

Die weiterentwickelten 16V-Zetec-E Motoren für den Ford Focus, Mondeo und Cougar

Von Martin Wölfle,
Thomas Grünert,
Andreas Kuske und
Glenn A. Warren

1992 erneuerte Ford sein Motorenprogramm mit den komplett neu entwickelten 16-Ventil-Zetec-E Ottomotoren mit Hubräumen von 1,6 bis 2,0 l. Nachfolgend setzten neue gesetzliche Anforderungen, gestiegene Kundenerwartungen und Erfahrungen aus der Serienproduktion Ziele zur Weiterentwicklung. Im Jahr 1998 bringt Ford eine verbesserte Generation der Zetec-E Motoren für den Focus, Mondeo und Cougar auf den Markt. Dieser Artikel stellt die Ergebnisse der Weiterentwicklung dar. Das Vierventil-Konzept beweist mit diesem Schritt sein Entwicklungspotential im Hinblick auf gestiegene Kundenerwartungen und legislative Anforderungen.

1 Rückblick

1992 erneuerte Ford einen wesentlichen Teil seiner Motorenpalette mit der Produktionseinführung der 16-Ventil-Motorenfamilie Zetec-E. Sie deckte einen Hubraumbereich von 1,6 bis 2,0 l ab und kam in Europa im Ford Fiesta, Escort und Mondeo sowie in Nordamerika im Ford Escort und Contour beziehungsweise dem Mercury Mystique zum Einsatz. Die Zetec-E Motoren werden heute weltweit an drei Produktionsstätten gefertigt.

1.1 Neuentwicklung zur Markteinführung

Randbedingungen der Neuentwicklung der Zetec-E Motorenfamilie waren [1]:

- Abdeckung eines Hubraums von 1,6 bis 2,0 l
- hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen
- zeitgemäß niedriger spezifischer Kraftstoffverbrauch
- gute Zuverlässigkeit, minimaler Serviceaufwand, gutes Startverhalten und ruhiger Motorlauf
- niedrige Rohemissionen zur Erreichung damaliger und zukünftiger Abgasgrenzwerte
- gutes Package für den Quereinbau vom Fiesta bis zum Mondeo
- Potential zur Weiterentwicklung im Hinblick auf zukünftige gesetzliche Anforderungen und Kundenwünsche.

Das Resultat war eine Familie von Vierzylinder-Reihenmotoren mit drei Hubräumen. Die wichtigsten geometrischen und konstruktiven Merkmale sind in den Spalten 1 bis 3 von **Tabelle 1** zusammengefaßt. Die Variation des Hubraums erfolgt über den Bohrungsdurchmesser. Mit gleichem Hub von 88,0 mm sind alle Varianten langhubig ausgelegt. Insbesondere der 1,6-l- und der 1,8-l-Motor weisen ein für niedrige spezifische Kraftstoffverbräuche günstiges Hub-/Bohrungsverhältnis auf. Der konstante Hub ermöglicht eine identische Kurbelwelle aus Kugelgraphitguß für alle Varianten. Ebenfalls für alle Hubraumvarianten identisch ist das geschmiedete Stahlpleuel mit einer Länge von 136,2 mm.

Durch den geringen Bohrungsabstand von 91,8 mm ist der Grauguß-Zylinderblock mit 395 mm Gesamtlänge sehr kompakt. Er ist im Closed Deck- und Short Skirt-Design ausgeführt. Die hubraumstärkste 2,0-l-Variante hat bei einer minimalen Stegbreite von 7 mm zwischen den Zylinderrohren siamesische Bohrungen.

Der Zylinderkopf aus Aluminium-Druckguß weist vier Ventile pro Zylinder mit zentraler Zündkerzenlage auf. Die Ventile werden mit einem Riementrieb über zwei Nockenwellen und hydraulische Tassenstößel betätigt. Normalerweise schließen bei Motoren mit Vierventiltechnik je zwei Ein- und Auslaßventile gleichzeitig. Zur Verringerung der Geräuschanregung sind im Zetec-E Motor

die Schließzeiten der Ventilpaare um 4° KW gegeneinander versetzt, **Tabelle 1**.

2 Verbesserungen des Motors

Felderfahrungen, verschärfte Emissionsgrenzwerte zusammen mit der steuerlichen Förderung emissionsarmer Automobile in Deutschland (D3, D4) und nicht zuletzt die Kundenerwartungen bildeten die Grundlage zur Festlegung der Ziele zur Weiterentwicklung des Motors. Im wesentlichen waren dies:

- Verbesserung der Motorlaufruhe
- Anpassung an zukünftige Abgasnormen und Erreichung der steuerlich geförderten D4-Emissionswerte bei gleichbleibend gutem spezifischen Kraftstoffverbrauch sowie Leistung und Drehmoment
- gezielte Verbesserung der Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit und somit Reduzierung der Betriebskosten
- Reduktion des Motorgewichts.

Im folgenden werden die wichtigsten Verbesserungen am Beispiel der 2,0-l-Variante im Detail vorgestellt. Die Bezeichnung „alt“ bezieht sich dabei auf den Serienstand bis Mitte 1998, mit „neu“ wird der ab Mitte 1998 einsetzende Stand bezeichnet. **Bild 1** zeigt eine Schnittdarstellung des verbesserten Motors in Längs- und Querrichtung.

