

Der BMW Eta-Motor

Der Schwerpunkt künftiger Verbrauchsoptimierung insbesondere bei Fahrzeugen mit Ottomotor liegt in der Nutzung des vorhandenen Potentials durch Betriebspunktverlagerung in wirkungsgradgünstigere Kennfeldbereiche. BMW stellt mit dem Eta-Motor ein Konzept vor, das die heute gewohnten Fahrleistungen mit wesentlich niedrigeren Drehzahlen und entsprechend höheren Drehmomenten im Vergleich zur heutigen Motorauslegung verwirklicht und durch diese Betriebspunktverlagerung im gemischten Fahrbetrieb den Kraftstoffverbrauch bis ca. 15 % senkt. Gleichzeitig tritt eine deutliche Verringerung der Geräuschemission ein.

Voraussetzung für das BMW Eta-Konzept ist die Freigabe des Hubraums als zusätzlicher Optimierungsparameter. Aus Verbrauchsgründen darf bei dieser unkonventionellen Motorauslegung nicht mehr wie bisher hohe spezifische Nennleistung, sondern es muß künftig hohe spezifische Arbeit bei kleinen Drehzahlen im Mittelpunkt des Interesses stehen. Das erstmals 1978 vorgestellte BMW Eta-Konzept ist produktionsreif und wird in naher Zukunft einen festen Platz im BMW-Serienprogramm einnehmen.

The BMW Eta Engine

Abstract

When optimizing fuel consumption in future, particularly in cars with an Otto-cycle engine, one must concentrate on utilizing existing potential by shifting the operating point to more efficient engine operating ranges. With the Eta-engine, BMW presents a concept that provides the current standard of performance at far lower engine speeds and accordingly higher torque as compared to contemporary engines. By shifting the operating point to more efficient operating ranges, this concept reduces fuel consumption in mixed driving conditions by approximately 15 %. At the same time, the noise level is also substantially reduced.

A prerequisite of the BMW Eta concept is the free use of engine displacement as an additional optimization parameter. To minimize fuel consumption, this unconventional engine design does not demand any more a high specific output, but rather high specific work at low engine speeds.

Presented for the first time in 1978, the BMW Eta concept is now ready for production and will soon assume a permanent position in BMW's standard production range.

1. Einleitung

Ausgelöst durch die Verknappung und Verteuerung von Energie allgemein und von Mineralöl speziell haben zahllose Untersuchungen in den vergangenen Jahren zu der Erkenntnis geführt, daß in der absehbaren Zukunft Straßen-Individualfahrzeuge ausschließlich wie bisher von Hubkolben-Verbrennungsmotoren angetrieben sein werden. Mögliche Diversifikationen auf der Kraftstoffseite werden sich nur innerhalb des Bereiches von Kohlenwasserstoffverbindungen abspielen.

Da somit revolutionäre Entwicklungen, welche die Energieproblematik im Straßenverkehr grundlegend entschärfen könnten, nicht zu erwarten sind, muß die systematische Minimierung des Energieverbrauchs heutiger Systeme vorrangigstes Ziel sein.

Im Bereich der Motorenentwicklung, und hier speziell bei Ottomotoren, wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Maßnahmen untersucht und auch in der Serie realisiert, die bei gegebener Gesamtauslegung des Fahrzeugantriebs den Wirkungsgrad des Motors an festen Betriebspunkten erhöhen. Erinnert sei hier an die Optimierung der Luftzahl λ und des Zündwinkels α , meist in Verbindung mit anspruchsvollen Gemischbildungs- und Zündanlagen, die Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses, die Optimierung der Brennraumform, die Verringerung der Reibungsverluste usw. Das damit zugängliche Verbesserungspotential ist heute zwar sicher noch nicht vollständig ausgeschöpft, die damit erzielbaren Fortschritte werden aber immer kleiner. Außerdem werden zunehmend die Grenzen dieses Optimierungsprozesses

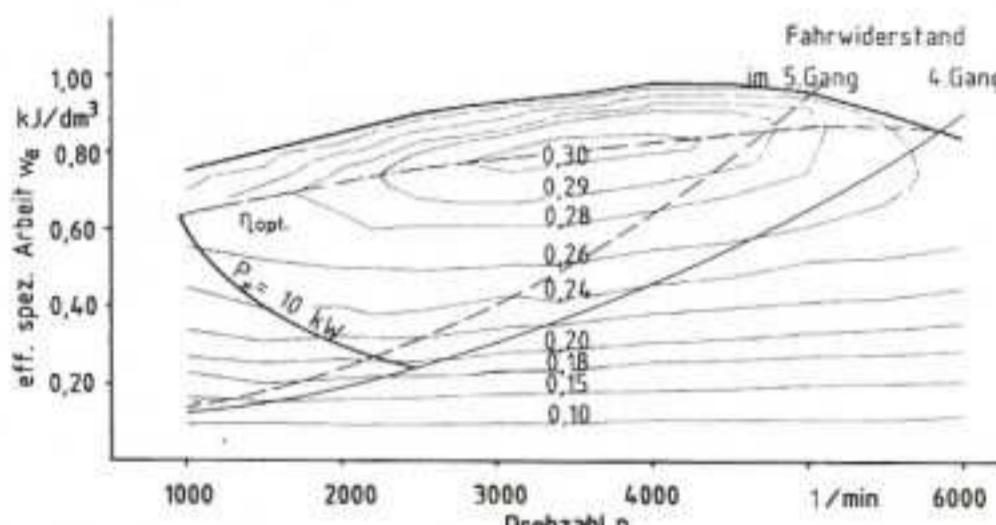


Bild 1. Kennfeld des effektiven Wirkungsgrades eines Einspritzmotors heute üblicher Auslegung (Hubraum 2,0 l)

Fig. 1. Ranges of efficiency of a current fuel-injection engine (displacement 2,0 l)

sichtbar, die entweder von der Physik oder vom Aufwand oder von anderweitigen Restriktionen, z. B. vom Umweltschutz, gesetzt werden.

