

ETA-Motor – Grundlagen und Einzelheiten eines zukunftsbezogenen Antriebskonzeptes

Von Dipl.-Ing. E. Heck VDI und Dipl.-Ing. R. Hofmann, München

1. Einleitung

Nachdem in früheren Jahren die Steigerung der Motorleistung und die Verringerung der Abgasemissionen die Schwerpunkte der Entwicklungsarbeit am Motor bildeten, hat heute die Verbrauchsreduzierung einen hohen Stellenwert inne. Ursache dieser Entwicklung sind die steigenden Kraftstoffkosten und zeitweilige Versorgungsprobleme. Die Nachfrage der Kunden nach sparsamen Fahrzeugen nahm dementsprechend zu, wenngleich Verschlechterungen bei Fahrleistungen und Fahrkomfort nur ungern hingenommen wurden.

Diese Anforderungen führten in den vergangenen Jahren im Bereich der Motorenentwicklung dazu, daß zahlreiche Maßnahmen untersucht und auch in der Serie realisiert wurden, die den Wirkungsgrad des Motors bei unveränderten Betriebspunkten verbesserten. Die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses, die Optimierung der Brennraumform, die Verbesserung der Gemischbildung und der Zündanlagen (Elektronik-Einsatz, z. B. Motronic), die Reduzierung der Reibungsverluste sind Beispiele dafür.

Welche Fortschritte insgesamt in den letzten 30 Jahren in dieser Richtung erzielt wurden, zeigt Bild 1 am Beispiel von Großserienmotoren aus den Jahren 1952 und 1982. Innerhalb dieses Zeitraumes wurde nicht nur die Vollastleistung im gesamten Drehzahlbereich deutlich gesteigert, sondern durch die vorher genannten Maßnahmen wurde auch der effektive Wirkungsgrad erheblich verbessert. Im η_{max} -Punkt wurde z. B. eine Verbesserung von ca. 30 % realisiert. Eingebaut ins gleiche Fahrzeug würde der moderne Motor bei Betrieb im direkten (4.) Gang eine Verbrauchsabsenkung von ca. 20 % bei 90 km/h und bei 120 km/h bei wesentlich verbesserten Fahrleistungen und stark reduzierten Abgasemissionen gegenüber dem älteren Motor erbringen.

Trotz dieser wesentlichen Erfolge zeigen die Wirkungsgradkennfelder, daß ein ähnlich großes Poten-

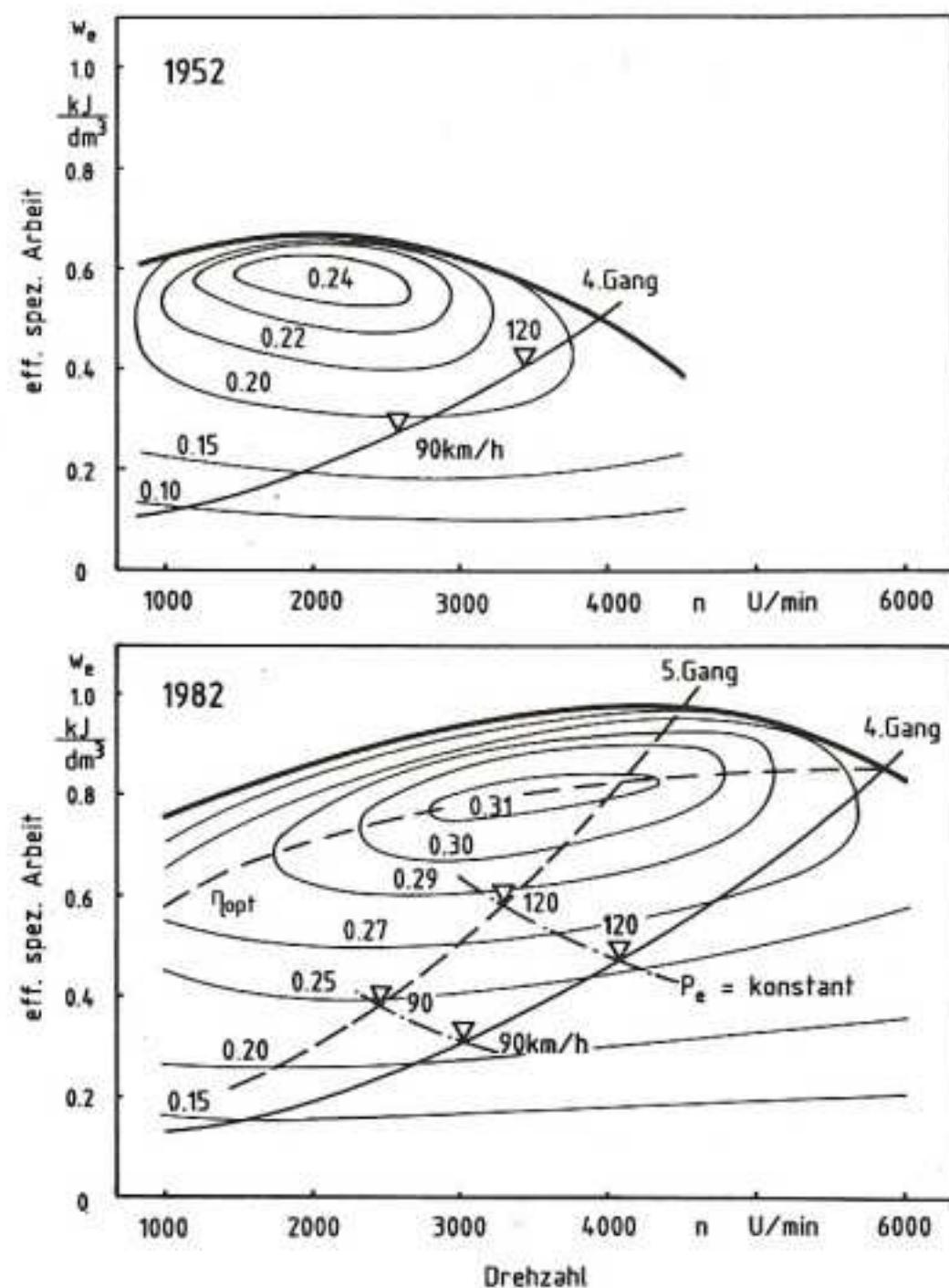


Bild 1. Kennfelder des effektiven Wirkungsgrades 1952 – 1982

tial weitgehend ungenutzt ist. Durch die Verlagerung der Betriebspunkte zu niedrigeren Drehzahlen und höheren Drehmomenten sind weitere Wirkungsgradverbesserungen möglich.

