der reinen Verfügbarkeitsproblematik stellt es sich aber auch so dar, dass ausgerechnet die ökologisch effektivsten Alternativen derzeit noch viel zu kostspielig sind, um auf den Markt gebracht werden zu können. Einige der eingeführten Alternativen weisen eine eher durchwachsene Ökobilanz auf. Das ökologische Image von Biodiesel beispielsweise ist besser als seine tatsächliche Ökobilanz. Ferner sind die Alternativen in der Bereitstellung deutlich teurer als Benzin und Diesel. Ihre derzeitige Attraktivität im Treibstoffmarkt verdanken sie fast ausschließlich steuerlichen Begünstigungen. Eine gewisse Ausnahme stellt das brasilianische Ethanol dar, doch sein Preis wird aufgrund agrarprotektionistischer Überlegungen künstlich erhöht. Somit fehlt es den Alternativen derzeit an ökologischer und ökonomischer Effizienz. Die Vermeidungskosten je Tonne Kohlendioxidäquivalente liegen beim Einsatz von alternativen Energieträgern und Antrieben im Straßenverkehr noch viel zu hoch, als dass ein Einsatz im Massenmarkt gerechtfertigt wäre (Tabelle 14). Das Kostenargument hat aber immerhin schon dazu geführt, dass die Forschungen in einigen besonders ineffizienten Bereichen aufgegeben wurden. Dies betrifft vor allem die Konzepte, die vorsahen, im Fahrzeug Wasserstoff aus flüssigen Kraftstoffen zu gewinnen.

Bei einer rein kostenmäßigen Betrachtungsweise würde es nahe liegen, den Straßenverkehr weitgehend von Emissionsreduktionsverpflichtungen zu befreien, denn in anderen Sektoren ließen sich mit den gleichen Ausgaben viel mehr Einsparungen erreichen. So wären

### Vermeidungskosten je Tonne Kohlendioxidäquivalente<sup>1</sup> Tabelle 14

Treibstoff/Antriebsart	THG-Einsparung in Millionen Tonnen CO <sub>2eq</sub> pro Jahr	Vermeidungskosten in Euro pro Tonne CO <sub>2eq</sub>
Konventionell/Hybrid	6	364
Erdgas (CNG)/VKM	5	460
GTL/VKM	-5 <sup>2</sup>	-
BTL/VKM	32	300
Ethanol/VKM	5-29	254-1.812
RME/VKM	14-16	278-345
H <sub>2</sub> (EDR)/VKM	-7 <sup>2</sup>	-
H <sub>2</sub> (EDR)/FC	12	1.539
H <sub>2</sub> (Elektrolyse-Wind)/VKM	33	746
H <sub>2</sub> (Elektrolyse-Wind)/FC	35	714
H <sub>2</sub> (Elektrolyse-NG)/VKM	-45 <sup>2</sup>	-
H <sub>2</sub> (Elektrolyse-NG)/FC	-9 <sup>2</sup>	-
Diesel (Reformer)/FC	4,1	6.656
Benzin (Reformer)/FC	5	5.467
Methanol (Reformer)/FC	4-32,8	964-6.828

VKM = Verbrennungskraftmaschine; FC = Brennstoffzelle; GTL = Gas to Liquids; EDR = Erdgasdampfpreformation; NG = Erdgas; BTL = Biomass to Liquids;

<sup>1</sup> Alle Angaben beziehen sich auf ein Szenario, in dem 5 Prozent aller

Pkw-Fahrleistungen durch den Einsatz alternativer Treibstoffe und/oder Antriebe geleistet werden; <sup>2</sup> Mehrverbrauch;

Quelle: CONCAWE et al., 2004, 22

beispielsweise gut 1,9 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> einzusparen, wenn man weltweit alle Kohlekraftwerke auf den neuesten technischen Stand brächte, und zwar zu einem Reduktionspreis, der unter 50 Euro pro Tonne liegen würde (vgl. Bonekamp, 2002). Doch auch im europäischen Rahmen sehen Experten durchaus kostengünstiges Potenzial zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. So identifizierte eine Arbeitsgruppe für die EU-15 ein Reduktionspotenzial von 664 bis 765 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> mit einem Kostenansatz von unter 20 Euro pro Tonne (ECCP, 2001, 1). Das entspricht in etwa der doppelten Menge, welche die EU-15 im Rahmen des Kyoto-Protokolls einsparen soll.