2.1 Motorlaufruhe

Die Verbesserung der Motorlaufruhe bilde-

Vierzylinder-Ottomotoren von Ford

Tabelle 1: Grunddaten Zetec-E Motoren

Table 1: Geometric data for the Zetec-E engines

		Zetec-E Motoren im Ford Mondeo					
		Vor 1998			Ab 1998		
Hubraum	[cm ³]	1,6l	1,8l	2,0l	1,6l	1,8l	2,0l
Bohrung	[mm]	76,0	80,6	84,8	76,0	80,6	84,8
Hub	[mm]		88,0			88,0	
Hub/Bohrung	[]	1,16	1,09	1,04	1,16	1,09	1,04
Zylindermittenabstand	[mm]		91,8			91,8	
Pleuellänge	[mm]		136,2			140,7	
Verdichtungsverhältnis	[]	10,3:1	10,0:1	10,0:1	10,3:1	10,0:1	10,0:1
Ventiltrieb		4 V DOHC, hydraulische Tassenstößel			4 V DOHC, mechanische Tassenstößel, Kontrolle Ventilspiel: 150.000 km		
Ø Ein-/Auslaßventil	[mm]	26,0/24,5	32,0/28,0	32,0/28,0	27,0/24,5	33,0/28,0	33,0/28,0
Max. Ventilhub Einlaßventil	[mm]	7,7/7,9	8,6/8,9	9,3/9,4	8,3	9,1	9,4
Einlaß öffnet*	[°KW vor OT]	11	8	11	10	14	13
Einlaß schließt*	[°KW nach UT]	41/45	48/52	57/61	42	50	59
Max. Ventilhub Auslaßventil	[mm]	7,6/7,8	7,7/7,9	8,2/8,4	8,1	7,9	8,7
Auslaß öffnet*	[°KW vor UT]	55	44	55	50	44	55
Auslaß schließt*	[°KW nach OT]	1/5	8/12	5/9	6	8	9
Ventilüberschneidung	[°KW]	12/16	16/20	16/20	16	22	22
Stößeldurchmesser	[mm]		27,5			30	
Maximale Leistung	[kW bei /min]	66 bei 5250	85 bei 5750	96 bei 5700	70 bei 5250	85 bei 5750	96 bei 5600
Maximales Drehmoment	[Nm bei /min]	138 bei 3500	153 bei 3750	176 bei 5700	142 bei 3600	158 bei 3750	178 bei 4000
>90% des max. Drehmoments	[/min]	1750 bis 5000	1900 bis 5600	2100 bis 5700	2100 bis 5150	1750 bis 5650	2200 bis 5750
Min. spez. Kraftstoffverbrauch	[g/kWh bei /min, bar]	250 bei 2000, 7,6	235 bei 2500, 9,8	234 bei 2500, 9,7	247 bei 1750, 6,9	231 bei 2000, 9,4	231 bei 2000, 9,3
Abgasreinigung		3-Wege Katalysator			3-Wege Katalysator		
Kraftstoffverbrauch nach 93/116/EG (4-T, man. Getr.)	[l/100km]	7,6	7,8	8,1	7,5	7,7	8,0
Emissions-Level		EU-Stufe 2			EU-Stufe 2		
Steuerzeiten bei Beginn/Ende des Hauptnockens					D3	D4	D3

te den umfangreichsten Schwerpunkt der vorgestellten Entwicklungsarbeiten. Folgende Maßnahmen wurden untersucht:

- Verringerung der freien Massenkräfte
- Anhebung der ersten Eigenfrequenz des vorderen Motorlagers
- Anhebung der Biege-Eigenfrequenz des Motor-Getriebe-Verbundes.

2.1.1 Freie Massenkräfte

Zur Verringerung der translatorisch bewegten Massen ist bei gegebener Hubfunktion die Kolbenmasse und der translatorisch bewegte Anteil der Pleuelmasse zu verkleinern. Weiterhin sinken mit abnehmendem Schubstangenverhältnis die freien Massenkräfte zweiter Ordnung. Den Ausgangspunkt bildete daher die Forderung zur Gewichtsreduzierung der Kolben und Verlängerung des Pleuels. Eine Verlängerung des Pleuels ist bei unveränderter Brennraumgeometrie durch Verringerung der Kompressionshöhe des Kolbens auszugleichen. Dies wird begrenzt durch die konstruktiven Randbedingungen zur Darstellung des Feuersteiges und der Ringstege. Unter den gegebenen Randbedingungen war eine Verlängerung des Pleuels um 4,5 mm bei entsprechender Anpassung der Kompressionshöhe realisierbar.

