

EINIGE UNKONVENTIONELLE BETRACHTUNGEN ZUM KRAFTSTOFFVERBRAUCH VON PKW¹⁾

Helmut Tschöke, Hanns-Erhard Heinze

Der Kraftstoffverbrauch eines Kraftfahrzeuges war schon immer ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Effizienz des Verbrennungsmotors, der Konzeption des Fahrzeuges und der Optimierung des Antriebsstranges bei einerseits gegebenem Motor und andererseits geforderten Fahrleistungen, wie Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen und Elastizität. Heute und in Zukunft ist es schlichtweg die Beurteilungsgröße für Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit eines Fahrzeuges. Dabei sind die Anforderungen an ein modernes Kraftfahrzeug einfach formuliert: Sicherheit, Komfort und Fahrleistungen auf höchstmöglichem Niveau bei möglichst geringem Kraftstoffverbrauch.

Die Erfüllung der Abgasgrenzwerte ist gesetzlich vorgeschrieben und somit eine MUSS-Bedingung und kann damit kein Entscheidungsparameter für den Kauf eines Fahrzeuges sein; allenfalls bei vorgezogener Erfüllung zukünftiger Grenzwerte und der damit verbundenen Steuerersparnis.

Für den Kunden ist der Kraftstoffverbrauch überwiegend unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit, der Ressourcenschonung, der Reduzierung der anthropogenen CO₂-Emission und der Reichweite, d. h. der Fahrleistung in km mit einer Tankfüllung, von Bedeutung.

Im nachfolgenden Beitrag wird das Thema Kraftstoffverbrauch aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet und eine neue aussagefähige Beurteilung des spezifischen Kraftstoffverbrauches im Motorkennfeld vorge schlagen.

KRAFTSTOFFVERBRAUCH „KONVENTIONELL“

Der übliche Streckenkraftstoffverbrauch in l/100 km wird heute nach den EU-Vorschriften 93/116/EG bzw. 1999/100/EG ermittelt. Danach wird das Fahrzeug entsprechend dem sogenannten NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus mit viermal dem Cityzyklus und einmal dem außerstädtischen Anteil) gefahren und dabei der Verbrauch gemessen. Ab dem Jahr 2000 (EURO III-Norm) wird ein modifizierter NEFZ angewandt, bei dem die 40 Sekunden dauernde Motorvorlaufzeit von Motorstart bis Messbeginn entfällt.

Abbildung 1 zeigt den vertrauten Zusammenhang, dass im Mittel die Fahrzeuge mit Dieselmotoren zwischen 38 % (bei kleiner Fahrzeugmasse) und 30 % (bei schweren Fahrzeugen) weniger verbrauchen, bezogen auf den mittleren Verbrauch der Fahrzeuge mit Otto-Motor. Dies bezieht sich auf die deutschen Fahrzeuge des Modelljahres 2001.

Differenziert man bei den Fahrzeugen die Antriebsart nach den Gemischbildungsverfahren, so zeigt sich, dass die Fahrzeuge mit Kammerdieselmotoren im Verbrauch etwa in der Mitte zwischen den konventionellen Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung und den direkteinspritzenden Dieselmotoren liegen (Abbildung 2). Die Ottomotoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung finden sich im Feld der Kammerdieselmotoren. Die Basis für diese Darstellung ist nicht auf ein

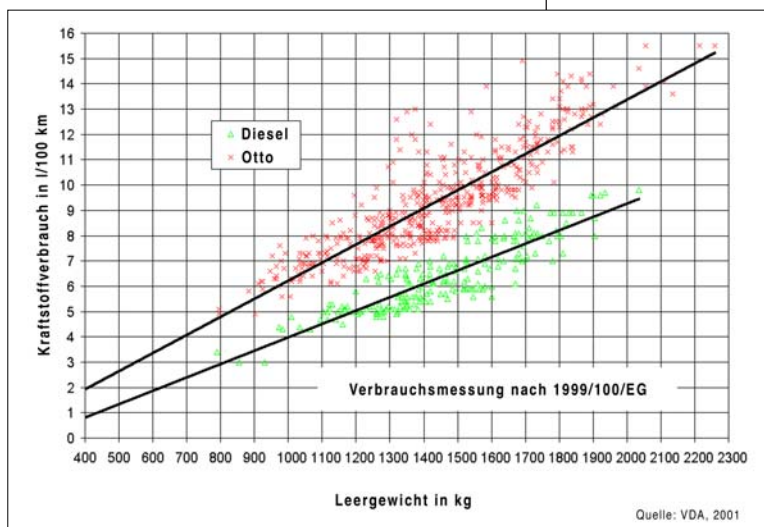


Abb. 1
Kraftstoffverbrauch deutscher PKW, Modelljahr 2001

Jahr beschränkt, sondern bezieht sich in etwa auf die letzten 10 Jahre.

Neben dem für Vergleichszwecke wichtigen, im NEFZ gemessenen Zyklusverbrauch kennen wir alle den tatsächlichen Verbrauch, der von der individuellen Fahrweise, dem aktuellen Zustand des Kraftfahrzeuges und seines Antriebes sowie den Verkehrs- und Witterungsverhältnissen abhängt. Diese Verbräuche können niedriger als

1)
Geringfügig gekürzte Fassung des Einführungsvortrages des 3. Symposiums der IAV Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr GmbH, Berlin „Steuerungssysteme für den Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen“ am 25. 10. 2001 in Berlin.