Ein Blick auf das Wirkungsgradkennfeld eines heutigen Ottomotors (aus Vergleichsgründen mit konstanter Luftzahl $\lambda = 1,0$ ermittelt) zeigt, Bild 1, daß demgegenüber ein wesentlich größeres Potential, das bisher weitgehend ungenutzt ist, in der Verlagerung des Betriebspunkt-Kollektives in wirkungsgradgünstigere Motor-Kennfeldbereiche liegt. Die Grenzen des zu optimierenden Systems, die bei der bisherigen Entwicklungsarbeit eng um den Motor gezogen wurden, umfassen damit zwangsläufig den gesamten Antrieb einschließlich Rad.

Die Möglichkeiten, die angesprochene Betriebspunkt-Verlagerung zu verwirklichen, sind vielfältig: Neben dem schon mit heutigen Fahrzeugen praktizierbaren Betrieb in der jeweils größtmöglichen Gangstufe gibt es hierzu eine Reihe von meist getriebeseitigen Maßnahmen bei im wesentlichen unveränderter Motorauslegung, wie ins Lange übersetzter 5. Gang, Overdrive-Getriebe, bis hin zu stufenlos variablen Getrieben, die einen fast ausschließlichen Betrieb entlang der η_{opt} -Kurve ermöglichen sollen.

Ein weiterer, bisher vernachlässigter Weg bietet sich, insbesondere bei Ottomotoren, in einer gänzlich geänderten Motorauslegung in Verbindung mit angepaßten konventionellen Abtriebselementen an.

2. Eta-Grundkonzept

Aufgrund einer Reihe herkömmlicher Randbedingungen hat sich in der Vergangenheit bei den meisten Fahrzeugherstellern eine Auslegungsphilosophie entwickelt, die zum Ziel hat, für ein gegebenes Fahrzeug die gewünschten Fahrleistungs-werte mit dem kleinstmöglichen Hubraum darzustellen. Mit beeinflußt wurde diese Entwicklung durch die Hubraumsteuer.

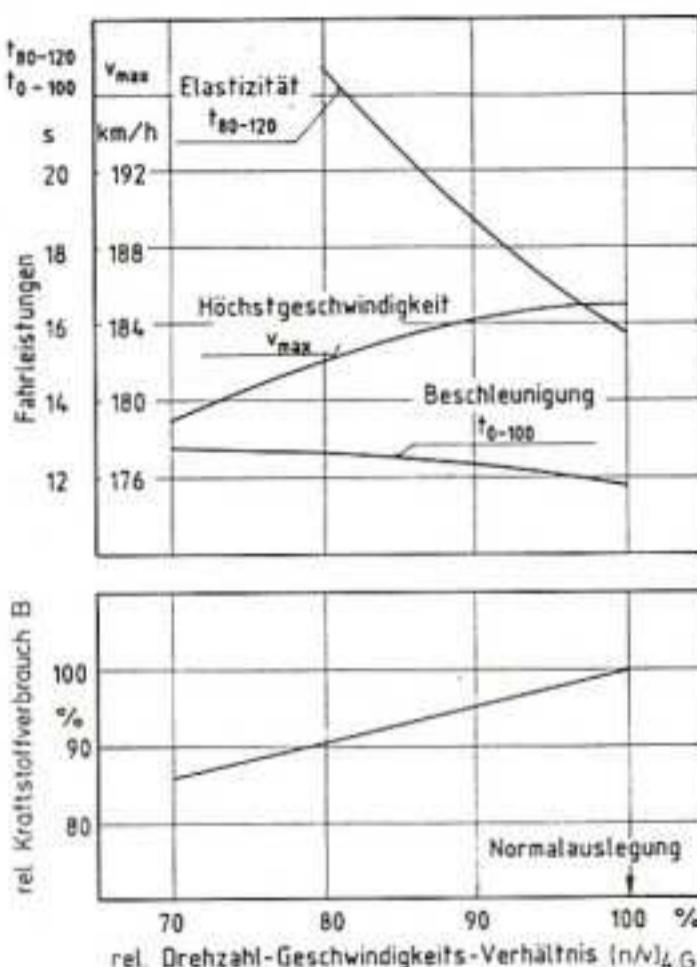


Bild 2. Einfluß der Gesamtübersetzung auf Kraftstoffverbrauch und Fahrleistungen

Fig. 2. Influence of the overall transmission ratio on fuel consumption and road performance

Dadurch entstanden Ottomotoren mit hoher spezifischer Nennleistung bei Drehzahlen um 6000 1/min, die durch entsprechende Auslegung der Gesamtübersetzung in Maximalgeschwindigkeit umgesetzt wurde. Es wäre sicher ein großer Zufall, wenn diese leistungs- bzw. fahrleistungsorientierte Antriebsauslegung gleichzeitig auch verbrauchsoptimal wäre.