Ein erster Schritt in diese Richtung ist der zunehmende Einsatz von Spargang-Getrieben. Gegenüber dem Betrieb im direkten Gang werden im Spargang Drehzahlabsetzungen von ca. 20 % bei entsprechender Lasterhöhung erreicht. Die damit verbundenen Wirkungsgradsteigerungen liegen hier zwischen etwa 20 % (90 km/h) und 12 % (120 km/h).

Diese Verbesserungsmöglichkeit ist allerdings auf

diejenigen Betriebspunkte beschränkt, in denen der Betrieb sowohl im direkten als auch im Spargang möglich ist.

Eine einfache Verlängerung der Achsübersetzung, die ja die gewünschte Betriebspunktverlagerung bei allen Geschwindigkeiten ergeben würde, führt zu erheblichen Fahrleistungsverschlechterungen und scheidet deshalb aus.

Die ideale abtriebseitige Lösung des Problems Betriebspunktverlagerung wäre ein stufenlos variables Getriebe, das einen Betrieb entlang der η_{opt} -Kurve ermöglicht.

Bisher weitgehend vernachlässigt wurde die Möglichkeit, die gewünschte Betriebspunktverlagerung durch eine grundlegend andere Art der Motorauslegung mit angepaßten konventionellen Antriebselementen zu verwirklichen. Von BMW wurde dieser Weg zur Realisierung einer Betriebspunktverlagerung in wirkungsgradgünstigere Kennfeldbereiche beschritten.

2. Grundlagen des BMW-Eta-Konzeptes

2.1 Vollastauslegung für konstante Fahrleistungen

Wesentliche Randbedingung bei der Entwicklung des Eta-Konzeptes war die Beibehaltung der gewohnten Fahrleistungen. Der über den Fahrwiderstand hinausgehende maximale Zugkraftüberschuß mußte folglich in allen Gängen und Geschwindigkeitsbereichen unverändert bleiben. Die Erfüllung dieser Forderung ist nötig, damit der Fahrer die neue Auslegung akzeptiert und den möglichen Verbrauchsgewinn nicht durch Benutzung des jeweils niedrigeren Ganges zu nützte macht.

Bild 2 unten zeigt verschiedene Drehmomentkurven, die, ausgehend von der eines konventionellen $2,0 \text{ dm}^3$ -Einspritzmotors, die gestellten Forderungen erfüllen. Die Gesamtübersetzung des Fahrzeuges wurde dabei jeweils so ausgelegt, daß der Fahrwiderstand in der Ebene die Motorvollastkurve im Nennleistungspunkt schneidet. Um die bei Absenkung der Drehzahl erforderlichen hohen Momente zu realisieren, ist neben einer Hubraumerhöhung eine "Drehmomentkippung" unumgänglich. Diese wird durch Ladungswechselmaßnahmen, insbesondere durch Veränderung der Einlaßsteuerzeiten, realisiert. Die in Bild 2 oben dargestellten Vollastkurven sind nach dieser Methode so abgestimmt, daß sie in das darunter vorgegebene Raster passen. Zu klären ist

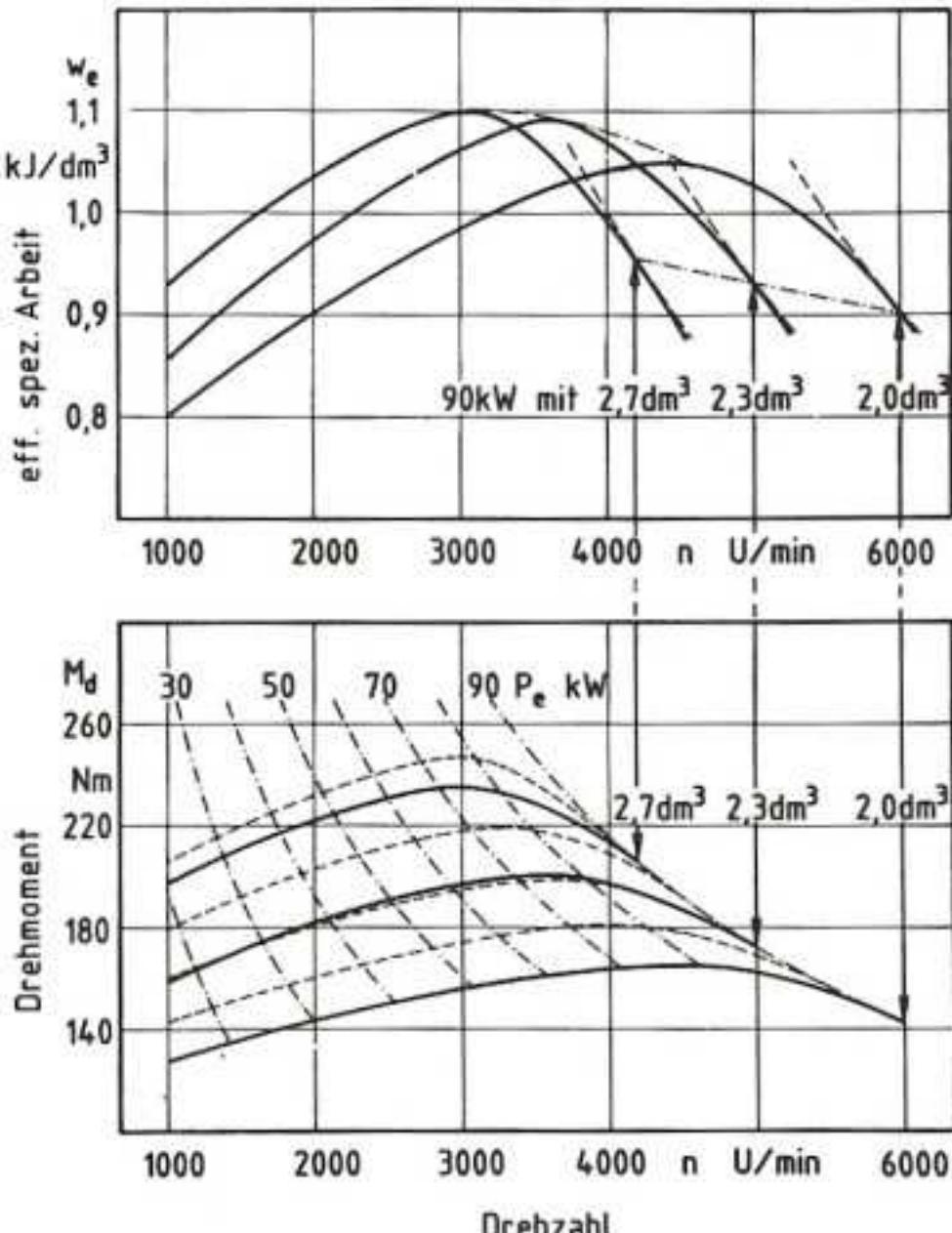


Bild 2. Alternative Vollastkurven

nun, welche Kombination aus Hubraum und Grad der "Drehmomentkippung" das beste Verbrauchsergebnis erzielt.