Der resultierende Kolben ist eine komplette Neukonstruktion aus einer hochwarmfesten Aluminiumlegierung. Den Hauptbeitrag zur Gewichtsreduzierung leisten die Reduktion der Kompressionshöhe und die Verringerung des Nabenabstandes. Der geringere Nabenabstand zieht eine Verkürzung des Kolbenbolzens um 8,6 mm nach sich und ermöglicht aufgrund der verringerten Biegebeanspruchung zusätzlich eine Verringerung des Bolzendurchmessers um 1,6 mm

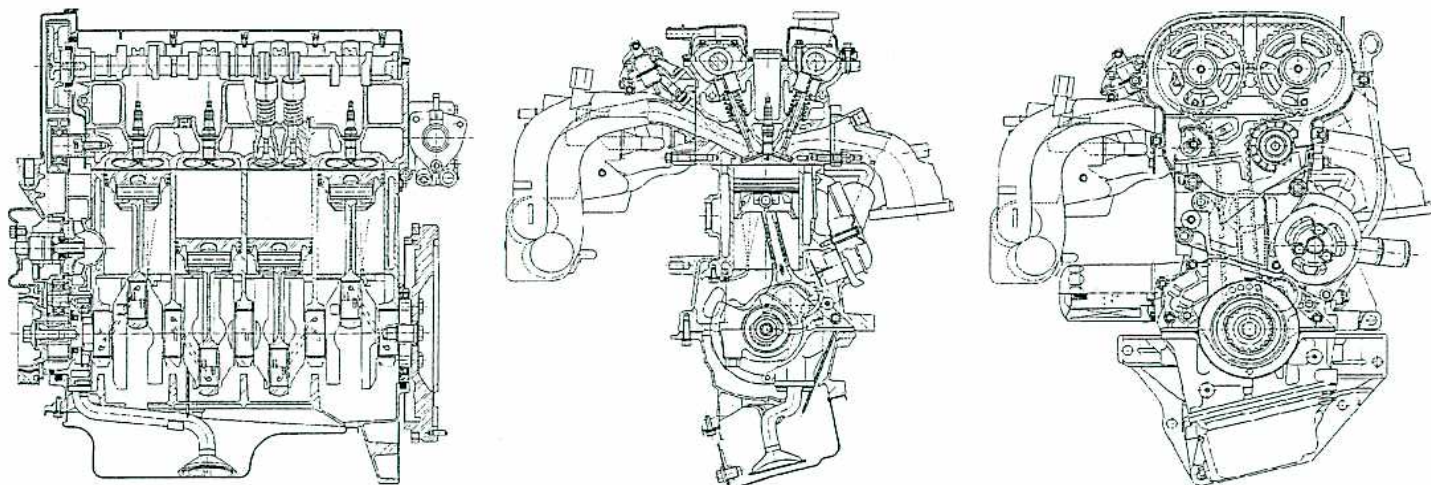


Bild 1: Längsschnitt, Querschnitt und Frontansicht des 2,0-l-Motors

Fig. 1: Longitudinal section, cross section and front view of the 2.0 l Zetec-E engine

Vierzylinder-Ottomotoren von Ford

auf 19,0 mm, **Tabelle 2**. Der Einzug der Bolzennaben bewirkt eine flexible Schaftanbindung, **Bild 2**. Dies führt zu sehr geringem Schafteinfall und damit zu niedrigem Kolbengeräuschniveau auch bei hohen Laufleistungen. Gleichzeitig wurden die bisher eingesetzten Regelstreifen eingespart.

Die Feuersteghöhe beträgt 5,5 mm. Die beschriebenen Designänderungen ergeben zusammen mit Hinterschnitten in Bolzenrichtung, **Bild 2**, insgesamt eine Gewichtsreduzierung des Kolbens um 7 %, **Tabelle 2**. Schon 1997 wurde die Beschichtung des Kolbenhemds mit Grafal im Siebdruck eingeführt. Sie erlaubt eine Verringerung des mittleren Kaltlaufspiels um 20 µm auf 10 µm und bewirkt eine signifikante Verbesserung des Kaltlaufgeräusches.

Das neue gestufte Pleuel, **Bild 3**, ermöglicht durch die verringerte Breite des Pleuelauges den Einzug der Kolbenbolzennaben. Zusammen mit der Verkleinerung des Pleulaugen-Durchmessers ergibt sich eine Verringerung der translatorisch bewegten Pleuelmasse von 26,5 %. Insgesamt wurde durch alle Maßnahmen eine Senkung der freien Massenkräfte von 18,0 % erreicht.

2.1.2 Vorderes Motorlager

Die Lagerung des Motor-Getriebe-Verbundes der Zetec-E Motoren im Fahrzeug erfolgt mit zwei Motorlagern (vorderes Lager am Motor, hinteres Lager am Getriebe) nahe der Drehmomentenachse des Verbundes und zwei Rollrestriktoren, **Bild 4**. Somit erzeugen Drehmomente um diese Achse im vorderen und hinteren Motorlager nahezu keine Anregungen der Karosserie.

Gutes Übertragungsverhalten der Motorlagerung wird unter anderem durch eine steife Auslegung der motorseitigen Anbindung mit dem Effekt einer hohen Eigenfrequenz erreicht. Daher wurde als zweite Maßnahme zur Laufruheoptimierung ein verbessertes Design der Motorhalterung des vorderen Motorlagers aus Aluminium-Druckguß mit direkter Montage an der Stirnseite des Motors realisiert, **Bilder 5 und 6**.