2.1. Randbedingung: unveränderte Fahrleistungen

Die einfachste Methode, ohne großen Aufwand das Ziel der Betriebspunktverlagerung und damit der Verbrauchsverbesserung zu erreichen, ist eine Verlängerung der Gesamtübersetzung, z. B. durch eine entsprechend geänderte Übersetzung in der Antriebsachse. Bild 2 zeigt, daß damit einerseits beträchtliche Verbrauchsvorteile, andererseits aber auch deutliche Fahrleistungsnachteile eintreten. Insbesondere die Maximalbeschleunigung im direkten Gang aus niedrigen Drehzahlen, wie sie z. B. die Beschleunigungszeit von 80 auf 120 km/h ausdrückt, spricht sehr sensibel auf derartige Maßnahmen an.

Bei der Entwicklung des BMW Eta-Konzeptes wurde daher gefordert, daß die von der heutigen Antriebsauslegung gewohnten Fahrleistungen unverändert bleiben müssen, d. h. der über den Fahrwiderstand hinausgehende maximal reali-

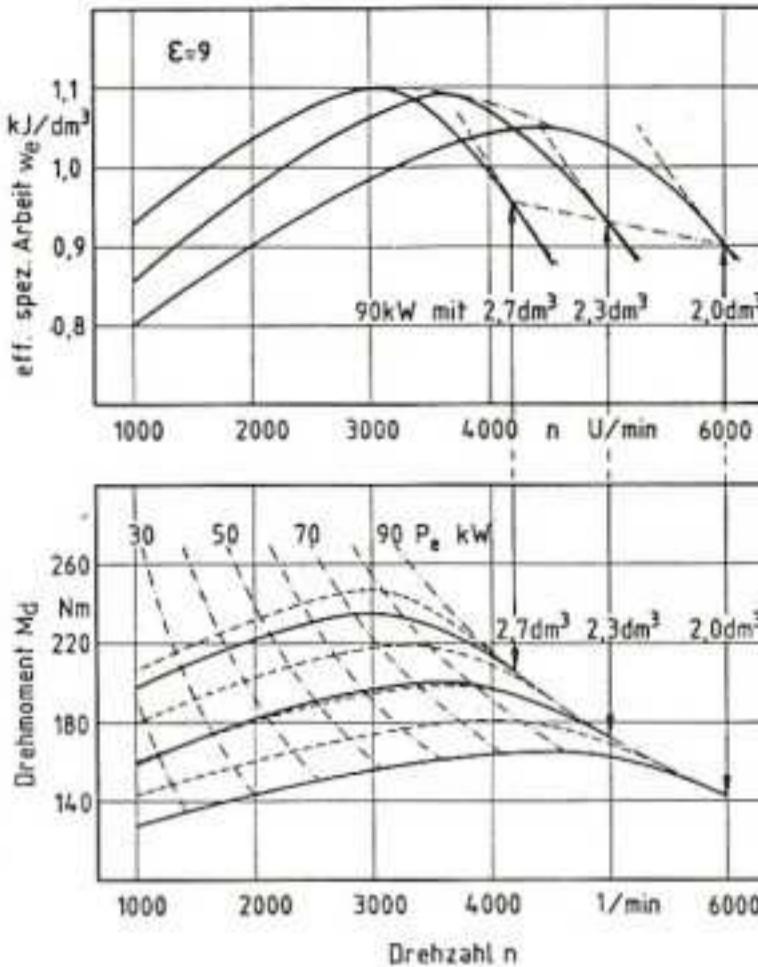


Bild 3. Alternative Vollastkurven für unveränderte Fahrleistungen

Fig. 3. Alternative full throttle characteristics for the same road performance

durch entsprechende Ladungswechselmaßnahmen zur Verfügung.

Bild 3, oben, zeigt beispielhaft, wie durch Hubraumerhöhung und Ladungswechselmaßnahmen Vollastcharakteristiken entstehen, die in das Raster der darunter gezeigten Sollkurven passen. Die Änderung der Charakteristik wird dabei im wesentlichen durch ein früheres Schließen des Einlaßventiles, durch eine Verlängerung der Saugrohre, durch eine Verkleinerung der Saugrohr- und Einlaßventil-Durchmesser sowie eine angepaßte Auspuff-Abstimmung erreicht.

Die Fragestellung lautet nun: mit welcher Kombination aus Hubraum und Grad der Drehmoment-„Kippung“, die in das Sollraster paßt, wird das beste Verbrauchsergebnis erzielt? Beim Einfluß auf den Verbrauch stehen sich im wesentlichen gegenüber der positive Einfluß der angestrebten Betriebspunktverlagerung von relativ hohen Drehzahlen und niedrigen Drehmomentwerten hin zu relativ niedrigen Drehzahlen und hohen Drehmomentwerten sowie der negative Einfluß der Hubraum-Erhöhung.

