
Alternative Kraftstoffe und Hybridantriebe

Herausgeber:

Wirtschaftsgesellschaft des Kraftfahrzeuggewerbes mbH, Bonn,
im Auftrag des Zentralverbandes des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes, ZDK,
Franz-Lohe-Str. 21
53129 Bonn

Verfasser:

Prof. Dr. Martin Burgmer
Dipl.-Ing. Ingo Meyer
Bonn, im August 2006

Satz & Layout:

Bürodienstleistungen Andrea Meyer, Münsterdorf

2. Auflage 2008, aktualisiert
Alle Rechte vorbehalten.

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	3
Vorwort	4
Künftige Anforderungen an den Fahrzeugantrieb	5
Rolle der Kraftstoffe	10
Kraftstoffe als konstruktives Element	10
Anforderungen an Kraftstoffe (Anforderungsbündel)	12
Pfade zur Herstellung von Kraftstoffen	13
<i>Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern</i>	15
Kraftstoffe auf Basis Erdöl/Erdgas	15
Otto-Kraftstoff	15
Diesel-Kraftstoff	18
Erdgas	20
Autogas/Flüssiggas	22
Wasserstoff	24
Vollsynthetische Kraftstoffe aus Synthesegas: GtL	27
GtL aus Erdgas/Methan	28
GtL aus Kohle	32
<i>Kraftstoffe aus erneuerbaren Energieträgern</i>	33
Kraftstoffe aus reiner Biomasse	33
Rapsöl	33
Teilsynthetische Kraftstoffe aus Biomasse	35
Rapsölmethylester/Biodiesel	35
Methan/Biogas	36
Ethanol	37
BtL/Sunfuel/Biotrol	39
Hybridantriebe im Fahrzeug	43
Mikro-Hybrid	45
Mild-Hybrid/Medium-Hybrid	47
Vollhybrid	48
Elektrifizierung des Antriebsstrangs	54
Schlussbemerkung	57

Konventionelle, auf Erdöl basierende Kraftstoffe werden auf absehbare Zeit den bei weitem größten Anteil beim Einsatz in Kraftfahrzeugen haben. Daneben sind sie unerlässlich beim Einsatz in der Luftfahrt. Aber: die Erdölreserven sind endlich. In einigen Schätzungen wird davon ausgegangen, dass bis heute die Hälfte des verfügbaren Erdöls bereits verbraucht ist. Neben den traditionellen Abnehmern treten auf den Weltrohölmärkten neue Nachfrager mit großem Potenzial auf, die den Rohölpreis tendenziell steigen lassen. Politische Unsicherheiten in den Regionen einiger Erzeugerländer treiben den Rohölpreis zusätzlich an. Vor diesem Hintergrund gewinnen alternative Kraftstoffe an Bedeutung. Diese zunehmende Bedeutung schlägt sich auch in zwei Gesetzen nieder, die nahezu zeitgleich im Sommer 2006 in Kraft traten. Das Energiesteuergesetz regelt den im Vergleich zu Otto- und Dieselmotoren günstigen Steuersatz für Flüssiggas (Autogas) und Erdgas bis 2018. Geregelt wurden dort auch die Steuersätze für Stoffe, die nach regenerativen Erzeugungsmethoden hergestellt werden. Das Gesetz zur Änderung der Biokraftstoffquote schreibt für Otto- und Dieselmotoren Beimischungen regenerativ erzeugter Komponenten vor. Auf Grund einer Änderung der Straßenverkehrszulassungsordnung sind Kraftfahrzeugwerkstätten, die sich für diesen Zweck anerkennen lassen, in die Lage versetzt, die wiederkehrende Prüfung von Gasanlagen und die Gasanlagensystem-einbauprüfung selbst durchzuführen. Die Kraftstoffforschung geht unter

Weiterentwicklung von Methoden, die in Deutschland schon in den 30iger Jahren großindustriell angewendet wurden, in Richtung Verflüssigung von Erdgas oder/und Biomasse zu Diesel. Diese synthetisch erzeugten Kraftstoffe, GTL und BTL bezeichnet, lassen hocheffektive und schadstoffarme Motoren zu. Parallel dazu gewinnen, wenn auch wegen der weiten Verbreitung von Dieselmotoren zunächst nicht in Europa, hybride Antriebe zunehmend an Bedeutung.

Die hier in der zweiten Auflage vorliegende Broschüre soll einen Überblick über die Kennwerte und die Herstellung der alternativen Kraftstoffe geben und diese in einen Vergleich zu den konventionellen Kraftstoffen setzen. Gleichzeitig wird ein aktueller Überblick über hybride Antriebskonzepte sowie die Elektrifizierung des Antriebsstrangs gegeben.

Wir bedanken uns bei:

- BMW AG München
- Robert Bosch AG, Stuttgart
- Choren Industries, Freiberg
- Daimler AG, Stuttgart
- Degussa AG, Düsseldorf;
- Honda Motor Europe (North) GmbH, Offenbach am Main
- Institut für Kraftfahrwesen, ifka, Aachen
- Shell, Hamburg
- Valeo, Frankreich
- Volkswagen AG, Wolfsburg
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg für die wertvollen Hinweise und die Bildunterlagen.

Zentralverband Deutsches Kraftfahrzeuggewerbes (ZDK)

Die Suche nach dem einen richtigen Verbrauchskonzept zur Erfüllung der künftigen Anforderungen an den Fahrzeugantrieb lässt sich heute nicht eindeutig zugunsten einer bestimmten Technologie beantworten. Je nach Fahrzeug, Nutzungs- und Marktgegebenheiten kann es sinnvoll sein, Hybridantriebe, Dieselmotoren oder auch verbrauchsreduzierte Ottomotoren einzusetzen, gegebenenfalls Wasserstoffdirektantriebe, Brennstoffzellen-Antriebe oder rein elektrische Antriebe.

Vor dem Hintergrund der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Mineralölressourcen einerseits und der Diskussion um befürchtete Klimaveränderungen durch die Anreicherung so genannter Treibhausgase andererseits stellt sich die Frage, mit welchen Technologien zur Reduzierung von Verbrauch und Emissionen diesen Herausforderungen begegnet werden kann. Verbrauchsarme und saubere Autos sind heute weltweit erklärtes Ziel - wenn auch mit unterschiedlicher Gewichtung und verschiedenen Umsetzungsstrategien. Beides hängt wesentlich von den Rahmenbedingungen in der jeweiligen Weltregion und damit letztlich von den administrativen und gesetzlichen Vorgaben ab.

Beispielsweise ist in den US-Staaten der Pazifikküste, allen voran Kalifornien, eine Verbesserung der Luftqualität treibender Regulierungsfaktor. In den gesamtstaatlichen Überlegungen der USA spielt auch zunehmend das

Bewusstsein der Abhängigkeit von Erdölimporten eine Rolle. Hinzu kommt in den städtischen Ballungsräumen der Wunsch nach Entlastung bei der Luftverschmutzung - Triebfeder für das ZEV-Mandat und somit für den Wunsch nach partiell emissionsfrei, elektrischem Fahren.

Ganz anders dagegen die Verhältnisse in Japan: zum einen diktiert dort die Verkehrsverhältnisse in den stark verdichteten Zentren die Einsatzbedingungen, zum anderen spielt der Dieselantrieb auf dem japanischen Markt traditionell praktisch keine Rolle - weshalb er als Sparkonzept dort nie wirklich in Betracht gezogen worden ist.

Wieder anders sind die Verhältnisse in Europa. Hier ist die Diskussion geprägt von der Sorge um das Weltklima und die globale Erwärmung. Daher steht hier das Streben nach einer Begrenzung des Treibhausgas CO₂ im Vordergrund. Europa hat sich in Sachen Verbrauchsrestriktionen als Vorreiter positioniert. Die freiwillige Selbstverpflichtung des ACEA - 140 g CO₂/km bis 2008 - stellte bereits eine echte Herausforderung dar. In Deutschland lag der durchschnittliche CO₂-Wert bei den Pkw Neuzulassungen im ersten Halbjahr 2008 bei 166 g/km. Europa hat einen etablierten Dieselmotorenmarkt mit einem Trend zur weiteren Verschärfung der Emissions-Grenzwerte für den Diesel. Hybridantriebe haben hier bislang keine Bedeutung. So lag z.B. in Deutschland der Diesel-Anteil bei neu zugelassenen Pkw im Jahr 2007 bei

Künftige Anforderungen an den Fahrzeugantrieb

47,7%, der Hybrid-Anteil bei 0,24% (entspricht 7591 Fahrzeugen mit deutlich fallender Tendenz im ersten Halbjahr 2008).

In Japan hat der Ottomotor eine Monopolstellung. Unterstützt durch Steuererleichterungen entwickeln dort Unternehmen wie Toyota, Nissan und auch Honda Hybridkonzepte zunächst für den heimischen Markt, um damit dann aber auch neue Märkte zu erobern - neue Wachstumsmärkte in Asien wie auch etablierte Märkte in den Industriestaaten. In den USA hat der Hybridmarkt innerhalb von 2 Jahren das Niveau des Pkw-Dieselmotors erreicht - wenn auch unter 1 % des Gesamtmarktes.

Marktprognosen in den USA gehen heute für die nächsten 10 Jahre von einem beständigen Wachstum bis zu 25 % vor allem bei Hybridantrieben aus. Dem Diesel werden mit einem 12%-Anteil geringere Chancen eingeräumt.

In Westeuropa wird der Dieselmotor seine Position als verbrauchsgünstige Motorentechnologie weiter festigen, aber auch hier gibt es ein Hybrid-Potenzial.

In Japan geben die Prognosen der Analysten dem Dieselmotor weiterhin wenig Chancen.

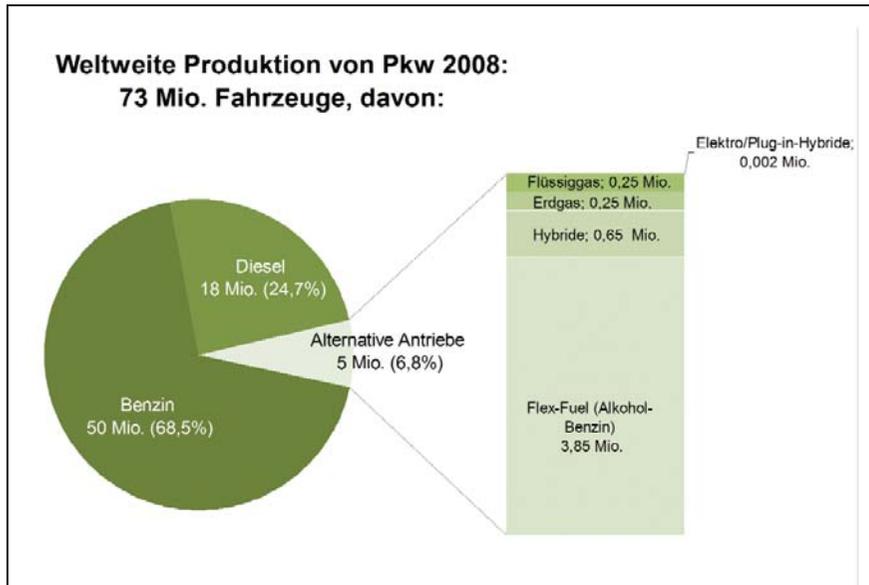


Bild 1: Weltweite Produktion von Pkw 2008; Quelle: Bosch

Künftige Anforderungen an den Fahrzeugantrieb

Jedoch steigt das öffentliche Interesse am Dieselantrieb zunehmend. Die Grafik in Bild 1 zeigt den weltweiten Stand des Jahres 2008 (Prognose Robert Bosch GmbH). Laut Bosch soll der Anteil von Elektrofahrzeugen, Hybriden und Plug-in-Hybriden im Jahr 2015 bei weltweit ca. 4% der Jahresproduktion liegen, der Dieselanteil bei ca. 27%.

Der Dieselanteil an den Pkw-Neuzulassungen von mittlerweile fast 50 % ist Beleg dafür, dass der Diesel unter den in Westeuropa üblichen Einsatzbedingungen heute mit seinem spezifischen Mix aus Langstrecken-Konstantfahrt, Überland- und Stadtverkehr das optimale Verbrauchskonzept ist.

Mag der Ottomotor mit Direkteinspritzung gegenüber modernen Motoren mit Saugrohreinjection sein Potenzial in Bezug auf Verbrauchsreduzierung bzw. Emissionssenkung noch nicht vollständig ausgeschöpft haben, so bietet er dennoch entscheidende Vorteile, wie einen größeren Freiheitsgrad bei der Wahl des Einspritzzeitpunktes sowie die Möglichkeit, Mehrfacheinspritzungen in einem Arbeitsspiel zu tätigen. Diese Vorteile werden gezielt z.B. beim Hochdruck-Schichtstart (High Pressure Stratified Start) oder bei der Homogen-Split Einspritzung für eine schnelle Katalysator-Aufheizung zur Absenkung der Emissionen ausgenutzt.

Kombiniert mit anderen Konzepten zur Verbrauchsreduzierung, wie z.B.

- down-sizing,
- start-stop-Automatik,
- Schaltanzeige und längere Getriebeübersetzung,
- günstigere Aerodynamikwerte,
- reduzierter Roll- und Luftwiderstand,
- Energierückgewinnung beim Bremsen,
- geringeres Gewicht,
- effiziente Generatorregelung (lädt nur, wenn nicht beschleunigt wird),
- sensorgesteuertes Batterie- und Generatormanagement,
- bedarfsorientierte elektrische Kühlmittelpumpe,

bietet die Direkteinspritzung der zweiten Generation alternative Lösungswege.

Weiterentwicklungen gehen in die Richtung, die positiven Eigenschaften von Diesel- und Ottomotoren zu kombinieren. Unter dem Namen "DiesOtto" bei Daimler oder CCS-Motor bei Volkswagen (CCS Combined Combustion System, kombiniertes Verbrennungssystem) laufen erste Vorserien-Motoren als Kombination der beiden Motorwelten. Mit den Verbrauchswerten moderner Diesel-Motoren und den Abgaswerten aktueller Otto-Motoren sollen diese Entwicklungen in absehbarer Zeit Serienreife erreichen.

Ogleich Volkswagen und Daimler das gleiche Entwicklungsziel verfolgen, unterscheiden sich die Motorkonzepte wesentlich.

Grundkonzept bei Volkswagen ist ein konventioneller Diesel-Motor, der allerdings mit synthetischem Kraftstoff (GtL oder BtL, wird im folgenden Kapitel beschrieben) befeuert wird.

Künftige Anforderungen an den Fahrzeugantrieb



Bild 2: CSS Motor von Volkswagen

Kennzeichen sind weiterhin eine aufwändige Regelung der Kraftstoffzumessung, Einspritzung in der frühen Phase des Verdichtungsstaktes, grundsätzlich Selbstzündung sowie optimaler Zündverzug. Beim DiesOtto-Motor von Daimler soll konventioneller Otto-Kraftstoff zum Einsatz kommen. Turbo-Stufenaufladung, variable Ventilsteuerung, Benzin-Direkteinspritzung der zweiten Generation, variable Verdichtung und Raumzündverbrennung im Teillastbereich sind wesentliche Merkmale dieses Konzepts.

Auf den Hybrid-Antrieb wird im Kapitel "Hybridantriebe im Fahrzeug" näher eingegangen.



Bild 3: DiesOtto-Motor von Daimler

Die Brennstoffzelle wird heutzutage von fast allen Automobilherstellern als sehr aussichtsreich für den mobilen Einsatz angesehen, und die Weiterentwicklung von Brennstoffzellen und den erforderlichen Systemkomponenten wird mit großem Aufwand vorangetrieben. Die Leistungsdichte von Brennstoffzellenstacks ist in den letzten Jahren auf über ein Kilowatt pro Liter angestiegen, und viele Automobilhersteller haben bereits fahrbare Prototypen mit annehmbaren Fahrleistungen, die fünf Personen Platz bieten, realisiert. Ferner sind bereits z.B. weltweit 33 Citaro-Stadtbusse mit Brennstoffzellenantrieb in der Erprobung. Mit diesem Antriebskonzept kann ein durchgehend emissionsloser Antrieb mit guten Fahrleistungen, einer hohen Reichweite und schneller Betankung kombiniert werden.

Künftige Anforderungen an den Fahrzeugantrieb

Verbrennungsmotoren in alternativen Antriebskonzepten können im Gegensatz dazu nicht völlig emissionslos ausgeführt werden. Neben der Möglichkeit, Brennstoffzellenfahrzeuge völlig emissionslos zu betreiben, ist der höhere Wirkungsgrad bei der Energiewandlung ein weiterer Vorteil gegenüber dem Verbrennungsmotor. Insbesondere bei niedrigen Lasten, wie sie im alltäglichen Betrieb häufig vorkommen, ist die Energiewandlung effektiver. Der zum Betrieb erforderliche Wasserstoff lässt sich auf viele verschiedene Arten gewinnen, z.B. durch Reformation von verschiedenen flüssigen Kraftstoffen an Bord des Fahrzeugs, aus Erdgas oder mit Hilfe elektrischer Energie durch Elektrolyse in stationären Anlagen. Allerdings sind sowohl bei der Herstellung von Wasserstoff, als auch bei der Bereitstellung und Speicherung noch viele Fragen ungelöst. Für den breiten Einsatz von Wasserstoff in Kraftfahrzeugen müsste zuerst mit großen Investitionen die erforderliche Tankstelleninfrastruktur geschaffen werden. Zusätzlich ist die Speicherung an Bord von Fahrzeugen problematisch. Deswegen haben die Hersteller ihre Entwicklungsanstrengungen auf die Verwendung von flüssigen Kraftstoffen, insbesondere Methanol, gelenkt. Die enormen noch zu lösenden Probleme bei der Nutzung der Brennstoffzelle haben bis heute die hohen Erwartungen in diese Technologie nicht erfüllt. Serienreife erwarten Experten nicht vor 2020; lediglich einzelne mobile Anwendungen, wie z.B. Gabelstapler, werden bereits heute betrieben.

Ob nach dem Jahr 2020 überhaupt noch ein Vorsprung der Brennstoffzelle etwa gegenüber dem Diesel besteht, ist heute noch nicht geklärt. Letztlich wird sich das System durchsetzen, welches die höchste Praxistauglichkeit bei geringsten Kosten und optimaler Umweltverträglichkeit besitzt.