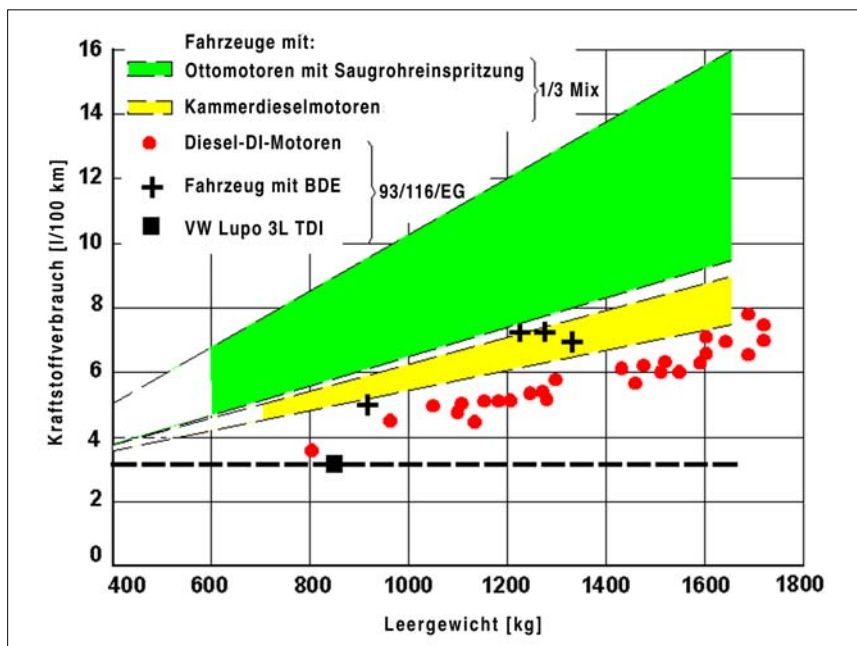


Abb. 2
PKW-Kraftstoffverbrauch nach Verbrennungsverfahren

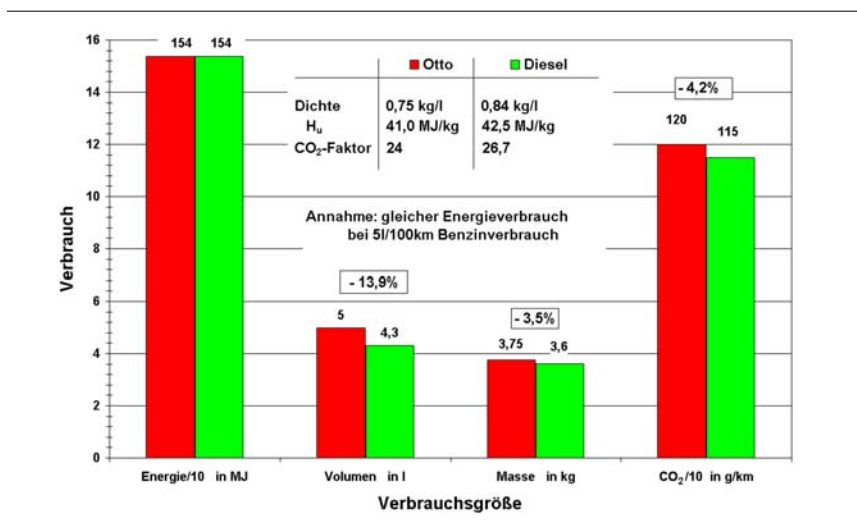


Abb. 3
Verbrauchsvergleich Otto- und Dieselmotor

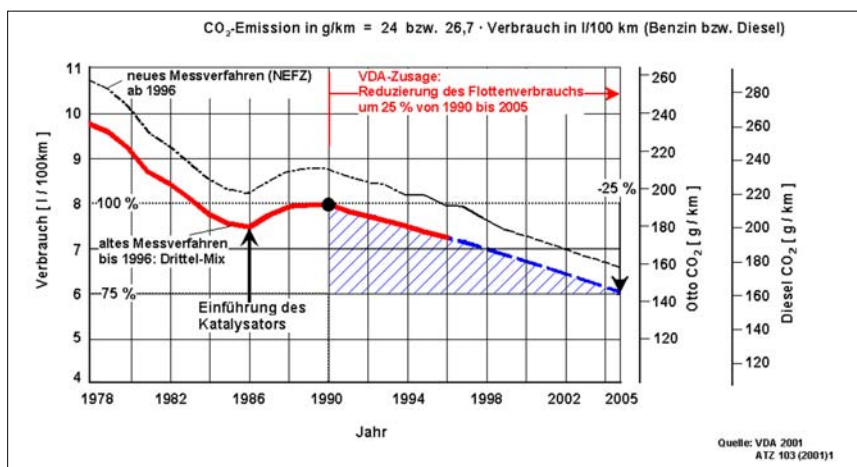


Abb. 4
Kraftstoff-Flottenverbrauch in Deutschland

die Zyklusverbräuche sein, in der Regel liegen sie aber deutlich höher. Bei realer Straßenfahrt kann dieser tatsächliche Kraftstoffverbrauch mit demselben Fahrzeug bei unterschiedlichen Fahrern zu unterschiedlichen Tageszeiten auf gleicher Strecke bis zu 100 % Unterschied aufweisen.

Gelegentliche Rekordfahrten mit minimalem Kraftstoffverbrauch finden in der Regel fernab jeglicher Realität statt. Die Fahrzeuge entsprechen nicht dem Serienzustand und auch das Können der Fahrer liegt weit über dem Durchschnitt. In diesem Zusammenhang sind die Rekordfahrten von vor ca. 12 Jahren mit dem 5-Zylinder TDI von Audi, dem ersten modernen PKW-Dieselmotor mit Direkteinspritzung, mit einem Durchschnittsverbrauch von 1,7 l/100 km und vom August 2001 mit dem 3-Liter-Lupo mit einem Praxisdurchschnittsverbrauch von 2,38 l/100 km zu erwähnen.

Grundsätzlich kann der Kraftstoffverbrauch jedoch auch anders definiert werden, nämlich als Energieverbrauch. Die dem Kraftstoff innewohnende chemische Energie, ausgedrückt durch den unteren Heizwert, z. B. in MJ/kg oder MJ/l, ist für Otto- und Dieselmotoren unterschiedlich groß. Berücksichtigt man dann noch die auf das Volumen bezogenen Energieinhalte, ergeben sich nochmals Veränderungen, da auch die Dichten dieser beiden Basiskraftstoffe verschieden sind.

Abbildung 3 zeigt z. B., dass eine Kraftstoffenergie von 154 MJ dem Energieinhalt eines Volumens von 5 l Benzin bzw. einer Masse von 3,8 kg Benzin entspricht, jeweils unter der Annahme einer mittleren Dichte und eines mittleren unteren Heizwertes. Die gleiche Energiemenge ist in 4,3 l bzw. 3,6 kg Diesel gespeichert.

Diese Betrachtung zeigt, dass bei gleichem Energieverbrauch der auf das Volumen bezogene Verbrauch beim Dieselmotor „von Hause aus“ um ca. 14 % niedriger ist. Mit anderen Worten: Hätte man einen Ottomotor und einen Dieselmotor mit gleichem Energiebedarf für die gleiche Leistung, so hätte der Dieselmotor einen Vorteil im volumetrischen Verbrauch von ca. 14 %, obwohl motortechnisch in diesem Idealfall keine Unterschiede beständen. Da aber der Kraftstoff nach Volumen bezahlt werden muss, ist dies ein Grundvorteil im Verbrauch bei Dieselmotoren. Würde der Kraftstoff nach Masse bestimmt und verrechnet, so hätte unter gleichen Bedingungen der Dieselmotor einen Minderverbrauch von nur 3,5 % und einen um 4,2 % geringeren CO₂-Ausstoß.

Abbildung 4 zeigt neben der zeitlichen Entwicklung des Flottenverbrauches der in Deutschland neu zugelassenen Fahrzeuge im jeweiligen Jahr auch die korrespondierende CO₂-Emission in g/km.