FE-Berechnungen ergaben für das neue Motorlager eine erste Eigenfrequenz von 419 Hz. Entsprechende Beschleunigungsmessungen an der Motorhalterung im ausgeführten Antriebsstrang lieferten mit 403 Hz gute Übereinstimmung und eine entscheidende Erhöhung im Vergleich zur deutlich geringeren ersten Eigenfrequenz des Vorgängerdesigns, **Bild 6**. Auch die Zielwerte für die maximalen Beschleunigungen im neuen Motorlager wurden unterschritten. Als Lager

Tabelle 2: Maßnahmen zur Reduzierung der Massenkräfte zweiter Ordnung, 2,0-l-Motor
Table 2: Measures to reduce 2nd order shaking forces, 2.0 l Zetec-E

Kolben		Pleuel	
Kompressionshöhe	-5,0 mm	Länge	+4,5 mm
Bolzenlänge	-8,6 mm	Breite oberes Auge	-9,1 mm
Bolzendurchmesser	-1,6 mm	Durchmesser oberes Auge	-1,6 mm
Kolbengewicht	-7,0 %	Oszillierender Massenanteil	-26,5 %
Bolzenlänge	-23,3 %	Gewicht	-19,0 %
Gesamtergebnis Massenkräfte zweiter Ordnung: -18 %			

Bild 2: Kolben des 2,0-l-Motors

Fig. 2: The pistons of the 2.0 l Zetec-E engine

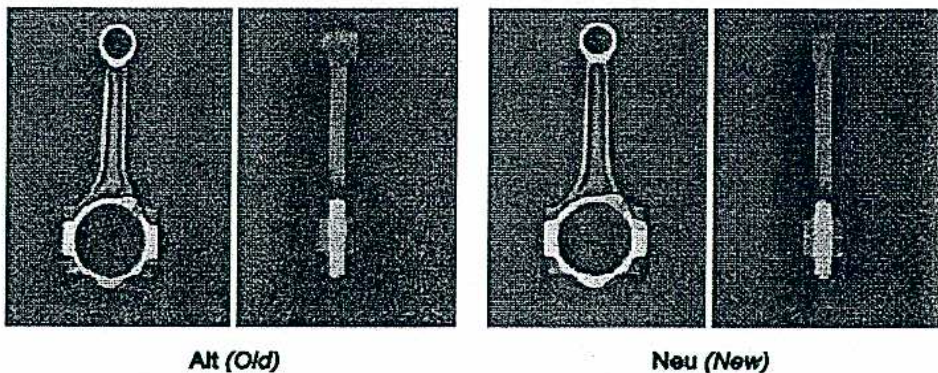
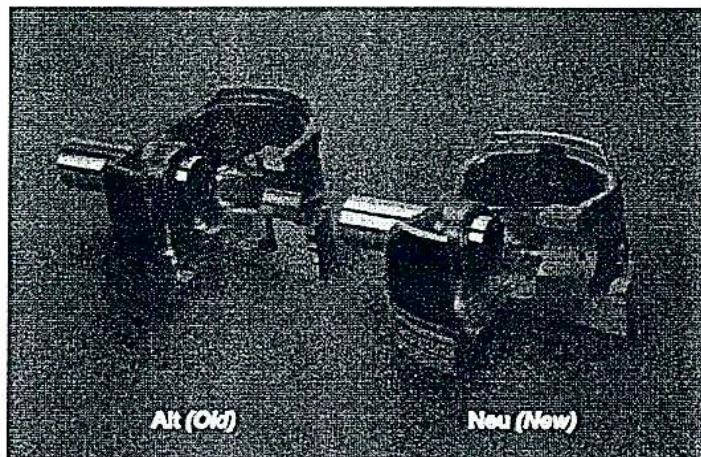