Im Straßenverkehr lassen sich solche Vermeidungskosten nicht erreichen, zumindest nicht mit technischen Maßnahmen. Es sollte allerdings nicht verkannt werden, dass es im Straßenverkehr auch noch andere Möglichkeiten zur Emissionsreduktion gibt, die zwar weniger spektakulär als neue Technologien, aber dafür hoch effizient sind. So gibt es Schätzungen, dass sich in Deutschland allein durch eine verbrauchsorientierte Fahrweise bis zu zehn Milliarden Liter Treibstoff einsparen ließen. Diese Reduktion wäre nicht einmal mit Kosten, sondern mit finanziellen Gewinnen für die Autofahrer verbunden. Dies dürfte in der Tat die effizienteste Möglichkeit zur Emissionsminderung sein (Oertel/Fleischer, 2001). Aber auch durch eine Erneuerung des Fahrzeugbestands ließe sich der Treibstoffverbrauch signifikant senken. So bestehen 35 Prozent des deutschen Fahrzeugbestands aus Automobilen, deren Typzulassung vor dem 1. Januar 1996 erfolgte. Seit damals hat sich der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch von Neuwagen – wie 1995 von der europäischen Automobilindustrie zugesagt – um gut 25 Prozent reduziert. Außerdem kann auch der Staat einen Beitrag zur Verbrauchsreduktion leisten. Jedes Jahr führen Staus auf deutschen Straßen dazu, dass Milliarden Liter Sprit im Stop and go vergeudet werden. Häufig ist die mangelhafte Straßeninfrastruktur der Grund für diese Staus. Ein bedarfsgerechter Ausbau der Engpassrouten könnte viel CO<sub>2</sub> einsparen. Die veröffentlichten Schätzungen reichen hier bis zu einem Einsparpotenzial von 30 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> (VDA, 2005b, 5).

Die alternativen Kraftstoffe weisen derzeit vor allem in Nischenanwendungen Vorteile auf, die es zu nutzen gilt. So ist Erdgas für reine Stadtfahrzeuge aufgrund seiner geringen Schadstoffemissionen ein sehr geeigneter Treibstoff. Ebenso positiv kann sich die Untermischung von GTL oder Biokraftstoffen unter die konventionellen Kraftstoffe auswirken. Ein solches Vorgehen verringert die Abhängigkeit von den Erdölproduzenten, bietet Perspektiven für die heimische Landwirtschaft und verringert den weltweiten Ölverbrauch. Die verschiedenen Biokraftstoffe haben zwar nicht das Potenzial, um die Energieversorgung des Straßenverkehrs zu übernehmen, aber sie können mittelfristig einen Beitrag zu

ihrer Diversifizierung leisten. Das klingt zunächst eher unspektakulär, aber man muss sich vor Augen halten, dass die Einführung von Wasserstoff – der eigentlich einzigen Alternative mit dem Potenzial, die konventionellen Kraftstoffe komplett zu ersetzen – ein sehr langfristiges Projekt ist. Bis die skizzierten Probleme der Bereitstellung von Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeugen gelöst sind, stellt die Verminderung des Erdölverbrauchs pro gefahrenen Kilometer die wohl zentrale Herausforderung an die Autoindustrie dar, da sich so die vorhandenen, relativ kostengünstig zu fördernden Erdölreserven strecken lassen.