2.2 Einfluß von Hubraum und Drehzahl auf den Wirkungsgrad

Grundsätzlich gilt, daß die Reibungsverluste mit steigendem Hubraum etwa linear zunehmen, während der Anstieg über der Drehzahl etwa quadratisch erfolgt.

Die Auswirkungen dieser Abhängigkeiten auf den Kraftstoffverbrauch wurden experimentell ermittelt. Am Motorprüfstand wurden Verbrauchskennfelder für die Hubraumvarianten $2,0 \text{ dm}^3$, $2,3 \text{ dm}^3$ und $2,7 \text{ dm}^3$ aufgenommen, die zur Simulation beliebiger Fahrzyklen auf der Rechenanlage verwendbar sind.

Parallel wurden Druckverlaufindizierungen mit anschließender thermodynamischer Auswertung durchgeführt. Bild 3 rechts zeigt die Abhängigkeiten der interessierenden Wirkungsgrade am Beispiel eines $2,0 \text{ dm}^3$ -Motors heutiger Auslegung. Diese sind über der Drehzahl bei einer konstanten effektiven Leistung von 10 kW aufgetragen. Mit fallender Drehzahl (und steigendem Drehmoment) nimmt der effektive Wirkungsgrad stark zu. Wie die untere, relative

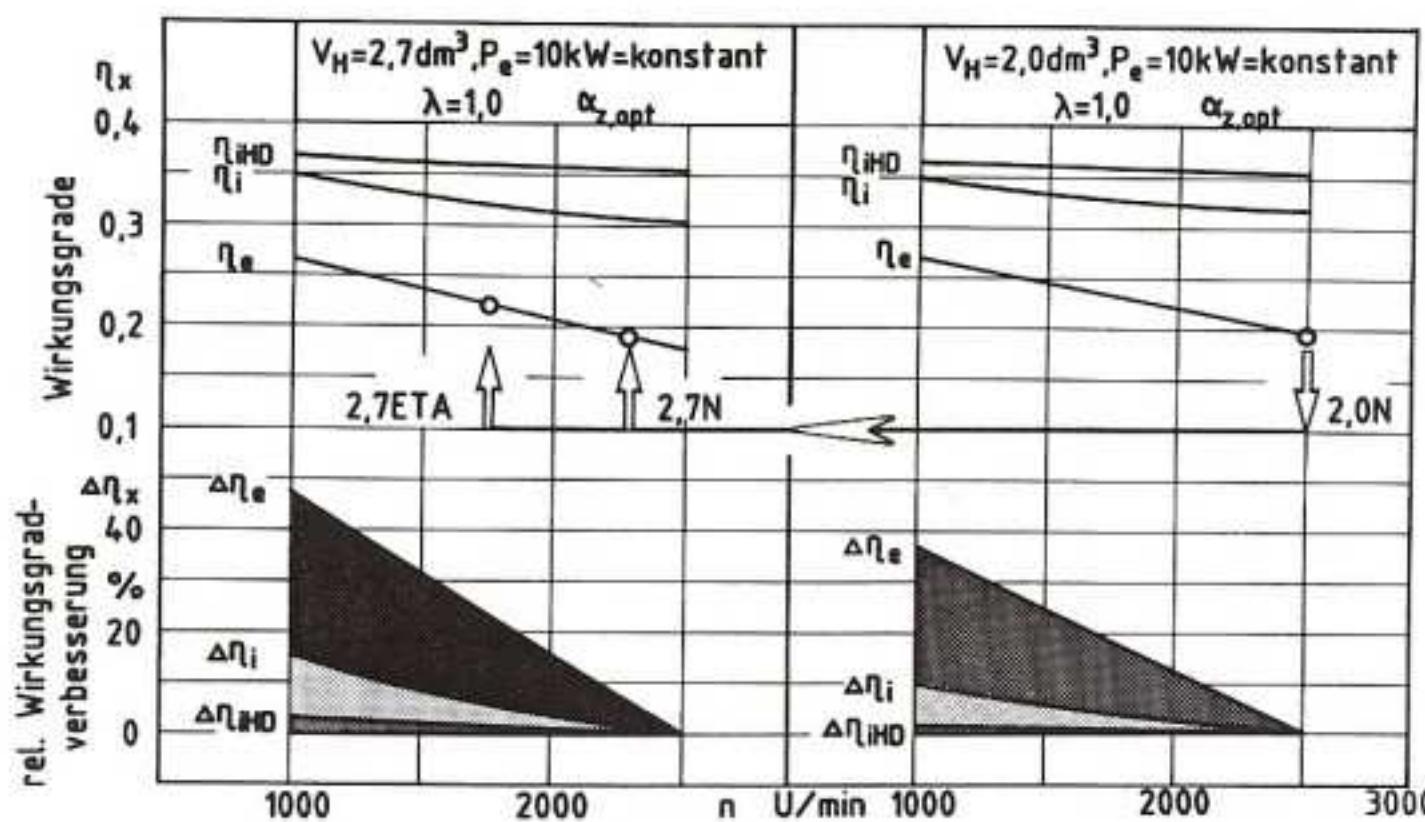


Bild 3. Wirkungsgradanalyse bei Betriebspunktverlagerung

Darstellung zeigt, ist die Verbesserung im wesentlichen eine Folge abnehmender Verluste durch Reibung und Antrieb der Nebenaggregate. Die Gewinne durch geringere Ladungswechselverluste und einen etwas besseren Hochdruckwirkungsgrad sind vergleichsweise gering.

Bild 3 links zeigt die gleichen Abhängigkeiten für einen $2,7 \text{ dm}^3$ -Motor mit der in Bild 2 dargestellten Charakteristik. Der Einfluß der Ladungswechselmaßnahmen auf den Wirkungsgrad ist vernachlässigbar klein (ca. 1 % relativ), sodaß die Ergebnisse auch für die Normalauslegung gelten.

Während der Hochdruckwirkungsgrad nahezu unabhängig vom Hubraum ist, führen die höheren Drosselverluste sowie die etwas höheren Reibungsverluste bei gleicher Drehzahl zu einem ungünstigeren effektiven Wirkungsgrad.

