

Alternative Kraftstoffe und Hybridfahrzeuge – Innovation im Fahrzeugbereich mit neuen Antriebskonzepten

Peter Kurzweil

1 Erfindungen für das postfossile Energiezeitalter

Die nachhaltige Energiewirtschaft des 21. Jahrhunderts baut auf regenerative Energien wie Solarenergie, Windkraft, Wasserkraft, Tidenhub, Geothermie und Biomasse. Kraftstoffe aus biogenen Quellen, elektrochemische Energiewandler¹ und Hybridfahrzeuge² begleiten die moderne Verkehrstechnik zu den Klimaziele des Kyoto-Protokolls.³ 2017 erreicht die konventionelle Erdölförderung ihren Höhepunkt.⁴ Erdöl versiegt in 45 Jahren, Erdgas in 67, Steinkohle in 178 und Braunkohle in 197 Jahren.⁵ Auf das Zeitalter der fossilen Ressourcen wird die Ära der elektrischen Stromerzeugung folgen. Der Energiemix in Deutschland schloss im Jahr 2001 verhaltene 3,2 % erneuerbare Energien ein. Doch nachwachsende Rohstoffe bieten sich vermehrt zur stofflichen Nutzung, zur Kraftstoffgewinnung, sowie zur Strom- und Wärmeerzeugung an.

Die Wandlungstechniken sind seit Jahrzehnten bekannt und nicht mehr patentierbar – doch im Detail ist mit wegweisenden Neuerungen zu rechnen. Die Patentstatistik spiegelt den Schöpfungsreichtum wider. Über alternative Kraftstoffe listet die Suchmaschine *scirus.com* 1701 aktuelle Publikationen und 56545 Webquellen auf. Das Deutsche Patentamt verzeichnet 1287 Patente zum Stichwort „Hybridfahrzeug“.⁶ Weiterhin gibt es 340 aktuelle wissenschaftliche Publikationen, 3038 Webseiten und 8239 sonstige Webquellen zum Stichwort „hybride vehicle“.⁷

¹ Brennstoffzellen, Elektrolyse, Superkondensatoren; vgl. Kurzweil (2003).

² Vgl. Kurzweil (2005), Abschnitt 3.3.

³ Reduzierung der Treibhausgasemissionen (CO₂, CH₄, N₂O, Fluorkohlenwasserstoffe, SF₆) in den Industrieländern bis 2008–2012 um 5,2% gegenüber 1990. Der vom UNO-Klimaausschuss prognostizierte globale Temperaturanstieg von 1,4 bis 5,8 °C bis zum Jahr 2100 wird durch das Kyoto-Abkommen (seit 16. Februar 2005 in Kraft) um 0,1 °C verlangsamt.

⁴ Vgl. *Süddeutsche Zeitung*, 04.06.2005, S. 21: 62% der Weltölförderung leisten Saudiarabien, Russland, USA, Mexiko, Iran, China, Venezuela, Norwegen, Kanada und Großbritannien.

⁵ Statistische Reichweite: bekannte und mit heutiger Technik erschlossene Reserven, bezogen auf den jährlichen Verbrauch (2002/03); vgl. *Süddeutsche Zeitung*, 15.-17.04.2006, S. 24.

⁶ <http://depatisnet.dpma.de>, 24. April 2006.

⁷ Ergebnisse der Suchmaschine www.scirus.com.

1.1 Hybridfahrzeuge – Innovation mit Tradition

Ende des 19. Jahrhunderts konkurrierten Antriebe mit Kolbenmaschinen und Elektromotoren um den höheren Wirkungsgrad und die größere Reichweite. *Moritz von Jacobi* betrieb 1839 ein Elektroboot auf der Neva mit Strom aus Grove-Zellen⁸ und Batterien, die rasch erschöpften. 1870 schuf *Werner von Siemens* die erste brauchbare elektrische Eisenbahn. 1899 entwickelte *Ferdinand Porsche* das erste Hybridfahrzeug⁹ bei *Jacob Lohner & Co* (Wien). Der „Lohner-Porsche“, ursprünglich ein Batteriefahrzeug, trieb mit einem konstant laufenden Benzinmotor einen Generator an, der eine Bank von Akkumulatoren lud. Diese speiste Strom in die Elektromotoren, die sich direkt in den Radnaben der Vorderräder, später auch der Hinterräder, befanden. Kurbelwelle, Getriebe, Riemen, Ketten und Kupplungen waren verzichtbar. Die einfache Kraftübertragung ohne Reibungsverluste bescherte einen Wirkungsgrad von damals unglaublichen 83 %. Auf der Weltausstellung in Paris am 14. April 1900 zog der Lohner-Porsche die Automobilwelt in seinen Bann. 300 Stück wurden bis 1906 produziert, das Patent später an *Emil Jellinek* verkauft. Das „Krieger-Hybrid“ von 1903 war dem Lohner-Porsche nachempfunden.

Bis in die 1920er Jahre bauten etliche Hersteller Hybridfahrzeuge von ähnlicher Art. Der belgische „Auto-Mixte“ von 1906/7 nutzte das *Henri-Pieper*-System zum regenerativen Bremsen: Ein 24 PS-Verbrennungsmotor trieb über eine magnetische Scheibenkupplung eine Dynamomaschine und über einen Kettentrieb die Hinterräder an. Beim Bremsen oder bei geringer Last speiste der Dynamo elektrischen Strom in die 28 Batterien zurück. Bei starker Last unterstützten die Batterien den Dynamo oder trieben das Fahrzeug allein. Die Kupplungsscheibe war gleichzeitig Teil der magnetischen Bremse. Die Wahl der Antriebsart erfolgte mangels Elektronik von Hand.

Das Patent von *H. Piper* aus dem Jahr 1905 beschrieb ein Fahrzeug mit Verbrennungs- und Elektromotor, das in zehn Sekunden auf 40 km/h beschleunigen konnte – anstatt der damals üblichen 30 Sekunden. Preiswertes Benzin und die Serienproduktion starker Verbrennungsmotoren verdrängten die frühen Hybridfahrzeuge. Der *Owen Magnetic* „Model 60 Touring“ von 1921 mit Elektromotoren in den Hinterrädern war das letzte erwähnenswerte Hybridauto.

Im Bahnverkehr konnten sich dieselektrische Antriebe durchsetzen. Porsches „Landwehr-Zug“ und der spätere „C-Zug“ waren Vorläufer heutiger Schienenantriebe – geboren aus den logistischen Herausforderungen des Ersten Weltkriegs. Das Hybridauto aber verschwand bis Mitte der 1960er Jahre.

⁸ Frühe Form der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle; vgl. Kurzweil (2003).

⁹ Vgl. www.hybrid-vehicle.org; Naunin 1994.

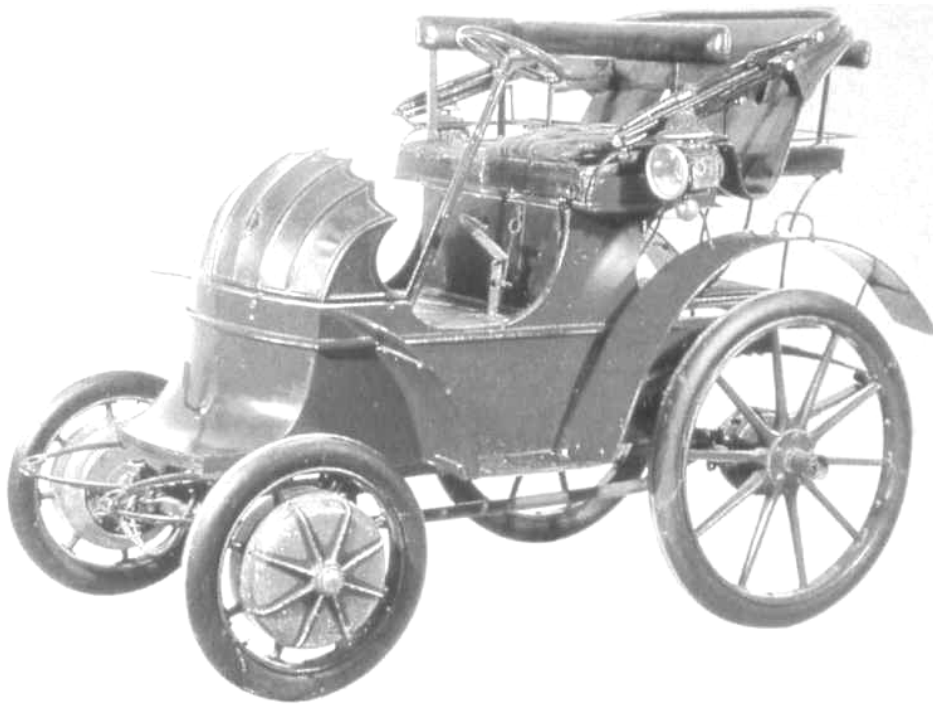


Abbildung 1: Der Lohner-Porsche von 1900, das erste Hybridfahrzeug mit Elektro- und Verbrennungsmotor¹⁰

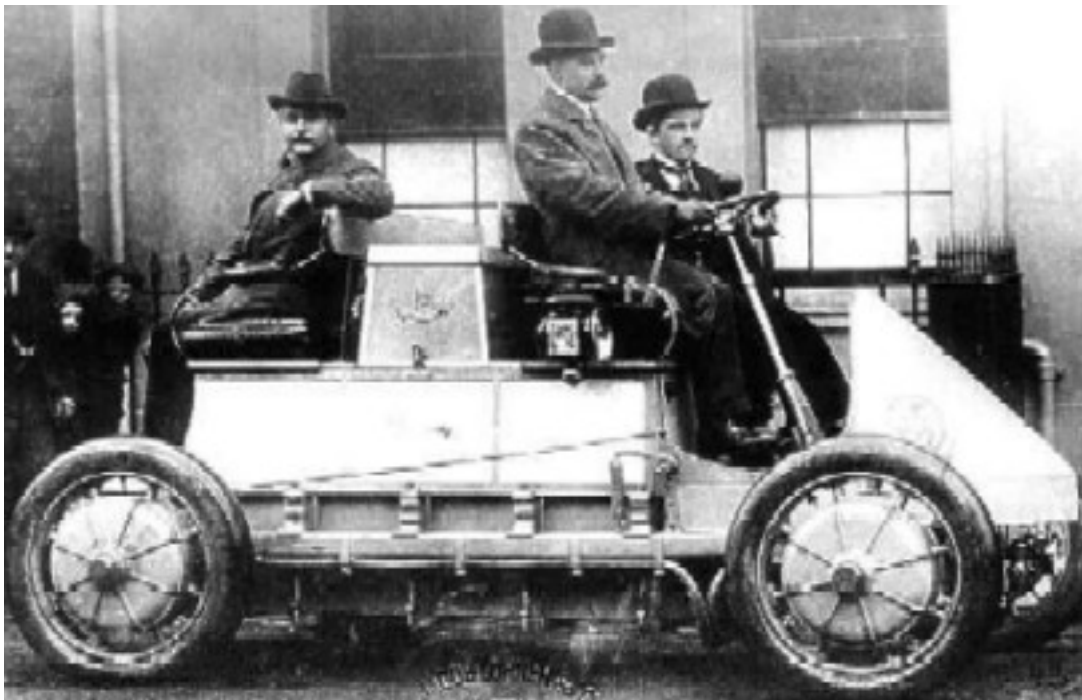


Abbildung 2: Lohner-Porsche mit dem ersten Vierradantrieb¹¹

¹⁰ Das Original in bordeauxrot im Technischen Museum Wien; <http://techauto.republika.pl>.

¹¹ Jacob Lohner & Co. (1900); www.wikipedia.org, Stichwort: Allradantrieb.

Die erste Ölkrise forderte zur Rückbesinnung: Der GM 512 von 1965 und das VW-Taxi Hybrid von 1973 konnten sich auf dem Markt allerdings nicht behaupten. Verschärfte Abgasnormen führen findige Ingenieure in unserer Zeit wiederum zu den „alten“ Hybridkonzepten.

