

Fahrzeugantriebe - Stand der Technik und Perspektiven

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Tretow

Institut für Fahrzeugtechnik der Georg-Simon-Ohm-
Fachhochschule Nürnberg

Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg

Dr.-Ing. Miroslaw Weclas

Invent GmbH

Am Weichselgarten 21
91058 Erlangen

Abstract

Nach einer kurzen systemtechnischen Einführung in die Problematik der Antriebe der Räderfahrzeuge, insbesondere hinsichtlich des Energiewandlungsprozesses, werden kurz die Grundlagen der Antriebstechnik dargestellt. Es folgt eine ausführliche Darstellung des Standes der Technik der Antriebsstränge sowohl der straßen- als auch der schienengebundenen Fahrzeuge. Dabei stellt die Entwicklung der Verbrennungsmotoren einen Schwerpunkt dar, insbesondere wegen der Bedeutung dieses Energiewandlers für die Räderfahrzeuge. Aus dieser Gesamtdarstellung der heutigen Antriebstechnik werden die aus Sicht der Autoren notwendigen Entwicklungsziele für zukünftige Antriebe abgeleitet.

1. Einleitung

Die Fahrzeugtechnik heute ist geprägt von Anforderungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Umweltfreundlichkeit, Sicherheit und Bedienungskomfort. Diese Aspekte werden zu einem großen Teil vom Antriebsstrang beeinflusst, über den überwiegend das Zugkraftangebot, der Kraftstoffverbrauch, die Zuverlässigkeit, die Lebensdauer, die Geräuschemission und die Bedienung definiert werden. Um den gestiegenen Anforderungen gerecht werden zu können, ist der Antrieb als funktionale Einheit zu betrachten, die Komponenten sind also auch im Hinblick auf ihre gegenseitige Beeinflussung zu optimieren, was im Automobilbereich als "powertrain-matching" bezeichnet wird.

Mit der vorliegenden Ausarbeitung unternehmen die Autoren den Versuch, den heute erreichten Stand in der Systembetrachtung darzustellen und darüber hinaus nicht nur den Antriebsstrang einer Gattung von Fahrzeugen, z.B. der Personenkraftwagen, zu analysieren, sondern die übergreifenden Systemmerkmale sowohl der straßen- als auch der schienegebundenen Fahrzeuge zu betrachten.

2. Grundlagen Fahrzeugantriebe

2.1 Eingrenzung Fahrzeuge

Fahrzeuge werden im allgemeinen entsprechend Bild 1 eingeteilt. Im Rahmen dieser Abhandlung sollen speziell die Antriebe der Landfahrzeuge behandelt werden. Wesentliches Merkmal der Landfahrzeuge im Vergleich zu den Wasser- bzw. Luft-

fahrzeugen ist die Verwendung des Rades zur Übertragung der Kräfte zwischen dem Fahrzeug und seinem Fahrweg. Die drei grundsätzlichen Aufgaben, die von dem Verbindungselement zwischen Fahrzeug und Fahrweg wahrzunehmen sind, sind die Einzelfunktionen

- Tragen, d.h. Aufnahme der Vertikalkräfte,
- Führen, d.h. die Übertragung von Querkräften,
- Antreiben, d.h. die Übertragung von Längskräften.

Bei den Wasser- und Luftfahrzeugen wird die Funktion Tragen durch Auftrieb des Fahrzeuges gegenüber dem "Fahrweg", die Funktion Führen durch Beeinflussung der Umströmung des Fahrzeuges und die Funktion Antreiben durch Schiffsschrauben, Propeller oder Strahltriebwerke, also im Wesentlichen eine fluidmechanische Kraftübertragung durch Strömungsmaschinen bewerkstelligt. Dies ist beim Landfahrzeug anders, hier übernimmt das Rad als zentrale Komponente alle drei Funktionen, wobei bei den einzelnen Ausführungsformen der Landfahrzeuge zusätzliche Komponenten einen Anteil übernehmen können. Zum Beispiel übernimmt das Gleis Aufgaben der Führung bei den Schienenfahrzeugen, bei anderen Fahrzeugen nimmt die über Trag- und Antriebsrollen laufende Kette eine unterstützende Funktion zum Tragen und Antreiben der Fahrzeuge ein.

Die vorliegende Abhandlung befasst sich mit dem gegenwärtigen Stand der Antriebstechnik, dies meint die Verwirklichung der Grundfunktion Antreiben mit allen ihren zur funktionalen Realisierung notwendigen Komponenten. Im engeren Sinne soll im Rahmen dieser Abhandlung die Antriebstechnik landgestützter Fahrzeuge betrachtet werden.

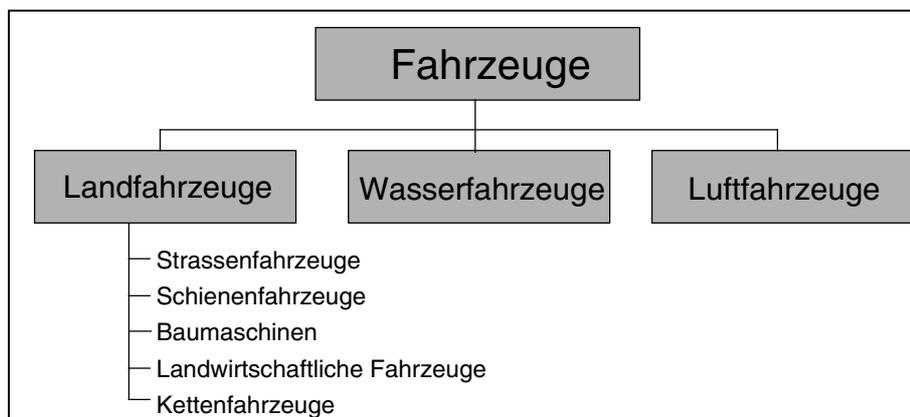


Bild 1: Einteilung der Fahrzeuge

2.2 Grundsätzlicher Aufbau der Fahrzeugantriebe

Der Antrieb bedarf zunächst Energie, die in verschiedenen Formen bereit gestellt werden muss. Dies kann mitgeführter Kraftstoff unterschiedlichster Art oder aber von außen zugeführte Energie sein. Diese Energie ist in mechanische Energie umzuwandeln und anschließend an die Bedürfnisse des Fahrzeuges hinsichtlich Drehmoment und Drehzahl anzupassen. Dieses System der Energiewandlung und Anpassung, der Antriebsstrang, ist Gegenstand dieser Ausarbeitung.

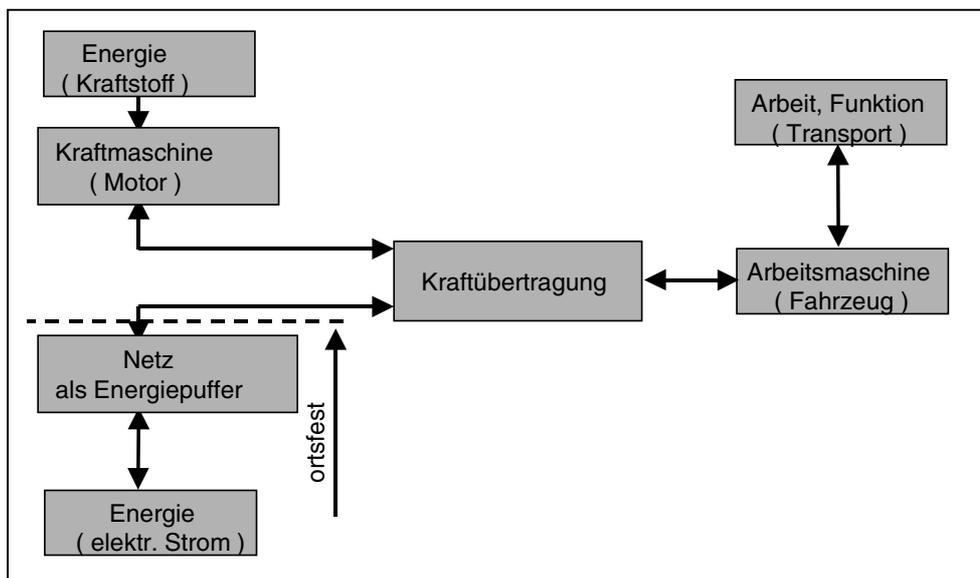


Bild 2: Struktur von Fahrzeugantrieben

Der Antriebsstrang ist der Teil des Fahrzeuges, der es selbstbeweglich, also "automobil" macht. Die Art der eingesetzten Energie bestimmt weitgehend die Elemente des Antriebsstranges, dies in einem sehr viel weiter gehendem Maße, als etwa die Unterschiede des Antriebsstranges zwischen Kraftfahrzeugen und Schienenfahrzeugen.

Mit der allgemein für Maschinensysteme geltenden Strukturbeschreibung lassen sich entsprechend Bild 2 auch Fahrzeuge beschreiben. Eine Kraftmaschine (Motor), die mit Energie versorgt wird, treibt eine Arbeitsmaschine (Fahrzeug) an, welche die gewünschte Funktion (Transport) ausübt. Wenn sich die Betriebsweisen und Kennfelder von Kraft- und Arbeitsmaschinen nicht decken, was in der Regel der Fall sein wird, muss durch eine Kraftübertragung (Getriebe o.ä.) eine geeignete Anpassung erreicht werden. Die Pfeile in Flussrichtung in Bild 2 deuten an, dass der Energiespeicher im Fahrzeug immer nur entladen, aber nicht von der Arbeitsma-

schine über die Kraftmaschine wieder aufgeladen werden kann. Dagegen findet eine wechselseitige Beeinflussung von Kraftmaschine, Kraftübertragung und Arbeitsmaschine statt.

Bei elektrischen Schienenfahrzeugen hat man Systeme entwickelt, die sehr wohl einen umkehrbaren Energiefluss realisieren. Dies ist im unteren Teil von Bild 2 dargestellt. Zu beachten ist dabei aber, dass bei diesen Systemen zum einen nicht Primärenergie verwendet wird, diese auch nicht wirklich zurückgewonnen sondern zwischengespeichert wird, zum anderen der Energiespeicher nicht fahrzeug-

fest sondern ortsfest ist, was zu einer gewissen Einschränkung der "Selbstbeweglichkeit" dieser Fahrzeuge führt.

Bild 2 gibt auch einen Hinweis darauf, dass zur optimalen Konzeption des Antriebsstranges dieser nicht isoliert, sondern stets im Umfeld des Gesamtsystems zu betrachten ist. Dies bedeutet, dass Kenntnisse über Energieart, Kraftmaschine und Arbeitsmaschine vor allem aber über die verlangte Funktion unerlässlich sind.

Die verwendeten Energiearten sind durchaus unterschiedlich. Deswegen seien einige grundsätzliche Bemerkungen zu den möglichen Energiearten vorangestellt.

2.3 Primärenergieträger

Es sind eine Reihe von Energiearten, besser Primärenergieträger bekannt, die für den Landverkehr genutzt werden können. Dabei sind nicht alle Primärenergieträger direkt für den Fahrzeugantrieb

nutzbar, sie müssen in stationären Anlagen, den Kraftwerken, umgewandelt werden und zwar in elektrischen Strom, der dann als Sekundärenergieträger für den Fahrzeugantrieb

den Energiewandler als auch an der Schnittstelle zur Umgebung, dem Kontakt Rad / Fahrweg. Des weiteren sind für den Fahrzeugbauer Fragen wie:

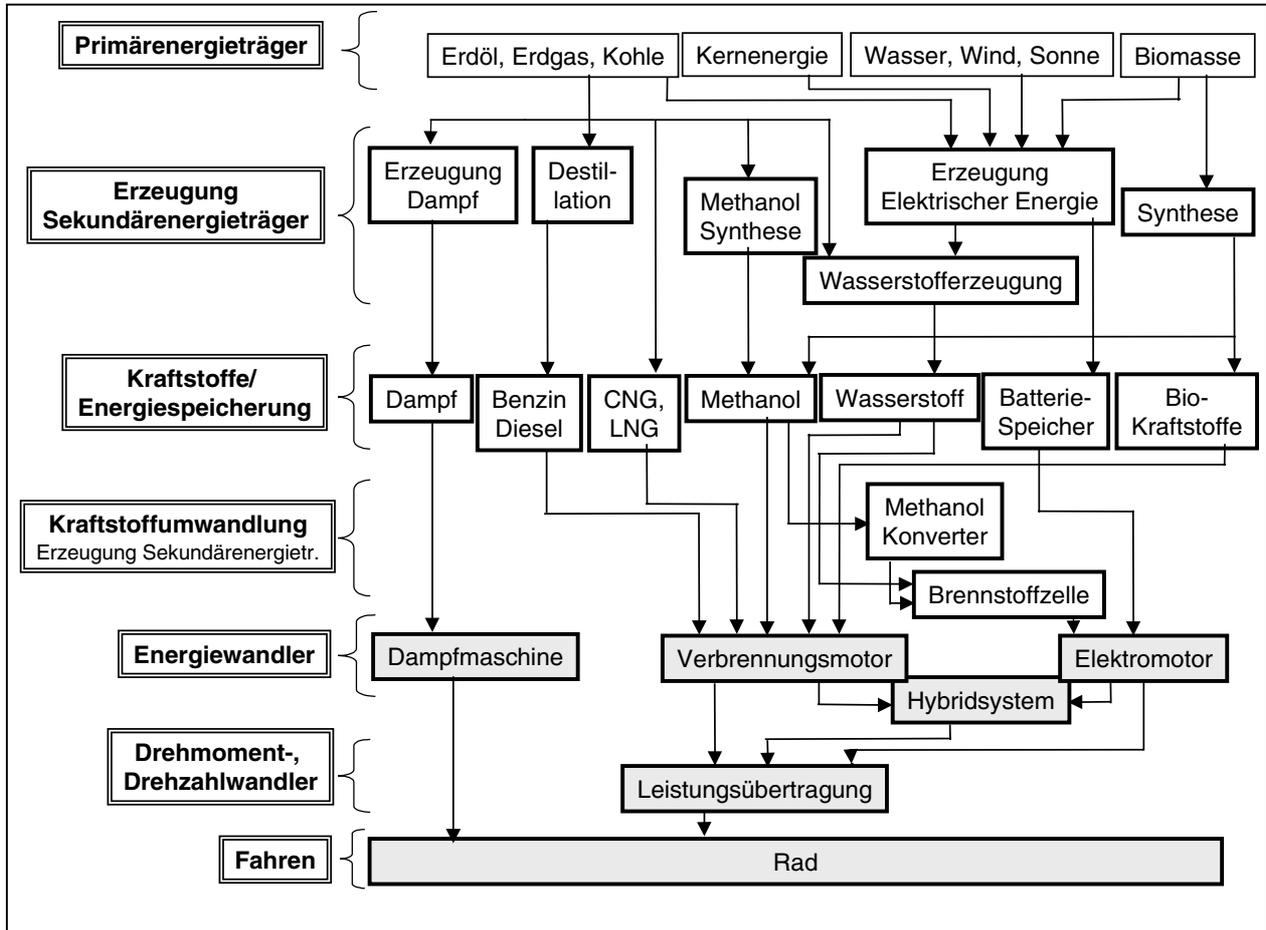


Bild 3: Energiearten für den Fahrzeugeinsatz

nutzbar gemacht werden kann.

Die Auswahl an Antriebsaggregaten ist begrenzt, der Energiewandler ist entweder ein Verbrennungsmotor oder ein Elektromotor, gegebenenfalls auch die Kombination von beiden als Hybridantrieb.

Heute häufig geführte Diskussionen über „alternative“ Antriebe betrachten zum einen die Alternativen auf der Primärenergieebene, hauptsächlich jedoch die Vielfalt der möglichen Treibstoffe, etwa Benzin, Diesel, Methanol, Gas, Wasserstoff.

2.4 Beurteilung von Antrieben

Um Antriebe beurteilen zu können, ist primär die Kenntnis des Verlaufes des Drehmomentes über der Drehzahl (Kennlinie) wichtig, dies sowohl für

- Gewicht und Raumbedarf
- Leistungsvermögen
- Wirkungsgrad
- Preis
- Unterhaltungskosten
- Lebensdauer
- Umweltverträglichkeit

von Bedeutung.

Die Notwendigkeit, diese Anforderungen ganzheitlich zu beurteilen, soll am Beispiel des mitzuführenden Vorrates an Primärenergie verdeutlicht werden. Der mitzuführende Energievorrat ist nicht nur hinsichtlich der Energiedichte der Stoffe selbst zu bewerten, sondern auch die erforderlichen Einrichtungen zur Mitnahme (Behälter, etc.) sind in die Bewertung einzubeziehen. Untersuchungen für Pkw zeigen, dass viele Energiearten für den Fahrzeugeinsatz geeignet sind, also als transportabel bezeichnet werden können, sie zeigen aber auch,

dass die zur Mitnahme an Bord erforderlichen Speicher die nutzbare Energiedichte nach Masse und Volumen wesentlich, d.h. in diesem Falle negativ beeinflussen können. Bild 4 zeigt das spezifische, auf die Masse bezogene Arbeitsvermögen verschiedener Primärenergieträger am Rad, wobei die Erhöhung der Fahrwiderstände durch das zusätzliche Gewicht von Energievorrat und Speicher noch nicht berücksichtigt sind.

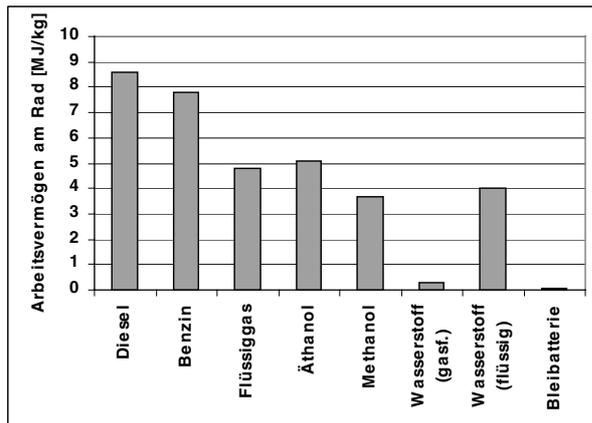


Bild 4: Spezifisches Arbeitsvermögen am Rad verschiedener Primärenergieträger (nach [8])

Nach dieser Untersuchung haben Diesel- und Ottokraftstoffe klare Vorteile hinsichtlich der Transportabilität. Neuere Entwicklungen zeigen aber auch, dass alternative Kraftstoffe, etwa Erdgas oder Wasserstoff, weiter aufholen werden, diese Alternativen aber durch andere Merkmale, etwa das Emissionsverhalten, zusätzliche Vorteile erzielen können.

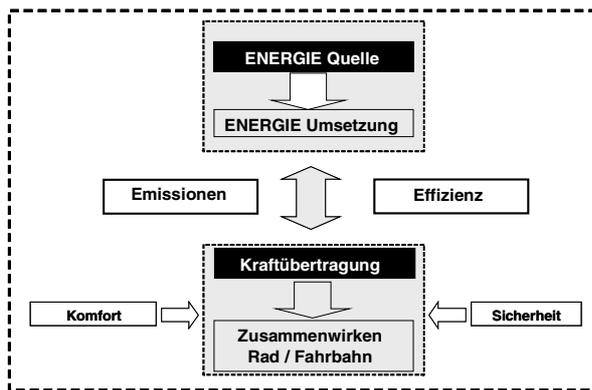


Bild 5: Hauptkomponenten der Antriebe

Der Antrieb von Fahrzeugen umfasst grundsätzlich immer:

- Wandlung eines Primärenergieträgers in mechanische/elektrische Energie

- Übertragung/Anpassung dieser Energie an die Erfordernisse des Fahrbetriebes
- Darstellung der Energie in Form von Drehmoment und Drehzahl am Rad
- Übertragung des Drehmomentes vom Rad auf die Fahrbahn

Bild 5 verdeutlicht diese Aufgabenstellung. In das Bild sind auch aufgenommen die wesentlichen Einflussgrößen, die aus heutiger Sicht die Antriebe der Fahrzeuge beeinflussen. Damit stellt diese Grafik im Allgemeinen die heutige Situation der Antriebe mit ihren Beeinflussungen dar.

Antriebe in diesem umfassenden Sinne meint also die Gesamtheit der Einrichtungen, die aus dem Primärenergieträger als "Kraftquelle" den Vortrieb des Fahrzeuges im Sinne der Übertragung der Kräfte zwischen Rad und Fahrbahn erzeugt.

3. Anforderungen an Antriebe

3.1 Einführung

Um fahren zu können, müssen alle Bewegungswiderstände überwunden werden, d.h. das Fahrzeug muss eine Zugkraft (Z) aufbringen, die der Summe der Bewegungswiderstände (W_i) entspricht.

$$Z = \sum_{i=1}^n W_i$$

Üblicherweise geht man von der erforderlichen Zugkraft bei Höchstgeschwindigkeit (v_{max}) aus und ermittelt die notwendige Leistung (P) über

$$P = Z \cdot v$$

Um die installierte Leistung konstant auszunutzen, muss die Zugkraft entsprechend einer Hyperbel verlaufen (Bild 6).

Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, würde die Zugkraft für v → 0 gegen Unendlich ansteigen. Dies ist - wie die Erfahrung lehrt - in der Praxis nicht durchführbar:

zum einen, weil diese Kräfte ja auch bis zum Rad übertragen werden müssen und die Übertragung großer und größter Kräfte bzw. Momente hinsichtlich der Bauteilfestigkeit Grenze erfährt, etwa für Zahnräder, Gelenkwellen, Fahrmotoren, um nur einige zu nennen, zum anderen, weil der Kontakt Rad/Fahrbahn nur eine begrenzte Kraft zu übertragen in der Lage ist.

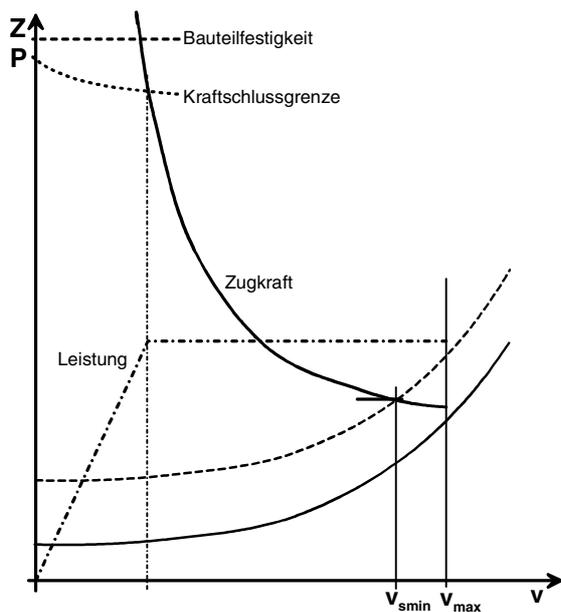


Bild 6: Zugkraft/Leistung über der Fahrgeschwindigkeit

Während die Frage der Bauteilgrenzfestigkeit eher ein Problem der konstruktiven Auslegung ist, ist die Frage der übertragbaren Zugkraft im Zusammenhang der Fahrdynamik von großem Interesse. Die Übertragung von Zugkräften zwischen Rad und Schiene wird bekanntlich durch den Kraftschlussbeiwert μ_{KS} beschrieben. Der Kraftschlussbeiwert ist abhängig von einer Reihe von Größen, etwa dem Schlupf, also der auf die Fahrgeschwindigkeit bezogene Gleitgeschwindigkeit oder der Fahrgeschwindigkeit.

Für Schienenfahrzeuge liegt das Maximum des Kraftschlussbeiwertes bei etwa 1 ... 1,3 % Schlupf, für Kraftfahrzeuge etwa eine Zehnerpotenz höher. Werte für den Kraftschlussbeiwert liegen für Gummiräder auf trockener Betonfahrbahn bei etwa 0,8 ... 1,0, für Stahlräder auf trockenen Stahlschienen bei etwa 0,3 ... 0,4.

Die bisherigen Angaben beziehen sich auf den Radaufstandspunkt. Infolgedessen ist eine aus Zugkraft am Radumfang und Fahrgeschwindigkeit ermittelte Leistung ebenfalls auf den Radumfang bezogen. Üblicherweise gibt man für Fahrzeuge die installierte Leistung als Kenngröße an, d.h. für elektrische (Schienen-) Fahrzeuge die am Stromabnehmer (für Traktion) aufgenommene Leistung, für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotorantrieb die Nennleistung des Antriebsmotors. Für das Gesamtsystem ist jedoch abweichend hiervon die mögliche Leistung, die der Primärenergieträger erbringen kann, heranzuziehen. Um also von der Leistung am Radumfang zur benötigten Leistung zu gelangen,

sind alle Verluste zu berücksichtigen. Es ergibt sich die aufzubringende Leistung zu

$$P = \frac{1}{\eta} \cdot Z \cdot v$$

wobei η den Gesamtwirkungsgrad vom Primärenergieträger bis zum Radumfang beschreibt, ein Umstand, der insbesondere bei der elektrischen Traktion gerne verschwiegen wird.

Aus dem Wunsch nach konstanter Leistung am Radumfang ergibt sich die Aufgabe des Antriebes, nämlich mit geringstmöglichen Emissionen und Verbrauch die Zugkraft so komfortabel und sicher wie möglich auf den Fahrweg zu übertragen.