Kraftstoffe als konstruktives Element

Verbrauchsarme Motoren neuerer Generationen benötigen adäquate High-Tech-Kraftstoffe. Motorenentwickler betrachten Treibstoffe heute ebenso als konstruktives Element, wie die Ventilsteuerung oder die Form des Brennraums; sie müssen sich deshalb auf eine gleichbleibend hohe Kraftstoffqualität verlassen können.

Auch die Automobilindustrie ist gefordert und benötigt für ihre neuen Motor- bzw. Abgasentgiftungs-Technologien neue, noch umweltschonendere Ottokraftstoffe. Ein entsprechendes Anforderungsbündel wurde in der "World Wide Fuel Charta" definiert. Allerdings konnte über die Erfüllung dieser überwiegend noch schärferen Bedingungen bisher noch keine Einigung erzielt werden.

In der World-Wide Fuel Charta (WWFC) sind Standards für Kraftstoffe festgelegt, die sich je nach Qualitätsgruppe voneinander unterscheiden. Dennoch müssen bestimmte Mindestanforderungen erfüllt werden. Daher spielt der Kraftstoff eine bedeutende Rolle.

Tabelle 1 zeigt zunächst wesentliche Auswirkungen von Kraftstoffeigenschaften auf das Motor- und Abgaskonzept eines Fahrzeugs auf.

Schon diese kurze Übersicht zeigt z.B. die Potenziale zur Schadstoffminimierung im Abgas auf, die allein durch Maßnahmen auf der Motorseite durch Motorkonzepte zu erreichen sind, die den Einsatz hochwertiger (synthetischer) Kraftstoffe integrieren.

Eigenschaft des Kraftstoffs	Auswirkung auf Motor- und Abgaskonzept
Zündfähigkeit/Cetanzahl, CZ	Je höher die Cetanzahl, desto besser zündet der eingespritzte Kraftstoff. Bei sehr hohen Cetanzahlen, wie sie z. B. GtL-Diesekraftstoffe mit einer Cetanzahl von ungefähr 70 haben (zum Vergleich: herkömmlicher Diesel hat eine Cetanzahl leicht über 50), kann überdies das Verdichtungsverhältnis gesenkt werden, z.B. von 18:1 in herkömmlichen Dieselmotoren auf 15:1 bei Motoren mit GtL-Diesel. Durch das geringere Verdichtungsverhältnis kann die Abgastemperatur abgesenkt werden; dies hat niedrigere NOx-Emissionen zur Folge.

Tabelle 1: Auswirkungen von Kraftstoffeigenschaften auf das Motor- und Abgaskonzept

Eigenschaft des Kraftstoffs	Auswirkung auf Motor- und Abgaskonzept
Schwefelgehalt (In Zukunft nur noch max. 10 ppm für Otto- und Diesekraftstoff gemäß geänderter Richtlinie 1999/30/EG)	Je niedriger der Schwefelgehalt, desto geringer sind auch die Sulfat-Anteile in den Partikeln. Auch sinkt der Partikelanteil insgesamt im Abgas. Außerdem trägt Schwefel maßgeblich zur Bildung des Schadgases SO ₂ bei. Ferner schränkt ein zu hoher Schwefelanteil im Kraftstoff die Wirkung des Katalysators ein. So enthält z.B. GtL-Kraftstoff nahezu keinen Schwefel mehr (unter einem Milligramm pro Liter).
Gehalt an Aromaten , also ringförmigen Kohlenwasserstoff-Verbindungen, z. B. Benzol; (EU-weit ab 01.01.2005 max. 35%vol zugelassen statt vorher 42%vol)	Aromaten begünstigen bei der Verbrennung im Brennraum die Bildung von Partikeln sowie - sozusagen als Vorstufe hiervon - ungesättigte Kohlenwasserstoff-Verbindungen, z. B. Acetylen. Aromaten im Otto-Kraftstoff haben indes auch eine erwünschte Eigenschaft: Je höher ihre Konzentration, desto höher auch die Oktanzahl. Die gesetzlich vorgeschriebene Absenkung der Konzentration an Aromaten würde daher zu einer Verminderung der Klopfestigkeit führen. Zum Ausgleich sind daher neue Additivpakete entwickelt worden, die bis zu 100 Oktan (ROZ) erreichen. Derartige Additivpakete enthalten häufig Methyltertiärbuthylether, MTBE. Dieser ersetzt in Deutschland und Europa bleiorganische Verbindungen (Oktanbooster) sowie Benzol und andere aromatische Kohlenwasserstoff-Verbindungen, die als umwelt- und gesundheitsgefährdend gelten.
Wasserstoffanteil im Kraftstoff	Ein höherer Wasserstoffanteil im Kraftstoff hat bei der Verbrennung zur Folge, dass weniger CO ₂ entsteht. So haben z. B. auf dem Motorprüfstand mit GtL-Kraftstoff befeuerte Dieselmotoren eine CO ₂ -Minderung um ca. 4 % erreicht; allerdings lag der Verbrauch um ca. 5 % höher.
Viskosität/Dichte	Anordnung der Einspritzdüsen und Anzahl der Einspritzlöcher sowie deren Durchmesser müssen an das Fließverhalten des Kraftstoffs angepasst sein, damit sich das Kraftstoff-Spray in der Brennkammer optimal ausbreitet und mit der Luft ein optimal zündfähiges Gemisch bildet.

Tabelle 1: Auswirkungen von Kraftstoffeigenschaften auf das Motor- und Abgaskonzept

Anforderungen an Kraftstoffe

Kraftstoffe müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Diese lassen sich in insgesamt sechs Anforderungsbündeln zusammenfassen, die im Folgenden auszugsweise dargestellt sind.

Anforderungsbündel: "Fahrzeug"

- hohe Energiedichte
- möglichst freie Formgebung des Kraftstoffsystems im Hinblick auf die Unterbringung im Fahrzeug
- möglichst geringe Energieverluste, wenn das Fahrzeug nicht benutzt wird
- geringe Aggressivität gegenüber den Materialien im Kraftstoffsystem

Anforderungsbündel: "Verbrennung"

- hohe Zündwilligkeit und Klopfestigkeit
- ausreichend hoher Dampfdruck für Kaltstarts auch bei tiefen Temperaturen
- keine schädlichen Ablagerungen im Gemischbildungssystem, Brennraum und Auspuff
- saubere, problemlose Verbrennung und einfache Abgasnachbehandlung
- Verträglichkeit mit Schmierstoffen

Anforderungsbündel: "Handhabungssicherheit"

- gute Lager- und Transportfähigkeit bei allen Umgebungsbedingungen
- gefahrlose Handhabung durch Laien
- geringer Dampfdruck zur Vermeidung von Verdunstungsverlusten
- explosionsicher

- geringes Risiko bei mechanischen und thermischen Belastungen kraftstoffführender Bauteile
- keine Nutzungseinschränkungen, z.B. Abstellen in Garagen, Tunnel-durchfahrt

Anforderungsbündel: "Wirtschaftlichkeit"

- vertretbare und langfristig kalkulierbare Kosten
- Versorgungssicherheit, vor allem auf wichtigen Fahrzeugmärkten
- Verfügbarkeit von Primärenergie und Rohstoffen in großen Mengen aus unterschiedlichen Weltregionen

Anforderungsbündel: "Wirkung auf den Menschen"

- keine Gefährdung bei Kontakt oder Inhalation
- nicht toxisch (giftig)
- nicht narkotisierend
- nicht ätzend
- nicht geruchsbelästigend
- nicht allergieauslösend
- leicht ab- bzw. auswaschbar

Anforderungsbündel: "Umweltwirkungen"

- geringe Emissionen bei Gewinnung, Herstellung, Transport, Lagerung und Umfüllung
- geringe Freisetzung von Schadstoffen
- geringer Beitrag zu Smog- und Ozonbildung
- nicht treibhauswirksam
- biologisch leicht abbaubar

Neben Benzin und Dieselmotoren gibt es weitere Kraftstoffe, die sich mit diesen beiden in den genannten Anforderungen messen lassen müssen. Hierzu zählen unter anderem Kraftstoffe auf Basis Erdöl/Erdgas, wie Erdgas, Autogas und Wasserstoff, voll-

synthetische Kraftstoffe (GtL), Kraftstoffe aus reiner Biomasse, wie Rapsöl und Abfallöle sowie teilsynthetische Kraftstoffe aus Biomasse, wie Rapsölmethylester/Biodiesel, Methan/Biogas, Ethanol und BtL/ Sunfuel.

Pfade zur Herstellung von Kraftstoffen

Das Bild 4 zeigt in einer Gesamtübersicht die heute prinzipiell genutzten Pfade der Herstellung von Pkw-Kraftstoffen.

Allerdings geht aus der Grafik nicht die Bedeutung der einzelnen Pfade für den Gesamtverbrauch hervor.

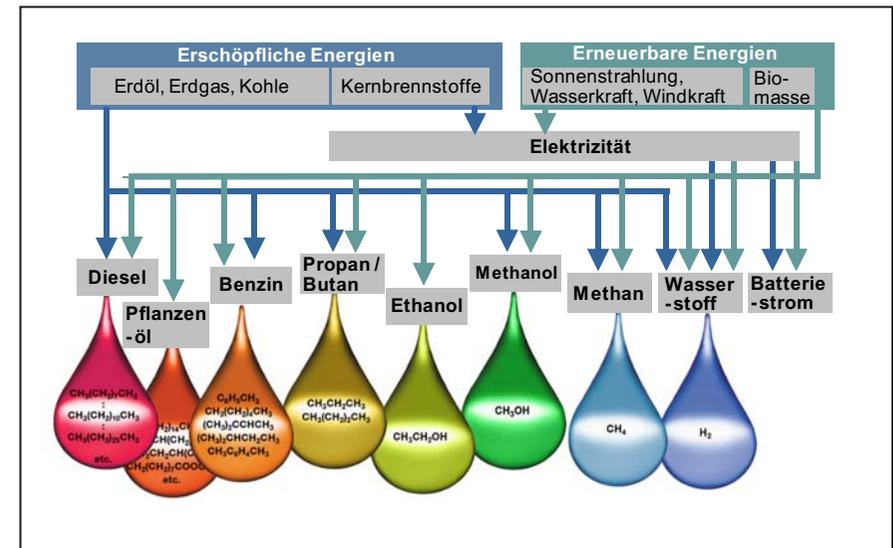


Bild 4: Mögliche Kraftstoffe für den Pkw-Antrieb: von der Primärenergie zum Kraftstoff; Quelle: BMW

Konventionelle Kraftstoffe, wie Benzin und Diesel, aber auch die alternativen Kraftstoffe Erdgas, Flüssiggas und Wasserstoff, führen in ihrem "Stammbaum" zu den fossilen Energieträgern, vor allem Erdöl und Erdgas. (Das gilt auch für den Wasserstoff, der derzeit zu gut 90% aus Erdgas gewonnen wird).

Entstanden sind Erdöl und Erdgas dadurch, dass sich vor mehr als einer Milliarde Jahre im Wasser gewaltiger Binnenmeere (Urmeere) pflanzliche und tierische Kleinstlebewesen zu bilden begannen. Diese organischen Massen, das Plankton (vom griechischen "Plankton" = Umherirrendes, Umhertreibendes) sanken nach ihrem Absterben auf den Meeresboden. Dort bildete das vom Schlick eingeschlossene Plankton Faulschlamm. In seichten Meeresbuchten und vor Flussmündungen sammelten sich im Verlaufe von Jahrmillionen riesige Mengen von Faulschlamm an. Daraus entstand unter Mithilfe von Bakterien zunächst Bitumen, eine teerartige Masse, die so genannte Muttersubstanz des Erdöls/ Erdgases, die von Schlamm und Geröll bedeckt war. Man nimmt nun an, dass katalytische Vorgänge die zunächst teerartige Muttersubstanz verflüssigt und vergast haben. Unter dem Druck der darüber liegenden Schichten wurde diese verflüssigte und vergaste Masse, das Erdöl/ Erdgas, durch Gesteinsklüfte und -poren an die Erdoberfläche gedrückt. Versperrten undurchlässige Deckschichten den Weg, so sammelten sich Erdöl und Erdgas in den

Gesteinsporen. Dort bildeten sich Erdöl-/ Erdgaslagerstätten. Treibt man nun Bohrlöcher in solchen Lagerstätten, so wird das Erdöl/ Erdgas infolge des Lagerstättendrucks an die Erdoberfläche gefördert.

1859 wurde die erste gezielte Erdölbohrung in Pennsylvania niedergebracht.

Die wichtigsten Erdöl-Lagerstätten befinden sich auf der nördlichen Hälfte des Erdballs, in Nordamerika (Golf von Mexiko, Texas, Oklahoma, Alaska), in Asien (Saudi-Arabien, Iran, Irak, China, Indonesien, Sibirien, Kasachstan), in Afrika (Libyen, Algerien, Nigeria) und in Europa (Rumänien, Baku, Nordsee).

Da Erdöl/ Erdgas selten dort gefunden wird, wo man es braucht, muss es mit Hilfe von Tankschiffen, Kesselwagen und Rohrleitungen (Pipelines) transportiert werden. So wird zum Beispiel Erdöl in die Raffinerien gebracht. Diese liegen in den Industrieländern, also dort, wo die aus dem Erdöl gewonnenen Produkte auch gebraucht werden. Bevor das Erdöl in Raffinerien verarbeitet wird, muss es zunächst gereinigt, entsalzt und entwässert werden; danach wird es als Rohöl bezeichnet.

Rohöl ist ein Gemisch aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoff-Verbindungen. Diese werden in der Raffinerie zunächst im Destillationsturm getrennt. Dabei fallen neben Rohbenzin, Gasöl und Schweröl auch Methan, Propan und Butan an. Rohbenzin, Gasöl und Schweröl werden dann durch Reformieren (Umwandeln) und Cracken

(Aufspalten) weiter zu Benzin und Diesel verarbeitet; dabei fallen erneut Propan und Butan sowie zusätzlich Wasserstoff an. Nicht nur in der Raffinerie, sondern auch bereits bei der Förderung des Erdöls wie auch des Erdgases werden Propan und Butan als natürliche Begleitstoffe mitgefördert. Bis in die heutige Zeit wird ein Großteil dieser Gase an den Bohrstellen der Ölfelder abgefackelt, und zwar täglich soviel, wie der Tagesbedarf der EU ausmacht! Eine schonende Verwendung dieser "Abfallprodukte" im Verkehrs-

sektor ist daher eine sinnvolle Alternative.

Die wichtigsten Erdgas-Lagerstätten befinden sich in Russland, in der kaspischen Region, in Algerien und in der Nordsee. Transportiert wird es vorwiegend durch Rohrleitungen (Pipelines). Da Pipelines jedoch sowohl technisch als auch politisch kompliziert sind, wird in jüngster Zeit das Erdgas teilweise am Förderort direkt verflüssigt. Damit kann es in entsprechend ausgelegten Behältern transportiert werden.

Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern Kraftstoffe auf Basis Erdöl / Erdgas:

Otto-Kraftstoff

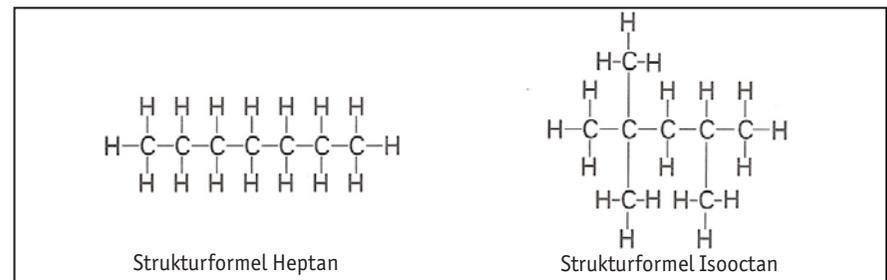
Otto-Kraftstoff, also Benzin oder Superbenzin, ist ein Gemisch von Kohlenwasserstoff-Verbindungen mit geraden, verzweigten und ringförmigen Kohlenstoff-Ketten mit 5 bis 9 Kohlenstoffatomen. Normalbenzin und Superbenzin unterscheiden sich zunächst dadurch, dass Superbenzin mehr klopfeste Kohlenwasserstoffe, wie z.B. Isooctan oder Aromaten enthält.

Ein nicht klopfester Kohlenwasserstoff ist beispielsweise das Heptan; es hat die Klopfestigkeit 0 Octan.

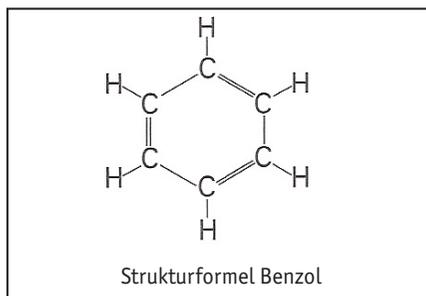
(Heptan, vom griechischen hepta=sieben)

Isooctan ist ein sehr hoch klopfester Kohlenwasserstoff. Es hat die Klopfestigkeit 100 Octan.

(Octan, vom griechischen octa=acht; Iso, vom griechischen isos=gleich)



Auch Aromaten sind klopfharte Kohlenwasserstoffe. Sie sind ringförmig (zyklisch) angeordnet. Ein Beispiel ist das Benzol:



Weil einzelne Kohlenstoffatome untereinander doppelt verbunden sind, werden sie auch ungesättigte Kohlenwasserstoffe genannt. Aromaten sind also ringförmige, ungesättigte Kohlenwasserstoffe; wegen ihres kennzeichnenden Geruches heißen sie Aromaten.

Neben Isooctan und Aromaten zeichnen sich noch Alkohole durch eine hohe Klopfhärte aus. Daher finden sich in heutigen Otto-Kraftstoffen Anteile solcher Alkohole sowie Aromaten.

Früher standen den Raffinerien zur Verbesserung der Klopfhärte hauptsächlich Bleialkyle zur Verfügung. Die Herausnahme von Blei sowie die zunehmende Auslegung moderner Motoren auf Super-Bedarf machen heute innovative Herstellungsverfahren notwendig. Das sog. Reformieren hat sich dabei ebenso bewährt wie z.B. der Einsatz sauerstoffhaltiger Kraftstoffkomponenten, die Oxygenates.