Um dieses Ziel erreichen zu können, muss der Einsatz der alternativen Kraftstoffe trotz all ihrer Schwächen ausgeweitet werden. Es wird jedoch erforderlich sein, dass Politik, Automobilindustrie, Kraftstoffversorger und Anlagenbauer an einem Strang ziehen, um eine diversifizierte Energieversorgung im Straßenverkehr möglich zu machen. Es wird eine wichtige Herausforderung an die Politik und ihre Förderinstrumente sein, eine ökonomisch sinnvolle Balance zwischen den relativ hohen Kosten der alternativen Kraftstoffe und ihrem Beitrag zur Dämpfung der Ölpreise zu finden. Wenn dieses Ziel verfehlt wird, besteht die Gefahr, dass der Konsument die Lösungen nicht akzeptiert. In einer von Konsumentensouveränität geprägten Marktwirtschaft ist dies gleichbedeutend mit einem Scheitern dieser Vorschläge. Ökologische Quantensprünge können die Alternativen hingegen nicht leisten. Es stehen eher die Hersteller in der Pflicht, den seit 1979 beschrittenen Weg der Verbrauchsreduktion fortzusetzen. Dabei werden vermehrt auch neue Einsparkonzepte wie Hybridantriebe oder Brennstoffzellen zur Stromversorgung zum Einsatz kommen müssen.

Die Industrie steht sowohl mit den Konzepten der Verbrauchsreduktion als auch mit der langfristigen Einführung des Wasserstoffs vor großen Veränderungen, an welche die industriellen Strukturen und Produkte angepasst werden müssen. Man kann dennoch optimistisch sein, dass diese Transformation gelingen wird. Auch wenn in der Öffentlichkeit viele Stimmen den Untergang des Autos aufgrund von Treibstoffmangel oder externen Kosten vorhersagen, hat das Auto in seiner inzwischen 100-jährigen Geschichte schon bewiesen, dass es sich gut an gesellschaftliche und wirtschaftliche Veränderungen anpassen lässt. Vor diesem Hintergrund sei zum Abschluss noch ein bekannter Autoskeptiker, der deutsche Kaiser Wilhelm II., zitiert, der die Möglichkeiten dieses Verkehrsmittels damals massiv unterschätzt hat: „In fünf Jahren wird keiner mehr vom Auto reden, ich setze aufs Pferd!“ (Krüger, 2002, 1).<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Zitiert nach Krüger, 2002, 1.

## Literatur

**Auer**, Josef, 2005, Bioenergien für die Zeit nach dem Öl, Deutsche Bank Research, Aktuelle Themen Nr. 327, Frankfurt am Main

**Berrisch**, Hans Joachim, 1993, Die Wirtschaftlichkeit der Biomasseproduktion zur Wasserstoffherstellung, Europäische Hochschulschriften, Reihe V, Band 1421, Frankfurt am Main

**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe**, 2003, Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, Heft XXVIII, Hannover

**Biedermann**, Peter et al., 2003, Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik, Band 19, Jülich

**Bonekamp**, Berthold, 2002, Moderne Kohletechnologien: Chancen für die Wirtschaft im Rahmen der Kyoto-Mechanismen, Zweiter Kongress „Zukunft der Kohle“, Berlin

**Bossel**, Ulf / **Eliasson**, Baldur / **Taylor**, Gordon, 2003, The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?, Luzern

**Brown**, Russel A., 2004, Critical paths to the post petroleum age, in: OECD (Hrsg.), Nuclear of hydrogen, Paris, S. 27–42

**Burns**, Lawrence et al., 2002, Vehicle of Change, in: Scientific American, Nr. 10, S. 47–49

**Ciraci**, Salim / **Yildirim**, Taner, 2005, Titanium-Decorated Carbon Nanotubes as a Potential High-Capacity Hydrogen Storage Medium, in: Physical Review Letters, Nr. 94 (175501)

**CONCAWE / EUCAR / Joint Research Centre**, 2004, Well to Wheel Analysis of future Automotive Fuels and Powertrains in the european context, Version 1 b, Brüssel

**Degen**, Winfried / **Maly**, Rudolf, 2000, Synthetische Kraftstoffe für die Zukunft des Individualverkehrs, in: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte Nr. 1565, Düsseldorf, S. 531–554

**Degen**, Winfried / **Maly**, Rudolf, 2002, Potenziale zukünftiger Kraftstoffe, in: Munack, Axel / Krahl, Jürgen (Hrsg.), Biodiesel – Potentiale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen, Landbauforschung Völknerode, Sonderheft 239, S. 15–16