3.2 Emissionen und Verbrauch

Das grundsätzliche Dilemma aller Antriebe zeigt Bild 7. Dies gilt grundsätzlich für alle Antriebe mit Verbrennungsmotoren, es gilt - wenn man den Primärenergieumwandlungsprozess im Kraftwerk mit in die Betrachtung einbezieht - auch für die elektrische Traktion der Eisenbahn.

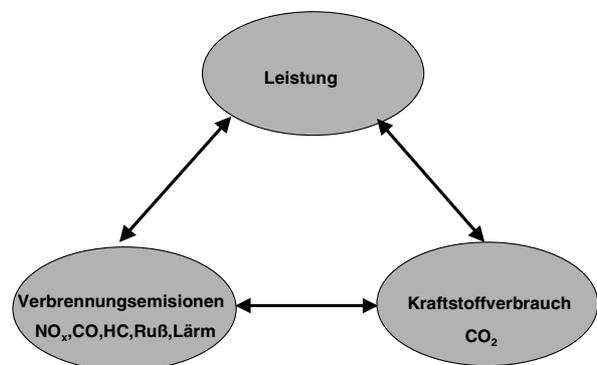


Bild 7: Magisches Dreieck der Antriebe

Die Komponenten der Verbrennungsemissionen werden direkt durch die Qualität des Verbrennungsprozesses definiert (Bild 8).

Der Kraftstoffverbrauch und damit die CO₂-Emission wird durch den Wirkungsgrad des Antriebes und durch Fahrzeugmasse, Fahrstil, elektrischen Energieverbrauch im Fahrzeug, Form des Fahrzeuges und Fahrwiderstand beeinflusst (Bild 8). So ergibt eine Verringerung der Fahrzeugmasse um 100 kg bei durchschnittlicher Fahrweise eine Reduktion des Kraftstoffverbrauches um etwa 0,6 l / 100 km (Benzin) und etwa 0,4 l / 100 km (Diesel), und 1 kW elektr. Energieverbrauch an Bord benötigt etwa 1,7 l / 100 km (Benzin) bzw. etwa 1,5 l / 100 km (Diesel).

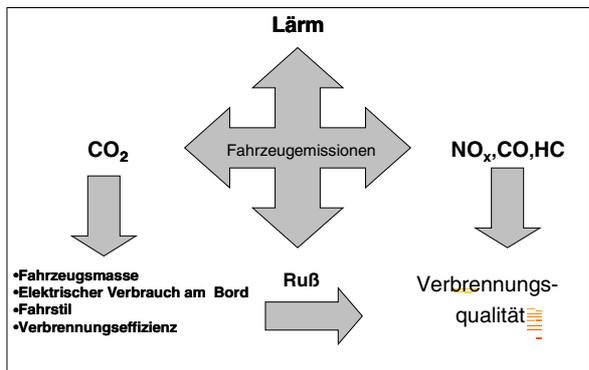


Bild 8: Hauptquellen der Fahrzeugemissionen

Die Bemühungen, die Emissionen zu senken, werden durch stetig verschärfte Abgasgesetzgebungen vorangetrieben, die CO₂-Senkung wird durch eher unverbindliche politische Absichtserklärungen (Kyoto-Protokoll) und steuerliche Maßnahmen begünstigt.

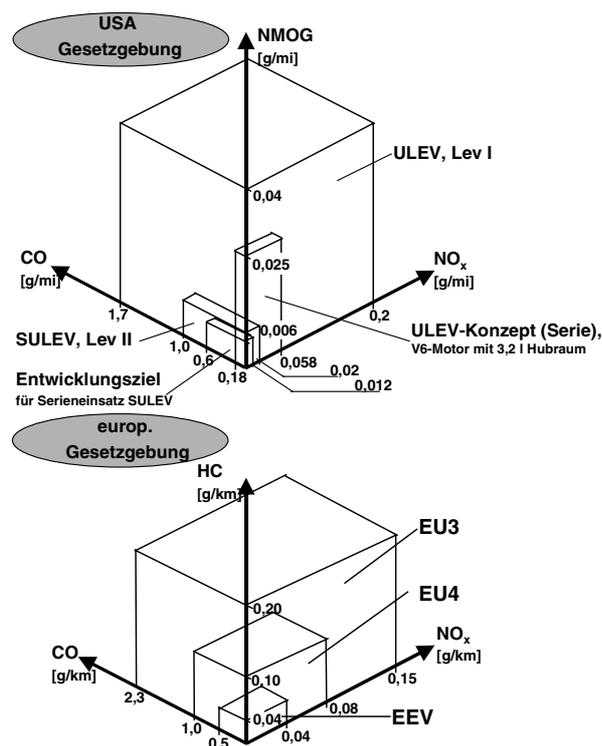


Bild 9: Emissionsregelungen für Pkw in USA und Europa

Bild 9 zeigt die Entwicklung der Abgasgesetzgebung in USA und Europa in den letzten Jahren. Die Grenzwerte sind stetig verschärft worden, weitere Grenzwertsenkungen sind geplant. Der damit erreichte Stand führt zu außerordentlich niedrigen Werten, die in die Nähe der Nachweisgrenze führen.

ren. Man bedenke bei den Zahlen stets, dass die Schadstoffanteile am Abgas ohne Nachbehandlungsmaßnahmen lediglich etwa 1% des Abgases ausmachen. Die Einhaltung der Grenzwerte wird heute durch motorische, vor allem aber durch Nachbehandlung der Abgase erreicht.

Durch viele motorische Maßnahmen und Wirkungsgradverbesserungen der Leistungsübertragungen konnte der relative Verbrauch der Fahrzeuge wesentlich reduziert werden, der absolute Verbrauch hat aber durch stetig wachsende Leistung und / oder Masse der Fahrzeuge, nicht zuletzt durch zusätzliche Ausrüstungen, aber auch durch steigende Sicherheitsstandards diese Verbrauchsverbesserung nicht in dem möglichen Rahmen nachvollzogen.

Bild 10 veranschaulicht exemplarisch die Entwicklung des Fahrzeuggewichtes vom Golf I bis zum Golf IV. Dieses Mehrgewicht resultiert aus dem insgesamt größer gewordenem Fahrzeug und aus zusätzlichen Ausrüstungen, nicht zuletzt wegen der gestiegenen Emissionsgrenzwerte und höherer Komfortansprüche. Im gleichen Zeitraum wurde der Kraftstoffverbrauch durch verschiedenen Maßnahmen wesentlich gesenkt.

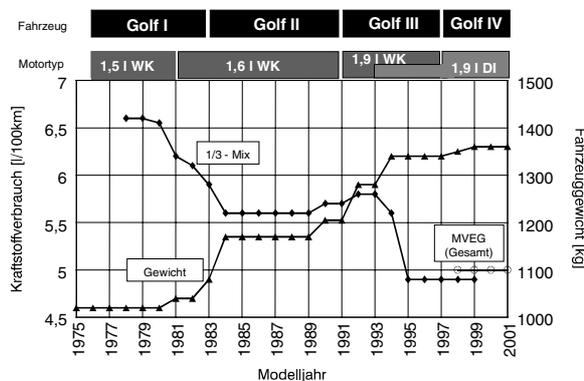


Bild 10: Entwicklung Kraftstoffverbrauch und Fahrzeuggewicht beim Golf Diesel

3.3 Komfort und Sicherheit

Wesentliches Merkmal der Fahrzeugentwicklung der letzten 20-30 Jahre war die Steigerung des Komforts und die Verbesserung der Sicherheit der Fahrzeuge. Dies gilt für Straßen- wie auch für Schienenfahrzeuge. Herausragender Beleg für die bessere sicherheitstechnische Ausstattung insbesondere der Pkw ist die Zahl der getöteten Verkehrsteilnehmer: in den sechziger Jahren lag die Zahl der Verkehrstoten in den alten Bundesländern - bei wesentlich niedrigerer Verkehrsdichte - in der Größenordnung von nicht ganz 20.000, derzeit liegt

die Zahl für das Gebiet der alten und der neuen Bundesländer bei rund 7.000.

Die Verbesserung der passiven Sicherheit der Fahrzeuge wurde im wesentlichen durch Optimierungen der tragenden Strukturen, insbesondere hinsichtlich des Verformungsverhaltens (Crash), durch neue Materialien und durch verbesserte ergonomische Bedingungen für die Fahrer erreicht.

Im Bereich der aktiven Sicherheit konnte insbesondere durch Einführung ergänzender, meist elektronisch gesteuerter Systeme eine Verbesserung erreicht werden. Beispielfhaft seien hier genannt:

- Sicherheitsgurte
- Antiblockiersysteme
- Traktionssteuerungen
- Airbags

Interessanterweise sind viele dieser Systeme, etwa ABS, Traktionssteuerungen, lange Zeit vor der Einführung im Straßenfahrzeug in Schienenfahrzeugen realisiert worden.

Die Steigerung des Komforts der Fahrzeuge ist in mancherlei Hinsicht durchaus kritisch zu betrachten. Zwar ist grundsätzlich nichts gegen komfortable Fahrzeuge einzuwenden, etwa im Bereich des Sitzkomforts oder bei entsprechenden klimatischen Verhältnissen der Einbau von Klimaanlage, aber viele zur Steigerung des Komforts dem Kunden insbesondere der automobilen Oberklasse angebotene Einrichtungen können durchaus als überflüssig bezeichnet werden, zumal sie dem wirtschaftlichen Betrieb der Fahrzeuge entgegenstehen. Wenn heute in Oberklassefahrzeugen bis zu 90 Elektromotoren (bei steigender Tendenz) zum Einstellen von Sitzen, Scheiben, Spiegeln, etc. verbaut werden, so trägt dies in nicht unerheblichem Maße zur Gewichtssteigerung bei.

Man kann einwenden, dass diese Komfortpakete nur einen sehr kleinen Teil der Fahrzeuge betrifft, aber es gibt eine sehr ausgeprägte Tendenz, Merkmale der Oberklasse über die obere Mittelklasse auch in die weit verbreitete Mittelklasse einzuführen (siehe weiter oben das Beispiel Golf).

3.4 Leistung

Eine weitere, viel diskutierte Anforderung an den Antriebsstrang ist die Leistung. Grundsätzlich wird die notwendige Leistung definiert über:

- die gewünschte maximale Fahrgeschwindigkeit,
- die erforderliche Beschleunigung,

- die in "normalen" Steigungen für notwendig erachtete Mindestgeschwindigkeit.

Die Fahrgeschwindigkeit in der Ebene (Beharrungsgeschwindigkeit) ergibt sich aus dem Gleichgewicht von Bedarfsleistung (Produkt aus Bewegungswiderständen und Geschwindigkeit) und verfügbarer Leistung am Rad. Wenn man eine deutliche Beschleunigungsreserve berücksichtigt, so ergibt sich für einen Mittelklasse-Pkw eine erforderliche Leistung von max. ca. 30 kW für eine Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h (Bild 11).

Um diese Fahrgeschwindigkeit zu steigern ist die Leistung weit überproportional zu steigern, eine Verdoppelung der Fahrgeschwindigkeit erfordert eine sechs- bis achtfach höhere Leistung. Der genaue Steigerungsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis des konstanten Fahrwiderstandsanteiles zum Luftwiderstandsanteil, der bekanntlich proportional zum Quadrat der Fahrgeschwindigkeit ist.

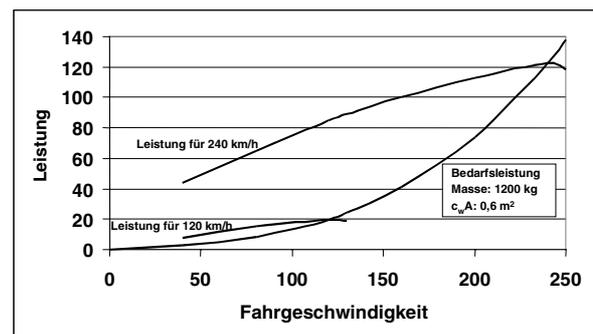


Bild 11: Erforderliche Fahrzeugleistung (Leistung in kW)

Die Masse des Fahrzeuges geht in die Leistung ein über

- den Fahrwiderstand,
- die Beschleunigung.

In beide Widerstandsanteile geht die Masse linear ein, die erforderliche Leistung steigt jedoch - bei konstanter Fahrgeschwindigkeit - unterproportional mit der Masse des Fahrzeuges, weil der Luftwiderstand von der Masse unbeeinflusst ist.

4. Stand der Technik

4.1 Stand der Verbrennungsmotorentechnik

Die Emissionsbestandteile werden primär durch die Verbrennungsprozessqualität, die Emissionsmenge wird zusätzlich auch durch Antrieb und Fahrzeug definiert. Auch der Kraftstoffverbrauch (CO_2 -Emissionen) wird durch den Wirkungsgrad

des Antriebes, darüberhinaus auch durch Fahrzeugmasse, Fahrstil, Energieverbrauch der Hilfsysteme, Aerodynamik und Kontakt Rad / Fahrbahn definiert (Bild 8). Die wichtigsten Aspekte des Verbrennungsmotors als Antriebsquelle für Fahrzeuge werden unabhängig von spezifischen Anwendungen analysiert.