Durch die im Vergleich zu einem $2,0 \text{ dm}^3$ -Motor höhere Leistung des konventionell ausgelegten $2,7 \text{ dm}^3$ -Motors erhöht sich die erreichbare Maximalgeschwindigkeit. Die damit verbundene längere Gesamtübersetzung führt zu einer Drehzahlabsehung, die den Wirkungsgradnachteil des hubraumgrößeren Motors bereits auf ca. 2 % reduziert. Eine weitere Drehzahlabsehung (insgesamt ca. 30 %) wird durch eine Motauslegung entsprechend dem BMW-Eta-Konzept erreicht. Dadurch ergibt sich im vorliegenden Betriebspunkt für den effektiven Wirkungsgrad eine Verbesserung von 14 %.

Der positive Einfluß der Drehzahlabsehung auf den effektiven Wirkungsgrad ist gegenüber dem negativen der Hubraumerhöhung also wesentlich stärker. Dementsprechend sind die höchsten Verbrauchsvorteile

dann zu erwarten, wenn ein möglichst großer Hubraum mit möglichst starker Drehzahlabsehung kombiniert wird.

Bild 4 bestätigt diese Erwartung. Der Kraftstoffverbrauch in den verschiedenen Testzyklen nimmt bei Normalauslegung mit steigendem Hubraum und angepaßter Gesamtübersetzung leicht zu. Bei Eta-Auslegung werden die besten Ergebnisse trotzdem mit dem größten Hubraum erzielt, da hier die

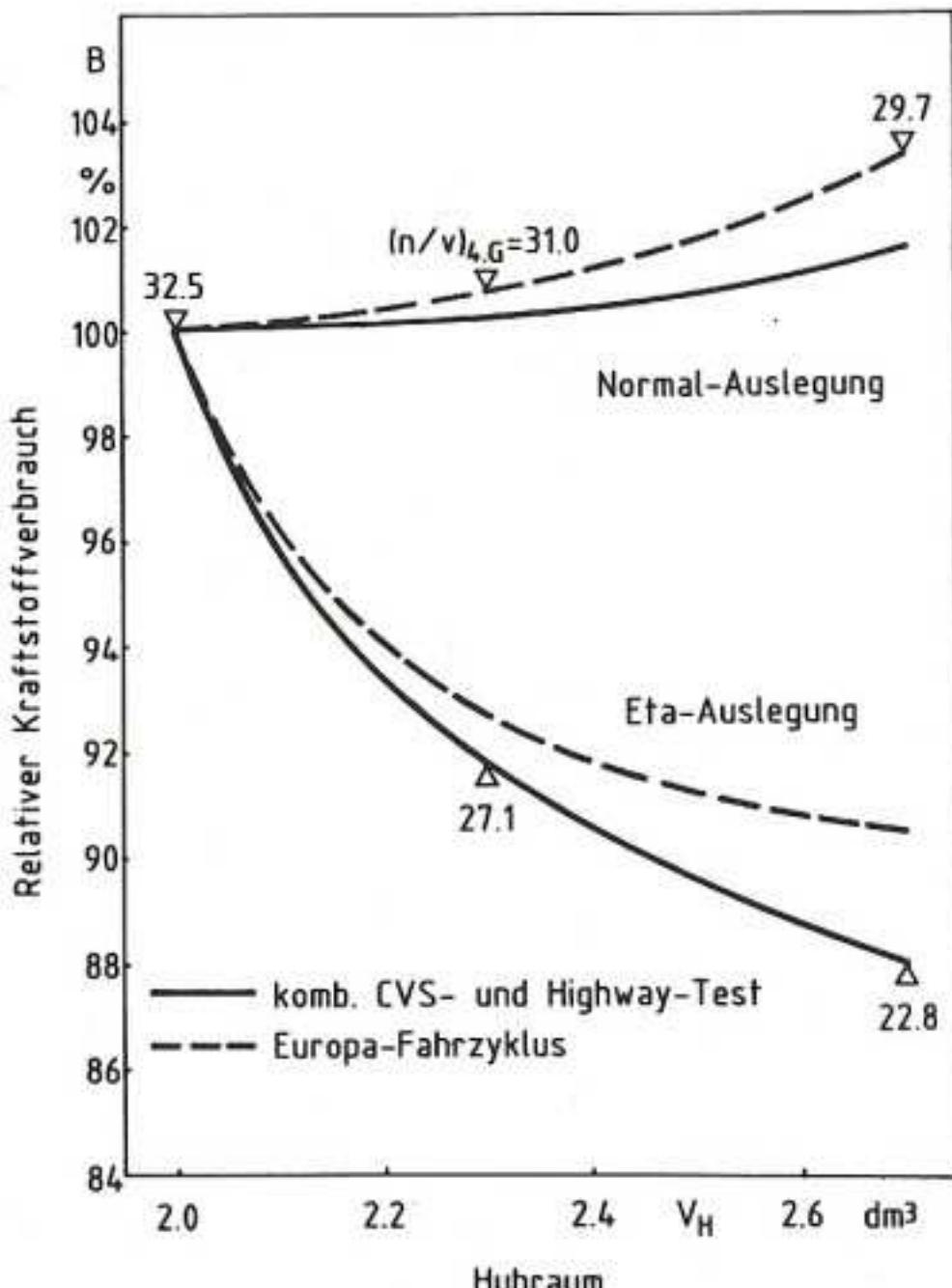


Bild 4. Einfluß des Hubraumes auf den Kraftstoffverbrauch bei Normal- und Eta-Auslegung

stärkste Drehzahlabsenkung möglich ist. Diese auf Basis der Verbrauchskennfelder durch Simulationsrechnung ermittelten Ergebnisse bestätigten sich bei Fahrzeugmessungen. Im identischen Fahrzeug ergeben sich bei Einsatz des 2,7 dm³-BMW-Eta-Motors Verbrauchsvorteile von etwa 9 - 12 % (je nach Fahrzyklus) gegenüber dem konventionellen 2,0 dm³-Motor.

2.3 Folgemaßnahmen

Die Auslegung der Mechanik und Nebenaggregate orientiert sich an dem höchstbelasteten Motor einer Baureihe. Dies ist üblicherweise die hubraumgrößte Variante in Normalauslegung. Durch die BMW-Eta-Auslegung wird das Drehzahlniveau jedoch erheblich abgesenkt, sodaß eine mit weiteren Reibungsvorteilen verbundene Überarbeitung der Motormechanik möglich wird.

Bild 5 verdeutlicht diese Verbesserungsmöglichkeiten am Beispiel der Nockenwellenantriebsleistung. Die Absenkung der Höchstdrehzahl erlaubt den Einbau von Ventilfedern mit niedrigerer Vorspannung und die Reduzierung der Lageranzahl von 7 auf 4. Die Antriebsleistung für die Nockenwelle wird so um ca. 50 % reduziert.

Weitere Ansatzpunkte sind z. B. eine Absenkung der Kolbenringvorspannung oder auch eine geringere Öl födermenge bei reduzierter Nockenwellenlagerzahl.