So darf z. B. ein Fahrzeug mit Ottomotor im Zyklusverbrauch zwischen einem halben Liter (bei kleinen Verbräuchen) bis ca. 1 l (bei größeren Verbräuchen) mehr verbrauchen als ein dieselmotorisch betriebenes Fahrzeug bei gleicher CO₂-Emission. Oder mit anderen Worten: bezogen auf ein Fahrzeug mit 8 l/100 km Testverbrauch (entspricht ca. 190 g/km CO₂ für den Benzinmotor) muss das dieseltreibene Fahrzeug einen ca. 10 % geringeren volumetrischen Verbrauch aufweisen, also etwa 7,2 l/100 km, um die gleiche CO₂-Emission von 190 g/km zu erreichen. Dies führt dazu – und das ist zwar nicht neu, wird aber häufig aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt –, dass der in Abbildung 1 dargestellte volumetrische Verbrauchsvorteil von ca. 30 % des Dieselmotors gegenüber dem Ottomotor nicht identisch ist mit einem Vorteil von 30 % bei der CO₂-Emission. Aus Abbildung 4 lässt sich am Beispiel eines benzinbetriebenen Fahrzeuges mit 8 l/100 km Verbrauch mit dem um 30 % niedrigeren Wert eines dieseltreibenden Fahrzeuges (5,6 l/100 km) eine CO₂-Reduzierung für den Diesel von ca. 22 % ermitteln.

Was für den Kunden und Nutzer der Streckenverbrauch ist, ist für den Motorenbauer der spezifische Kraftstoffverbrauch, d. h. die pro abgegebener Arbeitseinheit erforderliche Kraftstoffmasse. Üblicherweise wird diese ausgedrückt in g/kWh und als effektiver Kraftstoffverbrauch b_e bezeichnet. Der Bezug ist die an der Kurbelwelle abgegebene Arbeit. Diese Definition ist sinnvoll, erlaubt sie doch sofort eine Aussage über die Effizienz des Motors und, sofern der Heizwert berücksichtigt wird, auch über den Wirkungsgrad des Motors. Damit sind Motoren aller Größen untereinander vergleichbar.

Da dieser spezifische Kraftstoffverbrauch von der Last (Drehmoment) und der Drehzahl abhängig ist, wird er üblicherweise im Motorkennfeld in Kurven konstanten Kraftstoffverbrauches dargestellt (auch als „Muscheldiagramm“ bezeichnet).

Abbildung 5 zeigt vier typische Kraftstoffverbrauchskennfelder für verschiedene Verbrennungsverfahren. Die charakteristischen Unterschiede bestehen in erster Linie im absoluten Niveau der spezifischen Kraftstoffverbräuche, aber auch in der typischen Lage des Verbrauchsminimums im Teillastbereich bei Ottomotoren und bei oberer Teillast oder nahe der Volllast bei PKW-Dieselmotoren.

Üblicherweise konzentriert sich der Motoren-Ingenieur auf das Erreichen eines möglichst niedrigen minimalen Kraftstoffverbrauches. Wertet man für eine Vielzahl von Motoren dieses $b_{e\ min}$ aus, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 6.

Wie nicht anders zu erwarten war, liegen die Werte für den Ottomotor am höchsten. Nutzfahrzeugmotoren sind extrem auf Verbrauchsopt-

timierung appliziert und haben deshalb den geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauch. PKW-Dieselmotoren mit Direkteinspritzung (DI) liegen um den Wert 200 g/kWh. Die zugehörigen effektiven Wirkungsgrade liegen bei 36 % für PKW-Ottomotoren, bei 41 % für PKW-Dieselmotoren und bei 45 % für NFZ-Dieselmotoren.

Die Frage stellt sich, ob sich die Beurteilung der Effizienz eines Motors auf die Betrachtung des Punktes des minimalen Kraftstoffverbrauchs beschränken darf?

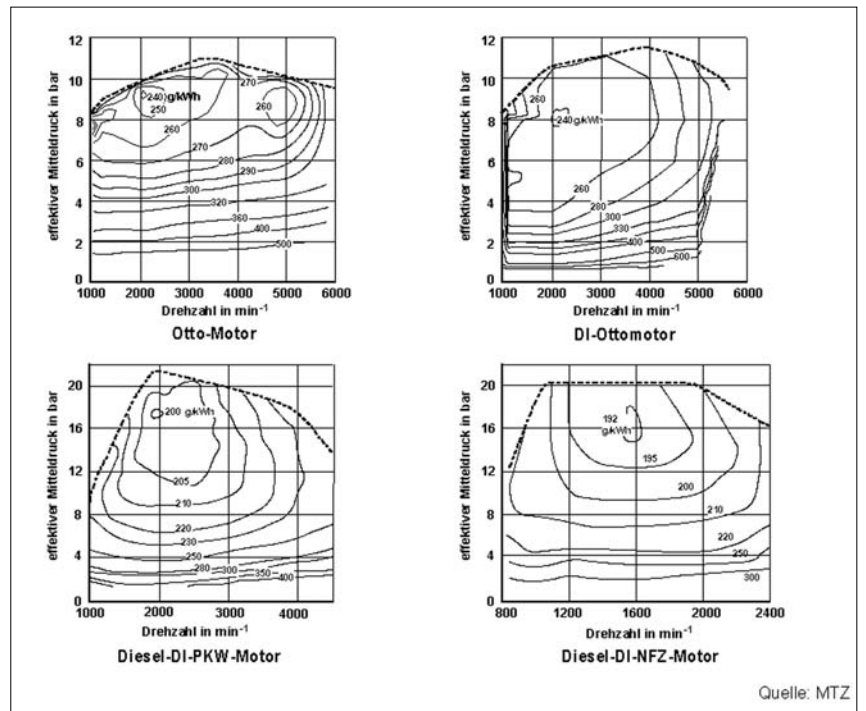


Abb. 5 Verbrauchskennfelder von Motoren mit unterschiedlichen Verbrennungsverfahren

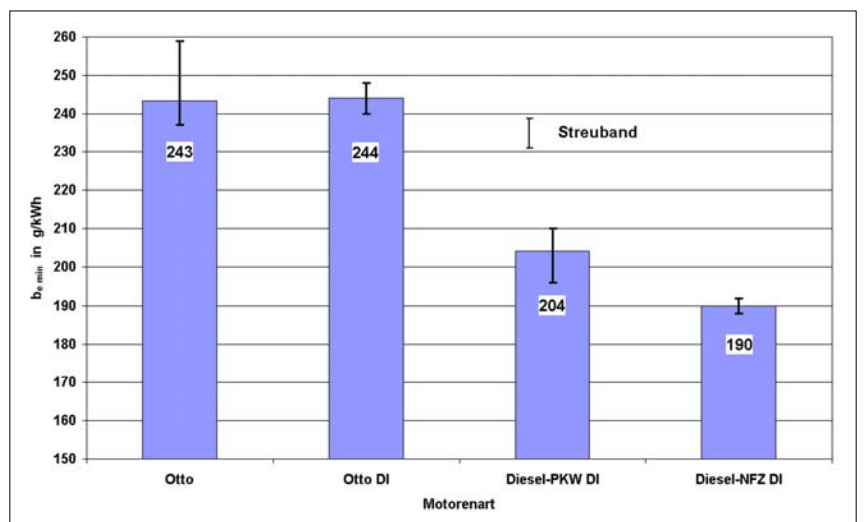


Abb. 6 Minimaler spezifischer Kraftstoffverbrauch $b_{e\ min}$ von Otto- und Dieselmotoren