Bild 3: Pleuel des 2,0-l-Motors

Fig. 3: Con rod of the 2.0 l Zetec-E engine

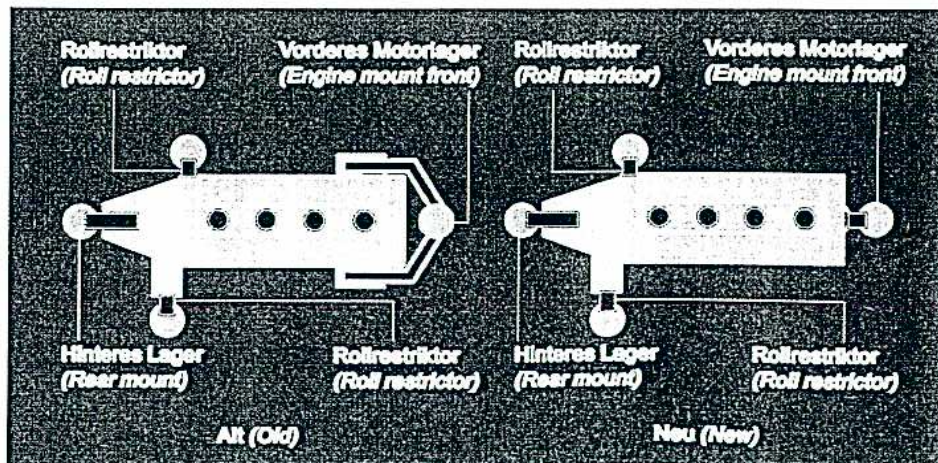


Bild 4: Schematische Darstellung der Lagerung Zetec-E Antriebsstrang

Fig. 4: Schematic representation of Zetec-E power train mounts

Vierzylinder-Ottomotoren von Ford

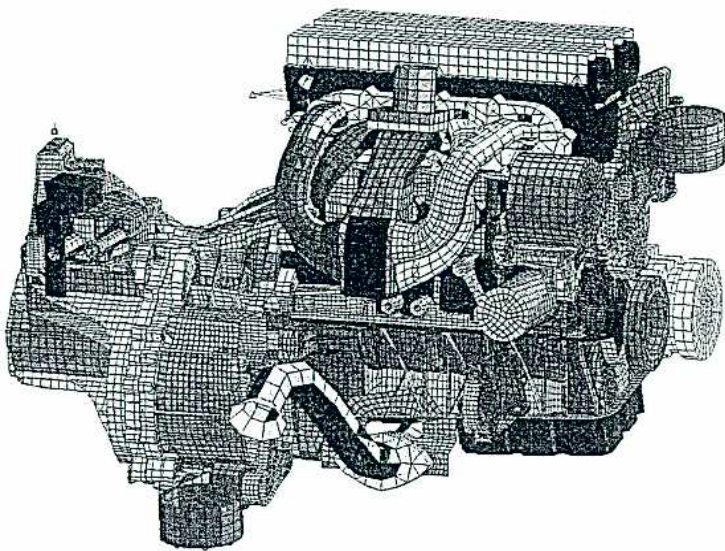


Bild 5: FE-Modell Antriebstrang Zetec-E

Fig. 5: FE Model, Zetec-E power train

kommt ein flüssigkeitsbedämpftes Gummilager zum Einsatz. Der Flüssigkeitsdämpfer ist mit sehr gutem Dämpfungsverhalten im Frequenzbereich unter 20 Hz übertragungsbestimmend.

2.1.3 Biegesteifigkeit des Motor-Getriebe-Verbundes

Die Biegesteifigkeit des Motor-Getriebe-Verbundes ist entscheidend von der Anbindung des Motors an das Getriebe abhängig. Die Ursprungsversion der Zetec-E Motorenfamilie hatte eine strukturierte Aluminium-Ölwanne, die mit einer entsprechenden Zweipunkt-Verschraubung eine stabile Verbindung zu den Getrieben gewährleistete. CAE-Analysen ergaben dennoch deutliches Verbesserungspotential. Sowohl rechnerisch als auch experimentell wurden unter anderem die im Bild 7 dargestellten Designalternativen untersucht.

Die Anbindung des Motors an das Getriebe über die verschiedenen Leiterrahmen-Varianten ist ähnlich. Ihre Steifigkeit wurde durch den sehr steif ausgeführten Flansch und eine vergrößerte Anzahl von jetzt sechs Verschraubungen erhöht. Daher ergibt sich kein signifikanter Unterschied der kritischen niedrigsten Biege-Eigenfrequenz des Motor-Getriebe-Verbundes für die drei Varianten. Beschleunigungsmessungen an Motor- und Getriebeaufhängung bestätigen dies.

Neben der Verbesserung des Biegeschwingsungsverhaltens beeinflussen die Konzepte auch die Luftschallabstrahlung über den unteren Teil des Motors. Im Vergleich zur Basisversion mit Aluminium-Ölwanne zeigen die Summenpegel des Luftschalls (über fünf Meßpositionen gemittelt) aller drei dargestellten Konzepte deutliche Vorteile bei Null- und Vollast. Ein Vergleich der neuen Konzepte untereinander ergibt bezüglich des abgestrahlten Luftschalls sowohl für Null- als auch für Vollast nur sehr geringe Differenzen von maximal 1,5 dB(A) in einem schmalen Drehzahlbereich. Bild 8.

Der waagrecht verschraubte Leiterrahmen versteift den Zylinderblock im unteren Bereich. Dies führt wie erwartet zu einer Verringerung der Oberflächengeschwindigkeiten des Zylinderblocks, erhöht jedoch die Schallabstrahlung über den Leiterrahmen selbst und die Ölwanne. In dieser Hinsicht ist der senkrecht verschraubte Leiterrahmen etwas günstiger. Er reduziert die Schallabstrahlung insgesamt: geringfügig.

Fertigungstechnisch weist der einfache Leiterrahmen ohne Verschraubungen die geringste Komplexität auf. Die querver-