1.2 *Umweltpolitik – Nährboden für neue Technologien*

Die Europäische Union (EU) will den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch in Europa bis zum Jahr 2010 auf 21 % steigern. EU-weit soll der Anteil von Biokraftstoffen 5,75 % bis 2010 und 8 % bis 2020 erreichen. Für Deutschland bedeutet dies bis zum Jahr 2010 eine Verdoppelung alternativer Energien gegenüber dem Jahre 2000. Die Stromerzeuger streiten derweil um Emissionsrechte.¹² Der „nationale Allokationsplan“ bestimmt, dass Kraftwerke und Industrie in Deutschland von 2008 an nur noch 495,5 Mio. t CO₂ ausstoßen dürfen – 5 % weniger als im Jahr 2004. Die meisten Kraftwerksbetreiber müssen ihre Emissionen um 15 %, Industriebetriebe um 1,25 % mindern – oder die fehlenden Zertifikate aufkaufen.¹³

Die europäische Ökoindustrie beschäftigt über 2 Millionen Menschen und wächst jährlich um etwa 5%. Langfristige Ziele sind Versorgungssicherheit und Klimaschutz.¹⁴ Der Verbrauch fossiler Kraftstoffe soll gesenkt, die Abhängigkeit vom Öl verringert und der Ausstoß von Treibhausgasen vermindert werden. Dies erfordert eine neue Generation effizienter Verbrennungsmotoren, synthetische und biogene Kraftstoffe, sowie kombinierte Antriebe (Hybridtechnologie), bis hin zur Wasserstofftechnologie mit Brennstoffzellen.

Der Euro-5-Grenzwert für Diesel-Pkw sieht eine Partikelbelastung von 5 mg/km vor – eine 80%ige Senkung im Vergleich zum Euro-4-Grenzwert von 25 mg/km.¹⁵ Durch den Einbau von Partikelfiltern¹⁶ sieht die EU-Kommission das technische Ziel von 2,5 mg/km als greifbar und vom Kosten-Nutzen-Gesichtspunkt her als gerechtfertigt an.

Der NO_x-Grenzwert für Otto-Pkw beträgt derzeit 80 mg/km und von 2010 an 65 mg/kg. In den USA gilt von 2007 an für Dieselmotoren der NO_x-Grenzwert von 80 mg/km – eine Herausforderung für Serienfahrzeuge.

Auf dem Genfer Automobilsalon 2006 feierte Europas Diesel-Generation mit Oxidationskatalysator, Partikelfilter und NO_x-Speicherkatalysator derweil Pre-

¹² Vgl. *Süddeutsche Zeitung*, 13./14.04.2006, S. 19. – CO₂-Emissionen 2004 in Deutschland: Energieerzeugung (43,1 %), Industrie (18,1 %), Verkehr (19,0 %), Haushalte (13,1 %), Gewerbe-Handel-Dienstleistungen (6,6 %). Klimaziel bis 2012 sind 849 Mio. t CO₂, davon 515 aus Energie und Industrie (inkl. Unternehmen ohne Emissionshandelspflicht).

¹³ Deutsche Emissionshandelsstelle (Umweltbundesamt), www.dehst.de.

¹⁴ Vgl. Deutscher Bundestag (2005); Umweltrat (2005).

¹⁵ Euro-4 ab 01.01.2005 - höchstens 35 Tage im Jahr dürfen die Schadstoffgrenzwerte überschritten werden; vgl. EU-Kommission (2005).

¹⁶ Die Partikel werden z. B. an porösem Siliciumcarbid zurückgehalten.

miere.¹⁷ NO_x-Speicherkatalysatoren werden jedoch durch Schwefel im Abgas schleichend vergiftet; SO₂ reagiert an Bariumatomen im Katalysator zu Bariumsulfat.¹⁸ In Lastwagen haben daher die schwefeltoleranteren SCR-Reaktoren¹⁹ mit Harnstoff-Einspritzung ein kommerzielles Stadium erreicht.

In Japan sind seit Anfang 2005 Kraftstoffe mit einem Schwefelgehalt von 10 ppm auf den Markt. Für Tankstellen in den chinesischen Städten gelten seit dem 1. Juli 2005 die Euro-2-Bestimmungen für Kraftstoffe mit einem niedrigeren Schwefelgehalt (500 ppm). Sieben von zehn Städten mit der weltweit höchsten Luftverschmutzung liegen in China. Internationaler Normen für Motorschmierstoffe (ILSAC GF-5), die 2009 eingeführt werden sollen, zielen auf bessere Treibstoffwirkungsgrade, Kompatibilität der Emissionssysteme, längere Lebensdauer und niedrigen Phosphorgehalt.

AEA Technology²⁰ schätzt, dass auf Grund der EU-Normen bis 2010 die verkehrsbedingten Feinpartikel (PM 10)²¹ um 76 % und die Stickoxid-Emissionen (NO_x) um 69 % reduziert werden können. Insgesamt hätten sich die Maßnahmen zur Reduzierung der Luftschadstoffe als rentabel erwiesen – und die vorhergesagten Kosten seien in den meisten Fällen überschätzt worden.

1.3 Toxikologische Studien fordern einen Technologiesprung

Moderne Lkw-Dieselmotoren emittieren etwa 40 mg Aerosole pro kWh Energie oder 10⁸ Partikel pro cm³ Abgas mit typischen Durchmessern von 15 bis 25 nm. Auf der spezifischen Oberfläche von bis zu 250 m²/g adsorbieren unverbrannte Kohlenwasserstoffe und krebserzeugende polyzyklische Aromaten. Die gestiegenen PM-10-Emissionen sollen die durchschnittliche Lebenserwartung in der EU um schätzungsweise neun Monate verringert haben.²² Eine US-Studie²³ führt jährlich 3000 vorzeitige Todesfälle durch Lungenkrebs allein auf die Feinpartikelemissionen von Dieselfahrzeugen zurück. Dieselaabgase erhöhten demnach das Risiko, an Krebs zu erkranken, um das 7,5-fache gegenüber dem durch alle anderen Giftstoffe verursachten Krebsrisiko.

¹⁷ Mercedes „BlueTec“ (E 320 CDI); vgl. *Süddeutsche Zeitung*, 25./26.02.2006, S. V2/2.

¹⁸ Vgl. DaimlerChrysler (2003).

¹⁹ SCR = Selektive katalytische Reduktion von NO_x zu Stickstoff; vgl. Kurzweil/Scheipers (2005).

²⁰ Im Auftrag des britischen Ministeriums für Umwelt, Ernährung und ländliche Angelegenheiten (DEFRA) erstellter Bericht; vgl. EU-Kommission (2005).

²¹ PM 10, engl. *particulate matter*: Massenanteil an Teilchen im Luftstaub mit einem Durchmesser von 10 µm und weniger. In städtischen Gebieten liegt der PM 10-Wert bei etwa 85%.

²² Im Jahr 2002 überschritten die Schadstoffwerte in 12 von 15 Mitgliedsländern den geltenden Grenzwert; vgl. Europäische Kommission (2005).

²³ Firma „Abt Associates“ im Auftrag der *US Clean Air Task Force*.

Zwischen in der Schwangerschaft eingeatmeten Luftschadstoffen und Krebserkrankungen von Kindern besteht ein Zusammenhang:²⁴ Mehr als die Hälfte aller Krebserkrankungen von Kindern soll auf Mütter zurückgehen, die in der Nähe von Fabriken, Kraftwerken oder Hauptverkehrsknotenpunkten gelebt und mit Rauch und Abgasen verschmutzte Luft eingeatmet haben. In kalifornischen Städten mit hohen Feinpartikelwerten kommen Kinder mit rund 28 g niedrigerem Geburtsgewicht auf die Welt als in Gemeinden mit besserer Luftqualität.²⁵ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in der Umgebungsluft schädigen offensichtlich das Erbgut der Ungeborenen.²⁶ Im Nabelschnurblut von Neugeborenen fanden sich 7,2 Chromosomabnormalitäten auf Tausend weiße Blutzellen, wenn die Mütter hohen Expositionen ausgesetzt waren – im Vergleich zu 4,7 Abnormalitäten bei geringer Exposition.

Über Langzeitwirkungen von metallhaltigen Emissionen aus Katalysatoren und Kraftstoffadditiven ist wenig bekannt. Manganhaltige Kraftstoffzusätze für höhere Oktanzahlen, hinterlassen Ablagerungen auf dem Abgaskatalysator.

1.4 Technische Maßnahmen zur CO₂-Minderung

Der deutsche Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)²⁷ beurteilt die durch den Straßenverkehr verursachten Folgeschäden an Gesundheit und Umwelt als unakzeptabel hoch. Bis 2012 müssen technische Potenziale zur CO₂-Minderung bei Kraftfahrzeugen mit konventioneller Antriebstechnik ausgeschöpft werden. Technische Ansatzpunkte sind Motoren mit Direkt-einspritzung im optimalen Kennfeldbereich, „Downsizing“²⁸ und Getriebe-spreizung²⁹, verbesserte Energienutzung, Leichtbau und Hybridfahrzeuge.

- Bei der vollständigen Verbrennung entstehen aus einem Liter Benzin 2,28 kg CO₂, aus einem Liter Diesel 2,58 kg CO₂. Die Reduzierung des Kraftstoffbedarfs bei künftigen Fahrzeugen um 40 % – bei Benzin etwas mehr, beim sparsameren Diesel weniger – senkt den CO₂-Ausstoß auf 100 g/km.
- Kraftstoffen aus Biomasse und Wasserstoff wird langfristig ein erhebliches Minderungspotential beigemessen.

²⁴ Studie der Universität Birmingham zitiert in EU-Recht (2005).

²⁵ US-Studie im Jahr 2000 an 18000 Babies zitiert in EU-Recht (2005).

²⁶ Studie zitiert in EU-Recht (2005).

²⁷ Vgl. Umweltrat (2005); Gremium aus sieben Universitätsprofessoren verschiedener Fächer.

²⁸ Downsizing = Hubraumreduzierung bei gleicher Leistung, ergänzt durch Turbolader oder elektrisch unterstützte Aufladung. Kraftstoffeinsparung durch Zylinderabschaltung bei niedriger Last.

²⁹ Wirkungsgradverluste beim Schaltvorgang mindern automatisierte Schaltgetriebe (6 bis 7 Gänge, hydraulisch oder elektronisch unterstützt) oder stufenlose Getriebe (CVT).

*Ottomotoren*³⁰ versprechen Verbrauchsminderungen von bis zu 18 % durch Direkteinspritzung in Verbindung mit Schichtladebetrieb bzw. variable Ventilsteuerzeiten und Zylinderabschaltung, sowie einer niedrigeren Leerlaufdrehzahl. Die NO_x- und Partikel-Emissionen erfordern eine Abgasnachbehandlung.

In *Dieselmotoren* treten durch die schnelle Direkteinspritzung trotz Luftüberschuss örtlich Luftmangel und Temperaturspitzen auf, so dass Ruß und NO_x emittiert werden. Fortschrittliche Techniken verfolgen Einspritzverfahren mit homogener Gemischbildung, verbesserte Abgasrückführung und Reibungsminimierung. Langfristig werden sich die Brennverfahren von Otto- und Dieselmotor angleichen, zumal beide Motortypen den besten Wirkungsgrad in einem bestimmten Kennfeldbereich besitzen.³¹ Lkw-Motoren sind heute schon auf die Transportleistung des Straßengüterverkehrs optimiert. Standard sind direkteinspritzende Dieselmotoren mit Aufladung und teils mit Abgasrückführung. Die SCR-Technik mindert den Kraftstoffverbrauch um bis zu 5 %.

Start-Stopp-Automatiken und Schwungnutzsysteme bewähren sich im Stadtverkehr, wo typisch 45 % der Motorleistung nicht genutzt werden. Die automatische Motoran- und Abschaltung des VW 3 l-Lupo spart 3,9 % Kraftstoff.³² Zwischen 1995 und 2002 stieg die durchschnittliche Fahrzeugmasse um rund 100 kg zu Gunsten von stärkeren Motoren, elektrischen Nebenaggregaten (Klimaanlagen, Bordelektronik, Servohydraulik), Komfort, Sicherheit und Vielseitigkeit.³³ Leichtlaufreifen und aerodynamische Karosserieformen sollen künftig 2–6 % bzw. 10–20 % Kraftstoff einsparen.