2.2. Wirkungsgrad-Analyse

Das Auffinden der verbrauchsoptimalen Variante ist nur auf experimentellem Wege möglich. Hierzu ist es sinnvoll, zunächst Verbrauchskennfelder der verschiedenen Motorvarianten auf dem Motorprüfstand aufzunehmen, die später zur Simulation beliebiger Fahrzyklen auf der Rechenanlage erforderlich sind. Bei dieser Gelegenheit bietet sich eine detaillierte Wirkungsgrad-Analyse mittels Druck-Indizieren und anschließender thermodynamischer Auswertung zum besseren Verständnis des später ermittelten integralen Ergebnisses an.

Bild 4 zeigt rechts für einen üblichen 2,0-l-Motor heutiger Auslegung den Verlauf der interessierenden Wirkungsgrade über der Drehzahl bei einer konstanten effektiven Leistung von 10 kW. Mit fallender Drehzahl (und steigendem Drehmoment) ist eine annähernd lineare Zunahme des effektiven Wirkungsgrades verbunden, die, wie die untere Darstellung zeigt, zum überwiegenden Teil aus einer Abnahme der Verluste durch Reibung und Antrieb der Nebenaggregate resultiert. Der restliche Gewinn wird durch abnehmende Ladungswechselverluste sowie durch einen geringfügig steigenden Hochdruck-Wirkungsgrad verursacht.

Die linke Darstellung in Bild 4 zeigt analog dazu die Analyse an einem 2,7-l-Motor mit der in Bild 3 dargestellten Charakteristik. Der Einfluß der Ladungswechselmaßnahmen auf den

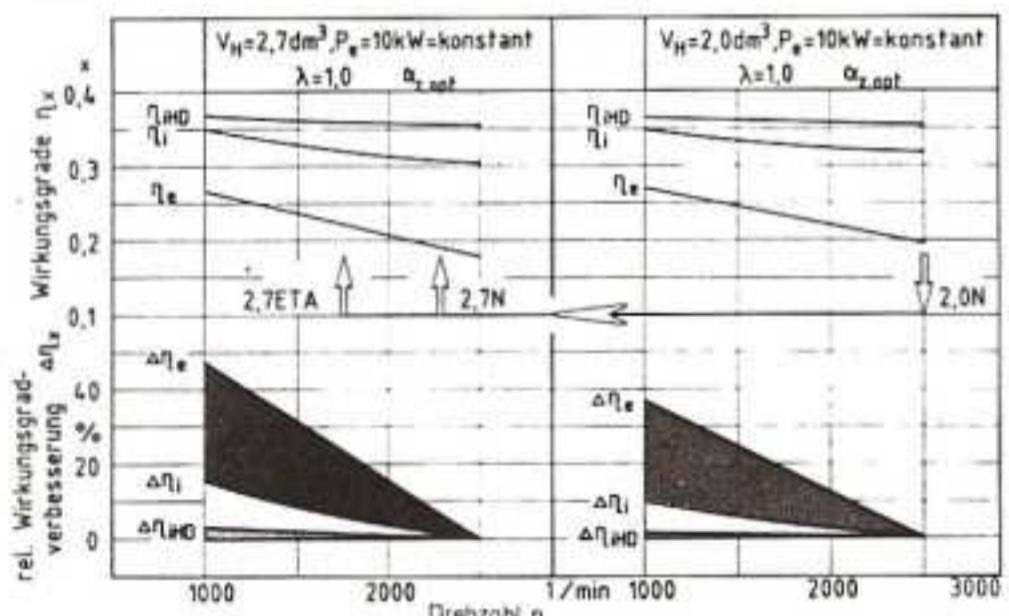


Bild 4. Wirkungsgradanalyse bei Betriebspunktverlagerung für Motoren mit unterschiedlichem Hubraum

Fig. 4. Analysis of efficiency for shifted operating point of engines with different displacement

indizierten und effektiven Wirkungsgrad liegt innerhalb der Meßgenauigkeit von ca. 1 % relativ. Die Wirkungsgradverläufe ähneln stark denen des 2,0-l-Motors. Bei etwa gleichem Hochdruck-Wirkungsgrad führen erwartungsgemäß die höheren Drosselverluste sowie die etwas höheren Reibungsverluste (größere Kolbenreibung) bei gleicher Drehzahl zu einem ungünstigeren effektiven Wirkungsgrad.

Doch schon durch die Drehzahlabsenkung, die entsteht, wenn ein normal ausgelegter 2,7-l-Motor seiner Endleistung entsprechend mit einer längeren Gesamtübersetzung kombiniert wird, schrumpft dieser Wirkungsgrad-Nachteil auf ca. 2 % zusammen. Wird die Drehzahl entsprechend dem Eta-Konzept, im vorliegenden Fall um 30 %, gesenkt, dann ergibt sich ein deutlicher η_e -Vorteil, im Fall des 10-kW-Betriebspunktvergleiches von 14 %.

Wie Bild 5 nochmals verdeutlicht, resultiert dieser Gewinn fast ausschließlich aus einer Erhöhung des mechanischen Wirkungsgrades. Bei einem annähernd unveränderten indizierten Wirkungsgrad wirkt sich die starke Drehzahlabsenkung durch das Eta-Konzept weitaus stärker positiv auf die Reibungsverluste aus, als die Hubraumerhöhung negativ.