Es gibt eine ganze Reihe von Technologien die für moderne Verbrennungsmotoren angewandt werden, um den Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen zu senken. Diese Technologien können in zwei Gruppen unterteilt werden:

- innermotorische Maßnahmen, und
- außermotorische Maßnahmen.

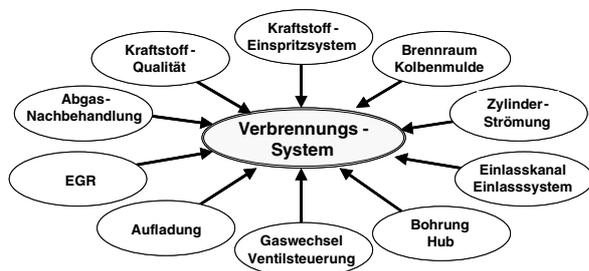


Bild 12: Technologien zur Optimierung des Verbrennungsmotors

Die wichtigsten Maßnahmen beider Gruppen sind in Bild 12 aufgelistet:

- Kraftstoffeinspritzungssystem und Steuerung
- Brennkammer und Ventilsteuerung
- „Down sizing“ und Zylinderabschaltung
- Abgasrückführung
- Aufladung und Ladeluftkühlung
- Homogenisierung des Gremisches, und homogenisierung der Verbrennung
- Abgasnachbehandlung
- Kraftstoff.

Zukünftige Motoren müssen sehr niedrige (quasi-Null) Abgasemissionen bei möglichst niedrigem Kraftstoffverbrauch (Bild 13) aufweisen.

Dabei muss der Verbrennungsmotor als Antriebsquelle für Straßenfahrzeuge in einem breiten Bereich von Drehzahl und Last arbeiten, wobei der gewünschte niedrige Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen in allen Betriebsbereichen realisiert werden sollen. Für Straßenfahrzeuge sind dabei folgende Betriebsbedingungen für den Verbrennungsmotor wünschenswert (Abb.13):

- Motor betrieben mit quasi-stöchiometrischem und homogenem Gemisch für maximale Leistungsdichte
- Motor betrieben mit magerem und homogenem Gemisch für niedrigen spezifischen Kraftstoffverbrauch bei Teillast

- Motor mit homogener Verbrennung (für quasi-stöchiometrisches und mageres Gemisch) für sehr niedrige (bis nahe-Null) Abgasemissionen.

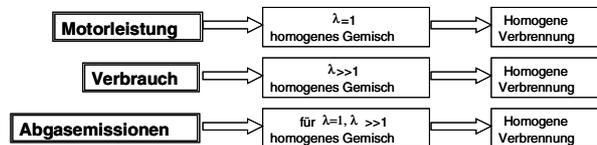


Bild 13. Gewünschte Betriebsbedingungen für Motoren der Zukunft

Besonderes attraktiv ist die Anwendung von magerhomogenem ($\lambda \gg 1$) Gemisch für Teillast-Betrieb. Das bedeutet, daß der spezifische Kraftstoffverbrauch (b_e) deutlich reduziert werden kann:

$$b_e \cdot \lambda \approx const.$$

Zur Zeit realisiert man die Verbrennung von nicht-homogenem magerem Gemisch mit dem Ziel, den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Leider geht dies zu Lasten der Abgasemissionen.

Die Autoren sind überzeugt, daß die weitere Entwicklung und die Anwendung von Abgasnachbehandlungssystemen zwar helfen kann, die Probleme der Verbrennungsemissionen zu reduzieren, diese Systeme werden aber die Probleme nicht lösen, insbesondere im Hinblick auf die nach 2005 geltenden Grenzwerte (siehe Bild 9) [17]. Um diese Emissionsnormen zu erfüllen, ist direkt in den Verbrennungsprozess des Motors einzugreifen.

Für Pkw-Fahrzeuge mit Ottomotor wurden die NO_x und HC Emissionen um 40% (EURO 3) bzw. um 70% (EURO 4) reduziert (bezogen auf EURO 2) [1]. Daneben wurden die CO Emissionen um 30% bzw. um 70% reduziert. Für dieselbetriebene Pkw- bzw. kleine Lkw-Fahrzeuge sind die Partikel Emissionen um 40% (EURO 3) bzw. 70% (EURO 4) reduziert. Weiterhin sind die NO_x und HC Emissionen um 12% bzw. um 56%, die CO-Emissionen um 40% bzw. um 50% reduziert worden. Das zeigt insbesondere, wie wichtig das Dieseldilemma: NO_x – Ruß für die Erfüllung der zukünftigen Emissionsnormen ist.

Für große Lkw-Fahrzeuge sind die Partikelemissionen um 30% (EURO 3) bzw. um 80% (EURO 4/5) reduziert. Daneben sind die NO_x -Emissionen um 30% bzw. um 50% (EURO 4) und 70% (EURO 5) reduziert. Die CO-Emissionen sind um 40% und 50% (EURO 3 bzw. 4) reduziert.

Neben dem Verbrennungsmotor als Antriebsquelle, trägt auch das Fahrzeug durch sein Gewicht und seine Aerodynamik, der Fahrer durch seinen Fahr-

still zum Kraftstoffverbrauch bei. Von verbrennungsmotorischer Seite sind noch zusätzliche Aspekte wie Leistungsdichte (pro Volumen), Motor-dynamik, Lärm und Zuverlässigkeit von großen Bedeutung.

Alle herkömmliche Verbrennungssysteme können nach Art der Gemischbildung und Zündung in einer der folgenden fünf Gruppen eingeordnet werden. Das Potential für Abgasemissionen und Kraftstoffverbrauch Reduktion wird analysiert.

1. Verbrennungsmotor mit homogenem, stöchiometrischem Gemisch, und lokaler Zündung (z.B. Benzindirekteinspritzer mit stöchiometrischem Gemisch).

Dieses Verbrennungssystem bietet hohe Leistungsdichte, hohen spezifischer Kraftstoffverbrauch, hohe Roh-Emissionen (insbesondere NO_x und CO) und sehr niedrige (oder keine) Ruß-Emissionen. Die Verfügbarkeit des Dreivegekatally

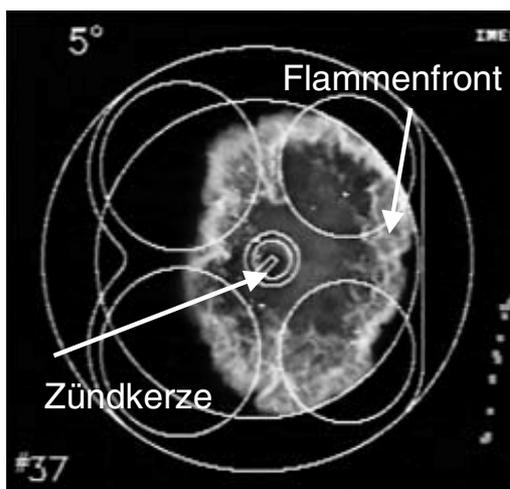


Bild 14: Beispiel Flammenfront bei Fremdzündung des homogenes Gemisches

sators erlaubt die hohe Roh-Emissionen signifikant zu senken. Der Verbrennungsprozess ist nicht homogen, mit einer Flammenfront, die sich vom Flammenkern durch den Brennraum ausbreitet (Bild 14). Dieses Verbrennungssystem ist in starkem Maße vom verwendeten Kraftstoff abhängig.

2. Verbrennungsmotor mit nicht-homogenem-magerem Gemisch, und lokaler Zündung (z.B. Benzindirekteinspritzer mit geschichtetem Gemisch).

Dieses Verbrennungssystem erlaubt es, den spezifischen Kraftstoffverbrauch unter Teillastbetriebsbedingungen durch Verbrennung von geschichtet -

magerem Gemisch zu senken. Hohe NO_x - und HC-Roh-Emissionen und signifikante Ruß-Emissionen charakterisieren das Verbrennungssystem. Zur Zeit gib es nur technisch noch nicht zufriedenstellende Abgasnachbehandlungssysteme zur Senkung der hohen Roh-Emissionen. Der Verbrennungsprozess ist nicht homogen, teilweise diffusionskontrolliert mit einer Flammenfront, die sich vom Flammenkern durch den Brennraum ausbreitet (Bild 15). Auch dieses Verbrennungssystem ist sehr vom verwendeten Kraftstoff abhängig.

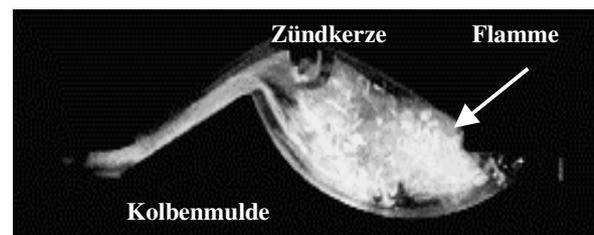


Bild 15: Beispiel Verbrennung in einem geschichtetem GDI-System (GDI-Mitsubishi)

3. Verbrennungsmotor mit nicht-homogenem-magerem Gemisch, und selbst-(Kompressions) Zündung (z.B. direkteinspritzender Dieselmotor).

Dieses Verbrennungssystem garantiert sehr niedrigen spezifischen Kraftstoffverbrauch unter Nutzung nicht-homogenes Gemisches. Die lokal hohe NO_x -Roh-Emissionen und signifikante Ruß-Emissionen charakterisieren die Qualität des Verbrennungsprozesses.



Bild 16: Beispiel Brennender Spray in Dieselmotor

Zur Zeit gib es noch kein zufriedenstellendes Abgasnachbehandlungssystem, um die hohe Roh-Emissionen (NO_x und Ruß) zu senken. Der Verbrennungsprozess ist nicht homogen und stark diffusionskontrolliert. (Bild 16). Auch dieses Verfahren ist vom verwendeten Kraftstoff abhängig.

4. Verbrennungsmotor mit homogenem, magerem Gemisch, und Selbst- (Kompressions-) Zündung (z.B. HCCI Konzept- Homogeneous Charge Compression Ignition).

Dieses Verbrennungssystem hat Potential für niedrigen spezifischen Kraftstoffverbrauch unter Teillastbetriebsbedingungen und nutzt ein homogenes Gemisch. Die Kombination von kompressionsindizierter Selbstzündung und homogenem Gemisch garantiert ein homogenes Temperaturfeld (keine lokale Temperaturspitzen) und sehr niedrige NO_x -Roh-Emissionen (für mageres Gemisch). Wenn der Kraftstoff vor der Zündung vollständig verdampft wird, sind kaum Ruß-Emissionen zu erwarten. Dieses System kann derzeit noch nicht mit höherer Last bzw. nicht unter nicht-stationären Bedingungen arbeiten [9, 10, 12, 22].

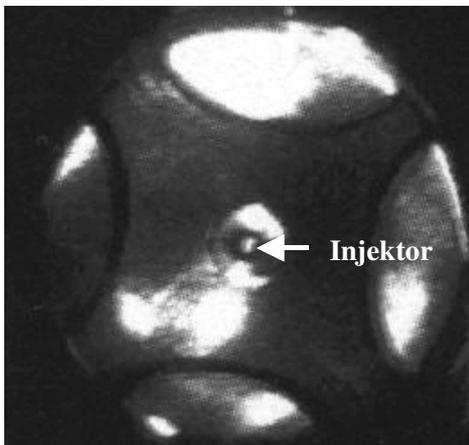


Bild 17: Beispiel homogene Verbrennung in Dieselmotor (HCCI)
(Quelle: DaimlerChrysler)

Das System reagiert sehr empfindlich auf lokale Gemischinhomogenitäten, auch lokales Flammenquenchen (z.B. in Wandnähe) ist möglich. Große Probleme macht das Zündtiming und die Anpassung der Lastpunkte. Der Verbrennungsprozess ist quasi-homogen (Bild 17). Dieses Verbrennungssystem zeigt geringere Abhängigkeiten vom verwendeten Kraftstoff.

5. Verbrennungsmotor mit homogen- magerem Gemisch, und selbst- („radical auto-ignition“) Zündung z.B.. Radical Combustion Konzept.

Dieses Verbrennungssystem bietet niedrigen spezifischen Kraftstoffverbrauch unter Teillastbetriebsbedingungen und nutzt ein homogenes Gemisch. Der Verbrennungstemperaturfeld ist nahezu homogen ohne Temperaturspitzen. Die chemisch- (durch aktive Radikale) indizierte Selbstzündung (volume-

trische Zündung) und homogenes Gemisch garantieren sehr niedrige NO_x -Roh-Emissionen [14]. Wenn der Kraftstoff vor Zündung vollständig verdampft wird, sind kaum Ruß-Emissionen zu erwarten. In konventionellen Systemen wird die chemische Aktivität des Gemisches durch Abgasrückhaltung im Zylinder (meistens in 2-Takt Motoren) unterstützt. Deswegen sind höhere Lasten derzeit nicht möglich. Neue Möglichkeiten eröffnet ein neues Gemischbildungskonzept, als MDI (Mixture Direct Injection) bezeichnet [24, 25].