Die Messgröße für die Klopfhärte von Otto-Kraftstoffen ist die Octanzahl. Das Maß für die Octanzahl wurde willkürlich gewählt und liegt zwischen 0 und 100. Um den Wert für einen bestimmten Kraftstoff zu ermitteln, wird dieser mit einer Mischung aus klopfhärtem Isooctan (Octanzahl 100) und klopfhärtefreiem n-Heptan (Octanzahl 0) verglichen. Per international festgelegtem Vergleichstest, dem sogenannten Einzylinder-CFR-Prüfverfahren, wird zunächst ermittelt, bei welcher Verdichtung der Motor mit der Kraftstoffprobe zu "klopfen" beginnt. Dies geschieht bei einer konstanten Zündzeitstellung, einer Drehzahl von 600 U/Min und einer Luftvorwärmung von 52 °C. Anschließend wird die dazugehörige Octanzahl ermittelt, indem das Isooctan/n-Heptan-Gemisch bei konstanter Verdichtung so lange in seinem Verhältnis verändert wird, bis der Testmotor ein identisches Klopfverhalten aufweist. Besteht das Gemisch dann z.B. zu 95 % aus Isooctan, so lautet die "Research-Octanzahl" "95 ROZ".

Härtere Bedingungen, nämlich 900 U/Min, eine Gemischvorwärmung auf 149 °C, sowie variable Zündzeitstellung gelten für die Bestimmung der Motor-Oktanzahl (MOZ).

Neben diesen Zusätzen können Otto-Kraftstoffe weitere Additive enthalten. Diese sollen die Entstehung fester Verbrennungsrückstände möglichst verhindern, Rückstände (Ablagerungen) im Motor umwandeln und das Ansaug- und Gemischaufbereitungs-

system reinigen. Außerdem verbessern bestimmte Additive den Korrosionsschutz. Weiter enthalten Otto-Kraftstoffe so genannte Oxidationsinhibitoren; dies sind Stoffe, die die Harzbildung in Otto-Kraftstoffen bei längerer Lagerung hemmen oder verhindern.

Eine weitere Kenngröße von Otto-Kraftstoffen ist der Heizwert. Er bezeichnet den Wert an chemisch gebundener Energie und wird Kilojoule pro Kilogramm Brennstoff, kJ/kg, angegeben. Für Normal- und Superbenzin liegt der Heizwert ungefähr bei 43500 kJ/kg und damit etwas höher als der von Diesel-Kraftstoff. Weitere Kenngrößen sind in der EN 228 (Otto-Kraftstoffe, Mindestanforderungen) aufgeführt. Neben der bereits erwähnten Klopfhärte sind dies unter anderem Dichte, Siedepunkt, Bleigehalt, Schwefelgehalt, Gehalt an Aromaten sowie Verträglichkeit gegenüber Elastomeren, z.B. Moltopren oder Vulkollan.

Dabei soll die Dichte bei 15°C für Superbenzin im Bereich von 0,74 bis 0,79 g/ml und für Normalbenzin von 0,72 bis 0,77 g/ml betragen.

Das Siedepunkt liegt bei maximal 215°C; dies bedeutet, dass bei dieser Temperatur das Benzin vollständig in den gasförmigen (dampförmigen) Zustand übergegangen sein muss.

Der Bleigehalt von unverbleitem Otto-Kraftstoff darf 0,013 g/l nicht überschreiten. (Daher ist der Begriff "unverbleites Benzin" nicht ganz richtig).

Bekanntermaßen dürfen Otto-Motoren mit Katalysatoren nur mit unverbleitem Benzin betrieben werden. Ist der Bleigehalt im Benzin zu hoch, so lagert sich der im Abgas enthaltene Bleistaub sowohl an der Lambda-Sonde als auch an den katalytisch aktiven Zonen des Katalysators ab. Dadurch werden beide Komponenten unbrauchbar.

Der Schwefelgehalt darf in Zukunft nur noch max. 10 ppm (parts per million) für Otto- und Dieseldieselkraftstoff gemäß geänderter Richtlinie 1999/30/EG betragen. Außerdem muss sichergestellt sein, dass der Otto-Kraftstoff mit Elastomeren verträglich ist, also diese z. B. nicht anlöst.

Der Gehalt an Aromaten, also ringförmigen Kohlenwasserstoff-Verbindungen wie z. B. Benzol, darf EU-weit ab 01.01.2005 max. 35 Vol.% betragen, statt vorher 42 Vol.%.

Schließlich sei noch die in der EN 228 nicht aufgeführte Kenngröße Flammpunkt erwähnt. Das ist die Temperatur, bei der ein brennbarer Stoff (hier der Otto-Kraftstoff) gerade so viel Dämpfe entwickelt, dass das über der Flüssigkeit stehende Dampf-Luft-Gemisch durch eine 5 mm lange Zündflamme kurz zum Aufflammen gebracht wird. Der Flammpunkt von Otto-Kraftstoff liegt unter 21°C, also sehr niedrig; dadurch erklären sich die notwendigen Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit Otto-Kraftstoff.

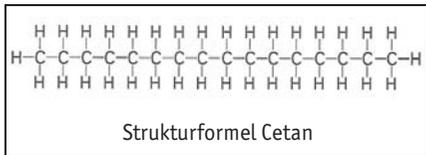
Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern

Kraftstoffe auf Basis Erdöl / Erdgas:

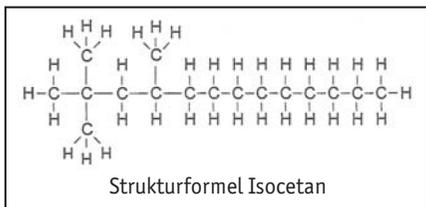
Diesel-Kraftstoff

Diesel-Kraftstoff ist ein Gemisch von Kohlenwasserstoff-Verbindungen mit geraden, verzweigten und ringförmigen Kohlenstoff-Ketten; diese weisen 10 bis 22 Kohlenstoffatome auf.

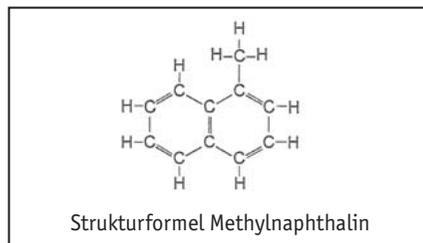
Als Beispiel für eine gerade Kette, auch normal-Paraffin, n-Paraffin, genannt, steht hier das Cetan (vom griechischen "ceta" = 16). Cetan besitzt also 16 Kohlenstoffatome.



Als Beispiel für eine verzweigte Kette, auch iso-Paraffin genannt, steht hier das (vereinfacht dargestellte) Isocetan (vom griechischen "isos" = gleich). Isocetan besitzt 16 Kohlenstoffatome, also gleich viel wie Cetan; sie sind jedoch anders (verzweigt) angeordnet.



Als Beispiel für eine ringförmige Kette steht das Methylnaphthalin (vom persisch-griechischen "naphta"= Schwebenbenzin).



Vergleicht man die Eigenschaften der beiden Kohlenwasserstoffe Cetan und Methylnaphthalin, so unterscheiden sie sich wesentlich in ihrer Zündwilligkeit. Dabei zeigt Cetan ein optimales Betriebsverhalten als Diesel-Kraftstoff; es dient daher als Eichkraftstoff zur Ermittlung der Cetanzahl, abgekürzt CZ. Die Cetanzahl ist ein Maß für die Zündwilligkeit eines Diesel-Kraftstoffs. Dem sehr zündwilligen Cetan ordnet man die Cetanzahl 100, dem zündträgen Methylnaphthalin die Cetanzahl 0 zu. Die Cetanzahl 55 z. B. bedeutet, dass dieser Diesel-Kraftstoff genauso zündwillig ist wie eine Vergleichsmischung aus 55 Vol.% Cetan und 45 Vol.% Methylnaphthalin. Die Zündwilligkeit steigt mit wachsender Cetanzahl.

Die Cetanzahlen heutiger Diesel-Kraftstoffe liegen bei Werten von mindestens 51 (nach EN 590) bis 55 (Super-Diesel). Kürzlich auf den Markt gekommene Sorten, wie V-Power (Shell) oder Ultimate (ARAL) erreichen Cetanzahlen von knapp 60 (siehe auch Kapitel "Vollsynthetische Kraftstoffe: GtL"). Die Bestimmung der Cetanzahl eines Diesel-Kraftstoffs gemäß DIN 51773 erfolgt in Einzylinder-Viertakt-Prüfmotoren mit einer Einrichtung zur Verstellung des Verdichtungsdrucks. Wegen der hohen Zündwilligkeit ist der Anteil von Kohlenwasserstoff-Verbindungen mit geraden Ketten hoch. Durch Zusatz von Zündbeschleunigern lässt sich die Zündwilligkeit des Diesel-Kraftstoffs zusätzlich erhöhen. Ihre Wirkung beruht darauf, dass sie bei Eintritt in die heiße Luft sofort und mit schnellem Temperaturanstieg verbrennen; hierdurch wird der Zündverzögerung des Diesel-Kraftstoffs verkürzt. Heutige Diesel-Kraftstoffe enthalten Zündbeschleuniger in der Größenordnung von 0,1 Vol.% bis 1 Vol.%. Eine weitere Kenngröße von Diesel-Kraftstoffen ist der Heizwert. Er bezeichnet den Wert an chemisch gebundener Energie und wird in Kilojoule pro Kilogramm Brennstoff, kJ/kg, angegeben. Für Diesel-Kraftstoff liegt der Heizwert bei ca. 42000 kJ/kg und ist damit etwas niedriger als der von Otto-Kraftstoff. Weitere Kenngrößen sind in der EN 590 (Diesel-Kraftstoffe, Mindestanforderungen) aufgeführt. Neben der bereits erwähnten Zündwilligkeit sind

dies unter anderem Dichte, kinematische Viskosität, Siedeverlauf, Flammpunkt, Filtrierbarkeit, Schwefelgehalt und Wassergehalt. Dabei soll die Dichte bei 15°C bei 0,82 bis 0,86 g/ml und die kinematische Viskosität bei 20°C 2 bis 8 mm²/s betragen; diese liegt damit etwa zehnmal höher als die kinematische Viskosität von Otto-Kraftstoffen. Der Siedeverlauf zeigt an, bei welchen Temperaturen wieviel Volumenanteile in den dampfförmigen Zustand übergegangen sein müssen. Für Diesel-Kraftstoff gilt, dass bei 250°C höchstens 65 Volumenanteile, bis 350°C mindestens 85 Volumenanteile dampfförmig sein müssen. Der Siedeverlauf oder auch Siedebereich beeinflusst die Eigenschaften des Diesel-Kraftstoffs. So führt eine Ausweitung des Siedebereichs nach höheren Temperaturen zu erhöhter Rußbildung und zu Anlagerungen von Verbrennungsrückständen an der Düse (Düsenverkokung). Der Flammpunkt bezeichnet die Temperatur, bei der ein brennbarer Stoff (hier der Diesel-Kraftstoff) gerade so viel Dämpfe entwickelt, dass das über der Flüssigkeit stehende Dampf-Luft-Gemisch durch eine 5 mm lange Zündflamme kurz zum Aufflammen gebracht wird. Der Flammpunkt von Diesel-Kraftstoff soll gemäß EN 590 55°C betragen; er liegt damit deutlich über dem Flammpunkt von Benzin-Kraftstoff mit 21°C. Der gemäß EN vorgeschriebene Grenzwert der Filtrierbarkeit liegt für

Sommerdiesel bei 0°C und für Winterdiesel bei -15°C. Durch Zusatz von Fließverbesserern und weiteren Additiven lässt sich die Fließbarkeit von heute angebotenem Winterdiesel auf -23°C absenken.

Der Schwefelgehalt darf in Zukunft nur noch max. 10 ppm für Otto- und Dieselmotoren gemäß geänderter Richtlinie 1999/30/EG betragen. (Nach der inzwischen gesetzlich fixierten

Definition gelten Kraftstoffe als "schwefelarm", wenn der Schwefelgehalt unter 0,00005 Gew. % liegt (gebräuchlich ist dafür auch die Angabe max. 50 ppm). Als "schwefelfrei" gelten Kraftstoffe mit max. 10 ppm Schwefel).

Schließlich darf ein Kilogramm Dieselmotorenkraftstoff höchstens 500 Milligramm (=0,5g) Wasser enthalten (Wassergehalt).

Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern Kraftstoffe auf Basis Erdöl / Erdgas:

Erdgas

Erdgas ist der umweltverträglichste fossile Energieträger. Es besteht im Wesentlichen aus Methan, CH₄, das den höchsten Wasserstoffgehalt aller Kohlenwasserstoffe aufweist.

Erdgas ist ein ausgezeichnete Ottokraftstoff und kann ohne chemische Veränderungen in Verbrennungsmotoren verwendet werden. Allerdings muss es - je nach Gewinnungsort - gereinigt, getrocknet und gegebenenfalls angereichert werden.

Erdgas (englisch: Natural Gas) ist unter Normalbedingungen (0°C, 1,013 bar) gasförmig und geruchlos.

Die Dichte von Erdgas schwankt zwischen 0,72 und 1,23 kg/m³. (Zum Vergleich: Luft hat eine Dichte von 1,29 kg pro m³). Erdgas ist also leichter als Luft.

Erdgas, das als Kraftstoff genutzt werden kann, gibt es in Deutschland in zwei unterschiedlichen Formen: als CNG = Compressed Natural Gas, also komprimiertes Erdgas und als LNG = Liquefied Natural Gas, also verflüssigtes Erdgas. Bei -162°C wird Erdgas flüssig und nimmt dabei nur noch 1/600 des Ausgangsvolumens ein. Diese Form des Erdgases gibt es zurzeit nur an sehr wenigen Tankstellen in Deutschland; es wird daher hier nicht weiter behandelt. In Deutschland wird CNG mit einem Tankdruck von ca. 200 bar, in Ausnahmefällen auch von ca. 700 bar angeboten.

Erdgas darf nicht mit Autogas verwechselt werden! Um dies sicherzustellen, werden an den Fahrzeugen unterschiedliche Füllstutzen verwendet.



Bild 5: Füllstutzen für CNG (links) und für Flüssiggas (rechts);

Quelle: Ford und Gieger

An den deutschen Tankstellen werden zwei CNG-Sorten angeboten: H-Gas und L-Gas. Dadurch können bei Verbrauch und Reichweite gegebenenfalls Abweichungen zu den Angaben der Automobilhersteller auftreten.

H-Gas steht nahezu bundesweit zur Verfügung, L-Gas wird überwiegend in Bremen, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen angeboten.

Der Unterschied zwischen H- und L-Gas liegt im Energiegehalt (Heizwert) und im Abgabepreis. Der Energiegehalt von H-Gas ist um etwa 15% höher als der von L-Gas; der durchschnittliche Abgabepreis für H-Gas lag zum Jahresanfang 2003 bei 67 Cent pro kg und für L-Gas bei 59 Cent pro kg. Der Kunde erhält also für das gleiche Geld die gleiche Fahrleistung.

Wie beim Rohöl schwankt auch bei Erdgas der Energiegehalt - je nachdem, woher das Gas kommt. Der Energiegehalt (Heizwert) wird angegeben in Megajoule, (MJ) pro m³ oder MJ pro kg; er liegt bei H-Gas durchschnittlich bei ca. 47 MJ/kg. Das entspricht bei einer

durchschnittlichen Dichte von 0,83kg/m³ und unter Normaldruck von 1,013 bar einem Heizwert von ca. 39 MJ/m³.

Zum Vergleich: Superbenzin hat einen durchschnittlichen Heizwert von ca. 44 MJ/kg; das entspricht bei einer mittleren Dichte von 0,85 kg/Liter einem durchschnittlichen Heizwert von ca. 37 MJ/Liter.

Dies bedeutet: CNG hat im Durchschnitt einen leicht höheren Heizwert als Superbenzin. Allerdings ist der volumenbezogene Energiegehalt von Superbenzin, also ca. 37 MJ, in einem Liter konzentriert, während für einen vergleichbar großen Energiegehalt beim Erdgas unter Normaldruck (1,013 bar) ein Volumen von einem Kubikmeter, also 1000 Litern, nötig ist. Das erklärt, warum Erdgas komprimiert werden muss. Denn bei einem Tankdruck von ca. 200 bar schrumpft dieses Volumen auf ca. 5 Liter. Also ist der volumenbezogene, mittlere Heizwert von CNG (39 MJ) unter dem Druck von ca. 200 bar auf ca. 5 Liter konzentriert.

Während bei stationären Heizgasanwendungen, zum Beispiel bei der Wohnungszheizung, das durchströmende Volumen in Kubikmetern erfasst wird, kann an der Tankstelle aus technischen Gründen nur die Masse des hoch komprimierten Gases in kg gemessen werden. Das erklärt, warum der Heizwert von CNG in MJ/kg angegeben wird.

Häufig wird der Heizwert auch als volumenbezogene oder massenbezogene (gewichtsbezogene) Energiedichte angegeben; er hat dann die Einheit kWh pro m³ (volumenbezogen) oder kWh pro kg (massenbezogen). Dabei gilt folgender Umrechnungsfaktor: 1 kWh = 3,6 MJ.

Die im Anforderungsbündel "Verbrennung" genannten Kriterien erfüllt Erdgas vergleichsweise gut; allerdings sind die Werte für Zündtemperatur,

obere und untere Zündgrenze sowie Luftbedarf etwas schlechter als bei Superbenzin; vgl. auch Tabelle 2.

Beim Kaltstart zeigen gasförmige Kraftstoffe gegenüber flüssigen Vorteile: Da der Kraftstoff bereits gasförmig vorliegt, ist eine bessere Durchmischung mit Luft möglich.

Bei flüssigen Kraftstoffen wie Benzin liegt die Verdampfungsrate bei geringen Temperaturen so niedrig, dass nur eine relativ geringe Menge an Benzindämpfen vorhanden ist. Da Gase und Gasgemische leichter entzündbar sind als beispielsweise Benzintröpfchen, treten bei Erdgas keine oder nur geringe Probleme auf. Eine Anfettung wie im Benzinbetrieb mit einer ca. sechsfachen normalen Kraftstoffmenge ist deswegen nicht notwendig.

Die Klopffestigkeit von Erdgas ist mit der von Superbenzin vergleichbar.

Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern

Kraftstoffe auf Basis Erdöl / Erdgas:

Autogas / Flüssiggas

Flüssiggas (englisch: Liquefied Petroleum Gas, LPG), auch als Autogas bezeichnet, enthält in Deutschland nach DIN EN 589 mindestens 95 Vol. % Propan (C₃H₈) und Propen (C₃H₆), der Propananteil muss jedoch überwiegen. Der Rest darf aus Butan (C₄H₁₀) und Buten bestehen.