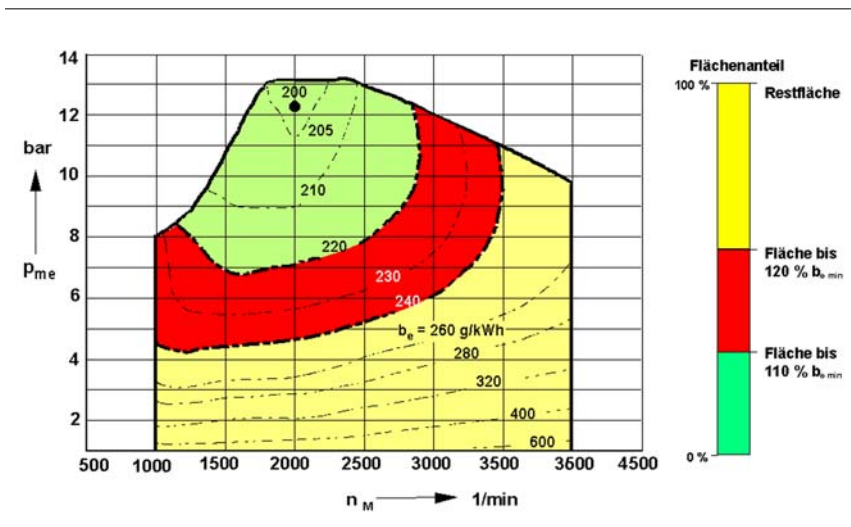


Abb. 7 Verbrauchskennfeld und Flächendefinition am Beispiel eines DI-Dieselmotors

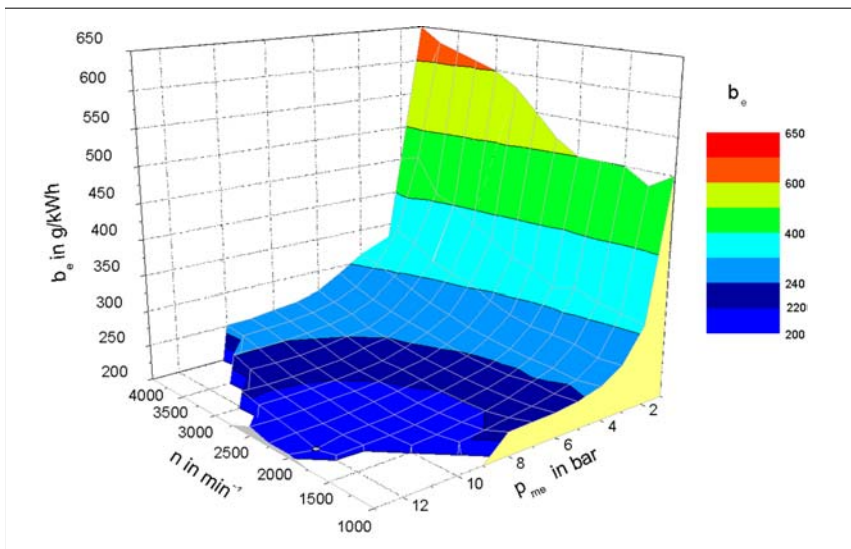


Abb. 8 Verbrauchskennfeld eines DI Dieselmotors in 3D-Darstellung

Verallgemeinert man die Darstellung, so können die Kurven im Diagramm als Höhenlinien interpretiert werden. Der tiefste Wert im Tal charakterisiert den minimalen Kraftstoffverbrauch; die höheren Werte charakterisieren den Anstieg bzw. die Spitze des Berges. Es ist leicht nachvollziehbar, dass nicht nur die Tiefe des Tales (möglichst niedriger Wert), sondern auch die Ausdehnung des Tales (möglichst groß) beachtet werden sollte, um einen verbrauchsarmen Betrieb des Motors zu gewährleisten. Oder anders ausgedrückt, das Niveau des minimalen Kraftstoffverbrauches sollte eine möglichst große Fläche des gesamten Motorkennfeldes abdecken. Legt man aber aus Vereinfachungsgründen das gesamte Motorkennfeld zwischen der Volllast- und der Leerlauf-Kennlinie einerseits und der oberen und unteren Drehzahlbegrenzung des Motors andererseits zugrunde, so lässt sich ein Kennfeld in z. B. drei Flächenbereiche aufteilen. In Abbildung 7 sind diese Bereiche farblich unterschiedlich gekennzeichnet. Das grüne Feld charakterisiert eine Fläche mit einem bis zu 10 % höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch gegenüber dem minimalen Kraftstoffverbrauch. Die rote Fläche charakterisiert einen von 10 % bis 20 % höheren Kraftstoffverbrauch bezogen auf $b_{e, \min}$. Die gelbe Restfläche definiert den Betriebsbereich mit spezifischen Kraftstoffverbräuchen von > 20 % bis zum Maximalwert. Alle drei Flächen zusammen charakterisieren den theoretischen Betriebsbereich eines Motors und werden als Fläche zu 100 % definiert.

Wertet man nun die grün und rot charakterisierten Flächen entsprechend ihrem Anteil am gesamten Kennfeld aus²⁾, ergibt sich bei dem in Abbildung 7 dargestellten Beispiel ein Flächenanteil von ca. 28 % mit einem Kraftstoffverbrauch, der bis zu 10 % größer ist als der Minimalwert, und ein Wert von ca. 56 % (bei Addition der roten und grünen Fläche) mit einem spezifischen Kraftstoffverbrauch $\leq 20 \%$ bezogen auf $b_{e, \min}$. Je größer nun die grünen und roten Flächenanteile bezogen auf die gesamte Fläche des Motorkennfeldes sind, desto verbrauchsgünstiger ist die Applikation des Motors gelungen. Selbstverständlich können anstelle der Flächen mit 10 % oder 20 % Mehrverbrauch auch andere Flächenanteile vorgegeben werden.