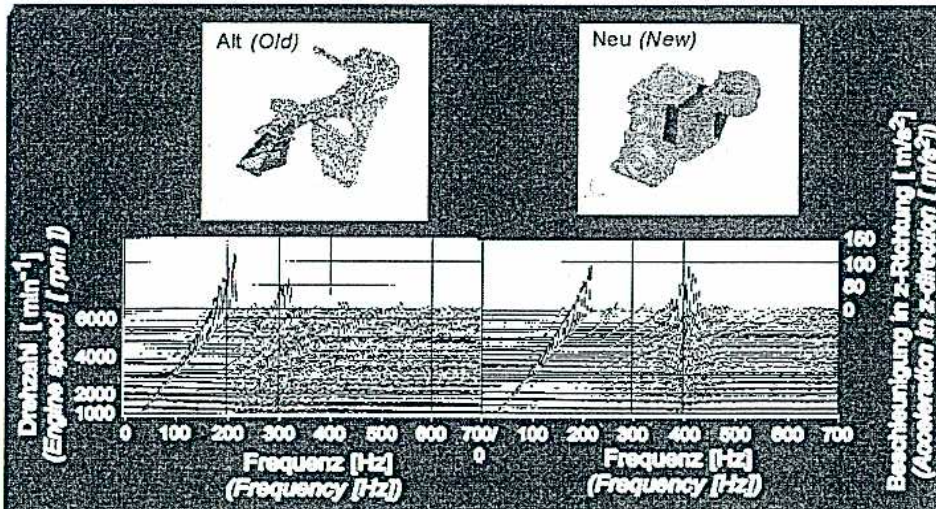


Bild 6: Design und Funktion des vorderen Motorlagers

Fig. 6: Design and function of Zetec-E front engine mount

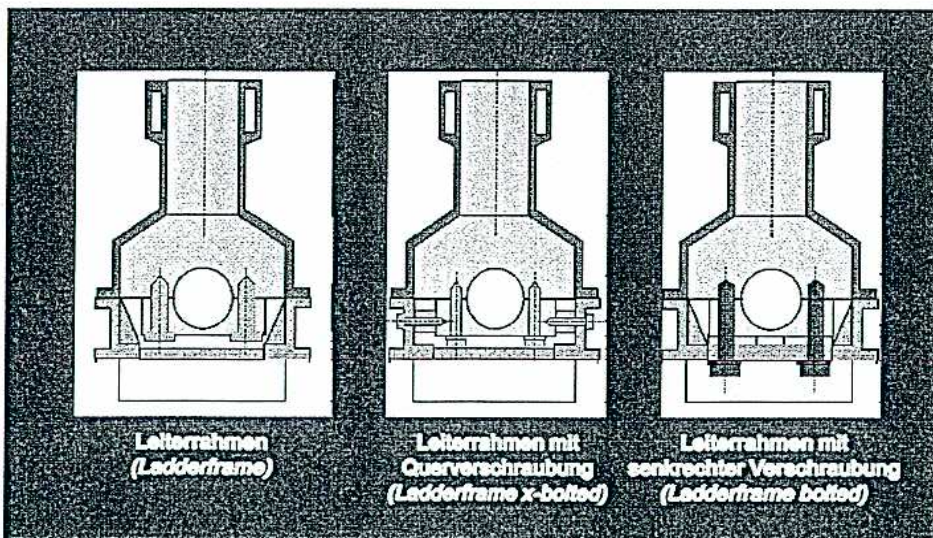


Bild 7: Designvarianten Motor unten

Fig. 7: Design variants, engine bottom end

Vierzylinder-Ottomotoren von Ford

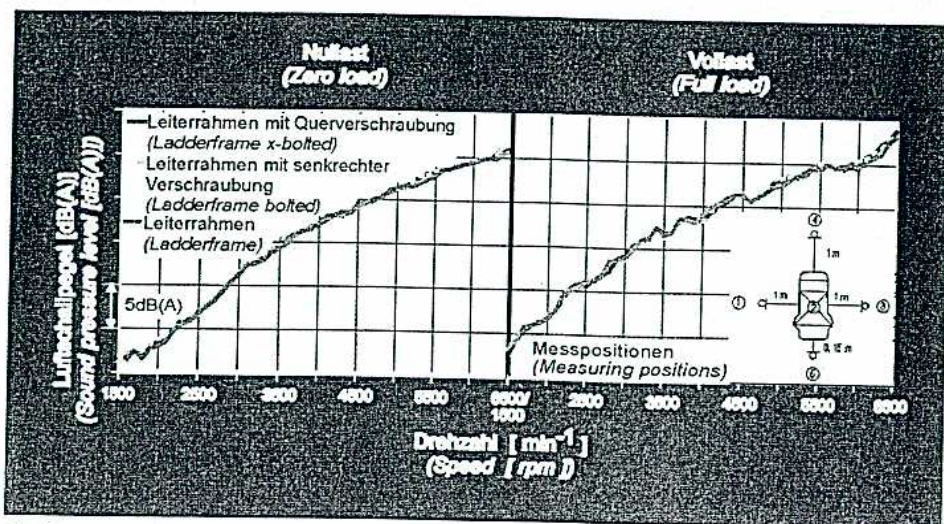


Bild 8: Gemittelter Luftschalldruckpegel bei Null- und Vollast des 2,0-l-Motors

Fig. 8: Overall engine noise at zero and full load, 2.0 l Zetec-E

schraubte Variante hat den entscheidenden Nachteil, daß die Verschraubungen zusätzliche mögliche Undichtigkeitsstellen darstellen. Bei der Montage der Variante mit senkrechter Verschraubung ergibt sich eine ungünstige Toleranzlage. Zwischen den zu verschraubenden Flächen der Hauptlager-schrauben und des Leiterraumens wären zur Montage Distanzscheiben notwendig, was eine Großserienfertigung praktisch ausschließt. Somit fiel letztendlich die Entscheidung zur Einführung in die Serie für den einfachen Leiterraum ohne zusätzliche Verschraubung, Bild 9.