In Europa ist indes das Mischungsverhältnis von Propan und Butan unterschiedlich. In Deutschland und Großbritannien hat Propan meist einen

Anteil von 95 Vol. %. In Frankreich wird hingegen eine 45:55-Mischung (Propan: Butan) bevorzugt. In sehr warmen Landesteilen überwiegt der Butan-Anteil. Die Gaslieferanten variieren die Zusammensetzung nach der Umgebungstemperatur. Unter Normalbedingungen (0°C, 1,013 bar) ist der Hauptbestandteil von LPG, also Propan, gasförmig und geruchlos. Als Abfallprodukt der Industrie ist Flüssiggas allerdings geruchsbelastet.

Gegebenenfalls wird es mit einer speziellen Substanz versetzt (odoriert), damit eine Leckage besser wahrgenommen werden kann.

Unter Normalbedingungen (0°C, 1,013 bar) hat Propan eine Dichte von ca. 2 kg pro m³; es ist also schwerer als Luft. Es sammelt sich am Boden; daher sind geeignete bauliche oder lüftungstechnische Maßnahmen erforderlich, damit sich keine erhöhten Flüssiggasmengen ansammeln können.

Bereits unter relativ geringem Druck (ca. 2 bar) und bei Raumtemperatur lässt sich Propan verflüssigen. Es nimmt dabei nur noch 1/260 seines Gasvolumens ein; aus 1.000 Litern Gas werden etwa 4 Liter Flüssiggas. Es wird in Deutschland mit einem Tankdruck von etwa 10 bar (bei 20°C) angeboten. LPG entsteht als Nebenprodukt sowohl bei der Förderung von Erdgas als auch bei der Verarbeitung von Erdöl in der Raffinerie; es muss also nicht speziell hergestellt werden.

Der gewichtsspezifische Heizwert von Flüssiggas mit durchschnittlich ca. 46 MJ/kg ist etwa so hoch wie bei Erdgas (ca. 47 MJ/kg) und liegt damit leicht über dem Wert von Superbenzin (ca. 44 MJ/kg).

Die im Anforderungsbündel "Verbrennung" genannten Kriterien (Werte für Zündtemperatur, obere und untere Zündgrenze sowie Luftbedarf) erfüllt Flüssiggas vergleichsweise besser als Erdgas und etwas schlechter als Superbenzin; vgl. auch Tabelle 2. Allerdings ist das Flüssiggas/Luft-Verhältnis beim LPG-Motor nahezu

immer identisch und im Vergleich zum Benzin-Motor relativ unabhängig von der Umgebungstemperatur.

Hinsichtlich des Kaltstartverhaltens verhält sich Flüssiggas ähnlich wie Erdgas; vergleiche die entsprechenden Angaben in Kapitel "Anforderungen an Kraftstoffe". Die Klopffestigkeit von Flüssiggas ist höher als die von Erdgas und Superbenzin.

Der Anteil gasbetriebener Kraftfahrzeuge am Gesamtbestand spielte bisher eine eher vernachlässigbare Rolle. Dies hat sich in den letzten Jahren geändert. So lag der Bestand an gasbetriebenen Pkw in Deutschland (Flüssiggas und Erdgas) bezogen auf den Gesamtbestand der Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2005 bei 9433 Stück oder 0,28%. Dieser Anteil stieg bei den Neuzulassungen im Jahr 2006 auf 0,45% und lag Ende 2007 bei 0,53% oder 16627 Stück.

Das EU-Ziel, bis zum Jahr 2010 einen Erdgasanteil von 2 % und bis 2020 einen Anteil von 10 % am Kraftstoffmarkt zu erreichen, ist dennoch ambitioniert. Eine Dauersubventionierung erscheint notwendig.

Wie in Kapitel "Künftige Anforderungen an den Fahrzeugantrieb" bereits ausgeführt, wird die dargestellte Entwicklung vor allem in Deutschland unter dem Gesichtspunkt der weltweit angestrebten CO₂-Reduktion (Klimagasreduktion) getrieben. Zusätzlich ist die Nutzung regenerativer Energien zur Kraftstoffherstellung sowie die Verringerung von Lärmemissionen politisches Ziel.

Entscheidender Impuls für die notwendigen Investitionen in Fahrzeuge und Tankstellen mit den entsprechenden Versorgungseinrichtungen ist jedoch die Steuerbegünstigung für alternative Kraftstoffe in Deutschland:

Im "Energiesteuergesetz" (Stand: 30.06.2006) wurde festgelegt, dass bis

Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern
Kraftstoffe auf Basis Erdöl / Erdgas:

Wasserstoff

Unter dem Blickwinkel der Vermeidung lokaler Emissionen ist die Verwendung von Wasserstoff in Ottomotoren nahezu optimal. Bei geeigneter Auslegung des Motors entstehen lediglich minimale Mengen an Stickstoffoxiden; das wesentliche Verbrennungsprodukt ist Wasser. Für die gesamte Bewertung ist auch hier die Erzeugung des Wasserstoffs entscheidend. Heute wird Wasserstoff nahezu ausschließlich durch Abspalten von Wasserstoff aus Erdgas mittels Hochtemperaturdampf in Gegenwart von Katalysatoren erzeugt. Dabei wird der gesamte Kohlenstoffgehalt des Erdgases als Kohlendioxid freigesetzt. Eine sehr viel günstigere Perspektive bietet die Nutzung von elektrischer Energie, mit deren Hilfe Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden kann (Elektrolyse). Die benötigte elektrische Energie kann entweder aus erneuerbaren Energieträgern (Wasser-, Wind-, Solarenergie) oder aus nuklearer Primärenergie stammen.

2018 ein im Vergleich zu Otto- und Dieselmotoren reduzierter Steuersatz für Erd- und Flüssiggas erhoben wird. Für Wasserstoff stehen Regelungen noch aus.

Damit kann aus Wasser nahezu emissionsfrei Wasserstoff erzeugt werden. Unter Normalbedingungen (0°C, 1,013 bar) hat Wasserstoff eine sehr geringe Dichte von 0,0899 kg/m³; Wasserstoff ist also deutlich leichter als Luft. Damit ist auch die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff (ca. 11 MJ/m³) deutlich niedriger als bei Erdgas (39 MJ/m³). Es ist daher erforderlich, Wasserstoff zu speichern. Die Speichertechnik für Wasserstoff ist der der Erdgastechnik sehr ähnlich. Druckgassysteme mit 200 bar Tankdruck werden schon sehr lange verwendet. Sie eignen sich vor allem für Nutzfahrzeuge mit begrenzten Reichweitenanforderungen. Hochdrucksysteme bis zu 700 bar werden derzeit entwickelt.

Komprimierter Wasserstoff, z.B. mit einem Tankdruck von 200 bar, wird unter der Bezeichnung Compressed Hydrogen, CH₂, oder Compressed Gaseous Hydrogen, CGH₂ angeboten.

Wasserstoff wird bei -253°C flüssig. Die Technik für die Nutzung dieses tiefkalten, flüssigen Wasserstoffs wurde zunächst für die Raumfahrt entwickelt und dann schrittweise für automobiler Anwendungen weiterentwickelt.

Die massenbezogene Energiedichte von flüssigem Wasserstoff liegt mit ca. 120 MJ/kg ungefähr dreimal so hoch wie die von Erd- oder Flüssiggas. Daher wird die Speichertechnik des tiefkalten, flüssigen Wasserstoffs besonders für den Einsatz im Pkw weiterverfolgt, obwohl der Energieaufwand zur Bereitstellung des flüssigen Wasserstoffs höher ist als bei der Druckgasteknik. Tiefkalter, flüssiger Wasserstoff wird unter der Bezeichnung Liquified Hydrogen, LH₂, angeboten.

Die im Anforderungsbündel "Verbrennung" genannten Kriterien (Werte für Zündtemperatur, obere und untere Zündgrenze sowie Luftbedarf) liegen beim Wasserstoff etwa bei denen von Erdgas; vgl. auch Tabelle 2.

Allerdings ist der Luftbedarf von 34 kg Luft/kg Wasserstoff vergleichsweise hoch. Dies ist jedoch kein grundsätzlicher Nachteil: Im Vergleich zu den anderen Kraftstoffen wird für eine bestimmte zu verbrennende Luftmasse eine deutlich geringere Wasserstoffmasse benötigt. Grund dafür ist die bereits beschriebene hohe massenbezogene Energiedichte des Wasserstoffs. Zurzeit befindet sich die Technik der Verbrennung von Wasserstoff in Ottomotoren in der Entwicklung.

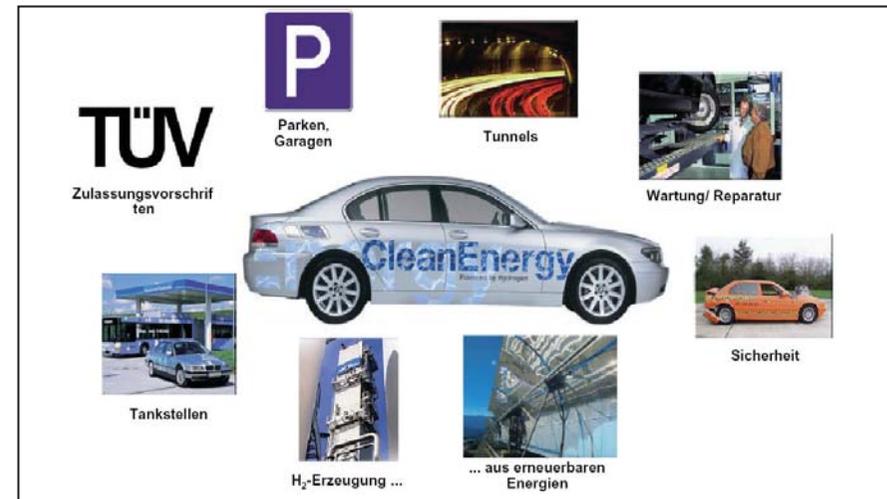


Bild 6: Herausforderungen auf dem Weg zur Großserie von Wasserstoff-Fahrzeugen; Quelle: BMW

Kennwert	Erdgas	Flüssiggas	Biogas	Wasserstoff	Superbenzin
Dichte in kg/m ³ 0°C, 1,013 bar (normal) flüssig bei	0,83 430 -162°C	2,25 510 8 bar	1,2 --	0,0899 71 -260°C	-- 820
Spez. Heizwert in MJ/kg	ca. 47	ca. 46	ca. 20	ca. 120	ca. 44
Zündtemperatur in °C	ca. 520	ca. 400	ca. 700	ca. 560	ca. 400
Zündgrenze in Vol % Gas in Luft untere obere	4 40	1,5 15	6 12	4 77	0,6 8
Stöch. Luftbedarf in kg Luft/kg Kraftstoff	ca. 18	ca. 16	ca. 15	ca. 34	14,7
Kloppfestigkeit	gut +	gut ++	gut -	gut	gut

Tabelle 2: Wichtige Kennwerte gasförmiger Kraftstoffe im Vergleich zu Superbenzin

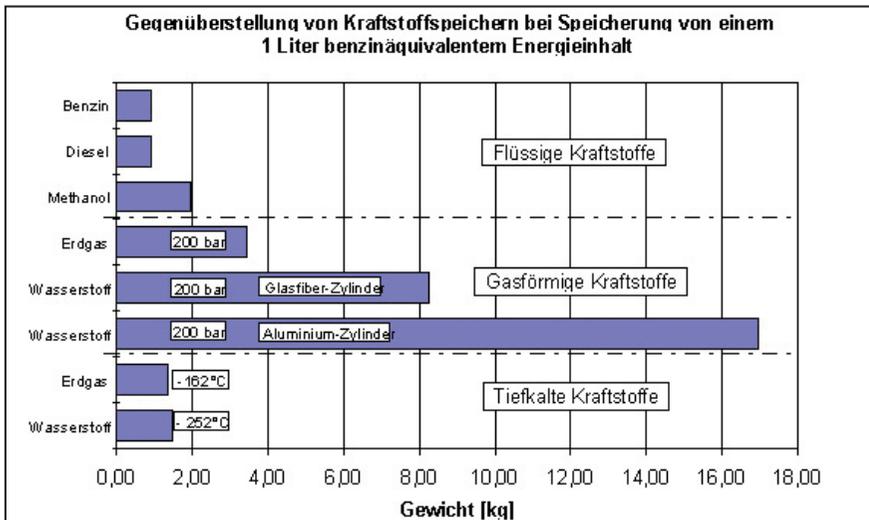


Bild 7: Gegenüberstellung von Kraftstoffspeichern bei Speicherung von einem Liter benzinäquivalentem Energieinhalt; Quelle: Umweltbundesamt

Es existieren drei öffentliche Wasserstoff-Tankstellen, eine in München, zwei in Berlin. Die Herausforderungen auf dem Weg zur Großserie von Wasserstoff-Fahrzeugen zeigt Bild 6. In Tabelle 2 sind die wesentlichen Kennwerte von Erdgas, Flüssiggas, Biogas und Wasserstoff im Vergleich zu Superbenzin zusammenfassend dargestellt.

Eine Gegenüberstellung von Kraftstoffspeichern bei Speicherung von einem Liter benzinäquivalentem Energieinhalt zeigt Bild 7.

Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern
Vollsynthetische Kraftstoffe aus Synthesegas: Gas-to-Liquid, GtL

Die Herstellung vollsynthetischer Kraftstoffe aus fossilen Kohlenwasserstoffen - insbesondere aus Erdgas - bietet in vielen Regionen der Erde beim heutigen Rohölpreis eine wirtschaftlich sehr interessante Alternative, weil Erdgas in entlegenen Quellen kostengünstig bereitgestellt wird oder als Erdölbegleitgas bei der Förderung von Erdöl anfällt. Vollsynthetische Kraftstoffe werden häufig auch als Designerkraftstoffe

bezeichnet, weil der Herstellungsprozess dazu genutzt werden kann, den Kraftstoffen ganz bestimmte Eigenschaften zu verleihen. Einige Fahrzeughersteller, z.B. Volkswagen, verwenden auch die Bezeichnung Synfuel. Da aus gasförmigen Ausgangsstoffen flüssige Endprodukte - in diesem Fall flüssige Kraftstoffe - hergestellt werden, hat sich die Bezeichnung Gas-to-Liquid, GtL, etabliert.

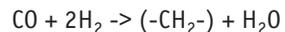
Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern
Vollsynthetische Kraftstoffe GtL:

GtL aus Erdgas / Methan

Zunächst muss das Erdgas zu Synthesegas umgewandelt werden. Synthesegas ist eine Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff; es hat nahezu das ideale Mischungsverhältnis von ca. 1 mol CO und 2 mol H₂ für eine anschließende Fischer-Tropsch-Synthese.

Hierbei handelt es sich um ein um 1923 entwickeltes großtechnisches Verfahren zur Umwandlung von Synthesegas (CO/H₂) in flüssige Kohlenwasserstoffe. Großtechnisch wurde das Verfahren ab dem Jahr 1934 von der Ruhrchemie AG angewandt.

Bei der Fischer-Tropsch-Synthese reagieren Wasserstoff und Kohlenmonoxid zu langkettigen Kohlenwasserstoffen. Ihr liegt folgende katalytische Reaktion zugrunde:



Die Reaktion läuft x-mal ab. Dabei entsteht eine gerade Kette von x -CH₂- Komponenten. Besteht die Kette z.B. aus 16 CH₂-Komponenten, so nennt man diesen Kohlenwasserstoff n-Hexadecan, besser bekannt als Cetan, einem sehr wichtigen Bestandteil von Dieseldieselkraftstoff; vergleiche auch Kapitel "Dieseldieselkraftstoff".

Das optimale Verhältnis von H₂ zu CO für die Fischer-Tropsch-Synthese ist zwei zu eins.

Die Reaktion verläuft exotherm ab. Das bedeutet, dass die Wärmeabfuhr eine entscheidende verfahrenstechnische Herausforderung darstellt. Für die Synthese muss eine bestimmte Temperatur konstant gehalten werden.

Ein deutlicher Anstieg würde zu einer schnellen Verkokung des Katalysators und damit zum Abbruch der Synthese führen. Als Katalysatoren kommen praktisch nur Eisen und Kobalt zum Einsatz. Nickel ist zwar hinsichtlich der Hydrierung von Kohlenmonoxid auch aktiv, bildet aber hauptsächlich Methan. In der Praxis werden Legierungen (Zusätze: Alkalimetalle, Kupfer, Ammoniak, Mangan, Vanadium, Titan) eingesetzt, mit denen man bestimmte Produktzusammensetzungen erzielen kann.

Üblicherweise läuft die Synthese bei 160°C - 350°C und 1 - 30 bar ab. Dabei führen hohe Temperaturen (T > 330°C) zur vermehrten Bildung von Leicht-siedern, d.h. kurzkettigen Kohlenwasserstoffen wie z.B. Rohbenzin oder auch Naphtha genannt. Um einen hohen Anteil an Dieseldieselkraftstoff zu erzeugen, erfolgt eine Verschiebung in Richtung langkettiger Kohlenwasserstoffe (T < 250°C).

Damit fällt auch ein relativ hoher Anteil von Wachsen an, der beim anschließenden Hydrocracking durch Zufuhr von Wasserstoff gezielt in kürzere Ketten der Dieselfraktion aufgespalten wird.

Für eine stabile Prozessführung ist vor Eintritt in den FT-Synthesereaktor die vollständige Reinigung des Synthesegases von Katalysatorgiften notwendig. Als Katalysatorgift gelten alle Stoffe, die mit dem Katalysator reagieren und eine Oxidschicht ausbilden oder die am Katalysator anhaften. Beides reduziert bzw. blockiert die Katalysatorwirkung. Deshalb muss das Synthesegas frei von Sauerstoff, Schwefel und Teer sein. Der Schwefelgehalt muss z.B. kleiner als fünf ppb (parts per Billion) sein, dies entspricht einem Anteil kleiner als 0,000000005.