Die Nutzung dieser Möglichkeiten führt zu einer zusätzlichen Verbrauchsreduzierung von bis zu 3 %.

Andere Maßnahmen, wie z. B. thermodynamische Optimierung durch höhere Verdichtung, Betrieb bei magren Luftzahlen oder Verbesserung des Brennraumes werden durch eine Eta-Auslegung nicht ausgeschlossen.

2.4 Grenzen des BMW-Eta-Konzeptes

Das BMW-Eta-Konzept läßt sich prinzipiell in jeder Motorbaureihe mit ausreichender Hubraumbreite verwirklichen. Ein Übergang zur nächstgrößeren Baureihe erscheint jedoch wenig sinnvoll, da die Verluste durch Reibung und Antrieb der Nebenaggregate dabei stark ansteigen. Baugröße und Motorgewicht nehmen ebenfalls zu. Ursache ist die Auslegung für den höheren Leistungsbereich.

Bei 4-Zylindermotoren setzt außerdem die Laufkultur

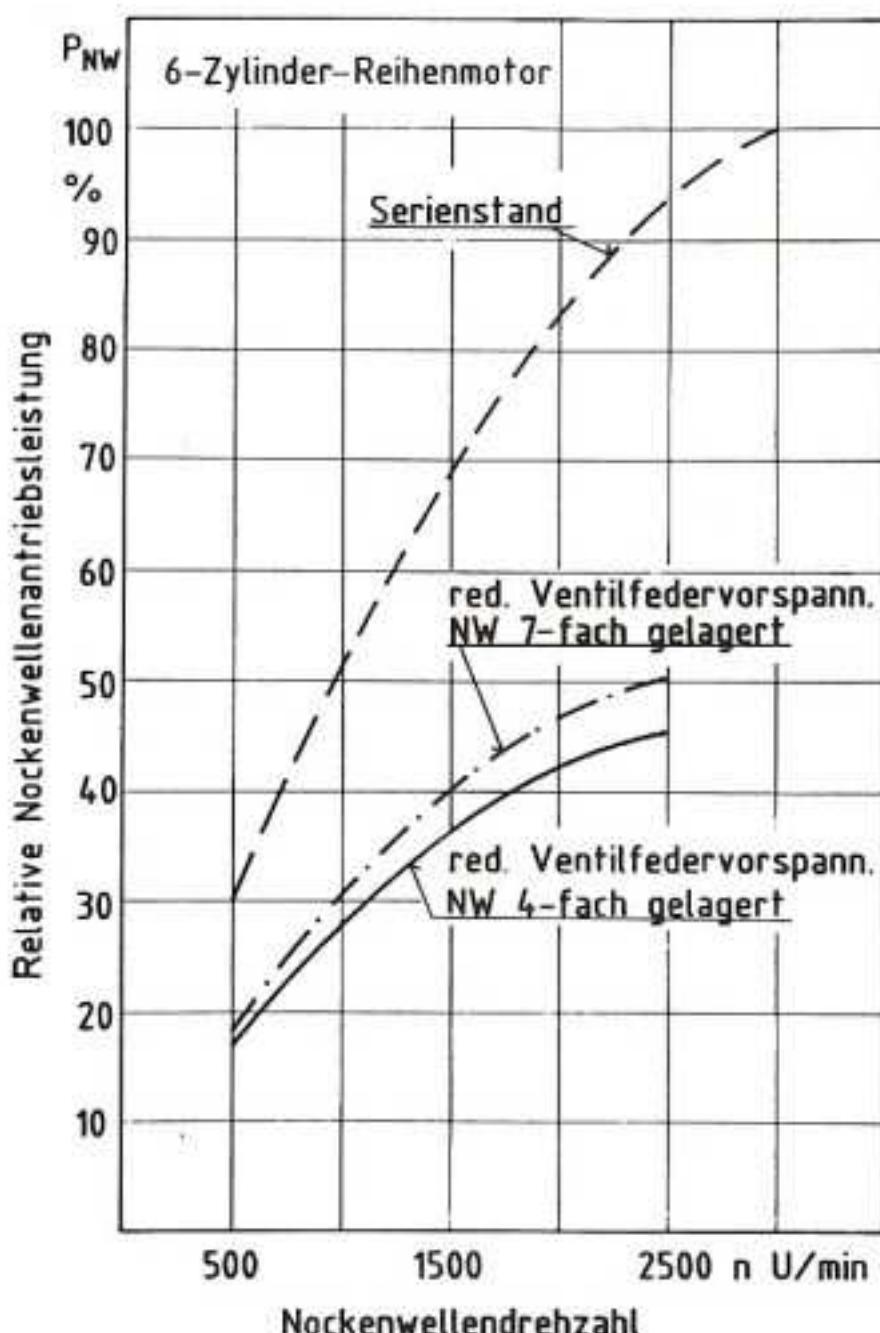


Bild 5. Reibungsminderung im Ventiltrieb

einer starken Drehzahlabsenkung Grenzen, während 6-Zylindermotoren selbst bei Drehzahlen unter 1000 U/min einwandfrei unter Vollast betrieben werden können.

2.5 Vergleich BMW-Eta-Motor - Drosselmotor

Der Eta-Motor ist kein Drosselmotor, wie Bild 6 anschaulich verdeutlicht. Hier sind qualitativ die Leistungskurven für Normal-, Eta- und Drosselmotor gegenübergestellt.

Beim Eta-Motor wird durch Ladungswechsel eingriffe die Charakteristik so verändert, daß die Leistung bei niedrigen und mittleren Drehzahlen über der eines hubraumgleichen Normalmotors liegt. Das Auslegungsziel "hohe spezifische Nennleistung" ist hier lediglich verlagert auf "hohe spezifische Arbeit" bei möglichst niedriger Drehzahl. Die Probleme einer solchen Abstimmung erfordern eine zumindest ebenso anspruchsvolle Entwicklung wie bei einer Normalauslegung.