**Demuß**, Lutz, 2000, Technologische Veränderungen beim Übergang vom konventionellen Antriebsstrang zur Brennstoffzelle, in: Wengel, Jürgen / Schirrmeister, Elena (Hrsg.), Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle, Karlsruhe, S. 111–176

**Deutscher Bundestag**, 2005, Bericht zur Steuerbegünstigung von Biokraftstoffen, Bundestagsdrucksache 15/5816

**DIW** – Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung / **BMVBW** – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.), 1981, Verkehr in Zahlen 1981, Berlin

**DIW / BMVBW** (Hrsg.), 2005, Verkehr in Zahlen 2004/2005, Hamburg

**Dreier, Thomas / Tzscheutschler, Peter**, 2000, Ganzheitliche Betrachtung innovativer Fahrzeugantriebe und alternativer Kraftstoffe, in: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte Nr. 1565, Düsseldorf, S. 531–554

**EU-Kommission**, 2001, EU Greenpaper – Towards a european strategy for the security of energy supply, Brüssel

**EU-Kommission**, 2005, Biofuels Barometer, Brüssel

**ECCP – European Climate Change Programme**, 2005, ECCP Long Report, Brüssel, URL: <http://www.shellglobalsolutions.com> [Stand: 2005-20-12]

**Ewe, Thorwald**, 2004, Im Paradies wird's teuer, in: Bild der Wissenschaft, Nr. 3, S. 86–93

**Fichtner**, 2001, Ganzheitliche Energie- und Emissionsbilanzierung von Heizsystemen, Düsseldorf

**Fischdick, Manfred / Nitsch, Joachim et al.**, 2002, Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland, UBA, Forschungsbericht 200 97 104, Berlin

**FO Licht**, 2003, World Ethanol and Fuels report, Kent

**Gärtner, Sven / Reinhardt, Guido**, 2003, Erweiterung der Ökobilanz von RME, Heidelberg

**Gemis**, 1994, 1998 und 2002, Öko-Institut: Gesamt Emissionsmodell Integrierter Systeme, Version 2.1 bis Version 4.13, Darmstadt

**Geschka**, 2003, Die Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb, Darmstadt

**Globus**, 2001, Kraftakt Klimaschutz, Nr. 56 (DC-7215), Hamburg

**Gruden, Dusan**, 1999, Auto und Umwelt, in: Gruden, Dusan (Hrsg.), Umweltschutz in der Automobilindustrie, Unterlagen zur Vorlesung an der Technischen Universität Wien, Stuttgart

**Hackenjös, Gunther**, 2000, Betankungsinfrastruktur: Stand und Perspektiven, in: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hrsg.), Themenheft Zukunftstechnologie Brennstoffzelle, Berlin, S. 73–110

**Henke, Jan / Klepper, Gernot / Schmitz, Norbert**, 2003, Tax Exemption for Biofuels in Germany: Is Bioethanol Really an Option for Climate Policy?, Kiel Working Paper, No. 1184, Kiel

**Henke, Jan**, 2005, Biokraftstoffe – Eine weltwirtschaftliche Perspektive, Kieler Arbeitspapier, Nr. 1236, Kiel

**Herrmann, Ingo**, 2000, Elektrofahrzeuge mit PEM-Brennstoffzelle, in: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hrsg.), Zukunftstechnologie Brennstoffzelle, Berlin, S.19–21

**Herrmann, Hans Otto / Steiger, Wolfgang / Heinrich, Hartmut**, 2005, BTL in Fahrzeugen: Potenziale von Kraftstoff und Brennverfahren, in: Synthetische Biokraftstoffe, Techniken – Potenziale – Perspektiven, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 25, Wolfsburg, S. 133–148



**IEA** – International Energy Agency, 2004, Biofuels for Transport, Paris

**IFEU** – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 1996, Vergleichende Ökobilanz: Elektrofahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge – Bilanz der Emission von Luftschadstoffen und Lärm sowie des Energieverbrauchs im Rahmen des BMBF-Vorhabens „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen“, Heidelberg