Er besteht aus Aluminium-Druckguß und ist in Längs- und Querrichtung durch optimierte Rippen versteift. Die Rippendicke wurde gegenüber der Ölwanne von 3,75 mm auf 4 mm abgesenkt, was zum geringen Gewicht von 5,1 kg beiträgt. Durch entspre-

chende Ausführung der unteren Querversteifungen kann das bisher notwendige Blech gegen Ölverschäumung weggelassen werden. Zusätzlich stellt der Leiterraum Butzen zur direkten Montage des Klimakompressors und der Katalysatorbefestigung auf der Ansaugseite des Motors zur Verfügung. Abgasseitig wird der Halter des Abgaskrümmers und die Lagerung der Zwischenwelle des Frontantriebs direkt am Leiterraum montiert.

Das Dichtungskonzept Zylinderblock-Ölwanne bestand bei Serieneinführung 1992 aus einer Nut in der Ölwanne mit manuell eingelegter Silikondichtung. Das neue Dichtungskonzept mit jetzt flachem Leiterraum-Flansch und Metall-Träger-Dichtung vermeidet dies. Zwischen Leiterraum und Ölwanne kommt bei Raumtemperatur aushärtendes Silikon als Dichtung zum Einsatz.

Im Motorenwerk wird es von einem Roboter appliziert. Im Reparaturfall wird Silikon von Hand aus Kartuschen aufgetragen. Die in der Summe geringfügige Gewichtserhöhung für das neue Konzept Leiterraum-Stahlölwanne im Vergleich zur Aluminium-Ölwanne wird wegen der dargestellten Vorteile in Kauf genommen. Mit dem letztendlich umgesetzten neuen Gesamtkonzept wurde eine um 31 % erhöhte erste Biege-eigenfrequenz erreicht.

Zusammenfassend zeigt Bild 10 die für den Kunden direkt wahrnehmbare, beeindruckende Verringerung des Innengeräusches am Beispiel des Ford Mondeo. Das Innengeräusch wurde über fast den gesamten Drehzahlbereich herabgesetzt, die höchsten Verbesserungen betragen bis zu 8 dB(B).

2.2 Anpassung an zukünftige Abgasnormen, Kraftstoffverbrauch und Drehmoment/Leistung

2.2.1 Zukünftige Abgasnormen

Die Zetec-E Motoren weisen aufgrund ihrer günstigen Brennraumgestaltung in Vierventiltechnik mit zentraler Zündkerzenlage, kurzen Flammenwegen und geringem Feuerstegbereich (siehe Kapitel 2.1) bereits günstige HC-Rohemissionen auf. Zusätzlich sind bei dem verbesserten Motor die Totvolumina im Bereich der oberen Kolbenringe nochmals reduziert, Tabelle 3. Dies wird erreicht durch die Ausführung des 1. Kompressionsrings (Rechteck-Ring) mit Innenradius und die reduzierte Bauhöhe des 2. Kompressionsrings.

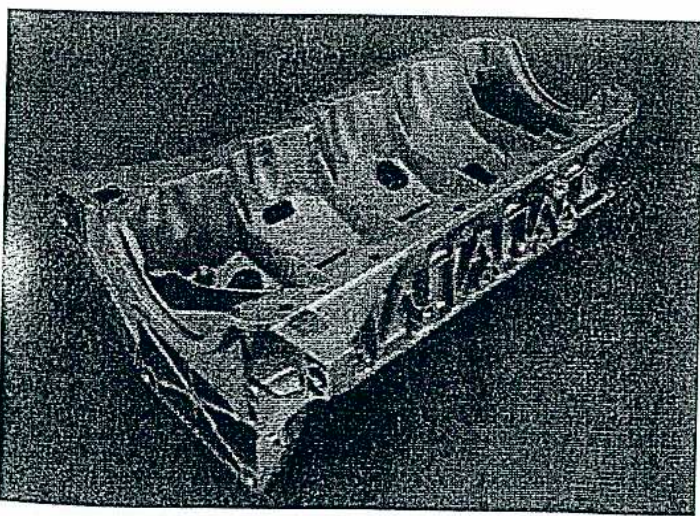
Zum Erreichen der Emissionsgrenzwerte entsprechend EU-Stufe 2 und D3/D4 beziehungsweise EU-Stufe 3 ist eine weitere Absenkung der NO_x-Rohemissionen sowie der Kohlenwasserstoff-Emissionen in der ersten Phase des Emissionszyklus notwendig. Folgende Maßnahmen wurden hierzu untersucht:

- motornahe Anordnung des Katalysators
- externe Abgasrückführung
- Sekundärlufteinblasung ins Abgassystem.

Für den komplett neuen Ford Focus wird eine motornahe Katalysator-Anordnung realisiert. Damit unterschreitet der Focus mit beiden Hubraumvarianten der Zetec-E Motorenfamilie (1,8 und 2,0 l) ohne externe Abgasrückführung und sonstige Zusatzmaßnahmen die Grenzwerte für EU-Stufe 2 und die D4-Grenzwerte. Dies hat einen direkten Kostenvorteil für den Kunden zur Folge.

Bild 9: Leiterraum Zetec-E

Fig. 9: Ladder frame, Zetec-E



Vierzylinder-Ottomotoren von Ford

Beim Ford Mondeo ist die Position des Katalysators unter dem Fahrzeug durch das Vorgängermodell bestimmt. Hierdurch und durch die unterschiedlichen Motor-Betriebspunkte im europäischen Emissionszyklus kommt für den 2,0-l-Motor eine externe Abgasrückführung zur Erreichung der Grenzwerte entsprechend EU-Stufe 2 beziehungsweise D3 zur Anwendung. Der 1,8-l-Motor erreicht Stufe 2/D4 ohne externe Abgasrückführung. Sekundärluft-Einblasung kommt in keiner Variante zum Einsatz.