Eine besondere Schwierigkeit bietet der Betrieb mit Vollast im unteren Drehzahlbereich bei für den Teillastwirkungsgrad günstigen hohen Verdichtungs-

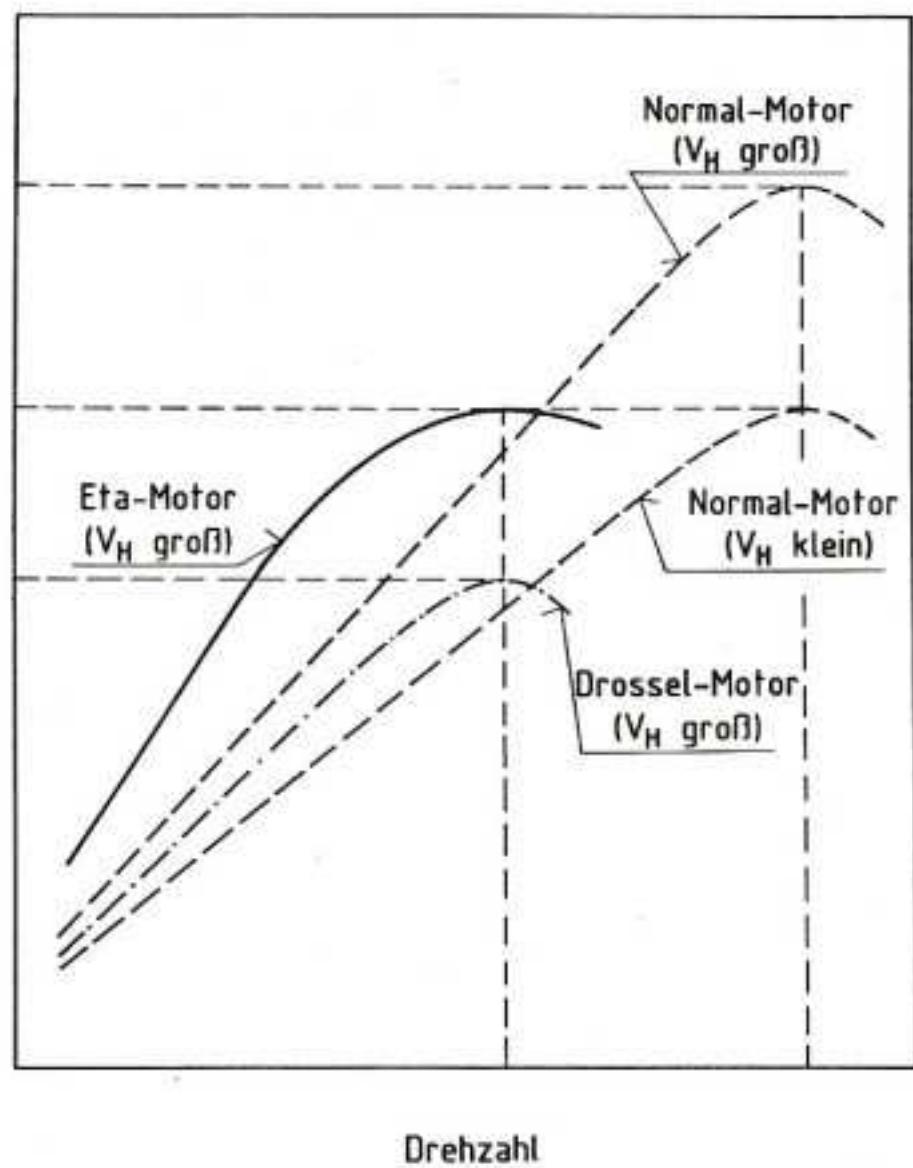


Bild 6. Motorkonzept-Vergleich

verhältnissen. Hier müssen beim BMW-Eta-Motor hohe Füllungen realisiert werden, um die geforderten Drehmomentwerte zu erreichen. Der Betrieb nahe der Klopfgrenze erschwert diese Aufgabe. Nur durch den Einsatz modernster Gemischbildungs- und Zündsysteme lassen sich diese Probleme lösen.

Beim Drosselmotor bestehen diese Probleme nicht. Die Drehmomente liegen üblicherweise im gesamten Drehzahlbereich unter denen eines hubraumgleichen Normalmotors. Die Ursache ist überwiegend eine verringerte Füllung, sodaß Klopftprobleme kaum auftreten. Dadurch ist die Verwendung einfacher Gemischaufbereitungs- und Zündsysteme möglich. Die damit verbundenen Kosteneinsparungen begünstigen den Einsatz derartiger Drosselmotoren für kostengünstige, anspruchsarme Großserienfahrzeuge.

3. Erste Serienmotoren mit BMW-Eta-Auslegung

3.1 Technische Daten

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Grundsatzuntersuchungen ist der Eta-Motor bisher in zwei Ländervarianten zur Serienreife entwickelt worden. Es handelt sich dabei um einen Reihen-Sechszylindermotor der kleinen Baureihe.

Bild 7 zeigt die wichtigsten Daten dieser Ländervarianten im Vergleich zum 520i.

Mit $2,7 \text{ dm}^3$ wurde der maximal mögliche Hubraum der Baureihe ausgewählt. Bei im Vergleich zum $2,0 \text{ dm}^3$ -Motor gleicher (ECE) bzw. etwas niedrigerer (USA) Nennleistung wurde damit eine Absenkung der Nennleistungsdrehzahl von 5800 U/min auf 4250 U/min realisiert. Die maximale spezifische Arbeit des ECE-Motors stieg um ca. 5 % auf $1,12 \text{ kJ/dm}^3$ an. Ursache des geringeren w_e beim US-Motor ist das niedrigere Verdichtungsverhältnis (9,0 statt 11,0) wegen der Auslegung für den Betrieb mit bleifreiem Kraftstoff anstelle von Super.

Die gewünschte Vollastcharakteristik wurde durch Verkürzung der Steuerzeiten zugunsten eines früheren Einlaßschlusses und durch eine Saugrohrverlängerung erreicht. Durch eine längere Hinterachsübersetzung wurde die Drehzahl in allen Betriebspunkten um 25 % reduziert.

Als zusätzliche Reibungsmaßnahmen wurden die Kolbenring- und Ventilfedervorspannung reduziert sowie die Nockenwellenlageranzahl von 7 auf 4 verringert.

Der erste Serieneinsatz des Eta-Motors erfolgte im Herbst 1981 in den USA. In naher Zukunft wird ein ECE-Modell folgen.

3.2 Kraftstoffverbrauch und Fahrleistungen

Beim 526e (ECE-Modell) konnte mit dieser Auslegung

		520i	Eta ECE	Eta USA
Motordaten				
Hubraum	dm^3	1,993	2,693	2,693
Hub/Bohrung	mm/mm	66/80	81/84	81/84
Leistung	kW	92	92	90
bei Drehzahl	U/min	5800	4250	4250
Drehmoment	Nm	170	240	230
eff. spez. Arbeit	kJ/dm^3	1,07	1,12	1,07
bei Drehzahl	U/min	4000	3250	3250
Verdichtungsverhältnis	-	9,8	11,0	9,0
Kraftstoffart	-	Super	Super	Bleifrei
Ventilsteuzeiten				
Einlaß	$^\circ\text{KW}$	252/112	236/104	236/104
Auslaß	$^\circ\text{KW}$	252/108	236/104	236/104
Saugrohrlänge	mm	400	490	490
Saugrohrdurchmesser	mm	36	36	36
Hinterachsübersetzung	-	3,91	2,93	2,93
(Drehz./Geschw.) _{4G}	$\frac{\text{U}/\text{min}}{\text{km}/\text{h}}$	34,0	25,5	25,5
Kraftstoffverbrauch				
ECE (1/3-Mix)	$\text{l}/100\text{km}$	9,1	8,3	-
CVS + Highway	mpg	-	-	25,5

Bild 7. Motordaten und Kraftstoffverbrauch 520i - Eta ECE - Eta USA

der Kraftstoffverbrauch, gemittelt aus dem EFZ-Zyklus und den Konstantfahrpunkten 90 km/h und 120 km/h, gegenüber dem Vergleichsfahrzeug 520i, von 9,1 auf 8,3 l/100 km gesenkt werden.