Der Verbrennungsprozess (RC) ist quasi-homogen. Dieses Verbrennungssystem zeigt ebenfalls geringere Abhängigkeiten vom verwendeten Kraftstoff.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur konventionelle Verbrennungssysteme im Sinne einer Beschreibung des „Standes der Technik“ analysiert. Völlig neue Konzepte für homogene Verbrennung im Motor, wie z.B. Porenmotorkonzept [4, 5, 6] werden in einer folgenden Abhandlung präsentiert und analysiert.

Die aktuellen F&E Aktivitäten im Bereich Abgasemissionsreduzierung betreffen in erste Linie Abgasnachbehandlungssysteme, die insbesondere für Magermotoren und Russfilter geeignet sind. Die wichtigsten Technologien auf diesem Gebiet sind:

- Dreiwegekatalysator
- Mager NO_x -Katalysator
- Selektiv Katalysator für NO_x
- NO_x adsorbers
- Plasma unterstützte Katalyse (niedrig Temperatur Prozess)
- Dieseloxidationskatalysator
- Partikel (Ruß) filter

Neben den Abgasnachbehandlungssystemen, die nur die „Ergebnisse“ des Primärverbrennungsprozesses beeinflussen, sind auch direkte Verbesserungen am Verbrennungsprozess durch innermotorische Maßnahmen aktuelle Themen für den Verbrennungsmotor. Die wichtigste Technologien seien noch einmal kurz analysiert.

• **Kraftstoffeinspritzungsstrategien:**

- hoher Einspritzdruck (bis über 2000bar) (Pumpe-Düse, Common-rail, Verteilerpumpe)
- Düsenoptimierung (kleine Löcher, Mehrlochdüsen, Variable Düsengeometrie)
- Vor- und Nacheinspritzungsstrategien (für Verbrennungsgeräusche und Abgastemperatur)
- gestufter Einspritzverlauf (Mehrphasen, Mehrzahl)
- Einspritztiming
- Elektronische Steuerung
- Kraftstoff-Wasser Einspritzung.

- **Mehrventiltechnik**
 - 3,4,5 bis 8-Ventiltechnik (Bessere Durchströmung, höhere volumetrische Effizienz, begrenzte Brennraumgeometrie, limitierte Zündkerze- bzw. Injektorlage)
 - gewünschte Luftströmungsstruktur (Tumble, Drall, Tipped)
 - Variable Ansaugrohlänge
 - Schaltbare Einlasskanäle
 - Variabler Hub (z.B. Valvetronic)
 - Freisteuerbar (z.B. elektromagnetische Ventilsteuerung)
 - Rotationsventil
- **Ventiltiming und Ventilsteuerung:**
 - Nockenwellen Steuerung (variabel timing) – z.B. Vanos
 - Ventilhub Steuerung – z.B. Valvetronic
 - Freiwählbare Ventilsteuerung (Timing und Hub) – z.B. elektromagnetische Ventilsteuerung EMV
- **Kolbenmuldegeometrie:**
 - Brennraumgeometrie
 - Squish
 - Gemischschichtung
- **Abgasrückführung:**
 - Kühlung
 - Timing
 - AGR-Rate
- **Variable Kompression, Hochdruck - Aufladung und Zylinderabschaltung**
- **Zündung:**
 - Lokale Zündung (Fremd)
 - Kompressionszündung nicht homogenen Gemisches

- Kompressionszündung des homogenen Gemisches
- Chemische Zündung des homogenen Gemisch
- 3D-thermische Zündung durch poröses Element.

Die Kombination zwischen Gemischhomogenität, Gemischzusammensetzung (Luftzahl und AG) und Art der Zündung definieren Verbrennungsmodi des Motors, d.h. sie definieren direkt Abgasemissionen und Effizienz.

Die herkömmlichen Verbrennungssysteme des Verbrennungsmotors mit Kraftstoffdirekteinjektion, die das Potential niedriger Abgasemissionen und niedrigen Kraftstoffverbrauches haben, sind mit Kreisen in Bild 18 markiert.

Diese Abbildung zeigt, dass es kein System gibt, das in allen Betriebsbereichen die Optima hinsichtlich Emissionen und Kraftstoffverbrauch garantiert, wobei jedes System in einem anderem Betriebsbereich als optimal bezeichnet werden kann.

Daher sollen zukünftige Motoren eine Kombination verschiedener Verbrennungsmodi nutzen, um Emissionen und Kraftstoffverbrauch in allen Betriebspunkten zu optimieren (siehe Konzept des Intelligenen Motors [25]).

Die wichtigste Probleme der GDI -Motoren liegen in folgenden Bereichen:

- Flüssiger Kraftstoff im Brennraum
- Kraftstoffverdampfung in Kolbenmulde
- Homogenisierung bzw. Schichtung des Gemisches
- Mager Zündgrenze für homogen-mageres Gemisch.

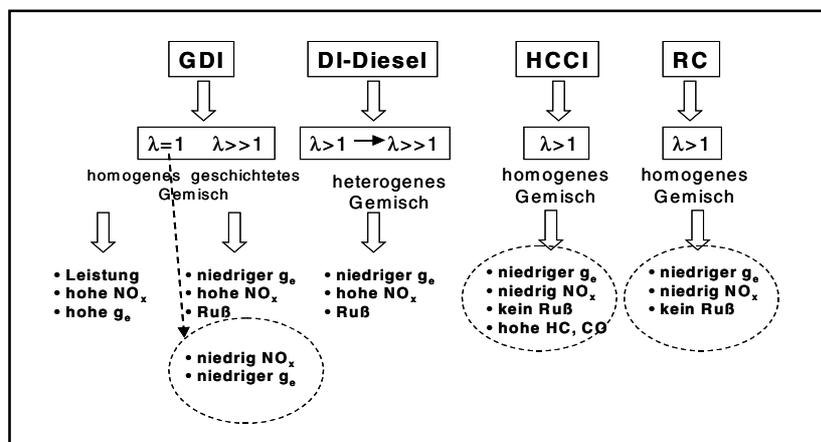


Bild 18: Wichtigste Merkmale des herkömmlichen Verbrennungsmotors

Die RC-Motoren haben bei vor allem bei folgenden Aspekten Probleme:

- Flüssiger Kraftstoff im Brennraum
- Kraftstoffverdampfung vor der Zündung
- Homogenisierung des Gemisches
- Kontrolle der chemischer Aktivität des Gemisches
- Grenze für fettere Gemische
- Konzentration der aktiven Radikalen Nutzung AGR im Zylinder.

Probleme der HCCI-Motoren liegen in folgenden Bereichen:

- Flüssiger Kraftstoff im Brennraum
- Kraftstoffverdampfung vor der Zündung
- Homogenisierung des Gemisches
- Zündfähigkeit des Gemisches nach Gemischzusammensetzung
- Kontrolle des Zündtimings in breiterem Bereich von Last und Drehzahl
- Leistungsdichte und Druckspitzen
- Hohe HC und CO Emissionen bei Teillast.

Die aufgelistete Probleme des herkömmlichen Verbrennungsmotor und verfügbare (inner- und au- ßermotorische) Technologien zeigen, dass für den Motor der Zukunft die „einfache“ Kombination dieser Technologien nicht ausreichen wird, um die gewünschte Reduktion der Schadstoffe und des Kraftstoffverbrauches zu erreichen. Völlig neue Konzepte für Motor und Antrieb der Zukunft sind notwendig.

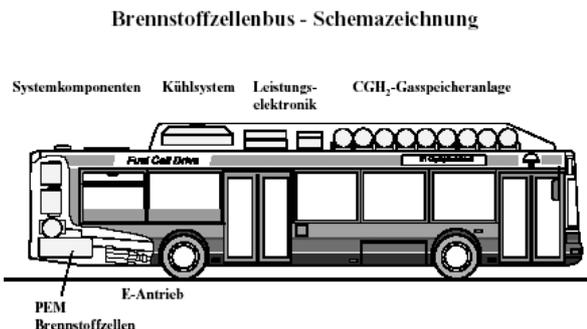
4.2 Stand der Brennstoffzellentechnik

Die Brennstoffzelle hat den besonderen Vorteil, dass sie aus Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie emissionsfrei erzeugen kann. Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen: Die bei niederen Temperaturen arbeitenden phosphorsauren Brennstoffzellen (PAFC, phosphoric acid fuel cell) und Brennstoffzellen mit Protonenaustauscher-Membran (PEMFC, proton exchange membrane fuel cell) sowie die bei hohen Temperaturen arbeitenden Schmelzkarbonatbrennstoffzellen (MCFC, molten carbonate fuel cell) und keramische Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC, solid oxide fuel cell). Früher wurden in der Raumfahrt auch Brennstoffzellen mit alkalischem Elektrolyten (AFC, alkaline fuel cell) eingesetzt, sie haben heute aber keine zivile Bedeutung.

Die Membran Brennstoffzelle ("Proton Exchange Membrane Fuel Cell" (PEMFC)) ist eine Niedertemperaturbrennstoffzelle. Sie arbeitet bei Betriebstemperaturen unter 100 Grad Celsius. Bei niedrigen

Temperaturen sind Katalysatoren notwendig, um eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit der elektrochemischen Reaktion sicherzustellen. Verwendete Katalysatoren sowie Elektrolyte erfordern eine vergleichsweise hohe Brenngasreinheit.

Die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC) ist ebenfalls eine Niedertemperaturbrennstoffzelle. Sie arbeitet bei Betriebstemperaturen unter 100 Grad Celsius. Wie bei der PEM-FC sind Katalysatoren für eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit notwendig.



Fahrzeug	MAN Nutzfahrzeuge AG
Modell	NL 163 FC Niederflrbus
Länge	12 m
zul. Gesamtgewicht	18 t
Fahrzeugantriebssystem	Siemens AG Transportation
Antrieb	Asynchron Motor, 1 PV 5135
Ausgangsleistung	2 x 75 kW über Summengetriebe
Fahrmotor	und Gelenkwelle zur Hinterachse
Umrichter	IGBT Umrichter, Typ ELFA-DUO
Brennstoffzellensystem	Siemens AG KWU
Anzahl Module	4
Nennleistung	120 kW
max. Ausgangsspannung	400 V
Betriebstemperatur	60 °C
Betriebsdruck	0,15 MPa _{abs}
Wasserstoffverbrauch bei Nennleistung	8 kg / h
Wasserstoffvorratssystem	MAN Technologie AG
max. Fülldruck	25 MPa
Anzahl Behälter	9
Behälterkapazität	ca. 1548 l
Aktionsradius	> 250 km
Wasserstoffanlage	Linde AG
Fahrzeug – Vers.system	Hauptabsperrhahn, Füllkuppl., Druckreduzierer, Druckltg., etc
Wasserstoff - Füllsystem	Vorrats- und Füllsystem einschl. Sicherheitseinrichtungen

Bild 19: Brennstoffzellen-Bus von MAN

Die phosphorsaure Brennstoffzelle ist eine Mitteltemperaturbrennstoffzelle. Sie arbeitet bei Betriebstemperaturen von ca. 200°C mit einem Elektroly-

ten. Sie ist bezüglich der eingesetzten Brennstoffe deutlich flexibler als die Niedertemperaturbrennstoffzellen.

Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle ist eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle. Die MCFC arbeitet in einem noch eher moderaten Temperaturbereich bei ca. 650°C. Die einsetzbare Brennstoffbandbreite erweitert sich dabei nochmals deutlich gegenüber der Mitteltemperatur-Brennstoffzelle.

In zwei Bereichen wurde die Brennstoffzellen-Entwicklung in den letzten Jahren entscheidend gefördert: zum einen als stationäres Energieerzeugungssystem bei hohen Temperaturen (> 500°C), zum anderen als PEM-Zelle im Niedertemperaturbereich, die auch im mobilen Bereich eingesetzt werden kann. Die PEM Zellenspannung liegt bei etwa 1V, so dass zur Erzeugung höherer Spannungen viele Zellen als "Stack" in Reihe geschaltet werden müssen.

Der Sauerstoff kann aus der Luft entnommen werden, der Wasserstoff muss im Fahrzeug bereitgestellt werden. Im Wesentlichen gibt es dabei zwei Möglichkeiten: entweder wird der Wasserstoff in Wasserstoffflaschen (gekühlt oder unter hohem Druck) mitgeführt, wobei er in Tankstellen getankt werden muss, oder er wird an Bord des Fahrzeugs aus Methanol - z.T. auch aus Benzin oder Erdgas - hergestellt.