Abbildung 8 zeigt die beschriebene dreidimensionale Darstellung eines solchen Verbrauchskennfeldes, in der der Vergleich mit den sogenannten Höhenlinien verständlich wird. Aus Abbildung 8 lässt sich auch ableiten, dass die Betrachtung der Projektionsflächen (vgl. Abb. 7) den Gradienten innerhalb der betrachteten Fläche vernachlässigt (siehe z. B. die grüne Fläche mit bis zu 10 % Verbrauchserhöhung).

Eine Verfeinerung der bisherigen Überlegungen würde dazu führen, dass das Volumen unterhalb der Kurve zu minimieren bzw. das Volumen oberhalb der Kurve zu maximieren ist, um den geringstmöglichen Kraftstoffverbrauch im genannten Kennfeldbereich zu erhalten. Vereinfachend genügt jedoch im Einzelfall auch, den

KRAFTSTOFFVERBRAUCH „UNKONVENTIONELL“

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, ist für den Motorenbauer das Kraftstoffverbrauchs-kennfeld, also die Darstellung des spezifischen Kraftstoffverbrauches im Drehmoment-Drehzahl- oder Mitteldruck-Drehzahl-Kennfeld, eine für die Vergleichbarkeit und Effizienz des Motors wichtige Darstellung. Üblicherweise beschränkt man sich bei der Betrachtung meist auf den Punkt des minimalen Kraftstoffverbrauches $b_{e, \min}$. Häufig werden auch nur diese Werte bei der Angabe technischer Daten erwähnt. Tatsächlich bietet dieses Diagramm aber wesentlich mehr Möglichkeiten, um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit des Motors vorzunehmen, als dies heute praktiziert wird. Abbildung 7 zeigt ein typisches Verbrauchskennfeld für einen PKW-Dieselmotor. Die spezifischen Kraftstoffverbräuche liegen zwischen ca. 200 und 600 g/kWh.

2)

Die Flächenauswertungen wurden mit Unterstützung von Herrn Manfred Hinz, Institut für Simulation und Graphik, mit dem Programm Interactive Data Language (IDL) ausgeführt.

betrachteten Stufensprung von z. B. 10 und 20 % auf 5 %-Stufen oder kleiner zu reduzieren. Die Auswertung einer Reihe verfügbarer Verbrauchskennfelder verschiedener Motoren zeigt, dass die in Abbildung 7 beschriebene Flächenauswertung völlig ausreicht, um die Motoren bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit besser differenzieren und charakterisieren zu können als dies mit der Angabe des minimal erreichbaren spezifischen Kraftstoffverbrauches möglich ist.

Die Abbildungen 9, 10 und 11 zeigen die in Abbildung 7 erläuterte Auswertung am Beispiel von PKW-Ottomotoren, PKW-Dieselmotoren und Nutzfahrzeugmotoren. Aufgetragen sind jeweils der minimale Kraftstoffverbrauch $b_{e \min}$ und die auf diesen Wert bezogenen Flächenanteile im Gesamtkennfeld für 10 % und 20 % Mehrverbrauch. Dabei charakterisiert die Farbe grün den 10%igen Mehrverbrauch und die Farbe rot den 20%igen Mehrverbrauch.

Es ist erkennbar, dass bei PKW- und Transporter-Dieselmotoren die Flächenanteile bis 20 % Mehrverbrauch zwischen etwa 43 % und 67 % der gesamten Kennfeldflächen liegen. Bei den ausgewerteten Ottomotoren ist die Streubreite größer, die Flächenanteile liegen knapp unter 30 % bis knapp unter 70% bei allerdings deutlich höherem minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauch. Bei den Nutzfahrzeugmotoren ergeben sich für die Flächenanteile bis 20 % Mehrverbrauch zwischen ca. 72 % und fast 80 % bei deutlich niedrigerem spezifischen Minimalverbrauch.

Beim Vergleich innerhalb einer Motorenkategorie ist es nur sinnvoll, Motoren mit etwa gleichem minimalen Kraftstoffverbrauch zu betrachten. So zeigt sich am Beispiel der PKW-Diesel-Motoren mit $b_{e \min}$ von ungefähr 200 g/kWh, dass der Flächenanteil bis 20 % Mehrverbrauch im Bereich von etwa 44 % bis 67 % der Gesamtfläche liegen kann. Dieses Beispiel macht deutlich, dass die neu vorgeschlagene Bewertungsmethode die Motoren wesentlich besser differenziert als die Betrachtung von $b_{e \min}$ alleine. Alle betrachteten Motoren mit $b_{e \min} = 200$ g/kWh wären hier gleich bewertet worden.

DAS 1- ODER 2-LITER-AUTO?

Die Beschäftigung mit dem Thema Kraftstoffverbrauch führt zwangsläufig zu der Frage: Welcher minimale Kraftstoffverbrauch ist für ein Kraftfahrzeug denkbar, das die Allgemeinheit noch als „Auto“ akzeptiert? Nach der von vielen für unmöglich gehaltenen Realisierung des 3-Liter-Autos wird heute intensiv über das 1- oder 2-Liter-Auto diskutiert. Eine einfache Betrachtung, ausgehend vom 3-Liter-Auto, soll aufzeigen, welche konkreten kraftstoffverbrauchsrelevanten Kennwerte zur Erfüllung dieser hehren Ziele erreicht werden müssen.

Zunächst werden, wie in Abbildung 12 erläutert, die bekannten Abhängigkeiten des Energie-