Hybridfahrzeuge betreiben einen konventionellen Verbrennungsmotor und einen Elektromotor parallel.³⁴ Der Elektromotor dient zum Fahrbetrieb in der Stadt und der Verbrennungsmotor für Überlandfahrten. Der Verbrennungsmotor wird bei geringer Leistungsanforderung in einem wirkungsgradgünstigen Bereich betrieben und speist überschüssige Energie in die Batterie.

Vor dem Hintergrund langfristiger Patentstrategien werden nachfolgende die technischen Neuerungen auf den Gebiet der alternativen Antriebe und Kraftstoffe beleuchtet.

³⁰ Vgl. Umweltrat (2005), Abschnitt 3 (Reduktionspotentiale); Lackner (2005).

³¹ „Raumzündverfahren“, homogeneous charge compression ignition (HCCI), ein Hybrid aus Dieselmotor (Selbstzündung) und Ottomotor (homogen verteilte Ladung in der Brennkammer).

³² Durch verbesserten Antrieb, geringeres Gewicht, sowie verringerten Luft- und Rollwiderstand wurde der Kraftstoffverbrauch gegenüber dem Basismodell um mehr als einen Liter gesenkt:

³³ Der Sommerfahrbetrieb mit Klimaanlage verursacht EU-weit einen Mehrausstoß von 3 bis 8 % CO₂ bzw. 16 bis 28 g CO₂-eq/km, wobei zwei Drittel davon auf das Klimagas HFC 134a entfallen; vgl. ECCP 2003; Zur Selbstverpflichtung der Automobilindustrie siehe ACEA.

³⁴ Das Parallelhybrid, engl. „strong hybrid“, erlaubt drei Betriebsweisen: verbrennungsmotorisch, elektrisch und kombiniert.

2 Hybridfahrzeuge und regeneratives Bremsen

Keine andere Antriebsart übertrifft den heutigen Verbrennungsmotor an Leistung und Reichweite.³⁵ Doch die Umweltbelastungen durch fossile Brennstoffe in städtischen Ballungszentren schaffen Absatzmärkte für Hybridfahrzeuge.³⁶ Der vorteilhafte Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffminderung rechtfertigen den höheren technischen Aufwand.

2.1 Hybridkonzepte – kein Vorteil ohne Speicher!

Hybridantriebe bewegen Fahrzeuge durch eine Kombination unterschiedlicher Energiespeicher und Leistungswandler. In Hybridantrieben ohne Verbrennungsmotor wird eine Traktionsbatterie durch mechanische oder elektrische Kurzzeit-Energiespeicher gestützt. Im Bahn- und Busverkehr auf fahrdrahtlosen Streckenabschnitten sind „Trolleysysteme“ mit externer Energiezufuhr interessant. Als Speicher werden Superkondensatoren erprobt.³⁷

In Hybridantrieben mit Verbrennungsmotor gleicht ein zusätzlicher Elektroantrieb das Absinken des Wirkungsgrades der Verbrennungsmaschine bei Teillast aus. Das System wird auf die mittlere Fahrleistung bemessen. Die Leistungsunterschiede zur momentan benötigten Fahrleistung, etwa beim Beschleunigen und Anfahren, deckt der zusätzliche mechanische oder elektrische Energiespeicher. Die Verschaltung von Verbrennungs- und Elektromotor hintereinander oder parallel eröffnet unterschiedliche Konzepte:

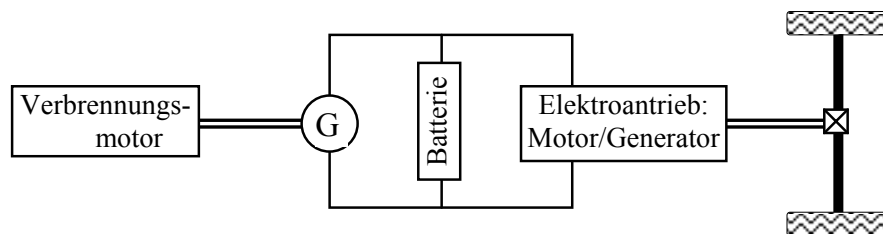
- *Serienhybride* stehen für Antriebkonzepte mit geringen Emissionen. Der Verbrennungsmotor ist vom Antrieb mechanisch entkoppelt und wird unabhängig von der Momentanleistung auf einen stationären Betriebspunkt mit günstigem Schadstoffausstoß oder Kraftstoffverbrauch eingestellt. Der Elektromotor muss die Antriebsleistung vollständig aufbringen. Die mehrfache Energiewandlung verschlechtert den Wirkungsgrad – zum Beispiel bei der hydraulischen oder elektrischen Leistungsübertragung von einem Schwungradspeicher in ein stufenloses Getriebe. Serienhybride passen ins Heck von Niederflurbussen. Der Dieselmotor läuft mit konstanter Drehzahl im Bestpunkt von Wirkungsgrad und Emissionen. Die zum Beschleunigen notwendige Spitzenleistung liefert eine Batterie. Der mechanische Wirkungsgrad zwischen Dieselmotor und Antriebsachse erreicht aufgrund der mehrfachen Energiewandlung höchstens 55%.

³⁵ Vgl. Bosch (2003), S. 728 ff. (Hybridantriebe).

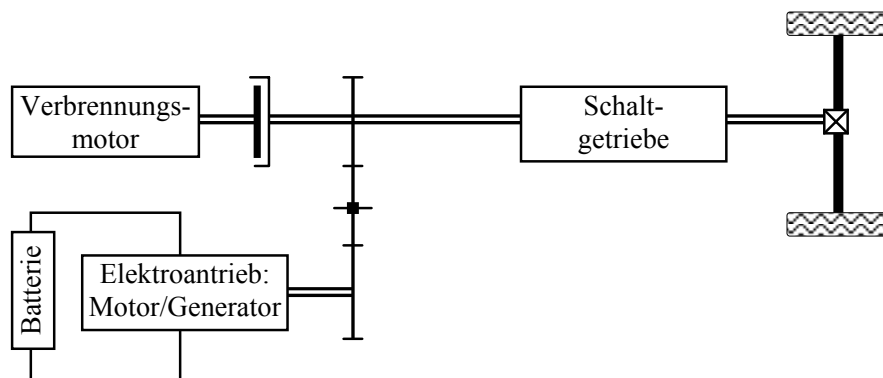
³⁶ Z. B. Toyota „Prius“, „Crown“ und „Estima“, Honda „Civic“, Audi „Duo“, Mercedes „F500“.

³⁷ Siemens Transportation Systems, Erlangen: „Sitras SES“ aus 1300 Kondensatoren (Montena 2,3 V/2400 F); vgl. *Innovation in Deutschland*, 4/2004, S. 28 f. (2004).

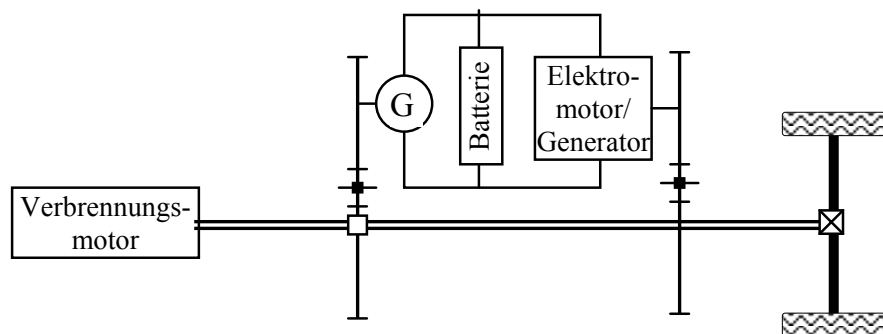
- *Parallelhybride* eignen sich als Antriebskonzept für geringen Kraftstoffverbrauch. Verbrennungs- und Elektroantriebe wirken zusammen und sind separat an die Einsatzerfordernisse dimensionierbar. Die Synchronisierung des mechanischen Getriebes ist einfach. Dafür bestehen konstruktive Einschränkungen durch die mechanische Verbindung der Antriebsmaschinen.



a) Serienschaltung



b) Parallelschaltung



c) Mischform aus Parallel- und Serienschaltung

Abbildung 3: Hybride Antriebskonfigurationen

<i>Speicher</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
Druckspeicher	hohe Energie je Speichermasse (Energiedichte)	Verluste durch Wandlung zwischen mechanischer Energie und Druckenergie
Schwungrad, rotierende Schwungmassen	keine Energiewandlung notwendig	stufenloses Getriebe erforderlich, weil die Schwungradrehzahl beim Beschleunigen sinkt; gefährlich beim Kippen
Batterie	Bremsenergienutzung	geringe Energie- und Leistungsdichte
Superkondensator	hohe Leistungsdichte, Zyklenstabilität	sehr geringe Energiedichte
Brennstoffzelle	große Reichweite	Lebensdauer, fehlende Wasserstoffinfrastruktur

Tabelle 1: Eigenschaften von Speichern für Hybridantriebe³⁸

Mischformen aus seriellern und parallelem Hybrid gleichen die Konzepte aneinander an. BMW erprobte ein Dampfhybridfahrzeug, das durch Kraft-Wärme-Kopplung wie bei Heizkraftwerken 10 kW Nutzleistung aus der Motorabwärme rückgewinnt – entsprechend einer Benzineinsparung von 1,5 l/100 km.³⁹ Die 800 °C heißen Abgase erzeugen über einen Kühlwasserkreislauf Dampf, der über einen Hubkolben auf die Kurbelwelle wirkt.

2.2 Parallelhybrid – das starke Gespann!

Diesel- und Elektroantrieb treiben die Antriebsachse gleichzeitig. Der starke Elektroantrieb gleicht die Teillastschwächen eines klein dimensionierten Dieselmotors aus, ohne dass – wie beim Serienhybrid – der Verbrennungsmotor eine Verschlechterung gegenüber dem herkömmlichen Fahrzeug erleidet. Das für den dieselmotorischen Antrieb benötigte Wechselgetriebe kann in den elektrischen Antriebszweig einbezogen werden. Der für ein kleineres Antriebsmoment ausgelegte, damit leichtere Elektromotor profitiert von der Momentenwandlung durch das nachgeschaltete Getriebe. Die Masse eines Elektromotors nimmt etwa proportional zum Motormoment zu.

Parallelhybride eignen sich für Lieferfahrzeuge, die kurze Strecken in Fußgängerzonen oder Lagerhallen emissionsfrei zurücklegen können. Der Elektromotor wird entweder *motorisch* zur Steigerung der Antriebsleistung

³⁸ Vgl. Bosch (2003), S. 729.

³⁹ Vgl. *Süddeutsche Zeitung*, 24.-26.12.2005, S. V1/2.

betrieben – oder *generatorisch* zum Aufladen der Traktionsbatterie, z. B. im Fall der Nutzbremmung (Bremsenergieerückspeisung). Gegenüber Otto- und Dieselmotoren glänzen Kraftstoffeinsparungen zwischen 25 und 34 %, ferner Minderungen des Schadstoffausstoßes – mit Ausnahme der NO_x-Emissionen.⁴⁰

Hilfsaggregate müssen im Parallelhybrid doppelt vorgesehen werden, damit das Fahrzeug bei ruhendem Dieselmotor Sicherheit und Komfort gewährleistet. In herkömmlichen Fahrzeugen ist der Startergenerator („Anlasser“) mit dem Verbrennungsmotor direkt gekoppelt. Beim Parallelhybrid kann die normale Kupplung Elektro- und Verbrennungsmaschine voneinander trennen.