Der aus der Fischer-Tropsch-Synthese gewonnene, nahezu 100 %ig paraffinische Kraftstoff, vorzugsweise im

Siedebereich von Diesel oder Kerosin, ist frei von Schwefel oder anderen mineralischen Verunreinigungen und vollkommen aromatenfrei (Aromaten < 1 ppm). Firmen wie Shell und Sasol haben kürzlich Großinvestitionen in gas-to-liquid GtL-Produktionen beschlossen. Es wird ca. 5-7 Jahre dauern, bis SynFuels in größerem Umfang zur Versorgung beitragen. Des Weiteren ist dieses Herstellungsverfahren Garant für zukünftige Motorkonzepte wie das Combined Combustion System (CCS), ein Motor, der die niedrigen Emissionen eines modernen Benziners mit dem geringen Kraftstoffverbrauch eines TDI-Dieselmotors verbindet.

Das Emissionsverhalten von GtL wurde erstmals mit dem von Shell in Malaysia produzierten Kraftstoff in einem Flottenversuch untersucht. Der Siedebereich ähnelt dem von üblichem Diesel, wobei der Siedebeginn mit



Bild 8: GtL-Anlage in Katar

240°C deutlich höher liegt, das Siedende mit 360°C etwa gleich ist; vergleiche Kapitel "Diesel-Kraftstoff". Spontan wurden ohne Anpassungen in der Motorsteuerung deutliche Emissionsverbesserungen erzielt. Die Messungen wurden an 25 Golf mit 1,9l TDI Aggregat und 74 kW vorgenommen. Die Ergebnisse zeigt Bild 9. Nach Aussagen von Volkswagen blieb der volumetrische Verbrauch trotz der mit 0,78 kg/l gegenüber Diesel um 6 % verringerten Dichte konstant, die CO₂-Emissionen sanken um 4 %; vergleiche auch Kapitel "Kraftstoffe als konstruktives Element". Der Kraftstoff setzt sich aus etwas über 50 % n-Paraffinen

Cetanzahl gegenüber n-Paraffinen leicht. Dennoch erreicht der angesprochene GtL-Kraftstoff eine Cetanzahl von 73 mit den bekannten guten Verbrennungseigenschaften. Offensichtlich ist die Aromatenfreiheit in erster Linie ausschlaggebend für die deutliche Russreduzierung. Auf den ersten Blick unverständlich - so Volkswagen - ist der Stickoxidvorteil. Es sei zu vermuten, dass durch die geringere Dichte des GtL-Diesels bei gleicher Momentenanforderung das Abgasrückführvolumen bezogen auf das eingespritzte Kraftstoffvolumen leicht zunimmt und damit zu einer leichteren Abkühlung führt.

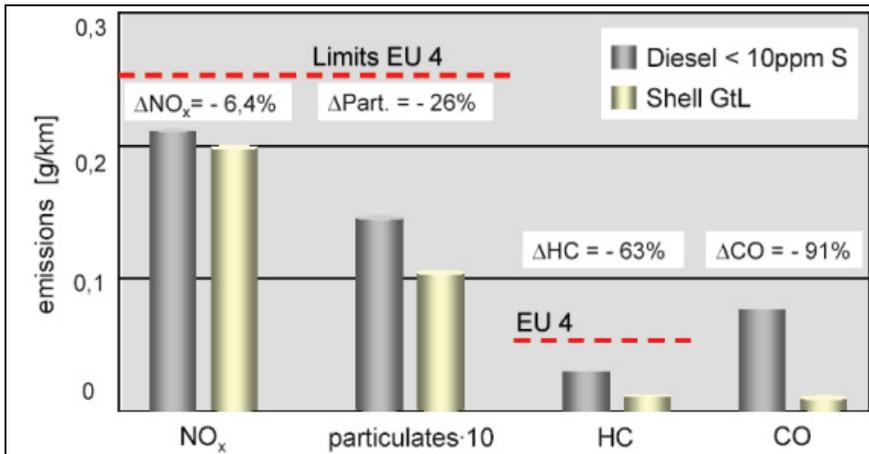


Bild 9: Emissionen mit Synthesediesel im Flottentest; Quelle: Volkswagen

und über 45 % iso-Paraffinen zusammen. Der Anteil von iso-Paraffinen ist für die Wintertauglichkeit unerlässlich, da dadurch der Cloudpunkt abgesenkt wird. Iso-Paraffine senken die

Nach allem, was man bisher ausmachen kann, verfolgen maßgebliche deutsche Kraftfahrzeughersteller eine Kraftstoffstrategie, die eine Diversifikation der Energiequellen und nicht der

Energieträger zum Ziel hat. Dabei soll eine Vielzahl von Rohstoffen der Erzeugung von Kraftstoffen dienen, die an bereits bestehenden Tankstellen vertrieben und von heutigen Fahrzeugen genutzt werden können. Da GtL/SynFuel ein hochreiner flüssiger Kraftstoff mit ähnlichen physikalischen Eigenschaften wie Benzin oder Diesel ist, kann das bestehende Tankstellennetz problemlos weiter genutzt werden. Wird dagegen Erdgas direkt als Kraftstoff verwendet, ist dies nicht der Fall. Darüber hinaus werden an den Fahrzeugen keine technischen Eingriffe notwendig. Dies ist ein entscheidender Vorteil, da die Emissionsvorteile nicht nur mit neuen, sondern mit allen Fahrzeugen erzielt werden. Für die Herstellung von GtL

bieten sich vor allem solche Erdgasvorkommen an, die sich in abgelegenen Gebieten befinden und nach herkömmlichen Verfahren nicht wirtschaftlich ausgebeutet werden können. Direkt an der Förderstelle produziertes GtL muss im Gegensatz zu Erdgas nicht aufwendig und kostspielig durch Pipelines zu den Absatzmärkten gepumpt werden, sondern lässt sich problemlos in Tankfahrzeugen transportieren. So bauen z. B. in Nigeria die Unternehmen Chevron und Sasol eine GtL-Anlage mit einer Jahresproduktion von 1,5 Millionen Tonnen, in der das bisher abgefackelte Erdgas zu hochwertigen Kraftstoffen umgewandelt werden kann.

Kraftstoffe aus erschöpflichen Energieträgern
Vollsynthetische Kraftstoffe GtL:
GtL aus Kohle

Zur Kohleverflüssigung für die Erzeugung flüssiger Produkte (Benzin bis Schweröl) aus Kohle sind im Wesentlichen zwei Verfahrenswege möglich: Die direkte Hydrierung der Kohle und die Kohlevergasung mit anschließender (indirekter) Hydrierung des Synthesegases. Die direkte Kohleverflüssigung wurde im Jahr 1913 durch Fritz Bergius patentiert (dieser erhielt dafür später den Nobelpreis) und wurde in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts als Pott-, Broche-, oder IG-Farben-Prozess bekannt. Die indirekte Kohleverflüssigung über Synthesegas wurde 1925 durch Fischer

Anders in Südafrika und China. Auf Basis des in Deutschland entwickelten Fischer-Tropsch-Verfahrens arbeitet schon seit langem eine industrielle Kohleverflüssigungsanlage der südafrikanischen SASOL. Die zwischen 1955 und 1982 gebaute und modernisierte Anlage im südafrikanischen Secunda produziert in drei Blöcken (SASOL 1, 2 und 3) rund 175 000 Barrel Ölprodukte (Benzin, Chemikalien) pro Tag für durchschnittlich rund 25 US-\$/Barrel. Der chinesische Energiekonzern Shenhua plant auch mit Hilfe deutscher Experten (DMT) im mongolischen Majata den Bau einer Kohleverflüssi-

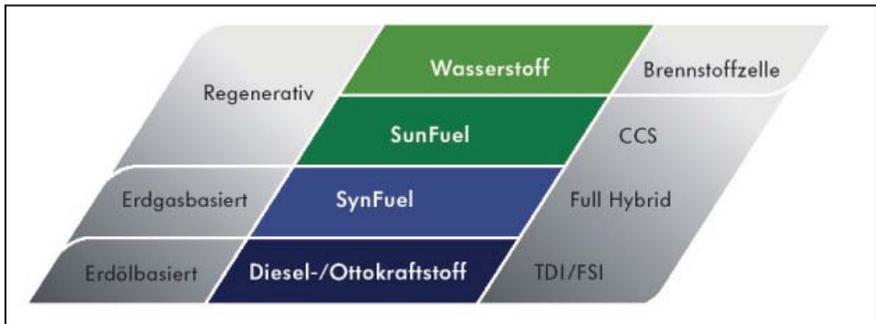


Bild 10: Kraftstoffstrategie der Volkswagen AG;
 Quelle: Volkswagen

und Tropsch zum Patent angemeldet. Beide Verfahrenswege wurden in Deutschland bis 1945 großtechnisch zur Kohlehydrierung angewandt.

gungsanlage, die jährlich aus rund 9,7 Mio t Kohle rund 5 Mio t Benzin, Kerosin, Diesel u. a. herstellen soll.

Die nach der ersten Ölkrise 1974 geplanten Anlagen zur großtechnischen Kohlevergasung und Kohleverflüssigung fielen dem Ölpreiseinbruch Mitte der 80er Jahre zum Opfer und wurden nie gebaut. Obwohl hierzulande entwickelt, ist die Kohleverflüssigung bei uns (fast) in Vergessenheit geraten. Die Nutzung des Hochtemperaturreaktors für die Kohlevergasung, Kohleverflüssigung oder Wasserstoffherzeugung ist ebenfalls hierzulande nicht weiter verfolgt worden.

Kraftstoffe aus erneuerbaren Energieträgern
Kraftstoffe aus reiner Biomasse:
Rapsöl

Rapsöl wird aus Raps gewonnen. Dies ist eine 60 bis 120 cm hohe Pflanze (Kreuzblütler) mit gelben Blüten und blaugrünen Blättern.

40 % Öl, das Rapsöl. Es wird entweder durch Auspressen oder durch Extraktion gewonnen; hierbei wird das Öl mit einem Lösungsmittel aus dem



Bild 11: Rapspflanzen

Ausgesät werden Sommer- und Winterraps; letzterer wird in Deutschland bevorzugt angebaut, da er einen höheren Samenertrag hat als Sommerraps. Er zählt zu den wichtigsten einheimischen Ölpflanzen. Die Samen des Raps enthalten etwa

Samen ausgewaschen oder ausgekocht. Bei beiden Verfahren entsteht als Nebenprodukt Rapskuchen, ein wichtiges, eiweißreiches Futtermittel. Das so gewonnene Rapsöl kann als Kraftstoff verwendet werden; allerdings besteht bei den meisten UBA

als Motorkonzepten die Gefahr von Motorschäden. Gegenüber Diesel-Kraftstoffen sind die Anteile an Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Partikeln im Abgas bei Rapsöl deutlich höher; der Anteil an Stickoxiden im Abgas ist bei beiden Kraftstoffen nahezu gleich hoch. Die Anteile an krebserzeugenden Stoffen, den polyzyklischen, aromatischen Kohlenwasserstoffen, PAH (vom englischen Polycyclic Aromatic Hydrocarbon), im Abgas von Rapsöl sind deutlich höher als bei Diesel-Kraftstoffen, ebenso die Geruchsbelastung. Dagegen enthält Rapsöl keinen Schwefel; somit entfällt der Ausstoß an Schwefel.

Nach einer Untersuchung des Umweltbundesamtes weist zwar Rapsöl gegenüber Diesel eine positive CO₂-Bilanz auf, diese ist jedoch nur dann überzeugend, wenn die Reststoffe der Rapsöl-Herstellung energetisch sinnvoll verwertet werden. Ungünstig wirkt sich die Lachgas-Freisetzung infolge der Stickstoffdüngung von Raps aus. Insgesamt liegt die Spanne an vermiedenen Treibhausgasen gegenüber Diesel zwischen 20% und 80%. Als eher begrenzt ist auch das Flächenpotenzial zu bezeichnen. Selbst wenn die Hälfte der deutschen Ackerfläche mit 4-jähriger Fruchtfolge mit Raps bestellt würde, könnte dies nur 5% unseres Dieselkraftstoffs ersetzen. Folglich könnte auch nur 1% bis 4% der dieselbedingten Klimagasemissionen hiermit vermieden werden, was nach ineffizienter CO₂-Vermeidungsstrategie einzustufen ist.

Da Rapsöl für moderne Dieselmotoren nicht geeignet ist, hat man versucht, durch so genannte Umesterung des Rapsöls einen dieselähnlichen Kraftstoff zu gewinnen, der bessere Eigenschaften als Rapsöl zeigt. Ein solcher Kraftstoff ist Rapsölmethylester, RME.

Kraftstoffe aus erneuerbaren Energieträgern Teilsynthetische Kraftstoffe aus Biomasse:

Rapsmethylester / Biodiesel

Rapsölmethylester, RME, fälschlicherweise auch häufig mit Biodiesel bezeichnet, wird durch die alkalische Veresterung (Verseifung) von Rapsöl mit Methanol hergestellt. Das Methanol wird üblicherweise aus Methan gewonnen und dieses wiederum aus Erdgas. Rapsölmethylester, RME (Biodiesel) ist daher kein reines Naturprodukt.

Technisch steht der Verwendung von RME in den meisten herkömmlichen Dieselmotoren prinzipiell nichts entgegen. Dennoch sollte man sich beim Fahrzeughersteller darüber informieren, ob der im Fahrzeug verbaute Motor für den Betrieb mit RME auch geeignet ist, da die Praxis gezeigt hat, dass Gummi- und Kunststoffteile durch den Kontakt mit RME angegriffen werden können. Nach Angaben der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. sind schätzungsweise 2,5 bis 3 Mio. Pkw für den Biodieselbetrieb (Betrieb mit Rapsöl und RME) zugelassen; Stand 2004. Dies ist indes sehr optimistisch, da zahlreiche Fahrzeughersteller in der Zwischenzeit (Stand 2006) ihre Freigaben (vor allem für Common rail- und Pumpe-Düse-Motoren) zurückgezogen haben.

Begrenzt durch den hohen Bedarf an Anbauflächen für Raps wird RME lediglich als Ergänzung, nicht aber als langfristige und sinnvolle Alternative zu den herkömmlichen Kraftstoffen

angesehen werden. Als realistische Annahme gilt, dass RME nicht mehr als 5% des Dieserverbrauchs in Deutschland ersetzt.

Ab dem Jahr 2005 bzw. 2008 müssen Pkw und Lkw die abgasrechtlichen Anforderungen nach Euro IV bzw. Euro V erfüllen. Die zurzeit gültigen Grenzwerte konnten bisher mit RME ohne technische Maßnahmen erreicht werden. Mit Einführung von Motoren, die die Abgasstufe Euro IV erfüllen, ist dies nur noch mit zusätzlichem Aufwand möglich. Durch die hiermit verbundene Anforderung an den Kraftstoff, sich bei geringerem Kompressionsdruck selbst zu entzünden, hat die Realisierung dieses Motorenentwicklungskonzeptes zur Konsequenz, dass RME aufgrund seines Siedeverlaufs unter diesen Bedingungen als Reinkraftstoff nicht mehr geeignet ist. Mit der EuroV-Motorengeneration läuft die ausschließliche Verwendung von RME, zumindest bei Pkw, praktisch aus. Vor diesem Hintergrund ist die Beimischung von RME zum Standard-Diesel für die Biodieselindustrie ein wichtiges Element der zukünftigen Kapazitätsauslastung. In die 10. Bundesimmissionschutzverordnung, BImSchV, wird die geänderte Europäische Dieselkraftstoffnorm DIN EN 590 aufgenommen, die die Zumischungsmöglichkeit von max. 5% RME vorsieht.

Kraftstoffe aus erneuerbaren Energieträgern
Teilsynthetische Kraftstoffe aus Biomasse:

Methan / Biogas

Biogas wird aus biologischen Roh- und Reststoffen sowie aus dem Faulschlamm kommunaler Abwasserkläranlagen gewonnen. Die Ausgangsprodukte müssen sich anaerob, das heißt unter Ausschluss von Sauerstoff, abbauen lassen. Roh- und Reststoffe können sein:

- Rinder- und Schweinegülle
- Futterrüben
- Silomais
- Weidegras
- Bioabfall
- Speiseabfälle
- Abfallfette
- Tierische Nebenprodukte

Biogas entsteht in einem mehrstufigen Prozess der Vergärung oder Faulung unter Mitwirkung von anaeroben Mikroorganismen, die also unter Ausschluss von Luft bzw. Sauerstoff aktiv sind. An dem Prozess sind vielfältige Organismenstämme beteiligt, deren Zusammensetzung sich jeweils aus den spezifischen Prozessbedingungen ergibt (z.B. Ausgangsstoff der Vergärung, Temperatur, pH-Wert etc.). Die in der Regel hochmolekulare organische Substanz wird in mehreren Stufen abgebaut zu wenigen niedermolekularen Stoffen bis hin zum Methan. Neben dem Biogas entsteht bei der Prozesskette als Gärrückstand ein Gemisch aus Wasser, nicht abgebauten organischen Stoffen (meist zellulose-

reiche oder holzige Stoffe) sowie nicht organischen Stoffen (meist Sand und andere Bodenteilchen, Salz und andere Minerale). Die Vergärung findet im feuchten Milieu statt.

Die Zusammensetzung von Biogas ist abhängig von der zur Vergärung eingesetzten Produkte; sie kann daher stark schwanken. Typisch sind:

- Methan mit 40-75 Vol. %
 - Kohlendioxid mit 25-55 Vol. %
 - Wasserdampf mit 0-10 Vol. %
- sowie Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff in geringen Mengen.

Unter Normalbedingungen (0°C, 1,013 bar) hat Biogas eine Dichte von ca. 1,2 kg/m³; es ist also etwas leichter als Luft. Biogas riecht nach faulen Eiern; entschwefeltes Biogas ist jedoch nahezu geruchlos.

Der gewichtsspezifische Heizwert von Biogas mit durchschnittlich ca. 20 MJ/kg liegt deutlich unter dem von Erdgas (ca. 47 MJ/kg). Auch die im Anforderungsbündel "Verbrennung" genannten Kriterien (Werte für Zündtemperatur, obere und untere Zündgrenze sowie Luftbedarf) liegen beim Biogas deutlich unter denen von Erdgas; vgl. auch Tabelle 2.

Wenn Kraftfahrzeuge mit Biogas betrieben werden sollen, muss es - ähnlich wie Erdgas - mit einem Tankdruck von ca. 200 bar vorgehalten werden.

Außerdem ist gereinigtes Biogas mit Erdgasqualität erforderlich, da die schwankende Zusammensetzung des reinen Biogases und insbesondere sein Schwefelgehalt von den empfindlichen Fahrzeugmotoren nicht toleriert wird. Entsprechend eingerichtete Tankstellen sind allerdings sehr selten.