2.3. Verbrauchsvorteil

Sowohl die Verbrauchssimulationsrechnungen als auch Messungen im identischen Fahrzeug mit den verschiedenen Motorvarianten ergeben, daß das beste Verbrauchsergebnis im gemischten Fahrbetrieb mit dem hubraumgrößten Motor, im vorliegenden Beispiel mit dem 2,7-l-Motor erzielt wird. Nach Bild 6 beträgt der resultierende Verbrauchsvorteil gegenüber einem 2,0-l-Ausgangsmotor 12 %.

Bild 7 stellt nochmals die unterschiedlichen Vollastcharakteristiken eines Motors und eines fahr- und nennleistungsgleichen Motors kleinen Hubraums mit konventioneller Auslegung gegenüber. Ein Vergleich der Wirkungsgrad-Kennfelder ergibt, daß der Vorteil weitgehend unabhängig vom Fahrzeug-Betriebspunkt ist.

2.4. Grenzen des BMW Eta-Konzeptes

Das BMW Eta-Konzept läßt sich, wie nachgewiesen wurde, in jeder Motorbaureihe erfolgreich realisieren. Seine technischen Grenzen liegen primär in der Hubraumbreite einer Baureihe. Ein Übergang zur nächstgrößeren Baureihe macht den Wirkungsgrad-Vorteil zumindest teilweise durch die dabei sprunghaft steigenden mechanischen Verluste infolge der

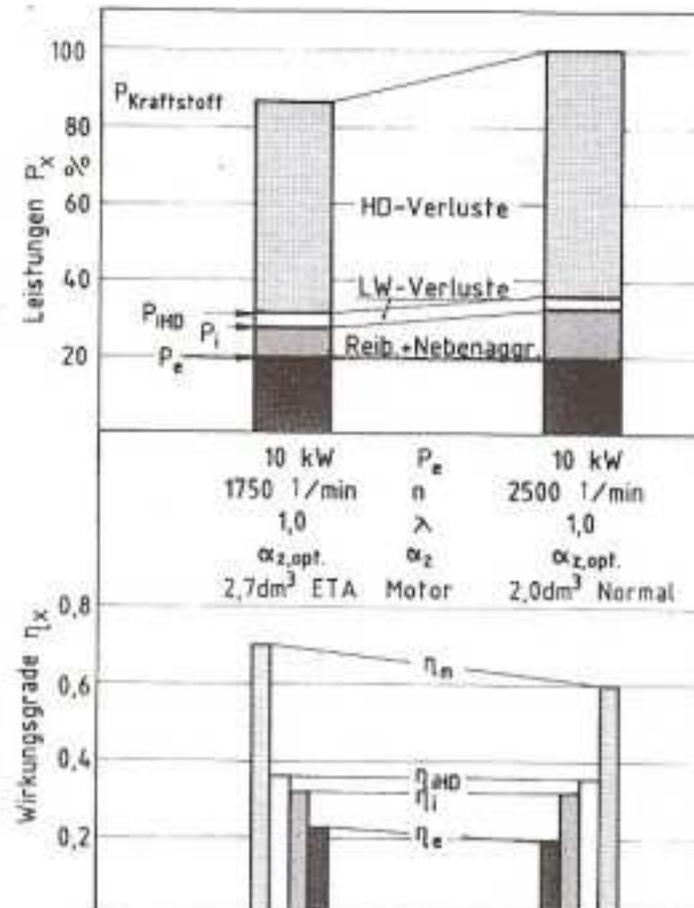


Bild 5. Vergleich der Leistungsaufteilung und Wirkungsgrade für einen Eta- und einen normal ausgelegten Motor im gleichen Betriebspunkt

Fig. 5. Comparison of power versus efficiency of an Eta engine and a conventional engine running at the same operating point