TOYOTA baut in der zweiten Generation das Hybridfahrzeug „Prius“ in Serie. Bei einem Verbrauch von 4,3 l/100 km und erzeugt es 30 % weniger CO₂ und 89 % weniger smogbildende Emissionen als vergleichbare Benzin-fahrzeuge. Ein serielles/paralleles Hybrid aus Vierzylinder-Verbrennungsmotor (57 kW) und Nickel-Metallhydrid-Batterie (25 kW) treibt das Fahrzeug an. Beim Beschleunigen wirken Elektro- und Verbrennungsmotor gleichzeitig auf die Antriebsachse. Beim Anfahren an Ampeln oder im Stau ruht der Verbrennungsmotor und das Fahrzeug rollt rein elektrisch. Bei konstanter Geschwindigkeit ab 40 km/h treibt der Verbrennungsmotor allein; die Batterie dient zur Bremsenergieerückspeisung. Bei Autobahnfahrten versagt das 100 kg höhere Gewicht des Antriebs Vorteile gegenüber modernen Dieselmotoren.

DAIMLERCHRYSLER und GENERAL MOTORS entwickeln eine „Two-Mode“-Hybridtechnik mit starken, aber leichten Elektromotoren und Automatikgetriebe.⁴¹ Das P1/2-Hybridssystem in der S-Klasse mit einem Dieselmotor und zwei Elektromotoren leistet 241 kW und verringert den Kraftstoffverbrauch im Langstreckenbetrieb um 15 bis 25 %. Elektromotor und Diesel wirken mit derselben Drehzahl auf die Kurbelwelle. Als „Integrierter Starter-Generator“ (ISG) arbeitet der Elektromotor als Anlasser und Lichtmaschine. An Ampeln schaltet der Dieselmotor ab. Beim Anfahren schleppt der Elektromotor den Diesel an. Beim Bremsen arbeitet der Elektromotor, angetrieben von den Rädern über das Getriebe, als Generator und lädt die Batterie auf. Der zweite Elektromotor (25 kW) sitzt hinter der Kupplung, vor dem Getriebe, und dient dem elektrischen Fahrbetrieb in Innenstädten, während der erste Elektromotor und der Dieselmotor ruhen.

Das erste Diesel-Hybridfahrzeug, das die kalifornischen Emissionsvorschriften für „Partial Zero Emission Vehicles“ erfüllt, präsentierte der Autohersteller FORD auf der Detroit Motor Show 2004. Der Sportwagen „Mercury Meta One“ birgt einen 2,7-Liter-Common-Rail-Diesel-Motor V6 und einen Elektromotor. Das Abgasreinigungssystem besteht aus einem Dieselpartikel-

⁴⁰ Vgl. Umweltrat (2005), Abschnitt 3.1 (konventionelle Motortechnik).

⁴¹ Vgl. DaimlerChrysler (2005).

filter, einem Oxidationskatalysator und einem Harnstoff-SCR-System zur Reduzierung der NO_x-Emissionen.

2.3 „Mild-Hybrid“ – die leichte Alternative!

Hybridantriebe erfordern duale Speicher und Antriebe, die Fahrzeugmasse und Kosten in die Höhe treiben. Alternativ zum „Full-Hybrid“ kombinieren „Mild-Hybrid“-Konzepte daher Anlasser und Lichtmaschine zu einem integrierten Starter-Generator (ISG). Eine Start-Stopp-Automatik unterbricht den Verbrennungsmotor umgehend, wenn das Fahrzeug zum Stehen kommt und startet automatisch wieder, wenn der Fuß von der Bremse genommen wird. Bremsenergie wird in die Batterie zurückgespeist. Verbrauchsreduktionen um 15 Prozent sind möglich. „BMW X3“, die auf der Internationalen Automobilausstellung⁴² vorgestellte Konzeptstudie, ersetzt die Hochleistungsbatterie durch faustgroße Superkondensatoren.⁴³

2.4 Elektrofahrzeuge – nichts für Langstrecken!

Batteriefahrzeuge locken durch emissionsfreies Fahren⁴⁴, ein attraktives Drehmoment und verschleißarmen Betrieb. Akzeptable Reichweiten erfordern jedoch große und schwere Batterien! Die Energiedichten fortschrittlichster Akkumulatoren erreichen nur ein Hundertstel der von flüssigen Kraftstoffen. Antriebe mit Traktionsbatterien und Brennstoffzellen gelten bei gedrosseltem Tempo als sinnvoll, etwa auf Flughäfen und im innerstädtischen Busverkehr; außerorts fährt der Benzinantrieb konkurrenzlos preiswert. Elektrofahrzeuge mit Reichweiten von 100 km erschließen Nischenanwendungen.⁴⁵ Grundsätzliche Vorteile bestehen in der einfachen Technik und geringen Abwärme gegenüber Verbrennungsmotoren (samt ihren Hilfsaggregaten) und gegenüber heutigen Brennstoffzellen. Asynchron-, Reluktanz- und permanenterregte Synchronmotoren für kostengünstige Elektroantriebe unterschieden sich jedoch erheblich in der Entwicklungsreife und im Schaltungsaufwand.

⁴² Vgl. *Süddeutsche Zeitung*, 17./18.09.2005.

⁴³ Vgl. Kurzweil (2005), Kap. 3.

⁴⁴ Beim derzeitigen Energiemix ist die Energie- und CO₂-Bilanz des Elektroantriebs ungünstig. Elektroantriebe mit Akkumulatoren sind bei Primärenergieerzeugung in Gas-Dampf-Kraftwerken dem Verbrennungsantrieb gleichwertig, bei Kraft-Wärme-Kopplung überlegen.

⁴⁵ Vgl. Umweltrat (2005), Abschnitt 3.2: alternative Kraftstoffe.

3 Alternative Kraftstoffe und zukünftige Treibmittel

Als alternative Kraftstoffe gelten alle Treibmittel mit Ausnahme der Erdölprodukte Benzin und Diesel.

- Erdgas, Flüssiggas, Wasserstoff
- Pflanzenölkraftstoffe
- „synthetische“, aus Biomasse, Erdgas oder Kohle hergestellte Kraftstoffe

Alternative Kraftstoffe versprechen geringere Emissionen an CO_2 und anderen Luftschadstoffen (VOC)⁴⁶, insbesondere an polyzyklischen Aromaten (PAK). Erdgasheizungen schaffen schon heute in Ballungsräumen eine bessere Luftqualität als herkömmliche Erdöl- und Holzfeuerungen. Die Stromerzeugung in konventionellen Kraftwerken verursacht den größten CO_2 -äquivalenten Treibhausgasausstoß. Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen versprechen eine nachhaltige Entlastung – wenngleich nicht zu heutigen Preisen. Wasserstoff aus importiertem Solarstrom leuchtet heute noch als teure Zukunftsvision.

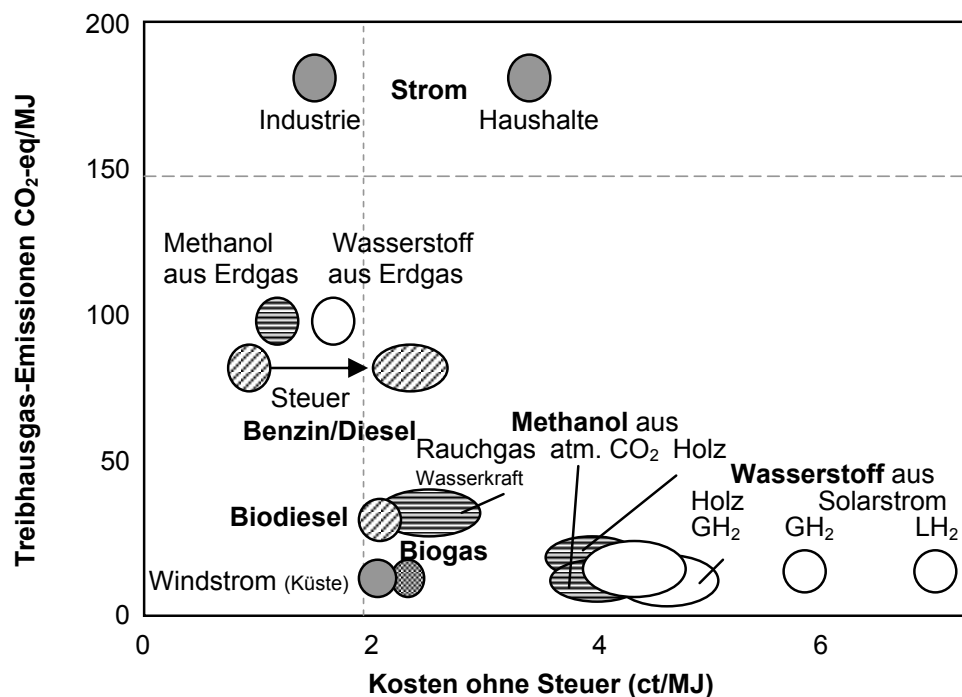


Abbildung 4: Kosten und Treibhausgas-Emissionen fossiler und regenerativer Kraftstoffe - nach Spech/Brandl/Pehnt (2001)

⁴⁶ VOC = volatile organic compounds; flüchtige organische Verbindungen.

3.1 Biokraftstoffe

Biokraftstoffe werden aus Biomasse erzeugt.

- Pflanzenölmethylester (Biodiesel), z. B. Rapsölmethylester (RME)
- Pflanzenöle
- Bioethanol aus Zuckerrüben und Getreide

Rudolf Diesel betrieb seinen Motor bereits 1912 erfolgreich mit Erdnussöl. Ein Liter Rapsöl ersetzt 0,96 l Diesel und senkt die effektiven CO₂-Emissionen um theoretisch 80%. Rapsöl und andere nichttrocknende Pflanzenöle bringen Jahreserträge von 1300 l/ha.

- Bei der *Kaltpressung* wird die gereinigte Ölsaart durch mechanischen Druck bei Temperaturen von unter 40 °C ausgepresst. Schwebstoffe werden durch Filtration oder Sedimentation entfernt. Der Presskuchen mit einem Restölgehalt von über 10% dient als eiweißreiches Tierfutter.
- Bei der zentralen Ölgewinnung wird die Ölsaart bei höheren Temperaturen gepresst, restliches Öl aus dem Ölpresskuchen mit Lösemitteln bei bis zu 80 °C herausgelöst, das Lösungsmittel verdampft und zum „Raffinat“ gereinigt. Der Extraktionsschrot kommt als Tierfutter zum Einsatz.

Biodiesel ist heute ein Gemisch aus Fettsäuremethylestern (Tabelle 2); reine Pflanzenöle finden wegen ihrer hohen Viskosität und Verkokungsneigung in direkteinspritzenden Dieselmotoren kaum noch Verwendung. Kaltgepresste Pflanzenöle erfordern eigens dafür umgerüstete Fahrzeuge. Biodiesel „B100“ muss oxidationsstabil sein und weitere Qualitätsmerkmale aufweisen.⁴⁷

Flammpunkt:	> 120°C
Wassergehalt:	< 500 mg/kg
Schwefelgehalt:	< 10 mg/kg
Oxidationsstabilität:	> 6 h bei 110 °C
Dichte:	860 ... 900 kg/m ³ (15 °C)
Viskosität:	3,5 ... 5,0 mm ² /s
Cetanzahl:	> 51
Filtrierbarkeit (CFPP):	< +5 ... -20 °C (Klasse A bis F)

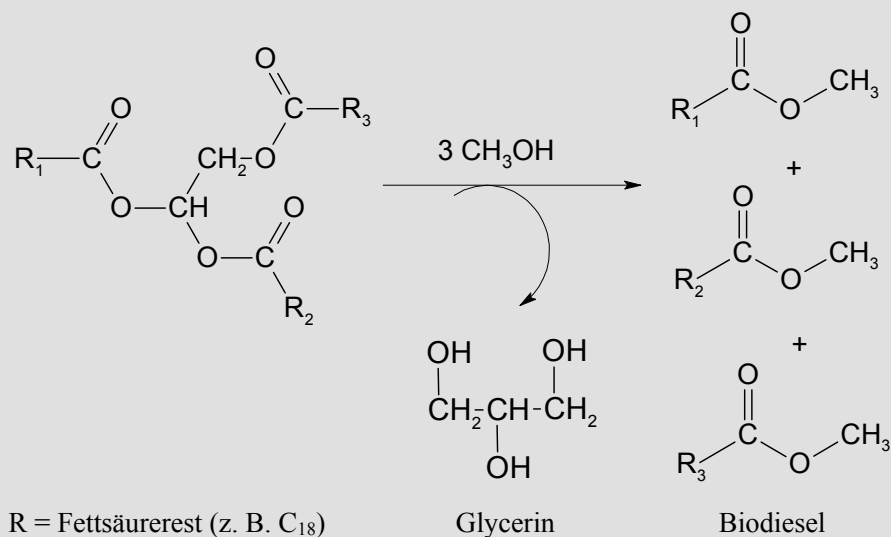
Im Jahr 2003 deckte Biodiesel (RME) 0,9 % des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr.⁴⁸ Zum Jahresende 2005 betrug die Produktionskapazitäten rund zwei Millionen Tonnen. Ohne Schaden für Fahrzeuge können fossilem Dieselöl bis zu 5 % Biodiesel⁴⁹ oder 15 % Ethanol bzw. Methanol zugesetzt werden. Durch FAME-Beimischung erzeugte „Blends“ („B5“) müssen die Euronormen für reinen Dieselmotorkraftstoff erfüllen.