Die Erhöhung der Energiedichte von Biogas zur Steigerung der Transportfähigkeit sowie für den Einsatz als Kraftstoff für mobile Anwendungen durch Umwandlung in Methanol ist bislang erst im Versuchsstadium.

Eine wirtschaftliche und auch energetische Bilanzierung steht noch aus.

Kraftstoffe aus erneuerbaren Energieträgern
Teilsynthetische Kraftstoffe aus Biomasse:

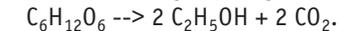
Ethanol

Als Bioethanol bezeichnet man Ethanol, der Otto - Kraftstoffen beige-mischt werden kann und aus Biomasse hergestellt worden ist. Ethanol wird auch umgangssprachlich als Alkohol bezeichnet.

Die EU hat in der Richtlinie 2003/30/EG (zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen) festgelegt, dass ein Mindestanteil an Biokraftstoffen in den Mitgliedstaaten in Verkehr gebracht wird. Bis 2005 sollen 2 % und bis 2010 sollen 5,75 % Biokraftstoffe auf den Märkten sein. Biokraftstoffe sind u.a. Bioethanol, Bio-Ethyl-Tertiär-Butylether, ETBE und Biodiesel. Bio-ETBE wird aus Bioethanol hergestellt.

Bioethanol wird durch die Fermentation (Gärung) zucker- und stärkehaltiger Pflanzen gewonnen. Die alkoholische Gärung ist die Bezeichnung für den anaeroben Abbau von Kohlenhydraten zu Alkohol durch die Enzyme von Mikroorganismen oder Hefen:

Die Reaktionsgleichung lautet:



Neben stärkehaltigen Pflanzen (Weizen, Roggen, Mais) sind Zuckerrohr und -rüben die am häufigsten verwendeten Ausgangsmaterialien für die Ethanolproduktion. Während zuckerhaltige Pflanzen direkt vergoren werden, muss bei Getreide, Mais und Kartoffeln die Stärke zunächst enzymatisch in Zucker umgewandelt werden.

Bei der Herstellung von Bioethanol wird das Getreide zunächst zerkleinert und unter Zugabe von Verflüssigungsenzymen auf eine Temperatur von 90°C erhitzt. Dabei kommt es zu der sogenannten Verflüssigung der Maische. Die verflüssigte Maische wird anschließend bei einer Temperatur von ca. 55 - 60°C mit technischen Verzuckerungsenzymen versetzt und die vorhandene Stärke in Zucker umgewandelt. Die jetzt süße, verzuckerte Maische wird auf Temperaturen von ca. 18 bis 20°C heruntergekühlt.

Sodann wird Hefe für die Fermentation/Gärung zugesetzt. Die Hefe entwickelt bei der Gärung aus dem Zucker der Maische Kohlendioxid und Alkohol. Die Gärdauer beträgt 72 - 96 Stunden. Die jetzt saure Maische (pH 4,0) besitzt einen Alkoholgehalt von maximal 12-18 Vol.-%.

Zur nachfolgenden Destillation wird die saure Maische gekocht; dabei verdampft das Ethanol. Es wird ein Ethanol-Wasser-Gemisch und ein von Alkohol befreiter Rückstand (Schlempe) gewonnen. Zur Aufkonzentrierung und Reinigung des Alkohols wird das Alkohol-Wasser-Gemisch in einer Kolonne rektifiziert. Weil Alkohol leichter verdampft, reichert er sich im Dampf an.

Der Dampf wird kondensiert und hochkonzentrierter Alkohol (maximal 96 Vol.-%) gewonnen. Der Rohalkohol wird in speziell explosionsgeschützten Tankanlagen gelagert.

Als Beimischung zum Benzin wird Ethanol in nahezu allen Märkten voraussichtlich an Bedeutung gewinnen, obgleich es eine der teuersten Alternativen ist. Derzeit ist der Marktanteil in Europa mit unter 1% noch vernachlässigbar. Am günstigsten wird Ethanol nicht als reiner Kraftstoff, sondern chemisch gewandelt als ETBE (Ethyltertiärbuthylether) eingesetzt. ETBE entsteht aus einer Reaktion von Ethanol (60 %) mit Isobuten (40 %). ETBE kann dem Benzin bis zu 15 Vol.% gemäß EN 228 ohne kundenrelevante Auswirkungen zugemischt werden. Sollte eine Produktion in den geforder-

ten Mengen nicht möglich sein, kann Ethanol nach der EN 228 bis zur Erfüllung einer Zumischung von 5 Vol.% zum Benzin zugemischt werden. Die Erfüllung der EU Biofuel Directive im Jahr 2010 (5,75 % energetisch) durch Ethanolbeimischung erfordert aber einen Mengenanteil von 8,7 Vol.% im Benzin. Nach der Erfüllung der flächendeckenden Zumischung von 5 Vol.% Ethanol (EU 25) ist in einem zweiten Schritt eine Zumischung von Ethanol bis zu 10 Vol.% denkbar, mit der dann die EU Richtlinie erfüllt werden kann. In diesem Zeitraum könnte die Kraftstoffnorm entsprechend geändert werden.

Alternativ sind Flex-Fuel-Fahrzeuge in der Diskussion, die mit beliebiger Ethanolkonzentration im Benzin zwischen 0 (Reinbenzin) und 85 (E85) Vol.% betrieben werden können.

Allerdings sind sowohl volkswirtschaftliche als auch technische Gründe zu berücksichtigen. So benötigt eine Marktdurchdringung von 10 Vol.% (EU 25) Produktionskapazitäten von ca. 13 Mio. Tonnen Ethanolproduktion, eine Größenordnung, die auch bei progressivem Vorgehen nur über viele Jahre hinweg aufgebaut werden kann.

Kraftstoffe aus erneuerbaren Energieträgern
Teilsynthetische Kraftstoffe aus Biomasse:

BtL / Sunfuel / Biotrol

Wie bereits angedeutet, wird zur Erfüllung der abgasrechtlichen Anforderungen insbesondere für Euro V ab dem Jahr 2008 das Ziel verfolgt, möglichst ohne Abgasnachbehandlungssystem die strengen Abgasanforderungen erfüllen zu können. Dies soll unter anderem durch die Absenkung des innermotorischen Kompressionsdrucks bei gleichzeitiger Verkürzung der Kettenlänge des Kraftstoffs erreicht werden. Hierzu sind synthetische Kraftstoffe zu entwickeln, die zunächst auf Basis von Erdgas bzw. Erdölbegleitgas

und in der mittelfristigen Strategie aus Biomasse gewonnen werden können. Eine viel versprechende Option sind zum Beispiel so genannte Gas-to-Liquid-Kraftstoffe, die aus Erdgas hergestellt werden; vergleiche Kapitel "Vollsynthetische Kraftstoffe: GtL".

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, synthetische Kraftstoffe nicht aus fossilem Erdgas, sondern aus nachwachsender Biomasse herzustellen. Diese so genannten Biomass-to-Liquid-Kraftstoffe (BtL), wie zum Beispiel

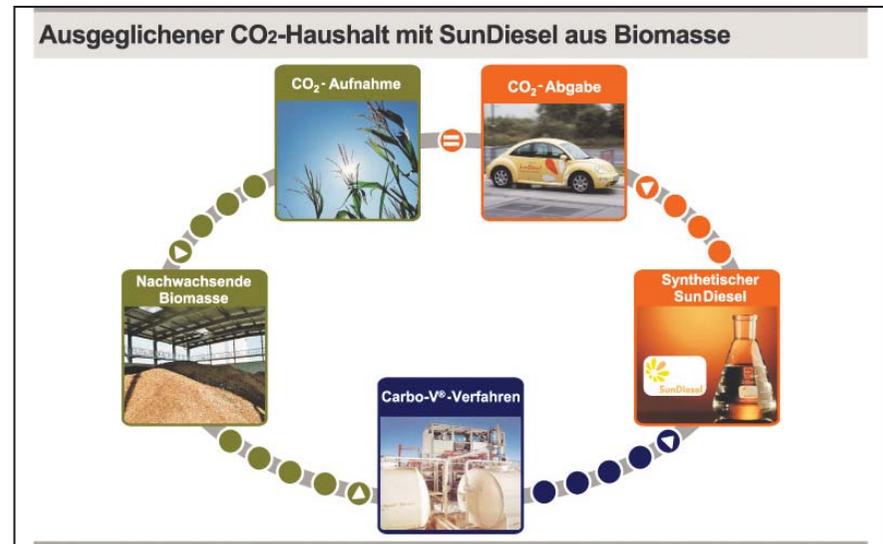


Bild 12: CO₂-Kreislauf, Beispiel SunDiesel;
Quelle: Choren

Biotrol, erhöhen den CO₂-Gehalt der Atmosphäre nicht wesentlich.

Biotrol ist ein Kunstwort aus "Biomasse" und "Petrol".

Daimler bezeichnet damit die so genannten BtL-Kraftstoffe, die aus Biomasse gewonnen werden und beim Verbrennen die Atmosphäre nur unwesentlich durch zusätzliches CO₂ belasten, weil das beim Verbrennen des Kraftstoffes freiwerdende CO₂ beim Wachsen der "Biomasse" aufgenommen wurde.

Ausgangsmaterial für den BtL-Dieselmotorkraftstoff ist Biomasse, also Holzabfälle aus der Forstwirtschaft, komplette Energiepflanzen wie Pappeln oder schnell wachsende Gräser, auch Altholz, Reststoffe aus der Müllsortierung oder getrockneter Klärschlamm.

Die Herstellung des BtL-Kraftstoffs soll nun am Beispiel des Carbo-V[®]-Verfahrens erläutert werden.

Das Carbo-V[®]-Verfahren ist ein dreistufiges Vergasungsverfahren mit den Teilprozessen:

- Niedertemperaturvergasung,
- Hochtemperaturvergasung und
- endotherme Flugstromvergasung.

Zunächst wird die Biomasse gehäckselt, getrocknet und zu Pellets geformt.

Die Biomasse (Wassergehalt 15 - 20%) wird in der ersten Prozess-Stufe kontinuierlich durch partielle Oxidation (Verschwelung) mit Luft oder Sauerstoff bei Temperaturen zwischen 400 und 500°C karbonisiert, d. h. in teerhaltiges Gas (flüchtige Bestandteile) und festen Kohlenstoff (Biokoks) zerlegt.

In der zweiten Prozess-Stufe wird das teerhaltige Gas in einer Brennkammer oberhalb des Ascheschmelzpunkts der Brennstoffe mit Luft und/oder Sauerstoff unterstöchiometrisch zu heißem Vergasungsmittel nachoxidiert.

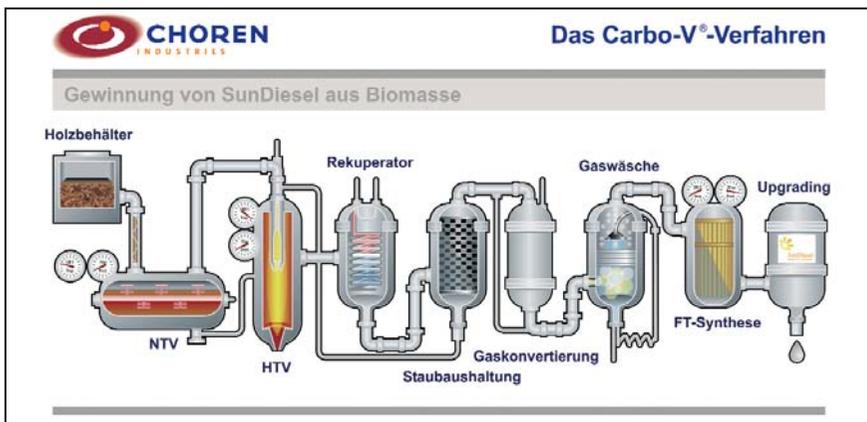


Bild 13: Das Carbo-V[®]-Verfahren;
Quelle: Choren

In der dritten Prozess-Stufe wird der zu Brennstaub gemahlene Biokoks in das heiße Vergasungsmittel eingeblasen. Dabei reagieren Brennstaub und Vergasungsmittel im Vergasungsreaktor endotherm zu Synthese-Rohgas. Dieses kann dann nach entsprechender Konditionierung als Brenngas zur Strom-, Dampf- und Wärmeerzeugung oder als Synthesegas für die SunDiesel-Herstellung genutzt werden. Für diesen Fall wird das Synthesegas anschließend z.B. mittels Fischer-Tropsch-Synthese, einem seit ca. 80 Jahren bekannten Verfahren, in Kraftstoff umgewandelt. Am Ende verlässt eine paraffinische Flüssigkeit die Reaktoren.

Nach einer Behandlung zur Erhöhung der Wintertauglichkeit kann zu etwa 60 Prozent der aromaten- und schwefelfreie Dieselmotorkraftstoff abdestilliert und sofort verwendet werden. Ein kleiner Teil der höhersiedenden Paraffinwachse lässt sich als Grundstoff für die Chemieindustrie verwerten. Die leichten Fraktionen sind entweder nach Anpassung der Oktanzahl als Ottomotorkraftstoff zu verwenden, oder werden erneut der Fischer-Tropsch-Synthese zugeführt. Dabei entstehen länger-kettige, also schwerer siedende Dieselmotorkraftstoffe.

Ein weiterer Vorteil der synthetischen Bio-Kraftstoffe ist ihre hohe Reinheit: Sie verursachen weniger Emissionen als die herkömmlichen Erdölprodukte.

Biotrol zum Beispiel enthält keinen Schwefel und ist frei von Aromaten.

Herkömmlicher Diesel dagegen ist ein Gemisch aus bis zu 500 Komponenten, von denen einige die Wirkung des Abgaskatalysators beeinträchtigen und die Bildung von Partikeln fördern.

Besteht die Basis für den synthetischen Kraftstoff aus Biomasse, so nennt z.B. Volkswagen den daraus hergestellten Kraftstoff wegen der von der Sonne in den Pflanzen gespeicherten Energie SunFuel[®]; allgemein wird dieser Kraftstoff wie beschrieben mit BtL bezeichnet. Synthetische Kraftstoffe auf Erdgas-Basis werden wie beschrieben allgemein mit GtL, von Volkswagen mit SynFuel bezeichnet.

Nachdem der Kraftstoff aus Biomasse im Zusammenhang mit dem globalen Klimawandel anfangs fast uneingeschränkt als umweltschonender, klimaneutraler Treibstoff gelobt wurde, geraten derzeit offenbar zunehmend seine Schattenseiten ins Blickfeld. Der Druck auf Deutschland und die EU wächst, ihre ehrgeizigen Ziele für diese Art erneuerbarer Energie zu revidieren. In einer kürzlich erschienenen Studie bezweifelt die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, OECD, nicht nur den ökologischen Nutzen der Agrokraftstoffe, sie hält auch die Förderung für ökonomisch fragwürdig.

Die OECD schätzt, dass mit der jetzigen Politik über staatliche Zuschüsse, Steuervorteile, Beimischungszwang und Importzölle die Fördersumme in den Wirtschaftsregionen EU, USA und

Rolle der Kraftstoffe

Kanada bis 2015 von jetzt rund 6,6 Mrd auf 11 Mrd Euro steigen wird, die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sich damit aber bestenfalls um 0,8% verringern werden.

Trotz der hohen Ölpreise sind Biotreibstoffe nicht einmal eine ökonomische Alternative zu Benzin oder Diesel geworden, weil wegen der hohen Nachfrage der Biotreibstoff-Erzeuger sich z.B. Mais oder Getreide derart verteuern, dass der Preisabstand zu fossilem Treibstoff noch größer wurde.

Neben dieser Sichtweise kommen weitere Fragen in den Blick. Ist es ethisch zu verantworten, wenn irgendwann Erntedank im Autotank stattfindet? Wird durch überzogene staatliche Eingriffe eine unheilvolle Flächenkonkurrenz zwischen Land- und Energiewirten gefördert, die - wie bereits geschehen - Nahrungsmittel verteuert? Sind vollständige Ökobilanzen für Wasser und Düngemiteleinsetz bei zu erwartenden Monokulturen vorhanden?

Wo liegen die Flächenpotentiale? Müssen Tropenwälder und Naturschutzgebiete für Bioenergie geopfert werden? Darüber hinaus liegt noch Forschungsbedarf bei technologischen Fragestellungen. Wie wirken Biokraftstoffe z.B. auf Motorschmierung, Dichtungswerkstoffe, Tanksysteme, Zündsysteme und Emissionen? Es bleibt also noch viel zu tun.

Hybridantriebe im Fahrzeug

Hybridfahrzeuge vereinen mindestens zwei verschiedene Energiespeichersysteme (z. B. Treibstofftank und Batterie) sowie zwei Energiewandlersysteme (z. B. Verbrennungsmotor und Elektromotor/Generator) in einem Antriebsstrang. Zusätzlich sollte die Kombination von Speicher- und Energiewandlungssystem das Laden der Batterie während der Fahrt ermöglichen, d. h. bidirektional sein. Bisher auf dem Markt erschienene Hybridfahrzeuge kombinieren entweder einen Otto-Motor oder einen Diesel-Motor mit einem Elektromotor/Generator. Der Hybridantrieb in Hybridfahrzeugen ist an sich keine Neuentwicklung, sondern bereits seit gut 100 Jahren bekannt. Anfang des 20. Jahrhunderts spielten insbesondere in den Vereinigten Staaten Elektrofahrzeuge eine große Rolle. So waren dort um die Jahrhundertwende mehr Elektrofahrzeuge zugelassen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

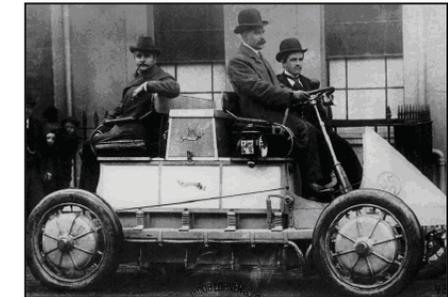


Bild 14: Lohner-Porsche mit Hybridantrieb aus dem Jahre 1900

Auch damals gab es schon erste Ansätze, die Vorteile elektrischer Maschinen mit denen von Verbrennungsmotoren zu kombinieren. Als Beispiel sei der im Jahre 1900 auf der Weltausstellung in Paris vorgestellte, vom 25-jährigen Ferdinand Porsche konstruierte Lohner-Porsche genannt. (Ferdinand Porsche arbeitete von 1898 bis 1906 bei der Hofwagenfabrik Jacob Lohner & Co. in Wien). Bei diesem Fahrzeug trieb ein Benzinmotor einen



Bild 15: Plug-in-Hybridantrieb (Elektroanschluss am Frontend) mit Elektro-Radnabenmotoren; Quelle: VOLVO

Generator an, der vier als Radnabenmotoren in den Rädern installierte Elektromotoren mit elektrischer Energie versorgte. Dieses war somit eines der ersten Fahrzeuge mit Allradantrieb und im weiteren Sinne eines der ersten Hybridfahrzeuge.