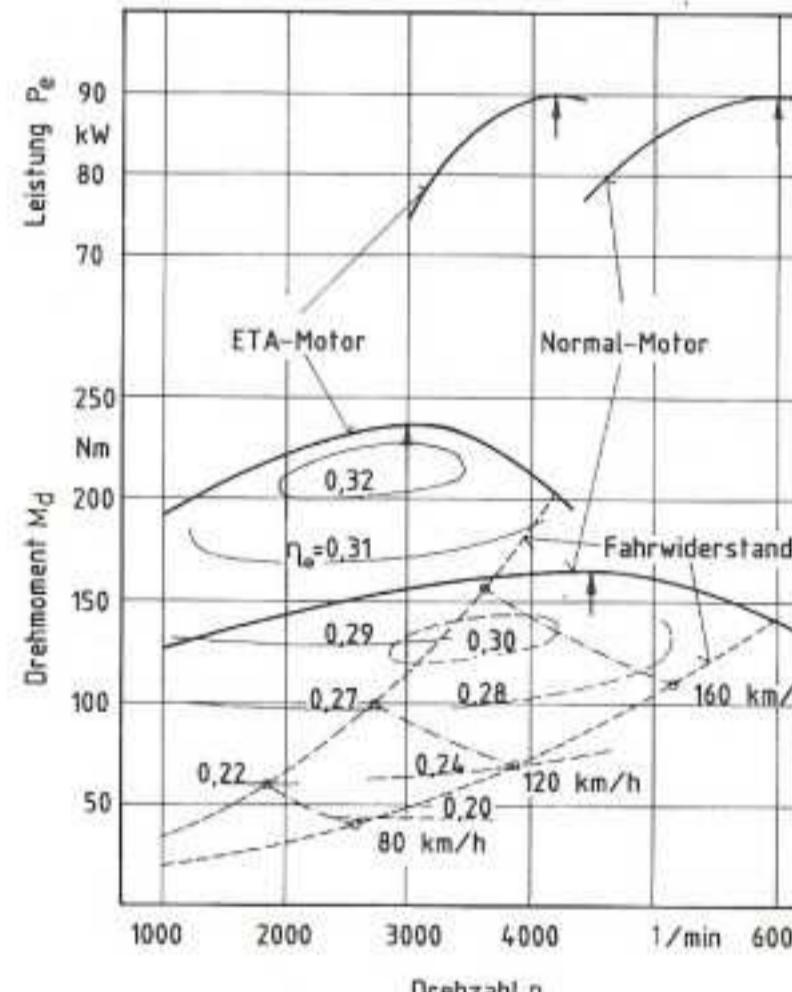


Bild 7. Vergleich von Vollastcharakteristik und Teillast-Wirkungsgrad bei Eta- und Normal-Auslegung

Fig. 7. Comparison of the full throttle characteristics and partial throttle efficiency of an Eta engine and a conventional engine

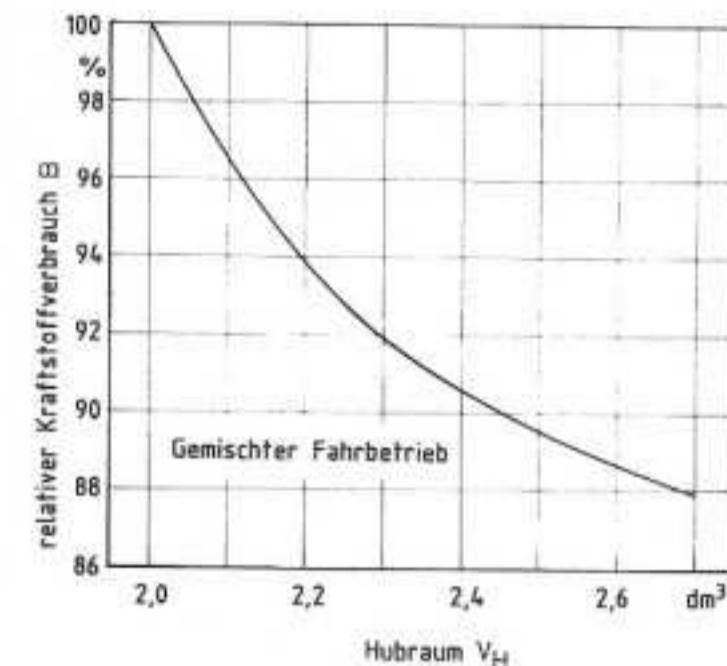


Bild 6. Verbrauchsgewinn durch Eta-Auslegung

Fig. 6. Reduction of fuel consumption by the Eta concept

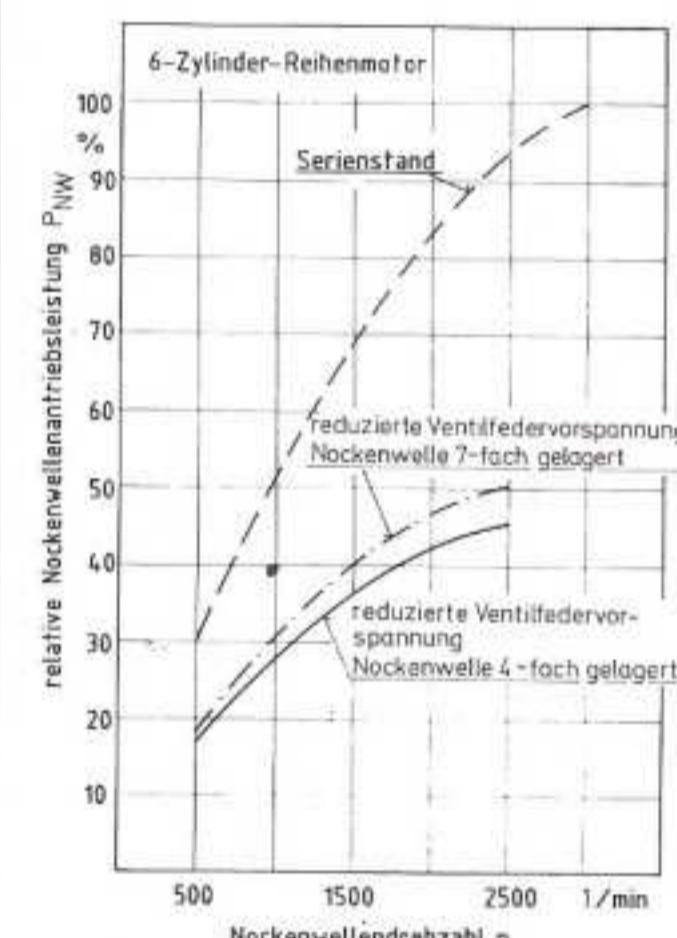


Bild 8. Abhängigkeit der Nockenwellenantreibsleistung von Lagerzahl und Ventilfedervorspannung

Fig. 8. Camshaft driving power as a function of the number of bearings and the tension of the valve springs

für den höheren Leistungsbereich ausgelegten Bauteile und Aggregate zunichte. Auch die Massen- und Bauvolumen-Nachteile bei einem Baureihen-Wechsel sind im allgemeinen nicht akzeptabel. Bei Vierzylindermotoren setzt außerdem die Laufkultur einer allzu starken Drehzahlabsenkung Grenzen, während Sechszylindermotoren selbst bei Drehzahlen unter 1000 1/min einwandfrei unter Vollast betrieben werden können.