⁴⁷ Eigenschaften von Fettsäure-Methylestern (FAME) nach EN 14214.

⁴⁸ Verbrauch in Deutschland 2001: 27.948.477 t Ottokraftstoff und 28.545.236 t Dieselmotorkraftstoff.

⁴⁹ 2004 erstmals BP/Aral infolge der Befreiung von Biokraftstoffen von der Mineralölsteuer.

Herstellung: Umesterung der Triglyceride im Pflanzenöl mit 10 % Methanol und starken Basen (Kaliumhydroxid, Natriumhydroxid, Alkoholate) bei ca. 60 °C. Der dreiwertige Glycerinrest und drei einwertige Methanolreste tauschen den Platz; es entstehen drei Fettsäuremethylester-Moleküle. Das Nebenprodukt Glycerin wird vom Biodiesel abgetrennt und findet z. B. in der Kosmetikindustrie Verwendung. Rapsschrot, der Rückstand aus der Ölpressen, wird als Futtermittel eingesetzt.



Abkürzungen

- PME = Pflanzlicher Methylester nach DIN EN 14214
- RME = Rapsölmethylester nach DIN EN 14214
- SME = Sojaölmethylester oder Sonnenblumenmethylester
- SEE = Sojaethylester (z. B. in Brasilien)
- PME = Palm- oder Palmkernölmethylester
- AME = Altspisefettmethylester (UFOME: Used frying oil methyl ester)
- TME = Rindertalgester (Tallow Methyl Ester)
- FAME = Fettsäuremethylester aus sonstigen Pflanzen- und Tierstoffen nach DIN EN 14214

Eigenschaften

- bessere Schmiereigenschaften als Diesel
- korrosiv (freie Fettsäuren, wasserlöslich); greift Schläuche, Dichtungen, Einspritzdüsen, Einspritzpumpen und Beschichtungen an
- reichert sich im Motoröl an; Kristallitbildung < -6 °C
- Wassergefährdungsklasse 1 (schwach wassergefährdend); Diesel 2 (wassergefährdend), Pflanzenöl gilt als nicht wassergefährdend

Tabelle 2: Herstellung und Eigenschaften von Biodiesel⁵⁰

⁵⁰ Zur ersten Information: www.wikipedia.de, Stichwort: Biodiesel.

Die Emissionen von Biodiesel enthalten weniger mutagen wirksame Rußpartikel⁵¹, Restkohlenwasserstoffe und CO, jedoch mehr NO_x und dreimal mehr N₂O als Deselemissionen. Die Ökobilanz von Biodiesel scheint nur günstig, weil seine Bereitstellung aus den Kuppelprodukten Rapsschrot und Glycerin vergleichsweise wenig Energie aus erschöpfbaren Quellen verbraucht. Der dynamische Ausbau der Biomassenutzung kollidiert mit den agrarpolitischen Rahmenbedingungen des Strukturwandels in der Landwirtschaft, den Zielsetzungen des Naturschutzes⁵² – und nicht zuletzt den benötigten riesigen Agrarflächen. Neue Anbauflächen für Biomasse erzwingen höhere Flächenerträge bei der konventionellen Pflanzenproduktion, die Senkung der Überproduktion und eine schrumpfende Bevölkerungszahl. Der Einsatz einheimischer Biomasse im Verkehrssektor übersteigt die verfügbare Anbaufläche um Faktoren! Raps auf Deutschlands gesamter Agrarfläche von 12 Millionen Hektar würde knapp 15 % des deutschen Dieserverbrauchs decken! In vierjähriger Fruchtfolge kann die Rapsmonokultur bestenfalls 2 bis 5 % des benötigtem Dieselmotorkraftstoffes ersetzen und 1 bis 4 % der Treibhausgasemissionen vermeiden helfen.⁵³ Der Import von Biokraftstoffen oder biogenen Rohstoffen⁵⁴ aus Entwicklungsländern widerspricht der wichtigeren Nahrungsmittelversorgung.

Rüben, Raps, Soja⁵⁵ und Getreide werden in intensiver Landwirtschaft produziert; Düngung und Pestizide führen zur *Eutrophierung und Schadstoffbelastung* von Gewässern und fördern die Sommersmogbildung durch Lachgas und Ammoniak. Für den Naturschutz relevante Auswirkungen sind: Grundwasserneubildung, Artenschutz, Biodiversität, Pollenflug, genetische Uniformität, innerartliche Veränderung des Genpools von Wildpopulationen, bis hin zu Totalausfällen durch Pilz- und Viruskrankheiten.

Betrachtet man den „biogenen Kohlenstoff“ bei der Verbrennung als klimaneutral⁵⁶, so zeigt die Klimabilanz von Biokraftstoffen, dass der Energieertrag vom Energieaufwand für Pflanzenanbau, Transport und Verarbeitung in Teilen wieder verzehrt wird. Biokraftstoffe reduzieren Treibhausgasemissionen, doch sie erwirtschaften geringere Energieerträge als die Verbrennung fester Biomasse – und zwar je Anbauflächeneinheit bzw. je Kilometer unterschiedlich. Der Energieertrag auf den Anbauflächen beträgt bei RME etwa 45

⁵¹ Vgl. Bänger (2000).

⁵² Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), Flora-Fauna-Habitatrichtlinie (FFH). Das europäische öko-logische Netz NATURA 2000 beansprucht >8,6 % der Landesfläche; hinzu kommen Trittsstein-Lebensräume zwischen den Gebieten, EU-Vogelschutzgebiete (derzeit 7 %), erosionsgefährdete Flächen und Gewässerrandstreifen; vgl. www.bfn.de/03/030303.htm.

⁵³ www.umweltbundesamt.de.

⁵⁴ Engl. „cash crops“ für verkaufbare Energiepflanzen.

⁵⁵ Häufigster Rohstoff für Biodiesel in den USA.

⁵⁶ Die CO₂-Neutralität, wonach bei der Verbrennung von Biokraftstoffen dieselbe Menge CO₂ entsteht, die der Atmosphäre zuvor von der Pflanze entzogen wurde, muss noch bewiesen werden. Für Allgemeines über Ökobilanzen siehe Stahl (1997).

bis 50 GJ/ha, bei Bioethanol aus 50 % Zuckerrübe und 50 % Weizen ca. 87 GJ/ha, bei BTL-Kraftstoffen 85 bis 90 GJ/ha. Schnellwachsende Baumarten erzielen einen fünffach höheren Energieertrag je Hektar als Raps.

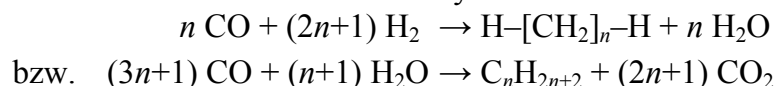
- Ethanol aus Zuckerrüben spart jährlich 12 t CO₂/ha ein, Biodiesel nur ein Sechstel davon.⁵⁷ Die Vergasung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen birgt die größten THG-Einsparpotenziale⁵⁸ pro Fläche, wenn daraus Wasserstoff für den Betrieb von Brennstoffzellen erzeugt wird.
- Pro Fahrzeugkilometer bzw. Liter Kraftstoff spart Biodiesel als Ersatz für konventionellen Diesel 57 g CO₂-eq/km ein; Zuckerrüben-Ethanol als Ersatz für Benzin 75 g CO₂-eq/km ein.

EU-Studien⁵⁹ für das Jahr 2010 setzen Mittelklasse-Fahrzeuge mit einem THG-Ausstoß von 139 g CO₂/km für Otto- bzw. 131 g CO₂/km für Diesel-PKW an, sowie 118,6 g CO₂/km für Benzin-Hybrid-Fahrzeuge.

Die *Erzeugungskosten*⁶⁰ von Biodiesel (0,35 bis 0,49 €/l) liegen über denen von herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff (0,286 €/l). Absatzpreise der Kuppelprodukte Rapsschrot und Glycerin fließen maßgeblich ein.⁶¹ In Einzelfällen kann Pflanzenöl aus hofeigener Produktion mit den Bereitstellungskosten für Diesel konkurrieren. Bei Bioethanol liegen die Produktionskosten im günstigsten Fall bei 0,45 bis 0,55 €/l Benzinäquivalent. BTL-Kraftstoffe aus FISCHER-TROPSCH-Prozessen werden mit 0,60 €/l angesetzt.

3.2 Synthetische Kraftstoffe

Aus Synthesegas (H₂ und CO) aus der Dampfreformierung von Erdgas oder Kohle zaubert die FISCHER-TROPSCH-Synthese⁶² „Syndiesel“, ein hochwertiges Gemisch aus schwefel- und aromatenfreien Kohlenwasserstoffen. Der unter dem Stichwort „Kohleverflüssigung“ bekannte Prozess erzeugt in der exothermen ersten Stufe Synthesegas und in der zweiten Stufe bei 190 °C in Gegenwart von Eisen- und Cobalt-Katalysatoren ein Alkan/Alken-Gemisch.



⁵⁷ Vgl. BMU (2004).

⁵⁸ THG = Treibhausgas; Ausstoß in Kohlendioxidäquivalenten (CO₂-eq).

⁵⁹ European Council for Automotive Research and Development (EUCAR), Conservation of Clean Air and Water in Western Europe (CONCAWE), EU-Kommission.

⁶⁰ Vgl. Umweltrat (2005), Abschnitt 3.2.1: Biokraftstoffe.

⁶¹ Vgl. *VDI nachrichten*, 27.02.2004, S. 11.

⁶² Kohle-Gas-Benzin-Verfahren (1925) bei 190°C und 0–20 bar; Vgl. Kurzweil (2003), S. 216.

Abhängig von den Katalysatoren entstehen mehr Diesel- bzw. Ottokraftstoffe. Als Nebenprodukte entstehen Flüssiggas und Paraffine. Der Kraftstoff kann mit Diesel gemischt und in herkömmlichen Motoren verbrannt werden.

CTL- (Coal-to-Liquid) und *GTL-Kraftstoffe* (Gas-to-Liquid) werden seit 1938 in Deutschland hergestellt. Das Verfahren wurde nach dem Zweiten Weltkrieg in Südafrika weiterentwickelt. Für GTL kann bei der Rohölförderung bislang abgefackeltes Erdgas genutzt werden. Wegen der hohen Kosten ist die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe auf Sondermärkte begrenzt.