Im ersten Fall ist eine Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur notwendig, im zweiten Fall muss ein Reformier im Fahrzeug mitgeführt werden, der in einem Verbrennungsprozess den Wasserstoff aus dem Methanol gewinnt. Prototypen für den ersten Fall sind von praktisch allen Automobilfirmen aufgebaut worden: im Pkw-Bereich der NECAR 4 von DaimlerChrysler, Fahrzeuge von Ford, Opel und Volkswagen; im Busbereich der NEBUS von DaimlerChrysler, Busse von MAN und Neoplan. Die zweite Variante ist durch den NECAR 5 von DaimlerChrysler bekannt geworden.

Die Gründe für die zahlreichen Aktivitäten in Bereich Brennstoffzelle für Mobileinsätze liegen im Potenzial der Brennstoffzelle hinsichtlich Effizienz, Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen sowie bei Innovationen in der Fahrzeugtechnik und der Möglichkeit der Diversifizierung und regionalen Differenzierung der Energiebasis des Verkehrswesens. Im Vergleich zu Verbrennungskraftmaschinen sind u.a. folgende Aspekte positiv hervorzuheben:

Hohe Wirkungsgrade im Teillastbereich führen zu einem höheren Gesamtwirkungsgrad und einem

Verbrauchsvorteil. Brennstoffzellen-Antriebe haben das Potenzial, im spezifischen Kraftstoffverbrauch das niedrige Verbrauchsniveau zukünftiger Pkw mit Dieselmotoren zu erreichen oder zu unterbieten.

Beim Fahrzeugbetrieb werden bei der Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff keine, bei der Nutzung von Methanol oder anderen Kohlenwasserstoffen - verglichen mit Verbrennungsmotoren - nur geringe Emissionen freigesetzt. Je nach eingesetztem Treibstoff und Brennstoffzellen-Konzept ergeben sich deutliche Vorteile in der Bilanz der Treibhausgase sowie bei weiteren ökologisch relevanten Parametern.

Der weitgehende Wegfall bewegter Teile im Antrieb führt zu mechanischer Einfachheit, Vibrations- und Geräuscharmheit und geringerem Wartungsaufwand, der je nach Systemkonzept jedoch u.U. gegen Mehraufwendungen für die Peripherie des Brennstoffzellensystems aufzuwiegen ist. Zudem ermöglicht die Technologie eine leistungsstarke Bordenergieversorgung sowie einen weitaus größeren Spielraum beim Fahrzeugentwurf.

Für den Fahrzeugbereich wird die Realisierung dieser Potenziale am ehesten von der Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) erwartet. Brennstoffzellen-Pkw mit Wasserstoff im Tank sind Nullemissionsfahrzeuge. Brennstoffzellen-Pkw mit Methanol und weitgehend auch solche mit Kohlenwasserstoffen als Kraftstoff werden den zukünftigen europäischen Emissionsstandard für Pkw EURO4 (ab 2005) und auch die strengen kalifornischen Emissionsstandards erfüllen und z.T. auch deutlich unterbieten [1, 2, 27].

Insgesamt ist die Entwicklung von Brennstoffzellen für mobile Anwendungen geprägt durch die Diskussion über den "richtigen" Kraftstoff, den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Technik in der Anwendung - insbesondere im Langzeitbetrieb, die aus heutiger Sicht erforderliche massive Kostensenkung und die Frage nach der Markteinführung. Gegenwärtig liegen keine verlässlichen Angaben über zu erwartende Kosten (und Preise) von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen-Antrieben vor.

Im Mittelpunkt der Forschung Aktivitäten dürfte in den nächsten Jahren der Brennstoffzellen-Antrieb selbst stehen. Schwerpunkte in diesem Bereich sind u.a.

- Entwicklung von effizienten und dynamischen Antriebssystemen,

- Entwicklung von kompakten Einheiten sowie Miniaturisierung von Bauteilen und des Gesamtsystems,
- Entwicklung von Speichersystemen,
- Erhöhung der Betriebssicherheit und Verbesserung der Praxistauglichkeit.

Daneben sind Arbeiten am Gesamtsystem Brennstoffzellen-Fahrzeuge erforderlich. Der Schwerpunkt dürfte dabei die Reduktion der Kosten sein. Ansätze dazu sind - neben entsprechenden Effekten durch hohe Stückzahlen in der Fertigung - vor allem im Fertigungsprozess selbst zu finden, etwa durch den Einsatz neuer Materialien oder die Verringerung des Edelmetall-Einsatzes.

Ergänzend müssen die Fragen nach dem "richtigen" Energieträger und der Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur beantwortet werden. Forschungsschwerpunkte in diesem Bereich dürften u.a. zu erwartende Veränderungen von Kraftstoff-Herstellungprozessen, Verfahren zur wirtschaftlichen und umweltverträglichen Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe, die Definition weltweit vergleichbarer Kraftstoffspezifikationen, der Umgang mit Kraftstoff-Gefahrenpotenzialen, Erfordernisse beim Aufbau von neuen Kraftstoffinfrastrukturen und die Definition praxisnaher Vergleichskriterien sein.

Wasserstoffbetriebene Stadtbusse, basierend auf der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle, befinden sich bereits kurz vor der Markteinführung (z.B. siehe Bild 19). Die völlige Kommerzialisierung dieser Technologie wird bis etwa 2010 erwartet. Die Verwendung des Brennstoffs Wasserstoff für Automobile in Kombination mit Brennstoffzellensystemen hat die positive Eigenschaft, dass diese Technologie die zwei- bis dreifache Effizienz eines konventionellen Verbrennungsmotors hat, mit Wasserdampf als einzigen Emittenten. Bei Verwendung von Erdgas als Energieträger würden sich die CO₂-Emission pro gefahrenen Kilometer - aufgrund der höheren Wirkungsgrade - auf etwa 35% reduzieren gegenüber benzin- bzw. dieselbetriebenen Fahrzeugen.

Die Perspektive von Personenkraftfahrzeugen ohne Emissionen (bei Verwendung von Wasserstoff) bzw. sehr niedrigen Emissionen (bei Verwendung von Methan oder Methanol) werden für einen Erfolg der Brennstoffzelle bei einer Kommerzialisierung als nicht ausreichend befunden.

Die Tatsache, dass die elektrochemische Energieumwandlung um 20-30 % effizienter abläuft als konventionelle benzin- bzw. dieselbetriebene

Verbrennungskraftmotoren wird für die zukünftige Entwicklung jedoch als wesentlich angesehen.

4.3 Stand der Technik der Elektrofahrzeuge

Unter Elektrofahrzeugen sollen in diesem systemtechnischen Zusammenhang alle die Fahrzeuge verstanden werden, die mit ortsfest erzeugtem Sekundärenergieträger betrieben werden. Die elektrische Energie wird dem Fahrzeug entweder über einen Fahrdraht im Betrieb zugeführt oder aber einem geeigneten Speichermedium über einen Netzanschluss zugeführt und das Fahrzeug entnimmt im Betrieb diesem Speicher die notwendige Energie. Die technisch ähnlichen elektrischen Leistungsübertragungssysteme werden im Abschnitt 4.4. behandelt.

Der Antrieb von Elektrofahrzeugen wird heute vorzugsweise mit umrichter gespeisten Drehstromasynchronmotoren realisiert, Bild 20 zeigt den grundsätzlichen Aufbau dieser Antriebsstränge.

Die Fahrdrahtspannung beträgt im Vollbahnbereich 15 kV, 16,66 Hz oder 25 kV, 50 Hz. In kleineren Netzen werden auch Gleichspannungen verwendet, etwa 500 bis 800 V im Nahverkehrsbereich oder bis 3000 V im Vollbahnbereich.

Aus Wechsellspannungsnetzen wird über einen Transformator der Gleichrichter, in der Regel ein Vierquadrantensteller, gespeist. Aus Gleichspannungsnetzen (Fahrdraht oder Batterie) wird über einen Eingangssteller eingespeist. Aus dem sich anschließenden Gleichspannungszwischenkreis wird der Umrichter gespeist, der den Drehstrom variabler Spannung und Frequenz bildet. Die Umrichter werden im Vollbahnbereich mit GTO – Thyristoren bestückt, die Zwischenkreisspannung beträgt bis 2800 V=. Insbesondere für Nahverkehrsfahrzeuge kommen zunehmend IGBT – Bausteine zum Einsatz.

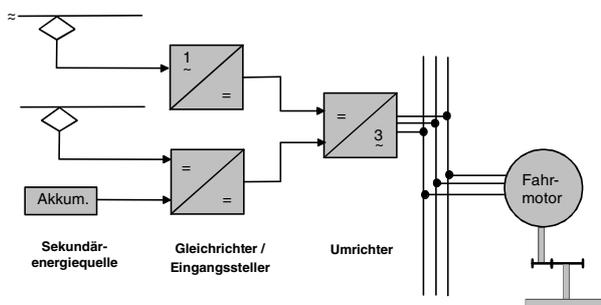


Bild 20: Schema Drehstromantrieb mit unterschiedlichen Sekundärenergiesystemen

Da fahrzeugseitig der Primärenergiewandler entfällt, erreichen fahrdrachtgespeiste Elektrofahrzeuge die höchste Leistungsdichte aller Räderfahrzeuge, Leistungen bis 6 MW bei vierachsigen Fahrzeugen mit Achslasten um 20 t sind heute realisiert.

Batteriegetriebene Fahrzeuge gibt es sowohl als Strassenfahrzeuge wie auch als Schienenfahrzeuge. Bei den Schienenfahrzeugen sei an den Akku – Triebwagen der DB erinnert.

Im Bereich der Strassenfahrzeuge werden heute Elektrofahrzeuge, die ihre Energie aus Batterien erhalten, vorzugsweise dort eingesetzt, wo Emissionen verboten oder nicht erwünscht sind, etwa in Kurorten, da diese Fahrzeuge am Betriebsort emissionsfrei sind.

Es sind verschiedene Batteriesysteme für den Traktionsbetrieb möglich: Die Bleibatterie ist nach wie vor die am meisten eingesetzte Batterie, weil sie die preiswerteste Lösung darstellt. Bleibatterien sind allerdings schwerer als z. B. Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Batterien, die es zwar schon in großen Mengen u.a. in Mobiltelefo-

täglich genutzte Stadtfahrzeuge eingebaut zu werden.

Neben den hohen Gewichten der einzelnen Komponenten für Speicherung bzw. Zufuhr der elektrischen Energie und der Komponenten zur Anpassung der Fahrmotorkennlinie an die Erfordernisse des Traktionsbetriebes ist ein Schwachpunkt die Verbindung des Fahrmotors mit dem Rad. Insbesondere, wenn hohe Fahrgeschwindigkeiten für Eisenbahnfahrzeuge zu realisieren sind, sind aufwendige mechanische Systeme erforderlich, um die ungefederten Massen klein zu halten.

Ein großer Vorteil dieser Systeme liegt in der Möglichkeit, Bremsenergie in elektrische Energie umzuwandeln und zu speichern (im speisenden Netz oder in der mitgeführten Batterie), Dadurch kann eine wesentliche Steigerung des Systemwirkungsgrades erreicht werden.