**Jacobson**, Mark Z., 2002, Atmospheric Pollution – History, Science, and Regulation, Cambridge

**Jörissen**, Ludwig / **Garche**, Jürgen, 2000, Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb, in: Wengel, Jürgen / Schirrmeyer, Elena (Hrsg.), Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle, Karlsruhe, S. 13–48

**Jürgens**, Ulrich / **Meißner**, Heinz-Rudolf / **Bochum**, Ulrich, 2002, Innovation und Beschäftigung im Fahrzeugbau, WZB, FS II 02-202, Berlin

**Kaltschmitt**, Martin / **Zander**, Frank / **Nil**, Moritz, 2003, Potenziale biogener Kraftstoffe in Deutschland, ZfE – Zeitschrift für Energiewirtschaft, 27. Jg., Nr. 3, S. 235–243

**Keppeler**, Stefan et al., 2005, Life Cycle Analysis von SunDiesel, in: Synthetische Biokraftstoffe, Techniken – Potenziale – Perspektiven, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 25, Wolfsburg, S. 149–169

**Knörr**, Wolfram et al., 2002, Aktualisierung des Daten- und Rechenmodells: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1980–2020, Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 20145112, Heidelberg

**Kohler**, Herbert, 2005, Strategic Importance of Synthetic Fuels for the Automotive Industry, in: Synthetische Biokraftstoffe, Techniken – Potenziale – Perspektiven, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 25, Wolfsburg, S. 21–33

**Kok**, Daniel et al., 2005, Hybridantrieb – Der Mikrohybrid als Zukunftslösung für Emissionen und Kraftstoffverbrauch, in: Verband der Automobilindustrie (Hrsg.), Tagungsband zum Technischen Kongress 2005, 16./17. März 2005, Ingolstadt, S. 39–50

**Kolke**, Reinhard, 2001, Car of the future – Das Spannungsfeld zwischen umweltpolitischer Notwendigkeit und Selbstzweck, 3. Euroforum Fachkonferenz für die Automobilindustrie, München

**Kolke**, Reinhard et al., 2003, CO<sub>2</sub>-Minderung im Verkehr, Berlin

**Krüger**, Roland, 2002, Systemanalytischer Vergleich alternativer Kraftstoff- und Antriebskonzepte in der Bundesrepublik Deutschland, VDI-Reihe 12, Nr. 499, Düsseldorf

**Lechtenböhrmer**, Stefan et al., 2004, Treibhausgasemissionen des russischen Erdgas-Exportpipeline-Systems, Wuppertal

**Lüke**, Hans-Wolfgang, 2005, BTL-Fuels – A view from the Mineral Oil Industry, in: Synthetische Biokraftstoffe, Techniken – Potenziale – Perspektiven, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 25, Wolfsburg, S. 49–54