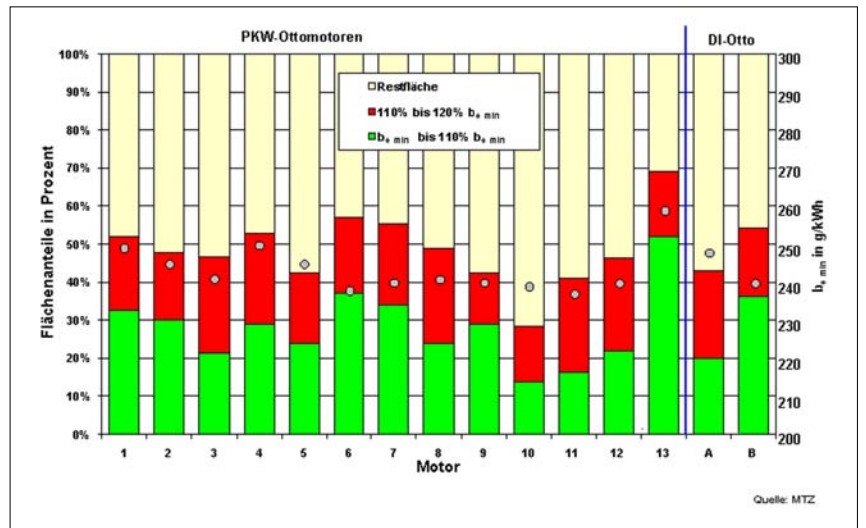


Abb. 9
Flächenauswertung von Verbrauchskennfeldern von PKW-Ottomotoren

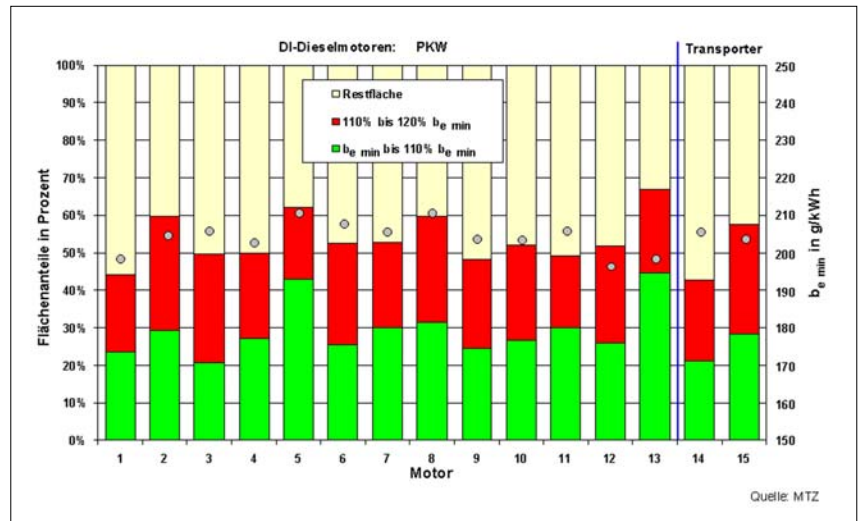


Abb. 10
Flächenauswertung von Verbrauchskennfeldern von PKW-Dieselmotoren

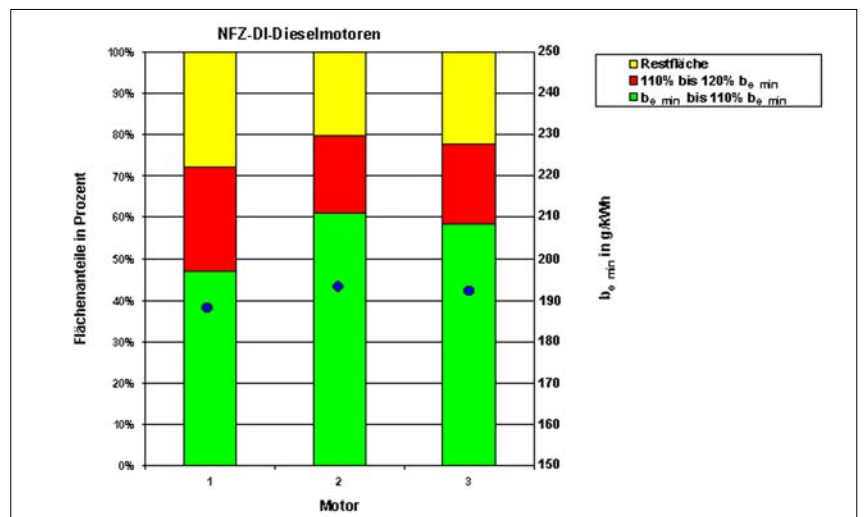


Abb. 11
Flächenauswertung von Verbrauchskennfeldern von NFZ-Motoren

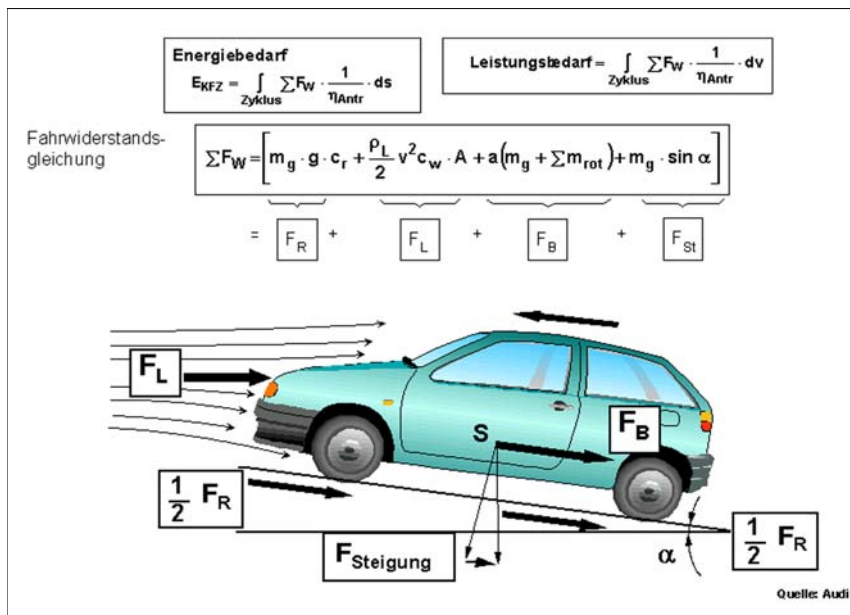


Abb. 12
 Fahrwiderstände, Energie- und Leistungsbedarf

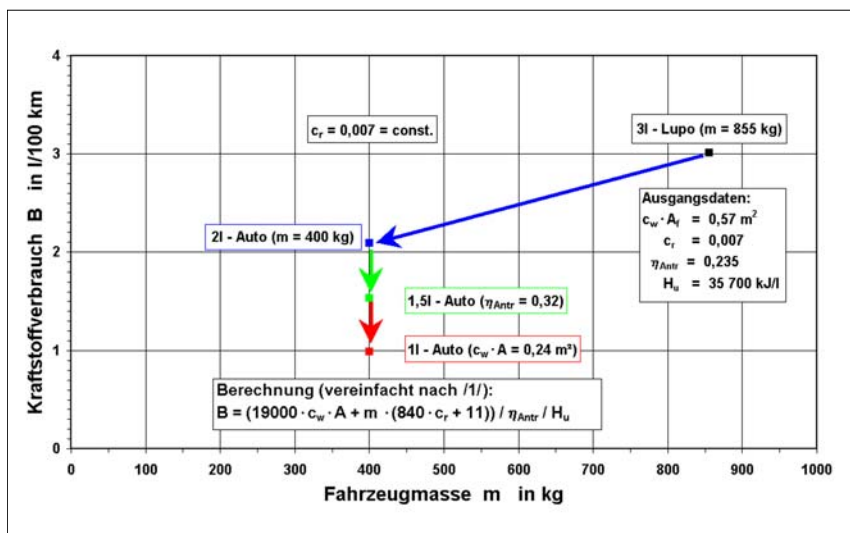


Abb. 13
 Das theoretische 1- und 2-Liter-Auto

heutiger Stand: Lupo 3L	Maßnahmenkatalog	für 1l-Auto notwendig:	denkbar, aber sehr schwierig
855 kg	Massereduzierung auf	400 kg	650 ... 700 kg
0,57 = 0,29 x 2 m ²	Luftwiderstandsfläche	0,24 m ² = 0,24 x 1,0 m ²	0,45 ... 0,47 m ²
0,235	Antriebswirkungsgrad	0,32	0,25 ... 0,28
2,99 l/100 km	Verbrauch	1,0 l/100 km	2,0 ... 2,3 l/100 km