*Sunfuels*⁶³ oder *BTL-Kraftstoffe* werden durch Vergasung von Biomasse – aus Holzhackschnitzeln, Stroh, Ganzpflanzen, Tiermehl, Klärschlamm, Hausmüll und Abfällen – und nachfolgende FISCHER-TROPSCH-Synthese produziert. BTL-Kraftstoffe aus Energiepflanzen und Holz bringen einen rechnerischen Jahresertrag von ca. 4050 l/ha. Aus einer Tonne Holz erhält man 100 Liter Diesel. Ein Liter BTL-Kraftstoff ersetzt 0,93 l Diesel bei einer CO₂-Minderung von über 90 %. BTL kann in Reinform oder in Mischungen ohne Anpassung des Motors verwendet werden. Bei der BTL-Erzeugung fällt ein großer Teil der in der Biomasse gespeicherten Energie als Prozessabwärme an, so dass die Energieausbeute im Kraftstoff nur 40 bis 50 % beträgt.⁶⁴ Pionier der BTL-Produktion ist die Firma CHOREN im sächsischen Freiberg.⁶⁵ Das mehrstufige Verfahren gleicht den geringen Wasserstoffgehalt der Biomasse durch Zugabe von Wasserstoff aus.⁶⁶

1. Niedertemperaturvergasung von trockener Biomasse bei 400–600°C zu Biokoks und teerhaltigem Schwelgas (vgl. Tabelle 3).
2. Hochtemperaturvergasung (Carbo-V-Verfahren) von Schwelgas, Sauerstoff, Restkoks und Asche am Kopf des Reaktorturms bei 1300–1500°C. Teer und langkettige Kohlenwasserstoffe bilden einen heißen Gasstrahl aus Kohlenstoffoxiden, Wasserstoff und Wasser, der im Mittelteil auf seitlich eingeblasenen Biokoks trifft. Schlacke setzt sich ab, heißes teerfreies Rohgas entweicht im Oberteil des Reaktors. Flugasche und Restkoks werden durch ein Staubfilter abgetrennt und rückgeführt.
3. Entstaubtes Synthesegas wird im Sprühturm gewaschen und reagiert im *Fischer-Tropsch*-Mehrstrangröhrenreaktor mit zugeführtem Wasserstoff bei 300 °C am Fe/Co-Katalysator zu paraffinreichem⁶⁷ Designerkraftstoff.

⁶³ Engl. „*Syn(thetic) Fuel*“ aus fossilen Energieträgern, *Sunfuels* aus Biomasse. *BTL* = Biomass-to-Liquid; vgl. a) www.btl-plattform.de; Kaltschmitt/Hartmann (2001); Kamm et al. (2005).

⁶⁴ Vgl. Umweltrat (2005), Abschnitt 3.2: Alternative Kraftstoffe.

⁶⁵ Sunfuel-Kooperation Choren Industries GmbH, Volkswagen AG, DaimlerChrysler AG.

⁶⁶ Vgl. Kurzweil (2003), S. 221; weitere Literatur siehe dort.

⁶⁷ Paraffin = langkettige Kohlenwasserstoffe.

Bei der Niedertemperaturkonvertierung (NTK) werden organische Reststoffe, von Klärschlamm bis hin zu Kunststoffen, unter Ausschluss von Luftsauerstoff bei 350–450 °C in kleinere Moleküle gespalten (gecrackt).

Prozess	Produkte
Vergasung Carbo V, ARGE	Trockene Biomasse → Synthesegas → Syndiesel, Methanol
Shell-HTU	Biomasse + superkritisches Wasser → „Bioöl“ → Benzin/Diesel
Hydrierung BERGIUS-PIER	Biomasse + Wasserstoff → Syndiesel
Pyrolyse	Trockene Biomasse → Bioöl → Benzin/Diesel

Tabelle 3: Thermochemische Syntheseverfahren für BTL-Treibstoffe⁶⁸

3.3 Energetische Nutzung von Biomasse

Biomasse zur energetischen Nutzung, also zur Verbrennung, fällt in Form von Reststoffen (Stroh, Altholz, Kompost) und Energiepflanzen (Getreide) an. Naturschutzmaßnahmen setzen erhebliche Mengen an Waldsaum- und Heckenpflegeholz sowie Landschaftspflegeheu frei. Je nach Verwendungsart können bei der Strom- und Wärmeerzeugung vergleichbare oder höhere CO₂-Einsparungen als im Verkehr erreicht werden. Die Stromerzeugung aus Biomasse eignet sich als Ersatz für Kohlefeuerungen, nicht aber für die umweltreineren Gasfeuerungen.

Die größte flächenbezogene CO₂-Einsparung bieten KWK-Anlagen mit Biomasse, zum Beispiel aus Kurzumtriebsholz (50 bis 100 g CO₂-eq/kWh_{el}) – im Gegensatz zu Kohlestrom (800 bis 1000 g CO₂-eq/kWh_{el}) und Erdgas (350 bis 500 g CO₂-eq/kWh_{el}). Die Verbrennung von Getreide erzeugt trotz guter Ausbrandqualität höhere Emissionen an NO_x, CO, SO₂, HCl, Staub und halogenierten Aromaten (je nach Düngung) als naturbelassenes Holz.

Parameter	Naturbelas- senes Holz	Getreide- stroh	Roggen	Weizen	Triticale
Aschegehalt in %	0,7	5,7	2,0	2,7	2,1
Ascheschmelzpunkt (°C)	1330	960	740	710	690
Kalium (%)	0,2	1,1	0,7	0,5	0,6
Stickstoff (%)	0,32	0,47	1,91	2,28	1,68
Schwefel (mg/kg)	318	740	1100	1200	1100
Chlor (mg/kg)	125	2500	1610	430	690

Tabelle 4: Zusammensetzung von Biobrennstoffen⁶⁹

⁶⁸ Vgl. Ullmann (1989); Vergasungsmittel z.B. Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Wasserstoff.

⁶⁹ Nach Daten des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz.

3.4 Erdgas⁷⁰ – Ökotreibstoff der Zukunft?

In Deutschland sind zwei Erdgassorten gebräuchlich: „H-Gas“ mit 87 bis 99 Vol.-% Methan ist bundesweit verfügbar und zeichnet sich durch einen hohen Heizwert (10,0...11,1 kWh/m³), sowie geringen Stickstoff- und Kohlendioxid-Anteil aus. „L-Gas“ in Bremen, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen hat einen geringeren Methangehalt und Heizwert. 19% des Erdgases stammen aus heimischen Quellen, 37% aus Russland, der Rest aus Nordeuropa.

- *Komprimiertes Erdgas* (Compressed Natural Gas, CNG), überwiegend Methan, bei einem Druck von 200 bar beansprucht das 4,5fache Volumen von Benzin in derselben Energiemenge. Die Sicherheitsprüfung des TÜV schreibt für Fahrzeugtanks einen Berstdruck von 600 bar vor. Wegen des Verhältnisses C : H = 1 : 4 bildet Erdgas weniger CO₂-Emissionen als Benzin (C : H = 1 : 2); die Oktanzahl beträgt ca. 130. Die Speicher-kapazität von *verflüssigtem Erdgas* (LNG) bei -162 °C ist dreimal höher, doch Umwandlungsverluste machen LNG ungünstiger als CNG.
- *Flüssiggas* (Liquified Petroleum Gas, LPG, „Autogas“): Das Propan-Butan-Gemisch fällt mit 2 bis 4 kg/t als Nebenprodukt der Erdölförderung an.
- *Hythane*, ein Gemisch aus 20% Wasserstoff in Erdgas, wurde in einem Stadtbus in Quebec getestet.

Erdgas eignet sich als reiner Kraftstoff in komprimierter oder verflüssigter Form besonders für Ottomotoren. In Europa bieten Ford, Isuzu, Opel, Renault, Peugeot und Volvo serienmäßig bivalente Fahrzeuge mit Flüssiggasantrieb an, die sowohl Erdgas als auch Benzin nutzen – teilweise mit einem schlechteren Wirkungsgrad für Erdgas. Angepasste Motoren erreichen durch die bessere Klopfestigkeit von Erdgas das Niveau eines Dieselantriebs und eine Emissionsminderung von gut 20 % CO₂. Erdgas brennt nur im 5 bis 15 %igen Gemisch mit Luft und einer Zündquelle von mindestens 540 °C. Die Verbrennung verläuft rußfrei zu einem NO_x-armen, geruchlosen Abgas.

Die Treibhausgas-Einsparungen von Erdgas – je nach Transportweg und Verlusten in Pipelines – können unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette 30 % unter denen von Benzin liegen. Der CO- und Kohlenwasserstoffausstoß ist geringer als beim benzinbetriebenen Ottomotor, der NO_x-Ausstoß geringer als beim Dieselmotor; Partikel und Benzol fehlen gänzlich. Die unerwünschte Kondensation von Kraftstoff beim Kaltstart an Motorteilen tritt bei Erdgas nicht auf. Offensichtlich werden die Vorteile von Erdgas im Schwerlastverkehr mit fortgeschrittener Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung. Die Stromerzeugung aus Erdgas verspricht eine 10-mal größere Treibhausgas-einsparung als im Verkehrsbereich.

⁷⁰ Vgl. Umweltrat (2005), Abschnitt 3.2.2; Bach (2002); Kurzweil (2003), Kap. 10.2.

<i>Kraftstoffe</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
Erdgas: komprimiert (CNG) verflüssigt (LNG)	niedrigste Emissionen; 25% geringere CO ₂ - Emission je Energieeinheit als Benzin und Diesel; erfüllt Sicherheitsstandards	geringe Speicherdichte, d. h. große Tanks und kurze Reichweite; für Flotten sinnvoll
Flüssiggas (LPG)	niedrige Emissionen; 10-16% geringere CO ₂ - Emission je Energieeinheit als Benzin und Diesel	wie Erdgas, jedoch bessere Speicherdichte und Handhabung;
Biokraftstoffe: Ethanol, Rapsöl, Rapsölmethylester	CO ₂ -Vorteil zu Diesel; biologisch abbaubar; schwefel-/aromatenarm	unwirtschaftlich; korrosiv; subventionierte Landwirtschaft; höhere NO _x -Emissionen;
Wasserstoff (H ₂)	keine Schadstoffemissionen außer NO _x in Verbren- nungsmaschinen	ungünstige Energie- und Ökobilanz bei Herstellung aus fossilen Ener- geträgern; geringe Speicherdichte; unwirtschaftlich (direkte Nutzung der Solarenergie günstiger)
Batterieantriebe	keine Emission am Ver- wendungsort; geräuscharm	geringe Energiedichte, d. h. schwer. Emissionsverlagerung zum Kraft- werk; Recyclingproblematik
Brennstoffzellen- antriebe	emissionsarm; hoher Wirkungsgrad	Verluste in Zusatzaggregaten; Ab- wärme; mäßige Lebensdauer; Reingas erforderlich

Tabelle 5: Vor- und Nachteile von alternativen Kraftstoffen im Überblick⁷¹

Methan ist auch aus Synthesegas oder durch hydrierende Druckvergasung von Biomasse zugänglich. Durch das BERGIUS-PIER-Verfahren⁷² können aus Erdgas oder Kohle GTL-Kraftstoffe oder Wasserstoff hergestellt werden. Aus energetischer und ökologischer Sicht hat synthetischer Diesel auf Erdgasbasis keine Vorteile gegenüber dem direkten Erdgaseinsatz. Qualitätsvorteile bestehen gegenüber Diesel in der Zündwilligkeit und dem Schadstoffausstoß, der frei von Schwefel, Stickstoff und Aromaten ist.

⁷¹ Vgl. auch: www.umweltbundesamt.de/verkehr/downloads/aerltant.pdf.

⁷² BERGIUS-Verfahren zur Kohlehydrierung (1913), von PIER bei BASF weiterentwickelt. 4 t Kohle lieferten 1 t Treibstoff (IG Farben, 1927); vgl. Ullmann (1989).

3.5 *Biogas – Methan aus dem Stall!*

Biogas ist das methanhaltige Fermentationsprodukt aus der Vergärung von Gülle, Maissilage, Agrarprodukten und Abfällen der Nahrungsmittelindustrie. Biogas enthält etwa 55 % Methan, erhebliche Anteile an Kohlendioxid und Spuren von Schwefelwasserstoff und Siliciumverbindungen. Es ist wie Erdgas nutzbar, erfordert jedoch weitere, zurzeit nicht wirtschaftliche Reinigungsschritte. Im Jahr 2005 gab es in Deutschland rund 4000 Biogasanlagen.