Bild 8 zeigt die Einzelwerte für die beiden Fahrzeuge jeweils in der 5-Gang-Spargang-Version. Im Mittel beträgt die Verbesserung knapp 10 %.

Dieser Wert liegt etwas unter dem in der Grundsatzuntersuchung prognostizierten Verbrauchsgewinn. Die Erklärung dafür liefert Bild 9.

Während bei der Grundsatzuntersuchung unterstellt wurde, daß gleiche Fahrleistungen wie beim Vergleichsfahrzeug 520i erreicht werden, wurde diese Bedingung beim 526e nicht ganz eingehalten. Zugunsten besserer Fahrleistungen wurde eine kürzere Übersetzung gewählt und so das Verbrauchspotential bewußt nicht voll ausgeschöpft. Diese Maßnahme führt zu besseren Elastizitäts- und Maximalbeschleunigungswerten.

3.3 Emissionen

Neben dem Verbrauch und den Fahrleistungen war der Einfluß der veränderten Auslegung auf die Abgas- und Geräuschemission zu überprüfen. In den Fahrzeugversuchen bestätigten sich die Prognosen, daß keine wesentlichen Veränderungen zu erwarten sind. Die HC- und CO-Emission des 526e entsprechen fast exakt denen des Vergleichsfahrzeugs 520i. Lediglich die NO_x-Emission nimmt wegen des höheren Ver-

dichtungsverhältnisses geringfügig zu. Der gesetzliche Grenzwert wird allerdings immer noch mit ausreichendem Sicherheitsabstand eingehalten.

Die Geräuschemission beim Eta-Motor wird durch zwei gegenläufige Einflüsse geprägt. Die starke Drehzahlabsenkung führt zu einer Verringerung des Motorgeräusches, während der Betrieb mit höheren Drehmomenten eher zu einer höheren Geräuschemission führt. In der Summe dominiert allerdings der positive Einfluß der Drehzahlabsenkung, sodaß neben einer geringeren Umweltbelastung auch eine Komfortverbesserung für die Fahrzeuginsassen die Folge ist.

3.4 Vergleich Eta-Motor mit Diesel-Motor

Neben dem Vergleich des Eta-Motors mit dem konventionell ausgelegten Ottomotor erscheint auch eine Gegenüberstellung mit dem Dieselmotor interessant.

Man kann davon ausgehen, daß ein vergleichbares Dieselfahrzeug einen Verbrauchsvorteil von ca. 25 % im gemischten Betrieb gegenüber einem mit konventionellen Ottomotor ausgerüsteten Fahrzeug erbringt. Durch Einsatz des BMW-Eta-Motors ist bei konsequenter Auslegung eine Verbrauchsersparnis von bis zu ca. 15 % möglich. Damit wird der Verbrauchsvorteil des Diesels bis auf ca. 10 % abgebaut. Geht man von der Bewertung des volumetrischen Verbrauches auf den Energieverbrauch über, verschwindet der Vorteil des Dieselmotors infolge des im Vergleich zu Superkraftstoff ca. 10 % höheren Heizwertes pro Liter nahezu völlig. Dies bedeutet, daß der effektive Wir-