Beim Personewagen-Dieselmotor läßt sich das Eta-Konzept über das schon heute aus verbrennungstechnischen Gründen vorhandene Maß hinaus kaum noch anwenden.

3. Folgemaßnahmen

Die Mechanik konventionell ausgelegter Personenwagen-Motoren ist für die eingangs angesprochene hohe Leistungsdichte und das hohe Drehzahlniveau dimensioniert und abgestimmt. Resultiert der Wirkungsgrad-Vorteil des Eta-Motors schon fast ausschließlich aus einer Verringerung der Reibungsverluste, so erlaubt die starke Absenkung des Drehzahlniveaus eine mit zusätzlichen Reibungsvorteilen verbundene Überarbeitung der gesamten Motormechanik.

Bild 8 zeigt beispielhaft, wie sich die Reibungsverluste im Zylinderkopf durch eine geringere Ventilfedervorspannung und den Entfall von 3 von ursprünglich 7 Nockenwellenlagern absenken lassen.

Weitere diesbezügliche Ansatzpunkte sind z. B. eine Verringerung der Kolbenringvorspannung oder eine Reduktion der Ölfördermenge bei gesunkenem Nockenwellen-Lagerzahl. Bei konsequenter Ausnutzung dieser Möglichkeiten lässt sich eine zusätzliche Verbrauchsverbesserung von etwa 3 % erzielen. In der Summe ergibt sich damit ein Verbrauchsvorteil bis ca. 15 %.

4. Sonstiges

4.1. Geräusch-Emission

Erwartungsgemäß macht sich beim BMW Eta-Motor die starke Drehzahlabsehung auch in einer deutlichen Ab-

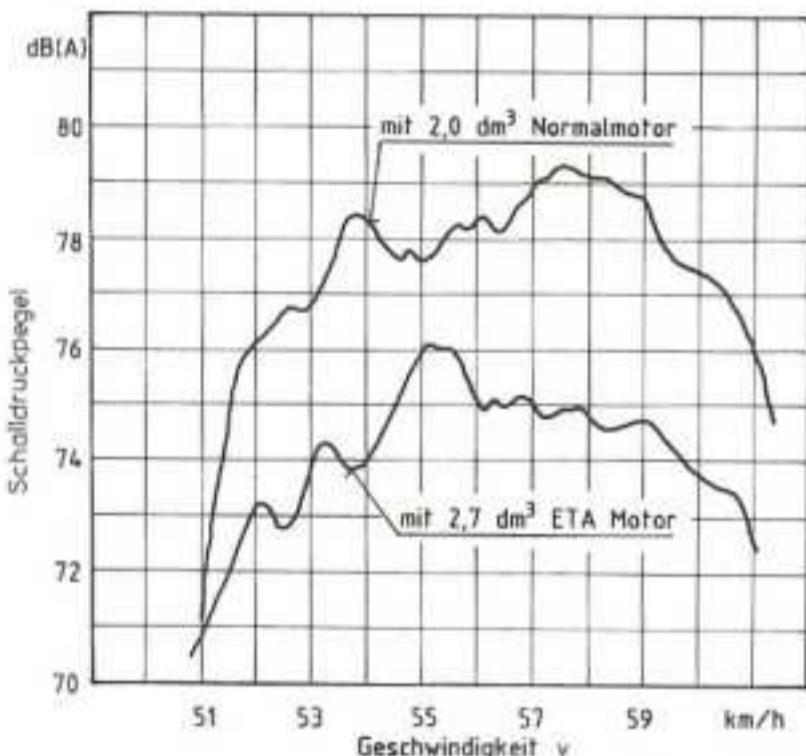


Bild 9. Vergleich der Außengeräusche nach ISO R 362 für das Fahrzeug mit Eta- und Normal-Motor

Fig. 9. Comparison of noise emission (ISO R 362) of the car with Eta engine and conventional engine