In Bild 14 sind die elektrischen Radnabenmotoren gut zu erkennen.

Gut hundert Jahre später präsentierte die Fa. Volvo auf der internationalen Automobilausstellung 2007 mit dem "ReCharge Concept" einen Plug-in-Hybridantrieb mit Elektro-Radnaben-

motoren und einer Batterie, die sich an regulären Haushaltsstromquellen aufladen lässt. Der Energiespeicher soll nach einer Ladezeit von drei Stunden eine Reichweite von rund 100 Kilometern bieten, bevor im Bedarfsfall ein Bio-Ethanol-tauglicher Vierzylinder-motor zwecks Wiederaufladung der Batterie zum Einsatz kommt.

Hybridantriebe lassen sich in drei Konzeptvarianten einteilen, wie folgende Grafik zeigt.

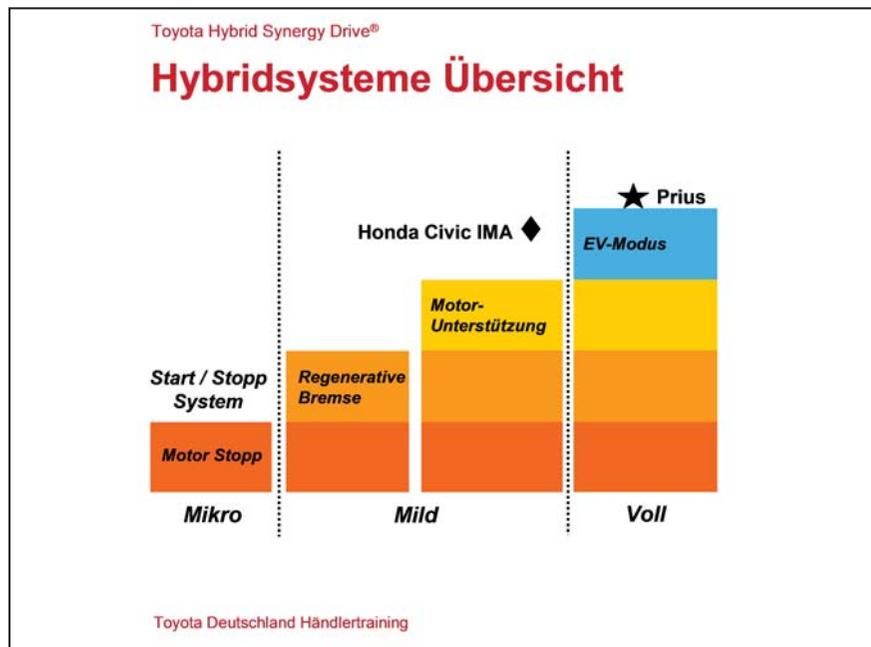


Bild 16: Konzeptvarianten von Hybrid-Systemen;
Quelle: Toyota

Mikro-Hybride

Die niedrigste Stufe der Hybridisierung, der Mikrohybrid, verbindet fortgeschrittenes Elektroenergie-Management in Form von regenerativem Bremsen mit automatischer Start-Stop-Funktion des Motors. Der Nutzen von regenerativem Bremsen hängt von der Leistungsfähigkeit der elektromechanischen Komponenten ab.

Mikrohybride verfügen über eine typische Generatorleistung von 2 bis 4 kW und entsprechender konventioneller 12 Volt Batterietechnologie. Hierdurch wird der während der Bremsverzögerung rückgewinnbare

Integrierten Starter-Generator, (ISG). Wichtige Kriterien hierbei sind Kundenakzeptanz, leistungsstarker Hochlauf, niedriger Geräusch- und Schwingungspegel.

Riemengetriebene Systeme wie auch solche, die im Antriebsstrang liegen (meist am hinteren Ende der Kurbelwelle), bilden eine aussichtsreiche Gruppe von Technologien. Für die Unterstützung der Verbrennungskraftmaschine sind sie indes ungeeignet.

Der hier dargestellte integrierte Starter-Generator besteht aus einem



Bild 17: Integrierter Starter-Generator im 14 Volt-Netz;
Quelle: Valeo

Betrag an kinetischer Energie beschränkt. Einige elektrische Antriebssysteme verfügen über eine Start-Stop-Funktion, z.B. einen verbesserten konventionellen Startermotor oder einen

riemengetriebenen reversiblen, synchronen Klauenpol-Generator, der anstelle des Seriengenerators mit dem Verbrennungsmotor verbunden ist. Weiterhin enthält das System einen

elektronischen Gleich-/Wechselrichter, der zwischen der Maschine und der 12 Volt-Batterie platziert ist. Beim Startvorgang wird der Gleichstrom aus der Batterie in Vollwellen-Wechselstrom umgewandelt, um die Maschine in Bewegung zu setzen und so den Motor zu starten.

Im Generatorbetrieb wird der Wechselstrom jeder einzelnen Phase durch den Gleich-/Wechselrichter in Gleichstrom umgewandelt. Diese synchrone Gleichrichtung erhöht den Wirkungsgrad des Generators je nach Stromfluss zwischen 5 und 10%, da Verluste durch den kleineren Widerstand der verwendeten MOSFET-Technologie geringer sind. Die Elektronik ist mit einer flexiblen Schnittstelle zum Fahrzeug ausgestattet, über die sowohl per CAN-Bus als auch digital und analog kommuniziert werden kann. Dadurch kann das System sowohl als Empfänger als auch als Geber funktionieren und Funktionen wie Stop-Start, Batteriemanagement und Diagnose übernehmen. Das System wird bereits mit Erfolg in der Serie eingesetzt, z.B. bei Citroen C3.

Aktuelle Weiterentwicklungen, z.B. von Bosch, verfolgen einen Direktstart mit minimaler Starterunterstützung. Fortgeschrittene Entwicklungen beziehen sich auf ein Startverfahren eines 4 Zylinder 4-Takt-Verbrennungsmotors mit Direkteinspritzung, bei dem ausschließlich aus dem Zylinder im Kompressionstakt gestartet wird. Die erste Kompression erfolgt stets mit Unterstützung durch den Elektro-

starter. Der Direktstart unterscheidet sich vom konventionellen Direktstart dadurch, dass die Kurbelwelle nicht durch ein intern erzeugtes Verbrennungsmoment in Rotation versetzt wird, sondern über ein externes Drehmoment einer E-Maschine. Er wird damit unabhängig von der Abstellposition der Kurbelwelle beim Motorauslauf und der Abnahme der Luftdichte bei hohen Motortemperaturen. Durch die Starterunterstützung wird außerdem eine deutlich bessere Aufbereitung des Kraftstoff/Luftgemischs im Zylinder gegenüber dem konventionellen Direktstart erreicht.

Im Unterschied zum herkömmlichen Starterstart kann beim Direktstart der Starter bereits nach der ersten Verdichtung deaktiviert werden. Der weitere Motorhochlauf erfolgt analog durch Befuerung der Zylinder, wobei hier ein neuer Algorithmus zur Steuerung der einzelnen Verbrennungen zum Einsatz kommt.

Start-Stop-Systeme erfordern ein zusätzliches Bordnetzmanagement, damit eine uneingeschränkte Verfügbarkeit der Start-Stop-Funktionalität über die Fahrzeuglebensdauer abgesichert ist. Hinzu kommt der Einsatz von zyklensfesten Energiespeichern, welche die zahlreichen Lade- und Entladevorgänge im Start-Stop-Betrieb unbeschadet überstehen und eine ausreichende Energieversorgung in allen Betriebsbereichen des Fahrzeugs garantieren.

Mild-Hybride / Medium-Hybride

Höhere Bordspannungen, z.B. 42 V, ermöglichen - zusätzlich zu den Funktionen des Mikrohybrid - eine beschränkte Unterstützung des Verbrennungsmotors. Dazu sind allerdings leistungsstärkere integrierte-Starter-Generator-Systeme erforderlich. Je nach ihrem elektrischen Leistungspegel werden derartige Antriebssysteme in Mild- oder Medium-Hybride eingeteilt. Mild-Hybride unterstützen den Verbrennungsmotor lediglich bei niedrigen Motordrehzahlen, während Medium-Hybride den Verbrennungsmotor auch bei höheren Drehzahlen unterstützen können.

Mit einem höheren elektromechanischen Leistungspegel lässt sich auch der Betrag an rückgewinnbarer Bremsenergie erhöhen. Allerdings sind für derartige Hybrid-Konzepte geeignete Speichersysteme für die elektrische Energie erforderlich. Dies sind derzeit vorwiegend Nickel-Metall-hybrid-Akkus, NiMH.

Ein typisches Medium-Hybrid-Fahrzeug ist z.B. der Honda Insight Civic. Er hat die folgenden Leistungsdaten (Auszug).

- Verbrennungsmotor: 4-Zylinder Otto-Motor, 1339 ccm, 82 kW, 167 Nm bei 2000 min⁻¹; dreistufige Ventilsteuerung,
- Integrierter Starter/Generator (Integrated Motor Assist, IMA): 15 KW, permanent erregt, 128 V;
- CVT-Getriebe.



Bild 18: Medium Hybrid mit integriertem Starter-Generator;
Quelle: Honda

Vollhybride

Nach dem Aufbau des Antriebsstrangs gibt es zwei wesentliche Grundstrukturen mit unterschiedlichen Potenzialen und Problemen: parallele und serielle Konzepte. Zudem werden Mischformen aus beiden Grundstrukturen eingesetzt.

In einem seriellen Hybrid-Konzept treibt ein Otto-Motor einen Generator an; die dort erzeugte elektrische Energie wird dazu verwendet, die Räder anzutreiben. Dieses Konzept ist quasi ein Elektro-Automobil.

Für ein solches Konzept reicht ein niedrig belasteter Otto-Motor. Er wird mit praktisch konstanter Drehzahl in seinem effektivsten Drehzahlbereich betrieben; dabei treibt er den Generator an, der während der Fahrt die Batterie wirksam auflädt.

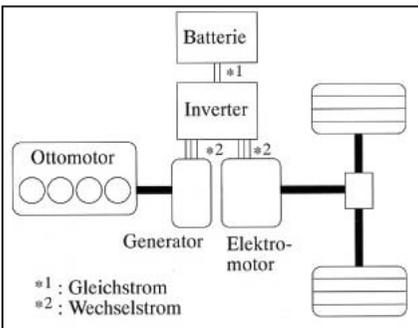


Bild 19: Schema eines seriellen Hybridantriebs; Quelle: Toyota

Bild 19 zeigt das Schema eines seriellen Hybridantriebs. Dabei muss der in der Batterie erzeugte Gleichstrom mit Hilfe eines Inverters

zunächst in Wechselspannung umgewandelt und dann herauftransformiert werden.

Bei einem parallelen Hybrid-Konzept werden sowohl der Otto-Motor als auch der Elektromotor dazu eingesetzt, die Räder direkt anzutreiben. Dabei ergänzt der Elektromotor einerseits die Antriebskraft des Otto-Motors, hat aber andererseits auch die Aufgabe

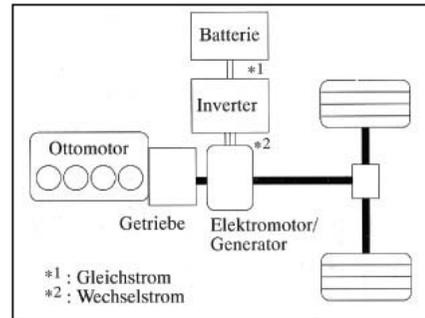


Bild 20: Schema eines parallelen Hybridantriebs; Quelle: Toyota

eines Generators, die Batterie während der Bewegung des Fahrzeugs zu laden; vgl. auch Bild 20.

Beispielhaft für die derzeit in Deutschland angebotenen Hybridfahrzeuge wird im Folgenden kurz der Toyota Prius II angesprochen. Sein Antriebskonzept zeigt Bild 21:

Der Antriebsstrang besteht aus einer Kombination von zwei Antriebsarten: einem Otto-Motor und einem Elektromotor MG 2. Beide Antriebsarten werden den jeweiligen Fahrbedingungen entsprechend optimal eingesetzt

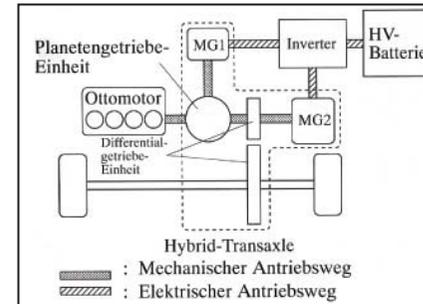


Bild 21: Antriebskonzept des Toyota Prius II; Quelle: Toyota

(prinzipiell paralleler Hybrid). Nach Angaben von Toyota war es dadurch möglich, ein außerordentlich gut ansprechendes, dynamisches Fahrverhalten zu erzielen und gleichzeitig den Kraftstoffverbrauch sowie die Abgas-Emissionen deutlich zu reduzieren.

Die Primärtriebskraft wird vom Otto-Motor geliefert. Sie wird in zwei Stränge aufgeteilt: die Antriebskraft, die durch das Planetengetriebe in der Hybrid-Transaxle auf die Räder übertragen wird, und die Antriebskraft zum Betrieb von MG 1 als Generator.

Die Hybrid-Transaxle besteht, wie Bild 21 zeigt, aus dem Generator MG 1, dem Elektromotor MG 2 sowie einer Planetengetriebeeinheit. Hierdurch ist ein stufenloser Schaltvorgang möglich, der eine ruckfreie Fahrt gewährleistet.

Otto-Motor, MG 1 und MG 2 sind über das Planetengetriebe mechanisch miteinander verbunden. MG 2 und das Differentialgetriebe für die Antriebsräder sind über eine Antriebskette und Zahnräder mechanisch gekoppelt; vgl. auch Bild 22.

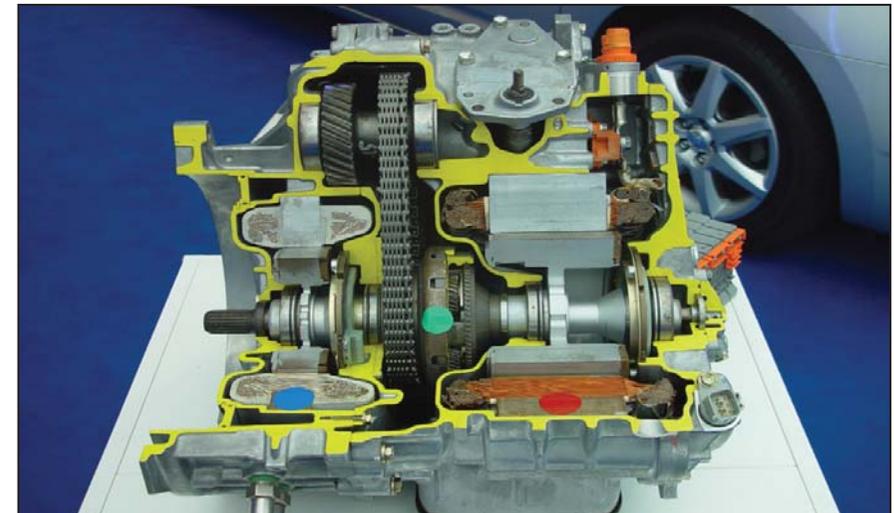


Bild 22: Hybrid-Transaxle des Toyota Prius II; Quelle: Toyota
Blauer Punkt = Generator MG 1; Roter Punkt = Elektromotor MG 2
Grüner Punkt = Leistungsverzweigung

Hybridantriebe im Fahrzeug

MG 1 und MG 2 sind kompakte, leichte und hocheffektive, wassergekühlte Drehstrom-Synchronmotoren mit Dauermagneten auf dem Rotor. Beide arbeiten mit einer Maximalspannung von 500 V Drehstrom, und sie werden sowohl in der Betriebsart "Generator" als auch "Elektromotor" verwendet. In der Betriebsart "Elektromotor" unterstützt MG 2 bei Bedarf die Antriebskraft des Otto-Motors. Wird die im Toyota Prius II verbauten regenerative Bremse aktiviert, so wandelt MG 2 die kinetische Energie des Fahrzeugs in elektrische Energie um (Betriebsart "Generator"). Die so zurückgewonnene elektrische Energie wird in der Hochspannungs-Batterie, HV-Batterie, gespeichert. MG 1 lädt die HV-Batterie und liefert die elektrische Energie zum Antrieb von MG 2 (Betriebsart "Generator"). Durch Regelungen der erzeugten elektrischen Leistung steuert MG 1 zusätz-

lich das kontinuierlich variable Getriebe der Transaxle. Außerdem dient MG 1 als Anlasser und wird bei Bedarf zum Antrieb der Räder genutzt (Betriebsart "Elektromotor"). MG 2 hat eine maximale Ausgangsleistung von 50 kW bei 1200 bis 1540 Umdrehungen pro Minute sowie ein maximales Drehmoment von 400 Nm von 0 - 1200 Umdrehungen pro Minute. Der Gleichstrom der HV-Batterie muss in dreiphasigen Wechselstrom zum Antrieb von MG 1 und MG 2 umgewandelt werden (und umgekehrt). Hierzu ist ein Inverter erforderlich. Dort wird u.a. die Nennspannung von 201,6 Volt Gleichstrom, die von der HV-Batterie ausgegeben wird, auf eine maximale Spannung von 500 Volt Gleichstrom verstärkt. Nachdem die Spannung angehoben wurde, wandelt der Inverter den Gleichstrom in Wechselstrom um.