Biomethan aus Silomais bringt einen Jahresertrag von 4700 m³/ha bzw. 3384 kg/ha. 1 kg Methan ersetzt ca. 1,4 l Ottokraftstoff und kommt ohne Anpassung in Erdgasfahrzeugen zum Einsatz.⁷³

3.6 *Methanol – Holzgeist im Tank!*

Methanol, als Übergangsstrategie zur Wasserstofftechnik diskutiert,⁷⁴ ist aus fossilen Energieträgern und Biomasse zugänglich. Methanol setzt am wenigsten Treibhausgas-Emissionen frei, wenn es aus Biomasse erzeugt wird. Methanol wird technisch an Cu/ZnO-Katalysatoren bei 260°C und 60 bar aus Synthesegas hergestellt.⁷⁵ Die vorausgehende Dampfreformierung von Erdgas gelingt an Nickeloxid-Katalysatoren bei 720 °C.



Methanol (M100) kann in umgerüsteten Ottomotoren verbrannt werden.⁷⁶ Es wirkt stärker korrosiv als Diesel und Benzin und kann nicht in herkömmlichen Kraftstofftanks gelagert werden. Sauerstoffhaltige Kraftstoffe⁷⁷ haben einen geringeren Heizwert als Kohlenwasserstoffe, weil der chemisch gebundene Sauerstoff nicht an der Verbrennung teilnimmt. Der Gemischheizwert des brennbaren Luft-Kraftstoff-Gemisches ist jedoch bei gleichem stöchiometrischen Verhältnis für alle flüssigen Kraftstoffe und Flüssiggase nahezu gleich groß (etwa 3,5 ... 3,7 MJ/m³).

LURGI und SÜDCHEMIE wandeln Methanol im Pilotmaßstab über Propen in MTG-Treibstoffe um.⁷⁸

⁷³ www.umweltbundesamt.de

⁷⁴ Vgl. Kurzweil (2003): Kap. 5 (DMFC), Abschnitt 10.5 (Wasserstoff aus Methanol) und 10.7.

⁷⁵ Vgl. Ullmann (1989); *discover Süd-Chemie*, 2/2004, S. 23; 2/2005, S. 18.

⁷⁶ M85 in den USA als oktanzahlverbesserndes Additiv.

⁷⁷ Engl. "oxygenates": Alkohole, Ether, Fettsäuremethylester.

⁷⁸ MTP = Methanol To Propylen; MTG = Methanol To Gasoline; s. a. DME (Abschnitt 3.8).

3.7 *Bioethanol – Fahren mit Alkohol!*

Bioethanol wird durch Fermentation von Stärke (Getreide, Mais), Zucker, Melasse (Zuckerrohr, Zuckerrüben), Cellulose und Hemicellulose (Stroh⁷⁹, Holz, Abfallbiomasse) gewonnen. Die Vergärung von Zuckerpflanzen und Getreide ist Stand der Technik insbesondere in Brasilien und in den USA. Die Ethanolproduktion in Deutschland betrug 2005 rund 885000 Tonnen.⁸⁰

Bestechend einfach sind Herstellung, Verteilung und Anwendung: Ethanol aus Getreide, Zucker und Holz bringt Jahreserträge von 2500 l/ha. Ein Liter ersetzt 0,66 l Benzin bei einer CO₂-Minderung von 30 bis 70 %. Bioethanol „E 85“, eine Mischung aus 85 % Ethanol aus Zuckerrüben und Kartoffeln und 15 % Benzin wird zurzeit von regionalen Initiativen in Straubing⁸¹ und Kemnath erprobt. Auf dem deutschen Markt bieten FORD „Focus“ und SAAB „95 BiPower“ den serienmäßigen Betrieb mit Ethanol an. In Brasilien ist reines Ethanol (E 100) für adaptierte Ottomotoren verfügbar.⁸²

Bioethanol gelangt über ETBE⁸³ in Ottokraftstoffe. Das herkömmliche Antiklopfmittel MTBE (Methyl-Tertiärbutyl-Ether) ist fossiler Herkunft, wird in der Atmosphäre rasch durch Hydroxylradikale abgebaut, persistiert aber bei Auswaschung durch Regen im Boden.⁸⁴ Mit Glycerin als Nebenprodukt der Biodieselgewinnung könnte Glycerin-*tert*-Butylether (GTBE) wichtig werden.⁸⁵

Biogenes Aceton, Butanol und Ethanol werden als ABE-Treibstoffzusatz bezeichnet. Eine Entwicklung von HENKEL ist die 10%ige Beimischung von Ethanol zu fossilem Diesel, die bislang wegen der Dampfdruckanomalie und Wasserlöslichkeit vermieden wurde. Durch höhere Verbrennungstemperaturen können innermotorisch bis zu 60% der Partikelemissionen vermieden werden.

3.8 *Dimethylether – einfacher als Methan!*

Dimethylether (DME, CH₃-O-CH₃), mit einer Cetanzahl um 55, verbrennt rußarm mit verminderter Stickoxidbildung. Aufgrund der geringen Dichte (Gas 2,05 g/l, verflüssigt 0,667 kg/l) und des hohen Sauerstoffanteils ist der Heizwert (28,8 kJ/kg) weitaus geringer als von Diesel (42,5 kJ/kg). DME siedet bei 23 °C; der gasförmige Zustand erfordert eine Anpassung des Einspritzsystems und

⁷⁹ Die kanadische Firma IOGEN gewinnt Bioethanol aus Stroh.

⁸⁰ Südzucker (Zeitz), Mitteldeutsche Bioenergie (Zörbig), Nordbrandenburger BioEnergie (Schwedt), Getreide AG (Rendsburg).

⁸¹ Vgl. *Süddeutsche Zeitung*, 25./26.03.2006, S. 45; Thermodruckhydrolyse (ATZ-Verfahren).

⁸² „Flexible-Fuel-Motoren“ (u. a. von VW, Bosch) verbrennen Ethanol in jedem Mischungsverhältnis mit Benzin. Als Kraftstoff E 100 (in Brasilien), als Additiv E 24 (Brasilien); E 10 und E 85 (USA).

⁸³ ETBE = Ethyl-Tertiärbutyl-Ether: Addukt aus 45,1 % Ethanol und 54,9 % fossilem Isobuten.

⁸⁴ Vgl. *Nachr. Chem.*, Bd. 53, 2005, S. 895.

⁸⁵ Mit Isobuten in Gegenwart von *p*-Toluolsulfonsäure entstehen vorteilhafte GTB-Diether.

Überlegungen zur Fahrzeugsicherheit. Dimethylether aus Methanol kann katalytisch an ZSM 5-Zeolithen in Benzin umgewandelt werden. Auch Dimethoxypropan und Di-*n*-pentylother werden erprobt.

Synthesegas → Methanol → DME → Olefine → MTG-Treibstoff

3.9 Wasserstoff – Hoffnung des 21. Jahrhunderts!

In Brennstoffzellen emissionsfrei verstromter Wasserstoff leuchtet als Zukunftsvision für mobile und stationäre Anwendungen.⁸⁶ Die amerikanische Regierung⁸⁷, die Internationale Energieagentur der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) und europäische Experten⁸⁸ räumen Wasserstoff im mobilen Bereich große Chancen ein. Im Kraftwerksbereich ist die direkte Nutzung des regenerativ erzeugten Stroms wirtschaftlicher und umweltverträglicher als der Umweg über das Speichermedium Wasserstoff.⁸⁹ Im Verkehrsbereich existieren zwei langfristige Optionen:

- Verstromung von Wasserstoff in Brennstoffzellen (DaimlerChrysler u.a.)
- Verbrennung von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren (BMW)

Die Brennstoffzelle brilliert mit ihrem gegenüber dem Verbrennungsmotor besseren Wirkungsgrad. Mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge verursachen vernachlässigbare Emissionen, insbesondere kein CO₂. Die Energie- und Ökobilanz aber fällt mit den Primärenergieträgern und der vorgelagerten Prozesskette der Wasserstoffherzeugung. Aus fossilen Ressourcen fordert die Wasserstoffgewinnung einen wenigstens dreimal höheren Primärenergieaufwand und erzeugt höhere Treibhausgasemissionen als die Herstellung von Benzin (12,5 g CO₂-eq/MJ) und Diesel (14,2 g CO₂-eq/MJ):

- Dampfreformierung von Erdgas (100 g CO₂-eq/MJ)
- Dampfreformierung von Methanol
- Kohlevergasung mit CO-Shift (190 g CO₂-eq/MJ)
- Kværner-Verfahren: Kohlenwasserstoffspaltung im Lichtbogen
- Vergasung oder Vergärung von Biomasse
- Wasserelektrolyse (mit Kohlestrom 420 g CO₂-eq/MJ, mit Strom aus Windkraft 9,1 CO₂-eq/MJ; mit Nuklearstrom 7 g CO₂-eq/MJ)
- An Nickel-Aluminium-Zinn-Katalysatoren bei 200 °C kann Wasserstoff sogar aus Glucoselösungen gewonnen werden (neben Alkanen und CO₂).⁹⁰

⁸⁶ Vgl. Kurzweil (2003), Kap. 10: Wasserstoffgewinnung, -speicherung und -nutzung.

⁸⁷ US Department of Energy im Jahr 2004: „President's Hydrogen Initiative“ mit 1,2 Mrd. Dollar.

⁸⁸ Expertengruppe zur Wasserstoffeinführung (High Level Group on Hydrogen and Fuel Cells).

⁸⁹ Wasserstoff ist kein Primärenergieträger.

⁹⁰ ACR (Aqueous Carbohydrate Reforming); vgl. DaimlerChrysler (2003).

Die Umstellung des deutschen Autoverkehrs würde einen Bedarf von 700 PJ Wasserstoff bedeuten und 290 TWh Strom, etwa die Hälfte der deutschen Bruttostromerzeugung, verzehren.⁹¹ Die Wasserstofftechnologie ist sinnvoll, wenn regenerative Energieträger und Brennstoffzellenfahrzeuge genutzt werden (10 g CO₂-eq/km; bei Gasreformierung 93 bis 116 g CO₂-eq/km).

Vergleichbare Treibhausgasemissionen können jedoch mit herkömmlichen Kraftstoffen in verbrauchsoptimierten Verbrennungsmotoren erreicht werden.

Die fotovoltaische Wasserstofferzeugung wurde 1985-1995 im deutsch-saudiarabischen Projekt HYSOLAR erforscht. HYPASSE⁹² sollte saisonale Stromüberschüsse in der schweizer Alpen in Form von Elektrolysewasserstoff und Methylcyclohexan speichern. Die damalige DAIMLER-BENZ AG wollte einen Stadtbus mit Wasserstoffdruckgas (300 bar) betreiben; beendete die Entwicklung jedoch 1995 zugunsten des Brennstoffzellenantriebs. BMW hat seit den 1970er Jahren eine Flotte von Wasserstofffahrzeugen entwickelt, die Dank einer neuen Einblasestrategie stöchiometrische Wasserstoff-Luft-Gemische ohne die sonst häufigen Früh- und Rückzündungen verbrennen.⁹³ Die niedrige Zündenergie lässt Wasserstoff leider unkontrolliert abbrennen.

Die erste öffentliche Wasserstofftankstelle Europas wurde im Herbst 2004 in Berlin eröffnet, getragen von Unternehmen der Clean Energy Partnership.⁹⁴ Druckgas- und Flüssigwasserstoffspeicher weisen gegenüber fossilen Brennstoffen nur geringe Speicherdichten auf. Bei den Hydridspeichern ist Titan-dotiertes Natriumalanat⁹⁵ am weitesten fortgeschritten und bis 5,6 % beladbar. Kohlenstoffnanoröhrchen (Nanotubes) haben ihre Tauglichkeit zur Wasserstoffspeicherung noch nicht erwiesen.

3.10 Kraftstoffadditive

Der Begriff „Reformulated Gasoline“ umschreibt gesetzliche Vorgaben in den USA für Additive zur Reinhaltung des Einlasssystems. Für Dampfdruck, Siedebereich, Aromaten- und Benzolgehalt gelten zunehmend strengere Umweltauflagen. Die Konzentration an Additiven liegt üblicherweise unter 0,1 %.