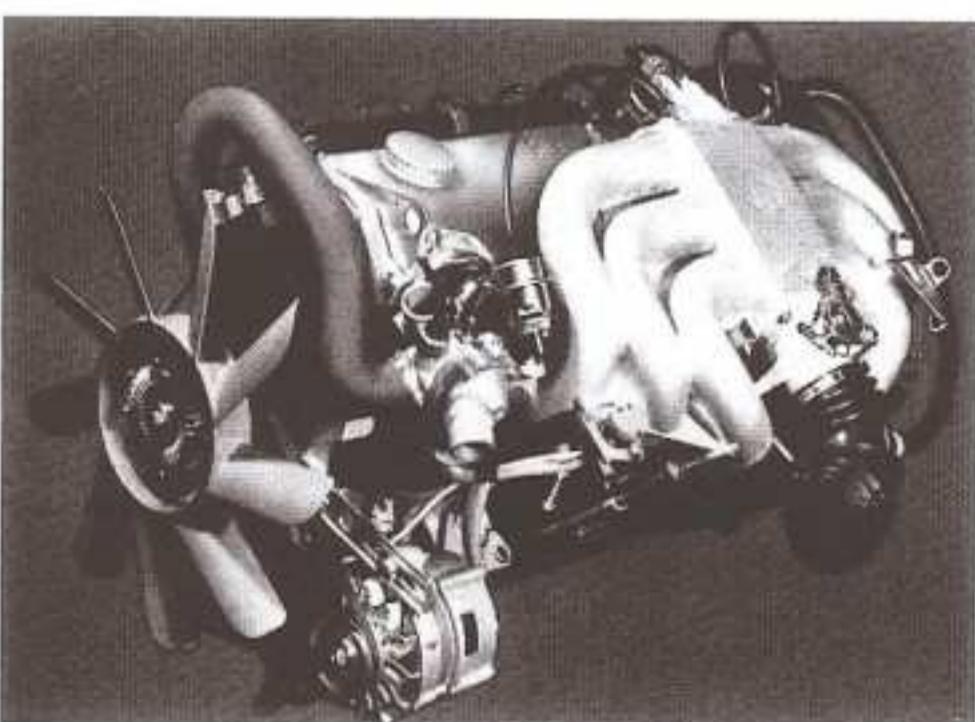


Bild 10. Der BMW Eta-Motor

Fig. 10. The BMW Eta engine

nahme der Geräuschemission bemerkbar. Vergleichsmessungen im identischen Fahrzeug ergaben bei der Messung nach der ISO-Vorbeifahrt eine Absenkung des Schalldruckpegels von 3,5 dB, Bild 9. Für die Fahrzeuginsassen stellt sich gleichzeitig durch das ebenfalls niedrigere Innengeräusch ein Komfortzuwachs ein.

4.2. Abgas-Emission

Die Emission der drei limitierten Abgaskomponenten wird durch den Übergang zum BMW Eta-Konzept nicht signifikant beeinflusst. Die CO-Konzentration, fast ausschließlich λ -abhängig, bleibt von der Betriebspunktverlagerung unbeeinflusst. Die HC-Konzentration im Endrohr ist außer von λ auch von der Abgastemperatur abhängig. Aufgrund des etwas höheren Hochdruck-Wirkungsgrades sowie der reduzierten indizierten Motorleistung liegen die Abgastemperaturen beim BMW Eta-Motor etwas tiefer als bei üblicher Auslegung, was zu einer leicht höheren HC-Konzentration führt. Dagegen bleiben die NO_x-Konzentrationen unverändert.

Unter Berücksichtigung des aufgrund des besseren Wirkungsgrades reduzierten Gasdurchsatzes emittiert der BMW Eta-Motor etwas geringere CO- und NO_x-Masse und etwa ebensoviel HC-Masse im Vergleich zu einem leistungsgleichen Motor konventioneller Auslegung.

4.3. Motormasse

Unter sonst gleichen Randbedingungen, d. h. gleicher bzw. gleichartiger peripherer Motorausrüstung, führt das Eta-Konzept, realisiert innerhalb derselben Motorbaureihe, zu einer um ca. 1...2 kg erhöhten Motormasse, verursacht hauptsächlich durch die längeren Saugrohre. Der daraus resultierende Einfluß auf Verbrauch und Fahrleistungen ist vernachlässigbar.

5. Zusammenfassung

Die systematische Optimierung des Wirkungsgrades heutiger Personenwagen-Antriebe darf vor einer erfolgversprechenden grundlegenden Änderung der Auslegungsphilosophie nicht halt machen. Das BMW Eta-Konzept ist in der Lage, die gewünschten Fahrleistungen mit deutlich abgesenktem Drehzahlniveau und dafür angehobenem Drehmomentniveau bis ca. 15 % verbrauchsgünstiger zu verwirklichen als mit herkömmlicher Antriebsauslegung. Gleichzeitig ist damit eine deutlich geringere Geräuschemission zu erzielen.

Voraussetzung für das BMW Eta-Konzept ist die Freigabe des Hubraums als zusätzlicher Optimierungsparameter. Selbst bei der heutigen Hubraumsteuer spricht eine Wirtschaftlichkeitsrechnung eindeutig für das BMW Eta-Konzept.

War in der Vergangenheit generell hohe spezifische Nennleistung ein wesentlicher Zielwert für die Motorentwicklung, so muß zukünftig dort, wo das Eta-Konzept sinnvoll ist, hohe spezifische Arbeit bei möglichst niedriger Drehzahl als Voraussetzung für eine verbrauchsoptimale Antriebsauslegung als Entwicklungsziel gelten. Dieses zu erreichen ist mindestens ebenso anspruchsvoll und nicht zu verwechseln mit dem einfacher Drosselmotoren.

Das BMW Eta-Konzept, erstmals 1978 anlässlich des BMW-Technik-Tages vorgestellt, ist inzwischen zur Serienreife entwickelt, Bild 10. Es wird in naher Zukunft in solchen Märkten einen festen Platz im BMW-Serienprogramm einnehmen, wo die Randbedingungen dies notwendig und sinnvoll erscheinen lassen. Über die länderspezifische Serienauslegung der ersten BMW Eta-Motoren wird zu gegebener Zeit an gleicher Stelle berichtet.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Reinhard Hofmann
Aicherstraße 3, 8080 Fürstenfeldbruck
Dipl.-Ing. Edgar Heck
Rofanstraße 29, 8000 München 82