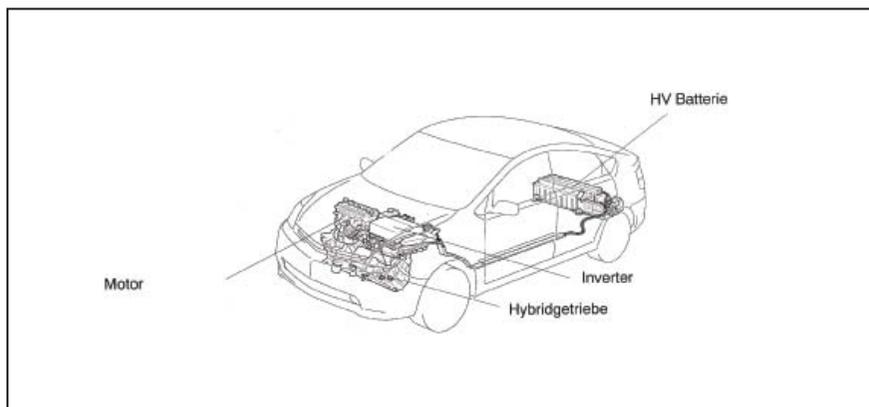


Bild 23: Stromversorgung im Toyota Prius II; Quelle: Toyota

Hybridantriebe im Fahrzeug

Die Stromversorgung für die Nebenverbraucher des Fahrzeugs, zum Beispiel Beleuchtung, Stereoanlagen und Steuergeräte, erfolgt mit einer Spannung von 12 V. Da MG 1 eine Nennspannung von 201,6 Volt Gleichstrom ausgibt, übernimmt der Spannungswandler zusätzlich die Aufgabe, die Spannung von 201,6 Volt Gleichstrom auf 12 Volt Gleichstrom zu senken. Damit wird eine im Fahrzeug verbaute Zusatzbatterie geladen. Seitlich am Inverter ist ein Trennschaltersensor verbaut. Dieser gibt bei einem Unfall ein Kollisionssignal ab, wodurch der Hochspannungs-Stromkreis abgeschaltet wird. Bei der im Prius II verbauten HV-Batterie handelt es sich um eine versiegelte Nickelhydrid-Batterie (Ni-MH).

General Motors, BMW und Daimler werden in Kürze ein "two-mode"-Vollhybridsystem herausbringen. Gemeinsames Ziel ist die Entwicklung eines Hybridkonzepts, das ein industrieller Standard bezüglich Verbrauch, Kosten und Emissionen sowie Agilität, Leistung und Fahrspaß werden soll. Durch das Zusammenlegen der Entwicklungskapazitäten und -erfahrungen sind eine deutliche Verkürzung der Entwicklungszeiten und signifikante Systemkostenabsenkungen möglich.

Auch andere Fahrzeughersteller, wie z.B. Audi und Porsche, haben Fahrzeuge mit Hybridantrieb entwickelt, die 2009 auf den Markt kommen.



Bild 24: Aufbau des Hybridsystems im Toyota Prius II; Quelle: Toyota

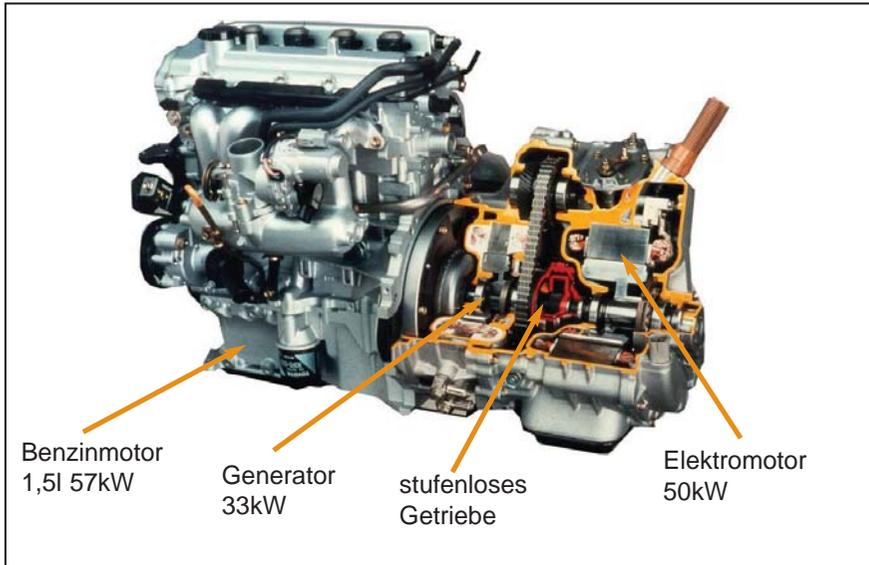


Bild 25: Antriebsstrang des Toyota Prius II; Quelle: Toyota

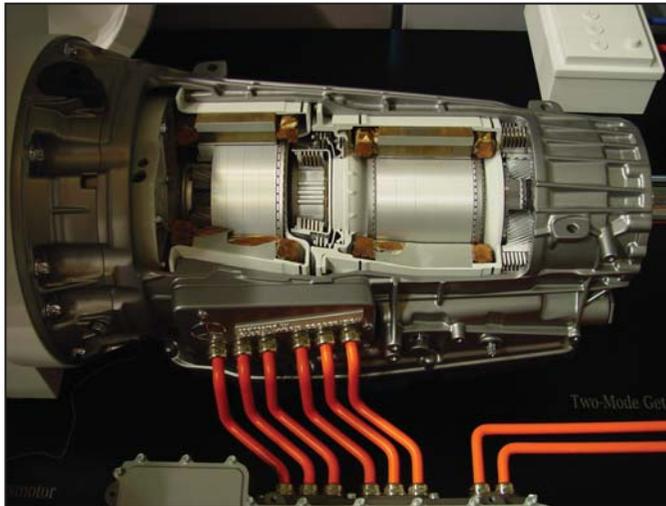


Bild 26: "two-mode" Vollhybrid; Ausschnitt Antriebsstrang
Quelle: Daimler AG

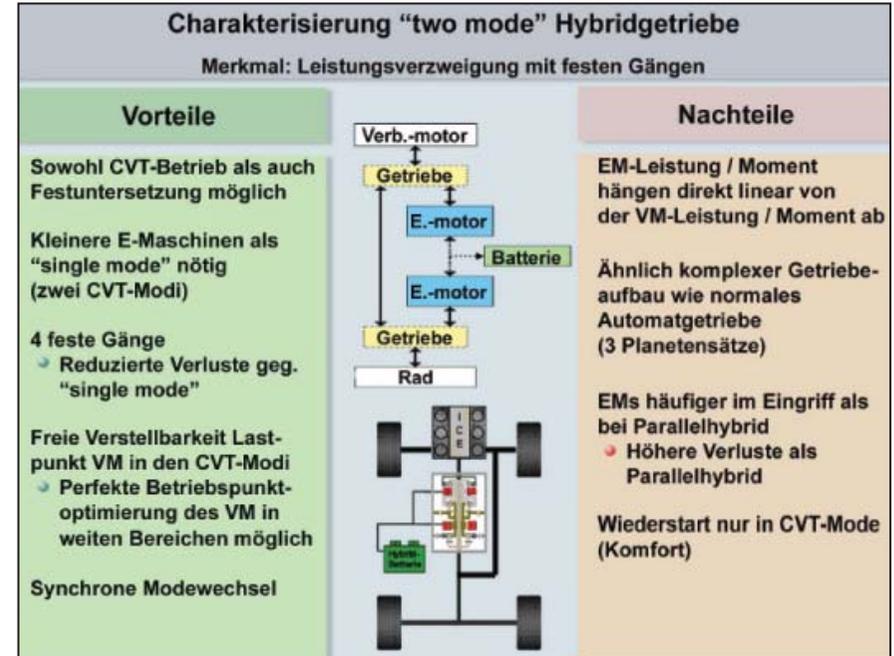


Bild 27: "two-mode" Vollhybrid; unten: Gesamtsystem
Quelle: Daimler AG

Mit einem Plug-in-Hybridantrieb, wie in Bild 15 gezeigt, wird eine weitere Stufe der Elektrifizierung des Antriebsstrangs angestrebt. Die Motivation für eine stärkere Elektrifizierung des Antriebsstranges bis hin zum reinen Elektroantrieb ergibt sich aus der Anforderung, zumindest lokal begrenzt emissionsfreies Fahren zu erreichen und Kraftfahrzeuge mit bisher nicht zugänglichen alternativen Energien zu betreiben. Sowohl die Brennstoffzelle als auch der reine Elektroantrieb besitzen dieses Potenzial.

Im Brennpunkt der Betrachtung stehen dabei die zu erwartenden unterschiedlichen Randbedingungen bei der Kurz- bzw. Langstreckenmobilität.

Bei der Kurzstreckenmobilität, hier vor allem im Bereich bis zu 200 km, nimmt die lokale Emissionsqualität an Bedeutung zu. Zur Deckung des Bedürfnisses nach Langstreckenmobilität dürfte der Fokus vor allem auf die zur Verfügung stehende Reichweite gerichtet sein. Im stadtnahen Umfeld mit einer Reichweite von bis zu 400 km kann sich ein Markt für die Brennstoffzelle ergeben. Für die Langstreckenmobilität mit Reichweiten größer als 400 km gibt es zum Verbrennungsmotor mit flüssigen Kohlenwasserstoffen als Energieträger derzeit keine Alternative. Demzufolge stellt der verbrennungsmotorische Antrieb auch in Zukunft einen festen Bestandteil für kommende Mobilitätskonzepte dar. Dieser wird neben innermotorischen Maßnahmen zur weiteren Verbrauchs- und Emissionsreduzierung langfristig auch mit einer hundertpro-

zentigen Hybridisierung kombiniert werden. Hierbei wird jedoch nicht mehr der durch die Hybridisierung generierbare Fahrspaß das Ziel der Applikation sein. Vielmehr werden beide Systeme so miteinander kombiniert, dass der Verbrennungsmotor durch die Hybridisierung gerade so unterstützt wird, dass der Verbrennungsmotor optimal arbeitet (Minimalhybridisierung).

Parallel dazu kann als zweiter Pfad der zukünftigen Mobilität die Elektrifizierung des Antriebsstrangs angesehen werden. Das Anwendungsspektrum erstreckt sich von Full-Hybrids über Range Extender bis hin zu Brennstoffzellen- bzw. Elektrofahrzeugen.

Bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs wird zunächst der Elektromotor als Ergänzung des Verbrennungsmotors gesehen. Die nächste Evolutionsstufe stellt einen Range Extender dar, bei dem ein Batteriefahrzeug mit einem relativ einfachen Verbrennungsmotor und Getriebe kombiniert wird, wobei letzterer nur noch zur Reichweiterhöhung dienen wird. Deutlich weiter in der Zukunft liegt die Vision, die Range Extension in Form des Verbrennungsmotors durch eine Brennstoffzelle zu ersetzen. Am Ende steht, bei Vorhandensein einer entsprechenden Energiedichte der Batterie, ein Fahrzeug mit rein durch Batterie gespeistem elektrischem Antrieb.

Die Vision der reinen Elektrotraktion ist indes derzeit noch sehr spekulativ.

So beträgt die Energiedichte heutiger Batteriesysteme gerade einmal ein bis zwei Prozent der von flüssigen Kraftstoffen. Dies entspricht bei heute verfügbarer Lithium-Ion-Technologie einem Nenn-Energieinhalt von ca. 60 Wh/kg.

weite, die rein elektrisch zurückgelegt werden kann, bei einem 100 kg-Batteriesystem auf ca. 7 km beschränkt ist. Eine Realisierung von derart schweren Batterien, z.B. in Hybridkonzepten, ist aber aus Kostengründen unwahrscheinlich, so dass sich letztlich die elektri-

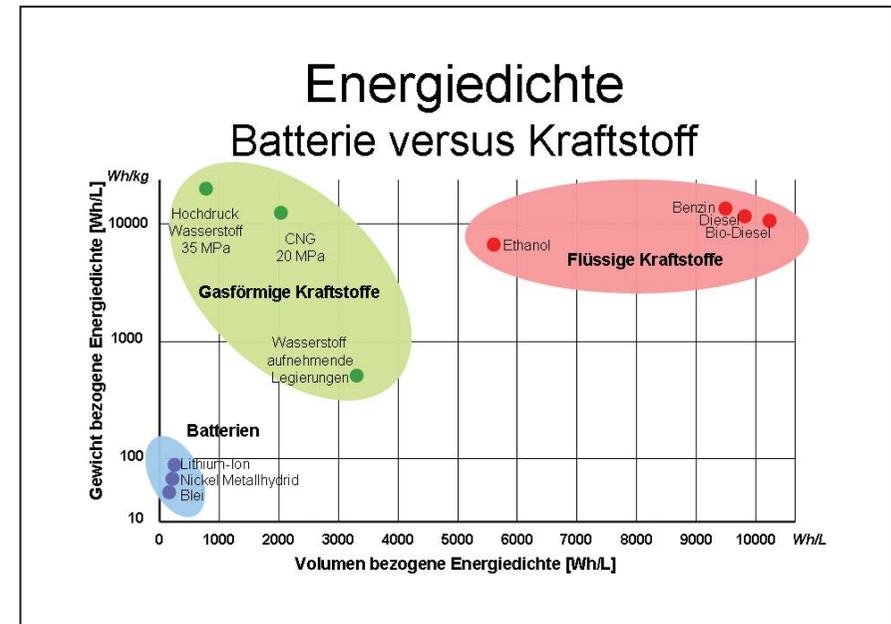


Bild 28: Vergleich der volumenbezogenen Energiedichten in Wattstunden pro Liter (Wh/L) von Batterien und Kraftstoffen; Quelle: Toyota

Um jedoch eine ausreichende Lebensdauer der Batterien sicherstellen zu können, steht im normalen Kundenbetrieb nur ca. 1/3 dieses Nenn-Energieinhaltes zur Verfügung, wodurch bei der Lithium-Ion-Technologie die Energiedichte auf 20 Wh/kg begrenzt wird. Das bedeutet, dass die Reich-

sche Reichweite noch einmal deutlich verringern wird. Durch Fortschritte bei der Zyklisierbarkeit und einer Steigerung des Nenn-Energieinhalts ist es aber durchaus möglich, die nutzbare Energiedichte von 20 Wh/kg auf 60 Wh/kg und damit die elektrische Reichweite kurzfristig

deutlich zu steigern. Das Ziel muss es jedoch sein, eine Energiedichte von mindestens 200 Wh/kg darzustellen. Nur so lassen sich nennenswerte Reichweiten mittels elektrischer Energie erreichen.

Bereits heute ist bei einer entsprechenden Auslegung der Batteriesysteme eine Energiedichte von 100 bis 130 Wh/kg möglich. Das Ziel von 200 Wh/kg, welches bei heutigen Consumer-Batterien, z.B. in Laptops oder elektrisch betriebenen Handwerkzeugen nahezu umgesetzt ist, kann deshalb mit der Lithium-Ion-Technologie auch in der automobilen Anwendung als durchaus realistisch eingestuft werden. Die eigentlichen Herausforderungen liegen bei solchen "High-Energy-Batterien" in der Darstellung einer entsprechenden Lebensdauer und Sicherheit.

Völlig neue Wege müssen beschritten werden, wenn elektrische Universalfahrzeuge mit einer Reichweite von mehr als 500 km realisiert werden sollen. Hierfür ist eine Energiedichte von mehr als 1500 Wh/kg notwendig. Sowohl die Lithium-Ion-Technologie als auch alle anderen bekannten chemischen Elemente stoßen hier an ihre theoretischen Grenzen, so dass für solche Energiedichten neue Ansätze erforscht und entwickelt werden müssen. Aus diesem Grund ist an eine Verwirklichung entsprechender Energiedichten erst nach 2020 zu denken - dann allerdings mit vielversprechenden Aussichten.

Veränderliche wirtschaftliche, technische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen erfordern eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrzeuge und Mobilitätssysteme. Dabei spielen Umwelt- und Ressourcenschonung eine dominierende Rolle. Nur ein vernünftiger Kompromiss zwischen diesen Gesichtspunkten kann zu nachhaltig nutzbaren Systemen führen. Nachhaltigkeit bedeutet hierbei eine ausgewogene Balance aus Ökologie und Ökonomie unter Berücksichtigung gesellschaftlicher Anforderungen. Hocheffiziente Antriebe und neue alternative Energiequellen stehen im Fokus der Entwicklung neuer Mobilitätssysteme und spielen eine entscheidende Rolle bei der Lösung der sich abzeichnenden weltweiten Energieprobleme. Der Erschließung neuer Energiequellen, insbesondere regenerativer Energieträger, kommt hierbei eine tragende Rolle zu. Benötigt wird dabei eine Diversifikation der Primärenergien, nicht aber der in der Mobilität genutzten Energieträger. So ergeben sich etwa für Volkswagen aus den dargestellten Rahmenbedingungen drei konkrete Handlungsfelder in der Entwicklung zukünftiger Antriebskonzepte:

- die konsequente weitere Erhöhung der Effizienz der Antriebsaggregate,
- die Einbeziehung alternativer Energiequellen zur Kraftstoffherstellung und
- die Entwicklung von CO₂-neutralen Pfaden zum Fahrzeugbetrieb.

Basierend auf diesen Bedingungen wird eine Antriebs- und Kraftstoffstrategie verfolgt, deren Kernpunkt zum einen

die Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung der direkteinspritzenden Motorenkonzepte TDI und TSI und ihre Ergänzung durch Hybridsysteme ist sowie insbesondere die Verschmelzung des Diesel- und des Otto-Brennverfahrens zum kombinierten Verbrennungsprozess CCS. Die Potenziale dieser Antriebsarten werden durch den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen aus alternativen Energieträgern noch einmal erweitert. Die synthetischen Kraftstoffe sind frei von Schwefel und Aromaten und können in ihren Eigenschaften enger toleriert werden als heutige Kraftstoffe. Diese vorteilhaften Charakteristika ermöglichen eine Weiterentwicklung der Produkte zu verringertem Verbrauch und, insbesondere bei Dieselmotoren, zu weiter verminderten Emissionen. Um möglichst viele Primärenergiequellen zu erschließen, ohne die Kraftstoffe zu diversifizieren, bietet sich eine Konzentration auf universale Energieträger an. Als solche Energieträger gelten synthetische, flüssige Kohlenwasserstoffe, Wasserstoff und elektrische Energie. Voraussetzung für die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen und Strom ist dabei ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug. Der Elektromotor wird also den Verbrennungsmotor nicht ablösen, sondern parallel zum Verbrennungsmotor existieren. Wichtige Voraussetzung ist indes eine deutlich gesteigerte Energiedichte von Batterien. Nach allem, was man bisher ausmachen kann, dürfte dies in der Lithium-Ion-Technologie zu realisieren sein.

Notizen