4.4 Leistungsübertragungssysteme

Leistungsübertragungen sind immer dann notwendig, wenn die Kennlinie des Energiewandlers oder

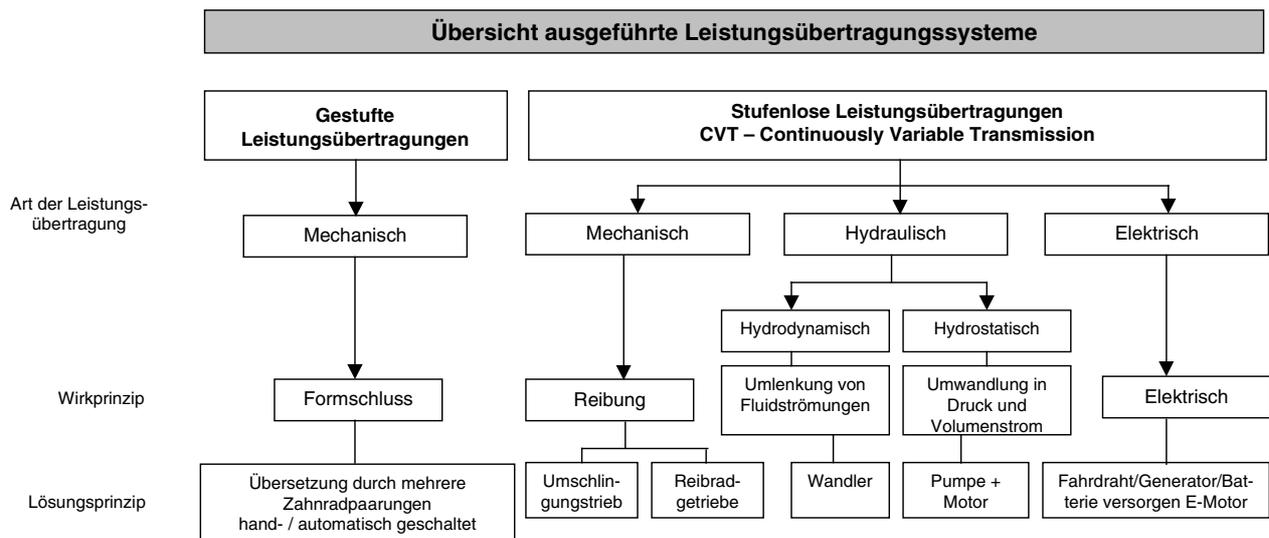


Bild 21: Ausgeführte Leistungsübertragungen

nen und Laptops gibt, die aber im hohen Leistungsbereich für Traktionszwecke bisher nur als Prototypen vorhanden sind und noch sehr teuer sind. Die Lithium-Ionen-Batterie wird vielfach favorisiert, weil man aufgrund der hohen Zellspannung von 3,6 V wesentlich weniger Zellen im Vergleich zu anderen Batterietypen braucht, um höhere Motorspannungen und damit niedrigere Ströme im Fahrzeug zu haben. Auch die Hochtemperaturbatterie ZEBRA - in der Schweiz hergestellt - hat gute Aussichten, in

die Charakteristik des Drehmomentwandlers nicht mit den Erfordernissen des Fahrbetriebes entsprechend Bild 6 übereinstimmt [16, 21, 23]

Die einfachste Form der Anpassung stellen die Schaltgetriebe dar, die auch heute noch als Standard im Pkw anzusehen sind. Mit der heute üblichen Zahl von 5 Gängen kann eine grobe aber dennoch ausreichende Annäherung an die Z, v - Hyperbel erreicht werden. Vorteil des Schaltgetriebes ist der von keiner anderen Form der Leistungsübertragung erreichte Wirkungsgrad von ca. 94 -

96 %, nachteilig ist die vor allem wegen der Schaltkräfte begrenzte übertragbare Leistung und die merkliche Zugkraftunterbrechung beim Schaltvorgang.

Eine bessere Anpassung an die Z, v – Hyperbel bei gleichen Wirkungsgraden bieten automatisierte Schaltgetriebe durch rechnergesteuerte Schaltvorgänge und meist leicht erhöhter Gangzahl.

Eine bessere Ausnutzung der installierten Leistung bieten die Systeme mit stufenloser Anpassung des Drehmomentes an die Z, v – Hyperbel.

Stufenlose Übertragungssysteme mit Umschlingungstrieb sind seit etwa drei Jahrzehnten bekannt, sie wurden erstmals als „Variomatic“ von DAF eingesetzt. Das Konstruktionsprinzip ist einfach: zwei bewegliche, kegelförmige Scheibenpaare werden über Riemen verbunden, durch gegensinniges Verschieben der Scheiben verändert sich der jeweilige Auflaufpunkt des Riemens und damit die Übersetzung. Begrenzt die verwendeten Keilriemen das übertragbare Drehmoment beträchtlich, so haben weiterentwickelte Systeme diesen Makel nicht mehr. Maßstäbe setzt das „Multitronic“ von Audi, das derzeit für Drehmomente bis 310 Nm ausgelegt ist, als Übertragungsorgan wird eine Laschenkette eingesetzt [15]. Zusätzlich wird beim „Multitronic“ je eine Lamellenkupplung für die Anfahrt vorwärts / rückwärts, dadurch werden die Verluste bei der Drehzahlwandlung im Anfahrbereich deutlich reduziert.

Eine zweite Form der mechanischen stufenlosen Übertragungssysteme sind die Reibrad- oder Wälzgetriebe. Diese sind bislang im Fahrzeugeinsatz nur in Ausnahmefällen anzutreffen. So hat GM bereits in den 30er Jahren ein Toroid – Getriebe serienmäßig angeboten, dies Getriebe konnte sich aber nicht durchsetzen. Nissan hat 1999 ein Toroid – Getriebe in die Serie eingeführt. Dieses Getriebe ist zwar hinsichtlich Drehmoment (350 Nm) und Spreizung (4,36) mit automatisierten Schaltgetrieben vergleichbar, ist aber wohl wegen des konstruktionsbedingt hohen Gewichtes und des hohen Preises im Nachteil.

Die zweite Gruppe der stufenlosen Leistungsübertragungen sind die hydraulischen Systeme. Die hydrostatischen Systeme sind in ihrem Einsatz auf Fahrzeugen im wesentlichen auf Baufahrzeuge beschränkt. Der Grund hierfür liegt vor allem in der begrenzten Lebensdauer, die bei Fahrzeugen mit ihren ständigen Lastwechseln, die wiederum zu starken Druckschwankungen führen, und den hohen Laufleistungen besonders niedrig ist.

Für den Fahrzeugeinsatz bedeutsamer sind die hydrodynamischen Systeme, bei denen im Gegensatz zur hydrostatischen Leistungsübertragung Strömungsmaschinen als Pumpen und Turbinen verwendet werden. Das Prinzip beruht auf dem von Föttinger im Jahre 1905 entwickeltem Konzept, Pumpe und Turbine in einem Spiralgehäuse zu einem Kreislauf zusammenzufassen. Wird zwischen Pumpe und Turbine ein Drehmoment aufnehmendes Leitrad angeordnet, so ist das System in der Lage, das Eingangsdrehmoment zu wandeln (Übersetzungen bis $i \approx 4$ sind möglich). Ohne Leitrad stellt das System eine hydrodynamische Kupplung dar, die keine Drehmomentwandlung ermöglicht. Leistungsübertragungssysteme nach diesem Prinzip finden sich vor allem in Schienenfahrzeuge, bei Lokomotiven meist als Getriebe mit zwei Wandlern, bei Triebwagen als Getriebe mit einem Wandler und ein oder zwei nachgeschalteten Hydr. Kupplungen.

Bei Strassenfahrzeugen wird der hydrodynamische Wandler meist in Getrieben als Anfahrwandler mit nachgeschalteten, mechanischen Übersetzungsstufen eingesetzt. Diese Getriebe schalten automatisch, je nach Aufbau auch ohne Zugkraftunterbrechung.

Die dritte Gruppe der stufenlosen Leistungsübertragungen sind die elektrischen Systeme. Hier besteht die Aufgabe – im Gegensatz zu den Elektrofahrzeugen, die ihre Sekundärenergie aus weitgehend konstanten Netzen beziehen – darin, die für die Traktion ungeeignete Kennlinie eines Verbrennungsmotors an die Bedürfnisse des Fahrbetriebes anzupassen. Auch hier hat sich die Drehstromtechnik weitgehend durchgesetzt (Bild 22).

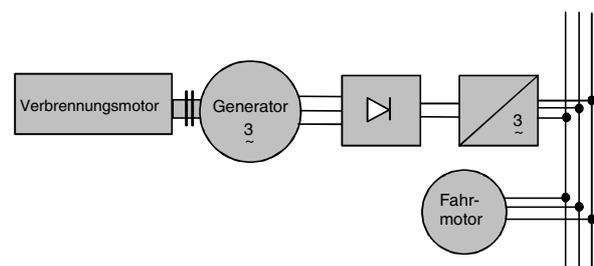


Bild 22: Dieselelektrische Leistungsübertragung in Drehstromtechnik

Die bereits bei den Elektrofahrzeugen angesprochen Nachteile

- Hohes Gewicht,
- Hohes Bauvolumen,
- Ungefederte Massen,

bleiben für dieses Übertragungssystem unverändert bestehen.

Interessant ist ein Vergleich der Wirkungsgrade der verschiedenen stufenlosen Systeme [20]. Im Lei-

stungsbereich um 400 bis 500 kW werden alle angeführten Systeme verwendet. Das mechanische Getriebe z.B. als am Dieselmotor angeflanschter Stufenautomat in Verbindung mit Gelenkwelle und einstufigem Achsgetriebe (einschl. Differential), die hydraulische Leistungsübertragung, z.B. mit einem Wandler und einer Kupplung, in Verbindung mit Gelenkwelle und zweistufigem Radsatzgetriebe und die dieselektrische Leistungsübertragung z.B. mit einem einstufigen Rädertrieb in Tatzlageranordnung. Hierfür zeigt Bild 23 den Vergleich der Wirkungsgrade der drei Systeme. Hinsichtlich des Wirkungsgrades (nicht etwa hinsichtlich des Komforts) ist die mechanische Leistungsübertragung kaum zu übertreffen.

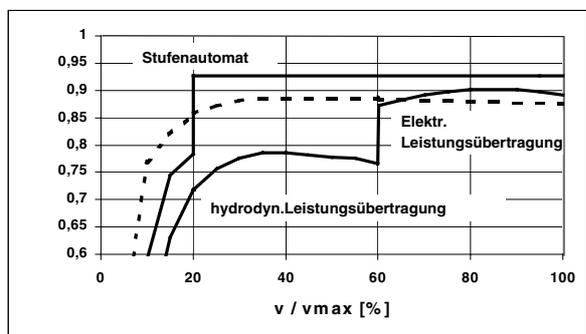


Bild 23: Wirkungsgradvergleich stufenloser Leistungsübertragungssysteme

5. Ausblick

Die vorstehenden Ausführungen geben den derzeitigen Stand der Fahrzeugantriebstechnik wieder. Abschließend sollen die aus den laufenden Entwicklungen zu ziehenden Schlussfolgerungen für die Fahrzeugantriebe der Zukunft aus Sicht der Autoren kurz erläutert werden. An zukunftsfähige Fahrzeugantriebe sind zwei Hauptforderungen zu stellen (Bild 24):

- quasi - Null Emissionen, und zwar für alle Schadstoffkomponenten,
- minimaler Energieverbrauch.

Die Realisierung beider Forderungen ist nach Auffassung der Autoren für zukünftige Fahrzeuge zwingende Voraussetzung, wobei die Verfügbarkeit entsprechender Primärenergieträger einerseits und Sicherheit und Komfort andererseits wichtige Rahmenbedingungen darstellen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird es nicht ausreichend sein, die bisher entwickelten Systeme zu optimieren, sondern es werden - zumindest in Teilbe-

reichen - neue Konzepte und Technologien entwickelt werden müssen. Dies schließt für die Zukunft auch heute noch völlig unbekannte Antriebskonzepte ein.

Auf der Basis der vorstehenden Analyse bestehender Antriebskonzepte wird deutlich, daß dem Primärenergiewandlungsprozess hinsichtlich des Emissionsverhaltens und des Verbrauches zentrale Bedeutung zukommt. Für diesen Prozess spielt derzeit der Verbrennungsmotor eine alles überragende Rolle. Es stellt sich aber die Frage, ob er diese Rolle auch weiterhin einnehmen kann.

Schon aufgrund seiner heutigen Verbreitung wird diese Rolle sicher lange Zeit erhalten bleiben. Die Chancen, diese Rolle auch weiterhin in gleichem Maße spielen zu können, werden steigen, wenn es gelingt, homogene Verbrennung in allen Betriebspunkten zu realisieren. Dabei ist homogene Verbrennung nicht zu verwechseln mit homogenem Gemisch. Für homogene Verbrennung sind drei Bedingungen Voraussetzung:

- Homogenisierung des Gemisches,
- Dreidimensionale (räumliche) Zündung,
- Volumetrische Wärmefreisetzung.

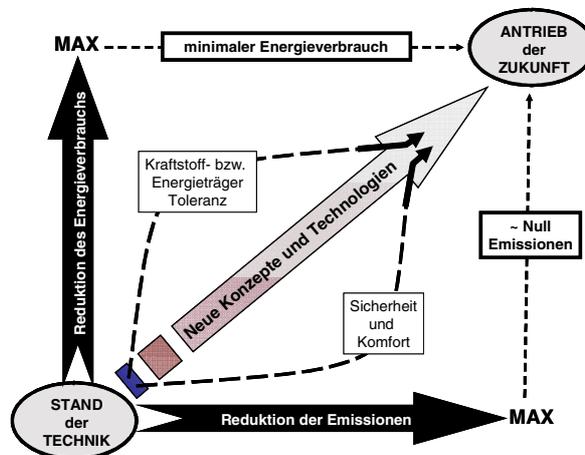


Bild 24: Anforderungen an zukünftige Antriebe

Um das Ziel einer quasi - Null - Emissionen Verbrennung zu erreichen, ist zusätzlich die Verbrennungstemperatur zu kontrollieren, insbesondere für nah - stöchiometrische Gemische. Ohne Temperaturabsenkung bei hohen Lasten sind die NO_x - Emissionen nicht kontrollierbar. Weiterhin muss das System in einem breiten Bereich von Last und Drehzahl arbeiten können, zumindest wenn Schaltgetriebe zur Leistungsübertragung verwendet werden sollen.