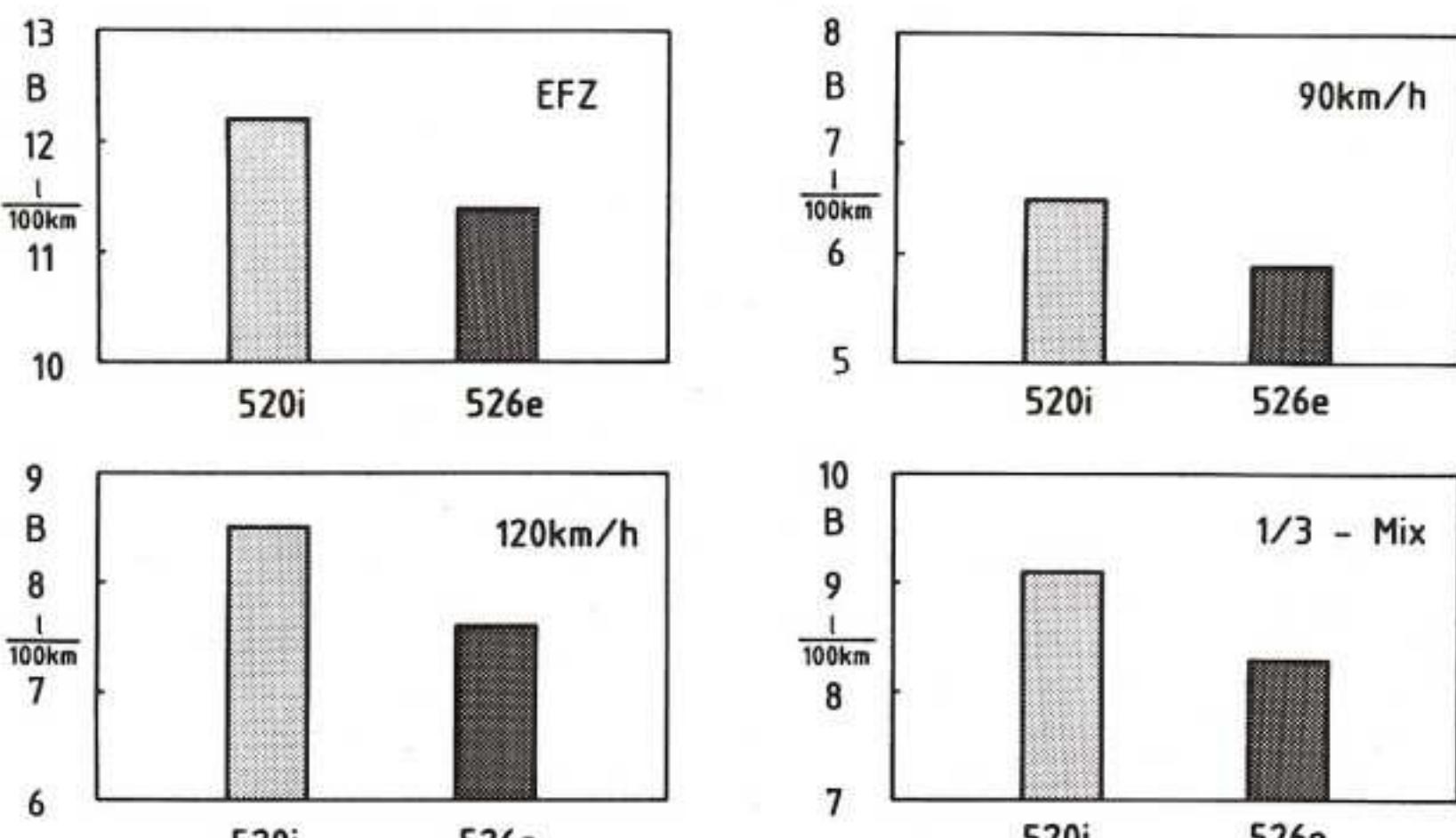


Bild 8. Kraftstoffverbrauch 520i – 526 e

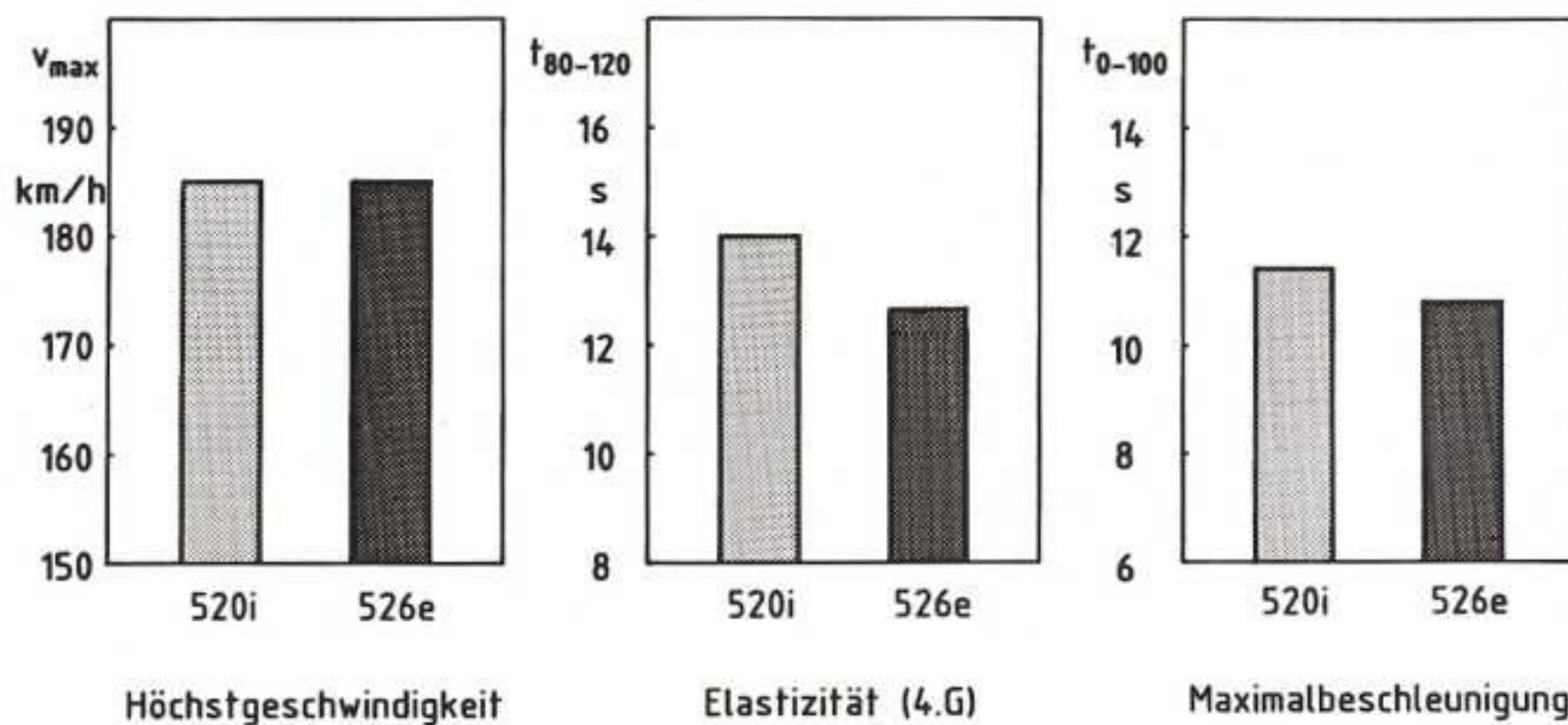


Bild 9. Fahrleistungen 520i - 526e

kungsgrad des BMW-Eta-Motors im Mittel fast so hoch ist wie der eines Kammerdieselmotors.

Bei differenzierter Betrachtungsweise bleibt für den Dieselmotor bei überwiegendem Kurzstreckenverkehr ein Verbrauchsvorteil, während bei überwiegen- dem Fern- oder Überlandverkehr ein Verbrauchsnachteil gegenüber dem Eta-Motor besteht.

4. Zusammenfassung

Zielsetzung bei der Entwicklung des Eta-Motors war eine möglichst hohe Verbrauchsabsenkung bei unveränderten Fahrleistungen. Dies konnte durch eine Abwendung von der üblichen Auslegungsphilosophie erreicht werden. Anstelle einer hohen spezifischen Leistung wurden große spezifische Arbeiten bei relativ niedrigen Drehzahlen angestrebt und erreicht.

Ein so optimierter Drehmomentverlauf erlaubt in Kombination mit einem relativ großen Hubraum eine Betriebspunktverlagerung zu niedrigen Drehzahlen, ohne daß sich die Fahrleistungen gegenüber einem hubraumkleineren, konventionell ausgelegten Motor mit gleicher Leistung verschlechtern. Damit sind je nach Betriebspunktkollektiv Verbrauchsverringerungen von 9 bis 12 % realisierbar. Konventionelle Maßnahmen zur Verringerung der Reibungsverluste oder Verbesserung der Verbrennung werden durch die Eta-Auslegung nicht ausgeschlossen.

Daneben bewirkt die Eta-Auslegung wegen der starken Drehzahlabsenkung eine deutliche Geräuschminderung. 6-Zylinder-Motoren sind für eine Eta-Auslegung besonders gut geeignet. Sie genügen auch bei der dafür typischen Betriebsweise mit hohen Drehmomenten und niedrigen Drehzahlen sehr hohen Komfortansprüchen.