- Metzner, André / Waschke, Thomas**, 2003, Innovationsstrategien im Automobil am Beispiel der Brennstoffzellentechnologie, in: Canzler, Weert / Schmidt, Gert (Hrsg.), Das zweite Jahrhundert des Automobils, Berlin, S. 63–76
- Müller, Friedemann**, 2003, Sicherheit der Versorgung mit Öl und Gas, in: Internationale Politik, 58. Jg., Nr. 3, S. 3–11
- Nitsch, Joachim**, 2003, Potentiale der Wasserstoffwirtschaft – Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003, Heidelberg
- Noreikat, Karl / Dönitz, Wolfgang / Schell, Alexander**, 2000, Hybride Fahrzeugkonzepte – Die Evolution zum Mehrwerthybrid, in: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), Innovative Fahrzeugantriebe, VDI-Berichte Nr. 1565, Düsseldorf, S. 671–690
- Nylund, Nils-Olof / Erkkilä, Kimmo / Lappi, Maija / Ikonen, Markku**, 2004, Transient Bus Emission Study: Comparison of Emissions from Diesel and Natural Gas Busses, VTT Processes report, URL: [http://www.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/VTT\\_Nylund.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/VTT_Nylund.pdf) [Stand: 2005-12-20]
- Oertel, Dagmar / Fleischer, Torsten**, 2000, TA Projekt Brennstoffzellen-Technologie, Endbericht, Berlin
- Oertel, Dagmar / Fleischer, Torsten**, 2001, Brennstoffzellen-Technologie: Hoffnungsträger für den Klimaschutz, Beiträge zur Umweltgestaltung, Band A 146, Berlin
- Ohlhoff, Jürgen**, 2002, Biodiesel: deutsche und europäische Perspektiven, in: Munack, Axel / Krahl, Jürgen (Hrsg.), Biodiesel – Potentiale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 239, S. 3–8
- Ostermeier, Andreas**, 2002, Biodiesel (RME) aus Sicht des Umweltbundesamtes, in: Munack, Axel / Krahl, Jürgen (Hrsg.), Biodiesel – Potentiale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 239, S. 97–98
- Pehnt, Martin**, 2002, Energierevolution Brennstoffzelle – Perspektiven, Fakten, Anwendungen, Heidelberg
- Petersen, Rudolf**, 2003, Die Zukunft des Ottomotors, in: Canzler, Weert / Schmidt, Gert (Hrsg.), Das zweite Jahrhundert des Automobils, Berlin, S. 77–96
- PWC – Price Waterhouse Coopers**, 2003, Shell Middle Distillate Synthesis (SMDS): Update of a Life Cycle Approach to Assess the Environmental Inputs and Outputs, and Associated Environmental Impacts, of Production and Use of Distillates from a Complex Refinery and SMDS Route, URL-Adresse: [http://www.shell.com/static/shellgasandpoweren/downloads/what\\_is\\_gas\\_to\\_liquids/PwC%20LCA%20Review%20May2020031.pdf](http://www.shell.com/static/shellgasandpoweren/downloads/what_is_gas_to_liquids/PwC%20LCA%20Review%20May2020031.pdf) [Stand: 2005-12-20]
- Quirin, Markus / Gärtner, Sven / Pehnt, Martin / Reinhardt, Guido**, 2004, CO<sub>2</sub>-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe, Heidelberg
- Reik, Wolfgang / Wagner, Uwe / Reitz, Dierk**, 2005, ESG – Ein Mild-Hybrid auf Basis des Doppelkupplungsgetriebes senkt Verbrauch und Emissionen bei verbesserter Agilität, in: Verband der Automobilindustrie (Hrsg.), Tagungsband zum Technischen Kongress 2005, 16./17. März 2005, Ingolstadt, S. 1–20

**Reitzle**, Wolfgang, 2003, Eine Vision für die Wirtschaft, Vortrag anlässlich des „Medienforums Deutscher Wasserstofftag“ am 1. Oktober 2003 in München

**Rifkin**, Jeremy, 2002, Die H2 Revolution, Frankfurt am Main

**Rifkin**, Jeremy, 2003, Deutschland und die Energierevolution, in: Internationale Politik, 58. Jg., Nr. 3, 25–30

**Schmitz**, Norbert (Hrsg.), 2005, Innovationen bei der Bioethanolerzeugung und ihre Auswirkungen auf Energie und Treibhausgasbilanzen, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 26, Münster

**Shell**, 2004, Pkw-Szenarien bis 2030, Hamburg

**Steiger**, Wolfgang et al., 2001, Die Volkswagen-Strategie zum hocheffizienten Antrieb, in: VDI-Fortschrittsberichte, Nr. 455, S. 47–65

**Stromberger**, Rolf, 2003, Aufbau einer Tankstellen-Infrastruktur zur Versorgung von Fahrzeugen mit dem alternativen Kraftstoff Wasserstoff unter Berücksichtigung technischer, ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte, München

**Tschimpke**, Olaf, 2005, BTL-Kraftstoffe aus Sicht des Naturschutzes, in: Synthetische Biokraftstoffe, Techniken – Potenziale – Perspektiven, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 25, Wolfsburg, S. 41–47

**UFOP** – Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V., 2005, UFOP-Markt-information: Ölsaaten und Biokraftstoffe, Berlin