Im Abschnitt 4.1. wurden die wichtigsten Probleme der herkömmlichen Systeme erläutert. Die Frage ist, ob und wenn ja, welche dieser Systeme Potential in Richtung auf einen zukunftsfähigen Motor haben? Aus der Analyse der verschiedenen Systeme ergeben sich die notwendigen Bedingungen für einen sauberen Verbrennungsprozess zu:

- Bedingungen für Kraftstoffzufuhr und Kraftstoffverdampfung unabhängig von der Last,
- Flüssiger Kraftstoff ist vollständig verdampft vor Zündbeginn,
- Homogenisierung des gasförmigen Gemisches vor der Zündung,
- Kontrollierbare und variable thermodynamische Parameter des Gemisches während Kompression und Zündung (abhängig von Lastpunkt und Drehzahl),
- Erhöhte (chemische) Aktivität bzw. Zündfähigkeit des Gemisches (abhängig von Lastpunkt und Drehzahl),
- Erweiterte Magergrenze für mager - homogenes Gemisch
- Kontrollierbare Zündbedingungen des homogenen Gemisches.

wickeln, die in allen Betriebsbereichen unterschiedliche Verbrennungsmodi realisieren, um eine homogene Verbrennung zu erreichen, oder aber neue Motorenkonzepte zu entwickeln, die unabhängig von der Last mit homogener Verbrennung und kontrollierbarer Verbrennungstemperatur arbeiten.

Die Verwendung alternativer Kraftstoffe kann für den Verbrennungsmotor ebenfalls zukunftssträftig sein. Dabei kommt dem Wasserstoff zweifellos eine überragende Rolle zu. Insbesondere die Emissionen lassen sich hiermit weitgehend reduzieren. Im Sinne einer Gesamtbetrachtung des Energiehaushaltes kommt bei der Anwendung von Wasserstoff der Energieaufwand für die Herstellung und den Transport dieses Sekundärenergieträgers allerdings zentrale Bedeutung zu. Die Gewinnung von Wasserstoff durch Elektrolyse bedarf zunächst der Erzeugung des Sekundärenergieträgers elektr. Strom. Die Erzeugung von 1GWh elektr. Energie durch erneuerbare Energieträger ermöglicht die Senkung des CO₂ – Ausstosses um 972 to verglichen mit der Erzeugung aus Kohle. Nutzt man die so gewonnene elektr. Energie zur Wasserstoffgewinnung, reduziert sich der CO₂ – Ausstoss „nur“ noch um 390 to [13].

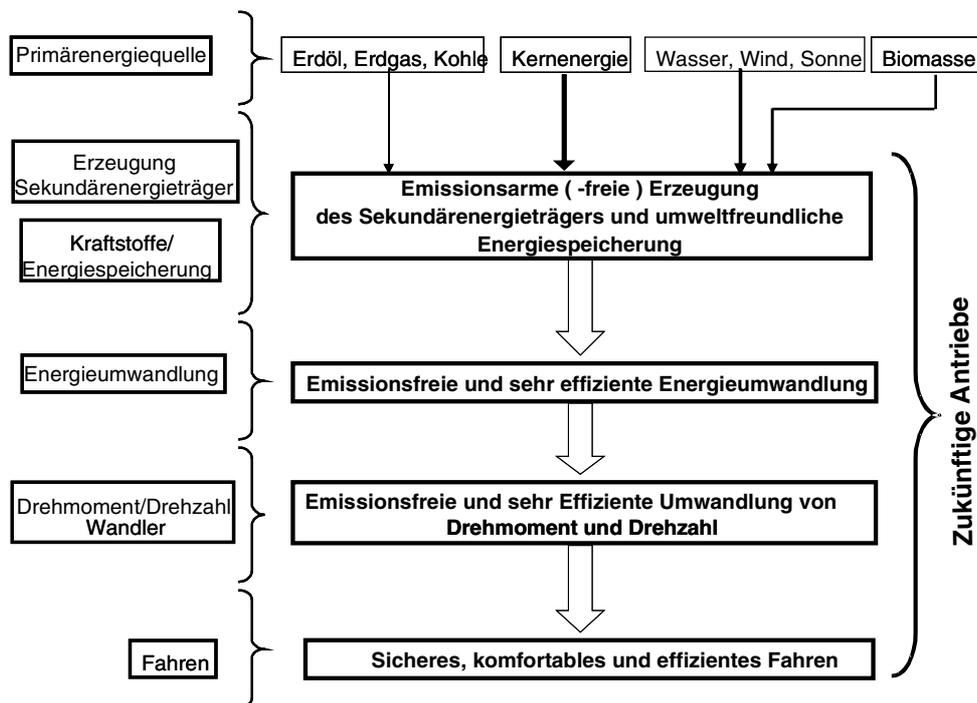


Bild 25: Anforderungen an zukünftige Antriebe

Alle heute eingesetzten Systeme erfüllen diese Voraussetzungen nur bedingt. Zwingend für den Verbrennungsmotor der Zukunft im Sinne der eingangs formulierten Ziele wird es also sein, auf der Basis bestehender Motorenkonzepte Systeme zu ent-

Auch für die Verwendung elektrischen Stromes als Sekundärenergieträger, der über ortsfeste Anlagen erzeugt und dem Fahrzeug zugeführt wird, oder aber bei Verwendung der Brennstoffzelle als Energiewandler auf dem Fahrzeug erzeugt wird, ist stets das Gesamtsystem zu betrachten. Bei den elektrischen Systemen ist zusätzlich das spezifisch hohe

Anlagengewicht auf dem Fahrzeug zu beachten, das in erheblichem Maße den Energieverbrauch der (Trieb-) Fahrzeuge erhöht.

Die Leistungsübertragungssysteme tragen nicht unerheblich zum Energieverbrauch der Fahrzeuge bei, indem für die Drehmoment- und Drehzahlwandlung Verluste in unterschiedlicher Höhe zu berücksichtigen sind. Leistungsübertragungssysteme sind in starkem Maße abhängig von der zu übertragenden Leistung. Leider können die hinsichtlich des Übertragungswirkungsgrades optimalen Schaltgetriebe nicht beliebig groß dimensioniert werden, so daß eine Übertragung auf andere Leistungsklassen nicht ohne weiteres möglich ist. Generell gilt aber auch für die Leistungsübertragungen, daß Gewicht und Wirkungsgrad für das Fahrzeug aus energetischer Sicht gleichermaßen wichtig sind.

Für zukünftige Antriebe einschließlich aller eingesetzten Primärenergieträger sind folgende Maßstäbe anzulegen (siehe auch Bild 25):

- emissionsarme und hocheffiziente Erzeugung von Sekundärenergieträger,
- effektive und umweltfreundliche Energiespeicherungstechnologien,
- emissionsfreie und hocheffiziente Energieumwandlung,
- emissionsfreie und hocheffiziente Umwandlung von Drehmoment und Drehzahl,
- sicheres, komfortables und effizientes Fahren.

Zukünftige Antriebe sollten darüberhinaus auch berücksichtigen, daß Mobilität nicht Selbstzweck ist, sondern hiermit ein Grundbedürfnis zu befriedigen ist. Daher sollten Antriebe auch so gestaltet sein, daß sie für den jeweiligen Zweck hinreichend dimensioniert sind. Also nicht Leistung (und damit letztlich Höchstgeschwindigkeit) um jeden Preis, sondern Fahrzeuge mit bedarfsorientiert ausgelegter Leistungsdimensionierung. Wie gezeigt worden war, reichen für einen Pkw Leistungen um 30 kW für Fahrgeschwindigkeiten von ca. 120 km/h völlig aus, und das ist eine nach unserer Auffassung akzeptable Geschwindigkeit für den Pkw.

Nach unserer Überzeugung sind intensive Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig, um saubere und effiziente Antriebe für zukünftige Fahrzeuggenerationen zu realisieren. Die vorstehenden Ausführungen zeigen mögliche Entwicklungsrichtungen auf.

6. Literatur

- [1] Advanced Fuell Cells Program: Strategy for the Period 1999-2003, Report International Energy Agency, July 1998
- [2] Brennstoffzellenfahrzeuge, Workshop, TU Graz, November 1999.
- [3] Beschluß der Bundesregierung vom 29.9.1994 zur Verminderung der CO₂-Emissionen und anderer Treibhausgasemissionen in der BR Deutschland auf der Grundlage des 3. Berichtes der Interministeriellen Arbeitsgruppe "CO₂-Reduktion"
- [4] Durst, F., Weclas, M. Porous Medium (PM) Combustion Technology and its Application to Internal Combustion Engines: A new concept for a near-zero emission engine, [in:] Applied Optical Measurements, Ed. M. Lehner & D. Mewes, Springer, 1999.
- [5] Durst, F., Weclas, M. A new type of internal combustion engine based on the porous-medium combustion technique, Proc. I. Mech.Engnrs, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 215, 2001.
- [6] Durst, F., Weclas, M. 2001, A new concept of I.C.engine with homogeneous combustion in porous-medium (PM), 5th Int. Symposium COMODIA-2001, Nagoya, Japan.
- [7] Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" (11. Deutscher Bundestag), Schutz der Erde - Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik, Economica Verlag, Bonn, 1990
- [8] Förster, H.-J. Die Kraftübertragung im Fahrzeug vom Motor bis zu den Rädern, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1987
- [9] Hanamura, K., Nishio, S. 2003, A feasibility study of reciprocating-flow super-adiabatic combustion engine, 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, March, 16-20, Paper nr. TED-AJ03-547
- [10] Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Technology, US Department of Energy Report to US Congress, April 2001.
- [11] 2000, Integrierte Verkehrspolitik: Unser Konzept für eine mobile Zukunft, Bericht Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin 2000.
- [12] Kusaka, J., Yamamoto, T., Daisho, Y. 2000, Simulating the homogeneous charge compression ignition process using a detailed kinetic model for n-heptane mixtures, Int. J. Engine Research, Vol. 1, No. 3, pp.281-289.
- [13] Larive, J.F. Hydrgen – a CO₂-free fuel?, CONCAWE Review, 10 (2001), S.16-18
- [14] Lavy, J., Dabadie, J.C., Duret, P., Angelberger, C., Le Coz, J.F., Cherel, J. 2001, Controlled auto-ignition (CAI): A new highly efficient and near-zero NO_x emissions combustion process for gasoline engine application, IFP Int. Congress on the A New Generation of Engine Combustion Process, November 26-27. pp.101-114.
- [15] Nowatschin, K., u.a., multitronic – Das neue Automatikgetriebe von Audi, ATZ 102 (2000) S. 548
- [16] Neumann, K.-H. und K.-P. Schindler Zukünftige Fahrzeugantriebe, Jahrbuch 2001 Fahrzeug- und Verkehrstechnik, S. 335 - 356, VDI - Verlag, Düsseldorf, 2001
- [17] Potential of exhaust aftertreatment and engine technologies to meet future emissions limits, CONCAWE Report No. 99/62, Brussels
- [18] Review of Technical Progress of Goal 2 Research, Report Partnership for a New Generation of Vehicles, Mai, 2001(USA)
- [19] Schallaböck, Petersen, R. 1999, Countdown für den Klima
schutz Wohin steuert der Verkehr? Bericht Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal, Juli 1999
- [20] Tretow, H.-J. Analyse des Energieeinsparungspotentiales von Diesellokomotiven der 2500 kW-Leistungsklasse, Dissertation Universität Hannover, 1989

- [21] Tretow, H.-J. Eine neue sechssachsige dieselelektrische Universallokomotive modernsten Entwicklungsstandes, Ziele - Realisierung - Testergebnisse, ZEV+DET Glasers Annalen 114 (1991), S.11-17
- [22] Urushihara, T., Hiraya, K., Kakuhou, A., Itoh, T. 2001, Parametric study of gasoline HCCI with various compression ratios, intake pressures and temperatures, IFP Int. Congress on the A New Generation of Engine Combustion Process, November 26-27, pp.77-84.
- [23] Wagner, G. Einsatz von Getriebesystemen für unterschiedliche Triebstrangkfigurationen in Personenkraftwagen, Jahrbuch 2001 Fahrzeug- und Verkehrstechnik, S. 383 - 421, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [24] Weclas, M. Anwendung von hochporösen Schäumen in stationären und nicht-stationären Verbrennungsprozessen, Seminar Industrietag Schaumkeramik, Fraunhofer IKTS, Dresden, 2002
- [25] Weclas, M., Strategy for intelligent combustion systems: from vision to reality, Bericht der INVENT GmbH, Januar 2002.
- [26] Workshop FIST: Financing Sustainable Transport Infrastructure and Technology Focusing on CEEC and NIS Wien, 25-26 Januar 2001
- [27] Wurster, R. 1997, Brennstoffzellenantriebe für Strassen- und Schienenfahrzeuge mit niedrigsten oder Null-Emissionen, ACHEMA 97.