Abb. 14
 „1- oder 2-Liter-Auto“?

verbrauchs von den Fahrwiderständen des Fahrzeugs betrachtet. Im Verbrauchszyklus treten der Rollwiderstand, der Luftwiderstand und der Beschleunigungswiderstand auf. Eine Steigungsfahrt ist im Zyklus nicht vorgesehen. Die entscheidenden Kennwerte sind die Fahrzeugmasse m , der Rollwiderstandsbeiwert c_r , der Luftwiderstandsbeiwert c_w , die Fahrzeugprojektionsfläche A und der Antriebswirkungsgrad η_{Antr} .

Unter Anwendung einer vereinfachten Zyklusverbrauchsrechnung nach Guzzella /1/ ergeben sich beispielhaft die folgenden Möglichkeiten für eine Verbrauchsreduzierung (Abb. 13). Ausgehend vom 3-Liter-Lupo mit einem Leergewicht von 855 kg müsste das 2-Liter-Auto bei sonst gleichen Kennwerten eine Masse von 400 kg aufweisen. Das 1,5-Liter-Auto müsste bei gleicher Masse einen Antriebswirkungsgrad von $\eta_{Antr} = 32\%$ erreichen und das 1-Liter-Auto zusätzlich einen Luftwiderstandsfaktor von $c_w \cdot A = 0,24$.

Die Massereduzierung um mehr als 50 % bei den zugrunde liegenden Mindestanforderungen an Sicherheit und Komfort scheint unrealistisch, trotz extremer Leichtbauweise unter Einsatz von Leichtmetallen und Kunststoff. Abbildung 14 zeigt die extrem hohen Anforderungen an ein Auto – und dies ist ausdrücklich zu betonen – mit konventionellem Verbrennungsmotor als Antrieb.

Bei extremen Anstrengungen auf allen Gebieten ist es denkbar, dass ein 2,x-Liter-Fahrzeug technisch machbar ist; wobei jedoch nichts über Kosten ausgesagt werden kann. Die Reduzierung des Luftwiderstandes dürfte zu einer unerwünschten Beschränkung der Transportkapazität führen. Die notwendige Verbesserung im Antriebswirkungsgrad ist zwar sehr hoch, aber nicht unlösbar. Bei all diesen Betrachtungen sind folgende Einsparmöglichkeiten noch nicht berücksichtigt:

- das Antriebsmanagement durch Start-Stopp-Schaltungen,
- die Energierückgewinnung während des Bremsens sowie
- der Einsatz von Hybridantrieben.

Ebenso sind eventuelle Entwicklungen von „Design-Kraftstoffen“ mit höheren volumenbezogenen Heizwerten nicht berücksichtigt.

MOBILITÄTSFAKTOR

Der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch sagt etwas über die Effizienz des Fahrzeuges während seines Betriebes aus. Die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Transportmittels läßt sich jedoch erst beurteilen, wenn man die Transportleistung des Fahrzeuges einbezieht. Während diese üblicherweise in Personen- oder Tonnen-Kilometern angegeben wird, soll hier eine Transportleistung definiert werden, die auch die Fahrzeit berücksichtigt.

Abbildung 15 zeigt den Energieverbrauch, die mittlere Geschwindigkeit und den Zeitbedarf für eine Wegstrecke von 100 km für drei verschiedene Transportarten: als Fußgänger, mittels Fahrrad³⁾ und mittels Kraftfahrzeug. Der Energieverbrauch ist bei der Fortbewegung unter Anwendung von Muskelkraft am geringsten, die Geschwindigkeit ebenso, und damit ist natürlich auch die erforderliche Zeit für das Zurücklegen einer Strecke von 100 km am längsten.

Das 3-Liter-Auto erweist sich sowohl im NEFZ mit einer mittleren Geschwindigkeit von 33 km/h als sparsam als auch in ähnlicher Größenordnung bei Konstantfahrt mit ca. 75 km/h und erreicht dabei die kürzest mögliche Zeit, jeweils bei einem Verbrauch von 3 l/100 km. Größere Fahrzeuge erreichen im Testzyklus bei gleicher mittlerer Durchschnittsgeschwindigkeit Verbräuche von z. B. 7 bis 8 l/100 km.

Ein Mobilitätsfaktor sollte neben den Wirtschaftlichkeitsfaktoren, wie Verbrauch und pro Fahrt zu befördernde Personen bzw. Lasten, auch die Fahrzeit berücksichtigen. Ein besonders günstiger Mobilitätsfaktor weist sich dadurch aus, dass ein möglichst geringer Streckenverbrauch bei möglichst kurzer Reisezeit mit einer möglichst großen Zahl von Personen oder Tonnen realisiert werden kann. Reisezeit und Streckenverbrauch gehen dabei gleichsinnig in die Betrachtung ein.

Die Definition für den Mobilitätsfaktor (MF) kann somit lauten:

$$MF = \frac{\text{Streckenverbrauch} \times \text{Fahrzeit}}{\text{Anzahl der beförderten Personen oder Tonnen}}$$

Auch sein Kehrwert ist geeignet. Im ersten Fall ist ein möglichst kleiner Wert anzustreben, nach der zweiten Definition ein möglichst großer Wert.

Abbildung 16 zeigt die Mobilitätsfaktoren für verschiedene Verkehrsmittel bezogen auf eine Strecke von 300 km, was sicherlich für den Fußgänger und den Radfahrer von theoretischer Natur ist, aber für alle anderen Beförderungsmittel eine realistische Entfernung darstellt.

ZUSAMMENFASSUNG

Je nach Zielsetzung differenziert die konventionelle Betrachtung des Kraftstoffverbrauches zwischen dem Volumen- bzw. Massenverbrauch pro zurückgelegter Entfernung und dem Energieverbrauch. Der Dieselmotor hat, unter Berücksichtigung gleichen Energiebedarfs, auf das Volumen bezogen einen Verbrauchsvorteil von etwa 14 % gegenüber dem Ottomotor. Andererseits hat der Dieselmotor aufgrund der höheren Dichte bei gleichem volumetrischen Verbrauch eine CO₂-Mehremission von ca. 10 % im Bereich der üblichen Kraftstoffverbräuche von 7 bis 9 l/100 km.