**VDA** – Verband der deutschen Automobilindustrie e.V., 2005a, Auto-Jahresbericht 2005, Frankfurt

**VDA**, 2005b, Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft, Frankfurt

**Vogel**, Alexander / **Reichmuth**, Matthias / **Kaltschmitt**, Martin, 2005, Potenziale von Biokraftstoffen unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte, in: Synthetische Biokraftstoffe, Techniken – Potenziale – Perspektiven, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 25, Wolfsburg, S. 55–80

**Volkswagen AG**, 2004, Umweltbericht 2003/2004, Wolfsburg

**WEN Consulting GmbH**, 2004, Preise und Wirtschaftlichkeit des Erdgaseinsatzes in Fahrzeugen, Berlin

**Wengel**, Jürgen / **Schirrmeister**, Elena, 2000, Auswirkungen des Innovationsprozesses auf die Baden-Württembergische Industrie, in: Wengel, Jürgen / Schirrmeister, Elena (Hrsg.), Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle, Karlsruhe, S. 177–200

**Witthuhn**, Barbara, 2004, Herbeigerechnete Klimagefahr, in: Bild der Wissenschaft, Nr. 3, S. 98–101

**Wurster**, Reinhold et al., 2002a, GM Well to Wheel Analysis of Energy use and Greenhouse Gas Emissions of advanced Fuel/Vehicle Systems – a European Study, Ottobrunn

**Wurster**, Reinhold et al., 2002b, Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung, Ottobrunn

## Kurzdarstellung

Mobilität ist eine der Grundlagen von Wohlstand und arbeitsteiligem Wirtschaften. Derzeit hängt die individuelle Mobilität von fossilen Energieträgern ab. Deren Endlichkeit zwingt die Industriegesellschaften dazu, bereits heute Alternativen zu suchen. Ein Kraftstoff der Zukunft muss sich dabei in ökonomischer und ökologischer Hinsicht dem Benchmark der erdölbasierten Kraftstoffe stellen. Die umfassende Analyse der aus heutiger Sicht denkbaren Alternativen zeigt, dass auch in den nächsten 15 Jahren Diesel und Benzin das Rückgrat der Kraftstoffversorgung bilden werden. Alternativen wie Erdgas oder Biodiesel werden dagegen Nischenprodukte bleiben. Hohe Bereitstellungskosten, geringe Mengenpotenziale und teilweise eher durchwachsene Ökobilanzen machen ihre Zukunft als eigenständige Kraftstoffformen fraglich. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht spricht jedoch vieles dafür, dass die alternativen Kraftstoffe in Form von Untermischungen einen Beitrag zur Diversifizierung des Kraftstoffmarkts leisten können. Langfristig dürfte es zu einem Übergang auf regenerativen Wasserstoff kommen, der als einziger alternativer Energieträger das Potenzial besitzt, die etablierten Kraftstoffe komplett zu ersetzen. Bis dahin sind aber noch viele technische Probleme in der gesamten Bereitstellungskette zu lösen.

## Abstract

Our prosperity and the division of labour is founded on the mobility of people and goods. Individual mobility is today largely dependent on fossil fuels. Since these are finite, our industrialised societies are already being forced to seek alternatives. From both the economic and the ecological points of view, oil-based fuels must be the benchmark against which future energy sources are measured. A comprehensive analysis of all currently imaginable alternatives makes clear that over the next 15 years diesel oil and petrol will continue to constitute the backbone of our energy supplies. Alternatives, such as natural gas and biodiesel, will not attain significant market shares. High supply costs, limited reserves and, in some cases, rather mixed ecological audit scores cast doubt on their potential roles as replacement fuels in their own right. There is, however, rather strong economic and ecological evidence that these alternative fuels will be able to contribute to the diversification of the fuel market in the form of fuel supplements. In the long term, it seems likely that there will be a move to the use of fuel cells since, alone among alternative energy sources, regenerative hydrogen has the potential to replace established fuels completely. Until then, however, many technical problems remain to be solved at all stages of the supply chain.