Mineralölbasierte *Ottokraftstoffe* bestehen aus Kohlenwasserstoffen, denen sauerstoffhaltige Additive zur Verbesserung ihrer Zündeigenschaften zugesetzt werden. Bleifreie Kraftstoffe bestehen aus hochoctanigen Komponenten, sogenannte Platformate, Alkylate und Isomerisate. Klopfeste Superkraftstoffe eignen sich für höher verdichtende Motoren. Als metallfreie Antiklopfzusätze sind 3 bis 15% Methyl-Tertiärtbutyl-ether (MTBE) und 5 % Ethanol zugelassen

⁹¹ Vgl. Umweltrat (2005), Abschnitt 3.2.3.; www.ag-energiebilanzen.de/daten/str0205w1.pdf.

⁹² Hydrogen powered automobiles using seasonal and weekly surplus electricity.

⁹³ Vgl. *VDI nachrichten*, 12.12.2003, S. 12.

⁹⁴ Vgl. www.cep-berlin.de; DaimlerChrysler (2004).

⁹⁵ Vgl. Schüth (2006); TÜV (2002).

(„E5“).⁹⁶ Sauerstoffhaltige Zusätze verbessern die Octanzahl, erhöhen aber die Flüchtigkeit und chemische Aggressivität des Kraftstoffes (Quellung von Elastomeren, Korrosion des Einspitzsystems). Für einen sicheren Kaltstart benötigt der Kraftstoff genügend leichtflüchtige Komponenten; darf bei höheren Temperaturen aber nicht zu Heißstart- und Fahrproblemen durch Dampfblasenbildung („vapour-lock“) führen.⁹⁷ Bei 150 °C soll ein ausreichendes Volumen verdampfen, um eine Schmierölverdünnung bei kaltem Motor zu vermeiden. Alkoholzusätze erhöhen den Dampfdruck erst bei höheren Temperaturen. Antioxidantien schützen vor Alterung, indem sie Luftsauerstoff binden.

<i>Ottokraftstoffe</i>	
Heizwert	nutzbarer Energieinhalt des wasserfreien Brennstoffes (in kJ/kg)
Brennwert	Verbrennungswärme (in kJ/kg)
Dichte	volumenbezogene Masse (0,720 ... 0,775 kg/l)
Octanzahl	Klopffestigkeit von Ottokraftstoffen (Super: ROZ 95) ⁹⁸ .
Siedeverlauf	Gehalt an verdampfenden Komponenten bei 70, 100 und 150 °C
Dampfdruck	Flüchtigkeit des Kraftstoffs (Sommer < 60, Winter < 100 kPa)
Dampf-Flüssigkeits-Verhältnis (DFV)	Neigung zur Dampfblasenbildung; Kraftstoff-Dampfvolumen bei definierten Gegendrücken und Temperaturen
Vapour-Lock-Index	Flüchtigkeit von Ottokraftstoffen : 10facher Dampfdruck (kPa bei 37,8 °C) plus 7-fache bis 70 °C verdampfte Kraftstoffmenge
Schwefelgehalt	Europaweit ab 2009: < 10 mg/kg
<i>Diesekraftstoffe</i>	
Cetanzahl (CZ)	Zündwilligkeit (> 50) ⁹⁹
Cold Filter Plugging Point (CFPP)	Maß für die Kältefestigkeit: untere Temperaturgrenze der Filterbarkeit
Flammpunkt	Temperatur der Dampfentzündung (> 55 °C, Gefahrklasse A III)
Siedebereich	Siedetemperatur der flüchtigen bis hochsiedenden Komponenten
Dichte	Maß für den Heizwert: 0,820 ... 0,845 kg/l
Viskosität	Zähigkeit
Schwefelgehalt	In Europa seit 2005: < 50 mg/kg; ab 2009: < 10 mg/kg
Koksrückstand	Verkokungsneigung durch hochsiedende Crack-Anteile

Tabelle 6: Kenngrößen von Otto- und Diesekraftstoffen

⁹⁶ Höhere Anteile im Ausland: USA E10, Brasilien E20 ... E26.

⁹⁷ Vgl. Bosch (2003), Kap. „Kraftstoffe“, S. 318 ff.

⁹⁸ ROZ = Research-Octanzahl: Volumenprozent klopffestes *iso*-Octan (Trimethylpentan) in *n*-Heptan, das im Prüfmotor gleiches Klopfverhalten zeigt wie der zu prüfende Kraftstoff. Die niedrigere MOZ (Motor-Octanzahl) wird bei höherer thermischer Belastung, mit Gemischvorwärmung, höherer Drehzahl und variabler Zündzeitpunkteinstellung gemessen.

⁹⁹ CZ 100 = zündwilliges *n*-Hexadecan (Cetan), CZ 0 = zündträges Methylnaphthalin.

Metalldeaktivatoren verhindern eine katalytische Zersetzung des Kraftstoffes. Reinigungsadditive (Detergentien) schützen Einspritz- und Einlassventile. Korrosionsinhibitoren begrenzen Schäden durch Wasserfilme auf Metallteilen.

Dieselmotoren bestehen aus Kohlenwasserstoffen im Siedebereich zwischen 180 und 370 °C. Die Raffinerien setzen den Erdöldestillaten in zunehmendem Maße Konversionsprodukte (Crack-Komponenten) aus Schwerölen zu. Dieselmotoren müssen sich nach dem Einspritzen in die heiße, komprimierte Luft im Brennraum nach einem möglichst kurzen zeitlichen Verzug von selbst entzünden. Zündverbesserer („Cetane improver“) – Salpetersäureester von Alkoholen – verkürzen den Zündverzug und vermindern Geräusch und Partikelemission. Hochwertige Dieselmotoren enthalten zündwillige Paraffine und wenig Aromaten. Flüchtige Komponenten senken den Flammpunkt und verschlechtern die Cetanzahl und die Schmiereigenschaften. Hochsiedende Komponenten mit dem höheren Heizwert wiederum erhöhen Russbildung und Düsenverkockung. „Schmierfähigkeitsverbesserer“ – Glycerine, Fettsäuren und ihre Ester – gleichen die korrosive Wirkung von entschwefeltem Kraftstoff auf das Einspritzsystem aus. Bei den üblichen Drücken von 1350 bar in direkteinspritzenden Dieselmotoren kann ein ungenügend schmierfähiger Kraftstoff die Hochdruckpumpe schlagartig zerstören.¹⁰⁰ Gemische aus bis zu 5 % Biodiesel („Blend“ B5) werden nicht zusätzlich additiviert. Detergentien und Korrosionsinhibitoren schützen das Einspritzsystem.

Polymere „Fließverbesserer“ verhindern im Winter die Ausscheidung von Paraffinkristallen, die den Kraftstofffilter verstopfen können. Niedrig viskose Dieselmotoren entweichen durch Leckagen in der Einspritzpumpe; zähe Kraftstoffe (Biodiesel) bilden beim Versprühen größere Tröpfchen und erhöhen in unregelmäßigen Pumpe-Düse-Systemen den Spitzendruck.

„Defoamants“ verhindern übermäßiges Schäumen beim Betanken. Emulgatoren verteilen Wasser und Alkohole in Dieselmotoren. Antioxidantien¹⁰¹ stabilisieren Biodiesel.

Literaturverzeichnis

- ACEA (European Automobile Manufacturers Association): Commitment on CO₂ Emission Reductions from Passenger Cars (2002), www.acea.be.
- Bach, C.: Erdgas als Treibstoff - Potentiale für eine nachhaltige(re) Mobilität, in: Gas, Wasser, Abwasser, Bd. 82, 2002, S. 379-384.
- Bänger, J. et. al.: Cytotoxic and mutagenic effects of particle size and concentration analysis of diesel engine emissions using biodiesel and petrol diesel as fuel, in: Archives of Toxicology 74, 2000, S. 490-498.

¹⁰⁰ Vgl. DaimlerChrysler (2003)

¹⁰¹ Baynox® Biodiesel Stabilisator, ähnlich Vitamin E, vgl.: Bayer Research, Nr. 15, S. 7.

- BMU* – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung, www.bmu.de., Berlin 2004.
- Bosch*: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 25. Auflage, Verlag Vieweg, Wiesbaden 2003.
- DaimlerChrysler*: a) Hybridfahrzeuge, in: Hightech Report, 2/2005, S. 6-7, 24-28; 2/2004, S. 38-41; b) Diesel unter der Lupe, in: HighTech Report, 2/2003.
- Deutscher Bundestag*: Drucksache 15/5900, Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen, 28.06.2005; <http://dip.bundestag.de/btd/15/059/1505900.pdf>.; Kap. 7 (Maßnahmen an der Quelle), 7.1 (Biokraftstoffe), 7.4.2 (Erdgas), 7.4.3 (Wasserstofftechnologie und Verkehr).
- DOE* (US Department of Energy): 1st International Biorefinery Workshop, Washington 2005, www.biorefineryworkshop.com.
- ECCP (European Climate Change Programme) 2003*: Can we meet our Kyoto targets?, europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/second_eccp_report.pdf.
- EU-Kommission*: www.europa.eu.int/comm/dgs/environment/index_de.htm (Umweltinformationen)
- EU-Recht*: Environmental Policy Review der EU-Kommission, www.aecc.be/de/news/docs/JanuarFebruar2005.pdf (internationale Gesetzgebung).
- Gerling, J. P./Wellmer, F.-W.*: Wie lange gibt es noch Erdöl und Erdgas?, in: Chemie in unserer Zeit, Bd. 39, 2005, S. 236–245.
- Kaltschmitt, M./Hartmann, H.*: Energie aus Biomasse, Springer-Verlag, Berlin 2001.
- Kamm, B./Gruber/P. R.; Kamm, M.*: Biorefineries – Industrial Processes and Products, Wiley-VCH, Weinheim 2005.
- Krüger, R./Fahl, U./Voß, A.*: Alternative Kraftstoffe und Antriebe – ein Weg zur Minderung der Kohlenwasserstoffemissionen?, in: ATZ, 1/1998.
- Kurzweil, P.*: Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen, Verlag Vieweg, Wiesbaden 2003.
- Kurzweil, P.*: Elektrochemische Energiewandler – Branchenrevolutionierende Schrittmachertechnologien, in: Tiefel, T. (Hrsg.): Patent- und Schutzrechtsmanagement in Zeiten des Hyperwettbewerbs, DUV-Verlag, Wiesbaden 2005.
- Kurzweil, P./Scheipers, P.*: Chemie, Verlag Vieweg, Wiesbaden 2005.
- Kyoto-Protokoll*, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>.
- Lackner, M./Winter, F./Geringer, B.*: Chemie im Motor, in: Chemie in unserer Zeit, Bd. 39, 2005, S. 246–254.
- Naunin, D.* (Hrsg.): Elektrische Straßenfahrzeuge, Expert-Verlag, Ehningen 1994.
- Schüth, F.*: Mobile Wasserstoffspeicher, in: Nachrichten aus der Chemie, Bd. 54, 2006, S. 24-28.
- Shell*: Mehr Autos – weniger Verkehr? Szenarien des Pkw-Bestandes und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020, Deutsche Shell GmbH, Hamburg 2001.
- Specht, M./Brandl, A./Pehnt, M.*: Regenerative Kraftstoffe – Bereitstellung und Perspektiven, 2001, www.fv-sonnenenergie.de/publikationen/th01/th2001_13specht.pdf.
- Stahl, B./Walz, R./Böhm, E.*: Anleitung zur Bewertung von Ökobilanzen, in: UmweltWirtschaftsForum, Nr. 2, 1997, S. 83-88.
- TÜV Süddeutschland Holding AG*: Hydrogen – a word of energy, München 2002.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 5. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim 1989, Vol. A12 (Gas production), S. 169 -306; Vol. A 16 (Methanol), S. 465-486.
- Umweltrat*: Potenziale und Instrumente zur CO₂-Verminderung; Sondergutachten Umwelt und Straßenverkehr, www.umweltrat.de/04presse/downlo04/hintgru/CO2Reduzierung_08_2005.pdf.