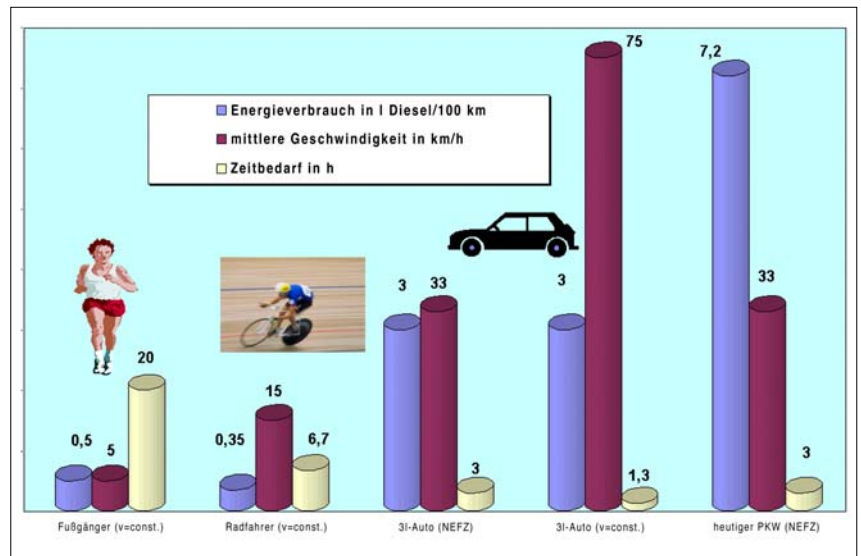


Abb. 15 Energieverbrauch, Geschwindigkeit und Zeitbedarf für 100 km

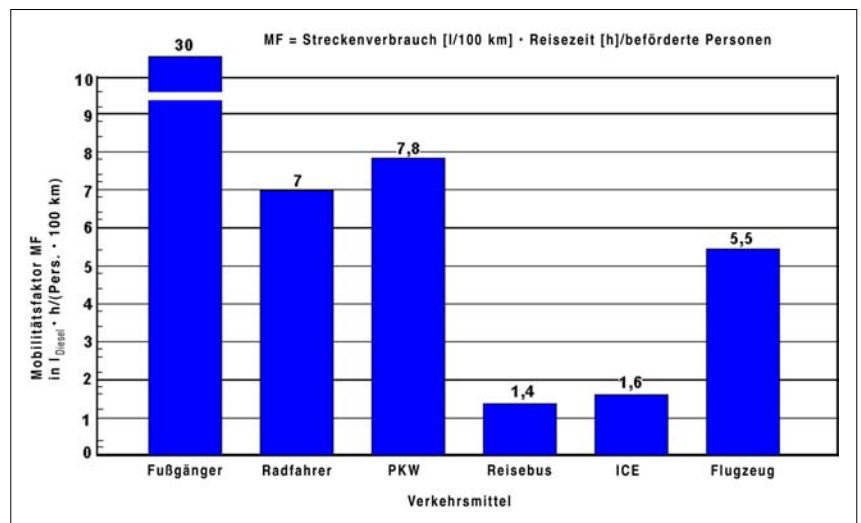


Abb. 16 Mobilitätsfaktoren MF für einige Verkehrsmittel bei Fernreisen über 300 km

Die genaue Betrachtung der Motorverbrauchs-kennfelder zeigt, dass die Fokussierung auf den minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauch nicht ausreicht, um die Effizienz eines Antriebsaggregates zu beurteilen. Mit einer einfachen und leicht nachvollziehbaren Vorgehensweise wird ein neues Bewertungsverfahren für Verbrennungsmotoren vorgeschlagen. Dabei wird der Flächenanteil (bezogen auf die Gesamtfläche des Kennfeldes) mit einer 10 bzw. 20%igen Verbrauchserhöhung gegenüber dem minimalen Verbrauch als Beurteilungsgröße herangezogen.

3) Für die Überlassung der Daten für Fußgänger und Fahrradfahrer danken wir Herrn Prof. Dr. André Niklas, Leiter der Sportmedizinischen Abteilung des Instituts für Sportwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.

Es zeigt sich, dass bei dieser Methode Motoren mit gleichem minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauch eine sehr unterschiedliche „Verbrauchsqualität“ aufweisen.

Zur Realisierung eines 1- bis 2-Liter-Autos sind erhebliche Verbesserungen bei Luftwiderstand, Rollwiderstand, Masse und Antriebswirkungsgrad notwendig. In einfachen Bei-

spielrechnungen werden die Zielwerte definiert.

Ein neuer Mobilitätsfaktor berücksichtigt neben dem Verbrauch und der Zahl der beförderten Personen oder Lasten auch die für die Mobilität wichtige Fahrzeit. Im Kurz- und Mittelstreckenverkehr (ca. 300 km) weisen der Reisebus und der ICE die günstigsten Mobilitätsfaktoren auf.

Literaturhinweis

/1/ Guzzella, L.; Roger, M.: Das SAVE-Motorkonzept. MTZ Motortechnische Zeitschrift 59 (1998) 10, S. 644-650



Prof. Dr.-Ing. Helmut Tschöke,

Jahrgang 1945, studierte an der Universität Stuttgart Maschinenbau mit den Schwerpunkten Kraftfahrzeuge und Technische Mechanik. Während seiner dortigen Institutstätigkeit beschäftigte er sich überwiegend mit Fragen der Motormechanik und Motorakustik. 1981 trat er in die Robert Bosch GmbH ein und war unter anderem verantwortlich für die Entwicklung der Dieseleinspritzpumpen für die neuen PKW-Diesel-Direkteinspritzmotoren. Seit 1995 ist er Professor für Kolbenmaschinen und seit 1996 geschäftsführender Leiter des Institutes für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen. Seine Forschungs- und Interessenschwerpunkte sind: Gemischbildung und Verbrennung von Otto- und Dieselmotoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung, Hochdruckeinspritzsysteme, Motorakustik und alternative Kraftstoffe. Er war die letzten drei Jahre Vorsitzender der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Kraftfahrzeug- und Motorentchnik. Seit 2000 ist Prof. Tschöke Dekan der Fakultät für Maschinenbau.



Dr.-Ing. Hanns-Erhard Heinze,

Jahrgang 1941, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen (IMKO). Er studierte von 1960-1965 an der Universität Leipzig Physik. Von 1965 bis 1968 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung der damaligen TH Magdeburg. Seit 1969 ist er am heutigen IMKO in Lehre und Forschung auf dem Gebiet der Messtechnik für Kolbenmaschinen tätig. 1983 promovierte er über ein Verfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten im Brennraum von Dieselmotoren. Schwerpunkte seiner Arbeit in den letzten Jahren waren u. a. die Abgasmesstechnik und die Untersuchung von Einspritzsystemen.