2.2.2 Kraftstoffverbrauch und Drehmoment/Leistung

Die jetzt einsetzenden Maßnahmen zur Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs sind:

- Reduktion der Tangentialkraft des Ölabstreifrings um 11%
- Freigabe von Leichtlauf-Motoröl (SAE 5W-30, ACEA A1/B1-96, ILSAC GF2) als Erstbefüllung und für den Service
- Grafal-Beschichtung der Kolben (siehe Kapitel 2.1.1)
- Ersatz der Hydrostößel durch mechanische Tassenstößel, verringerte Ventilfederkräfte
- Verringerung der Ölpumpenkapazität.

Basierend auf den Erfahrungen aus der erfolgreichen Entwicklung der Zetec-SE Motorenfamilie (ab 1996 im Ford Fiesta und ab Herbst 1998 auch im Ford Focus in Serie), die einen nahezu wartungsfreien mechanischen Ventiltrieb aufweist, fiel die Entscheidung zur Entwicklung mechanischer Tassenstößel auch für die bisher mit Hydrostößeln ausgestatteten Zetec-E Motoren. Dies ermöglicht eine Verkleinerung der bewegten Masse des Ventiltriebs und in der Folge eine Senkung der Federkräfte [2] sowie die Anpassung der Ölpumpenkapazität an den geringeren Bedarf. So konnte der Rotordurchmesser der direkt auf der Kurbelwelle montierten Ölpumpe von 89 mm auf 80 mm, die Rotordicke von 10 mm auf 9,25 mm verkleinert werden. Dies resultiert in einem um 32 % abgesenkten Ölvolu-menstrom. Die Geometrie der neuen Ventildfedern (Ein- und Auslaß) wurde bienenkorb-förmig gestaltet und ermöglicht eine geringe Masse von Feder und Federteller. Die bewegte Masse im Ventiltrieb wurde um 7 % (Auslaß 1,6-l-Motor) bis 16 % (Einlaß 2,0-l-Motor) reduziert. In der Folge konnte die Federvorspannkraft F1 um 15 % und die maximale Federkraft F2 um 30 % gesenkt werden. Der Rampenbereich der Nockenkontur wurde zur Anpassung an die mechanischen Stößel bei gleicher Steigung verlängert. Die Toleranzen im mechanischen Ventilspiel genügen für ein zeitversetztes Schließen der Ventile (nominal gleiche Schließzeiten, Tabelle 1). Die erzielte Verringerung der Ventiltriebsreibung zeigt **Bild 11**.

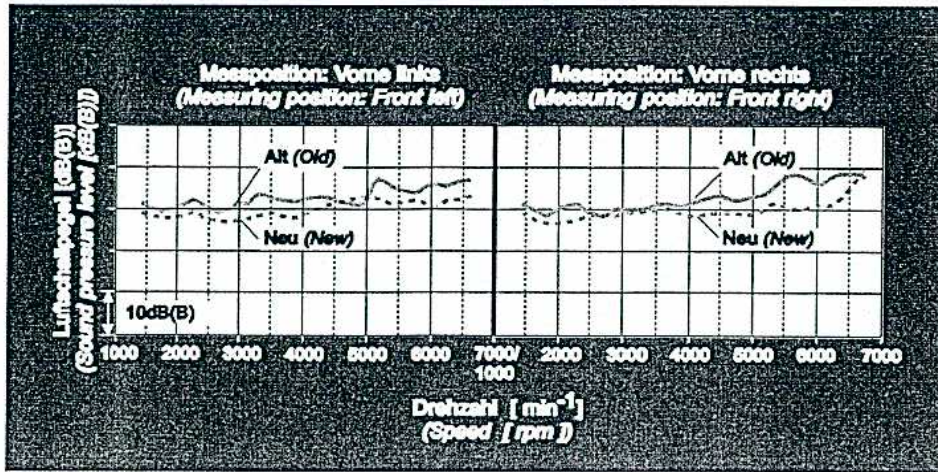


Bild 10: Innengeräusch 2,0-l-Zetec-E im Ford Mondeo

Fig. 10: Interior noise for 2.0 l Zetec-E in Ford Mondeo

Tabelle 3: Vergleich Kolbenring-Design

Table 3: Comparison of piston ring design

		Kolbenringdesign Zetec-E 2,0 l	
		Vor 1998	Ab 1998
1. Ring	Bezeichnung	Rechteckring, ballig	Rechteckring, ballig, innen gerundet
	Höhe [mm]	1,2	1,2
	Material	Stahl, nitriert	Stahl, nitriert, chemisch passiviert
2. Ring	Bezeichnung	Nasenring	Nasenring
	Höhe [mm]	1,75	1,5
	Material	Hochlegierter Eisenguß, phosphatiert	Legierter Eisenguß, phosphatiert
3. Ring	Bezeichnung	dreiteiliger Öl-abstreifring, VF-Design	dreiteiliger Öl-abstreifring, Hastings-Design
	Höhe [mm]	3,0	2,5
	Material	Stahl	Stahl

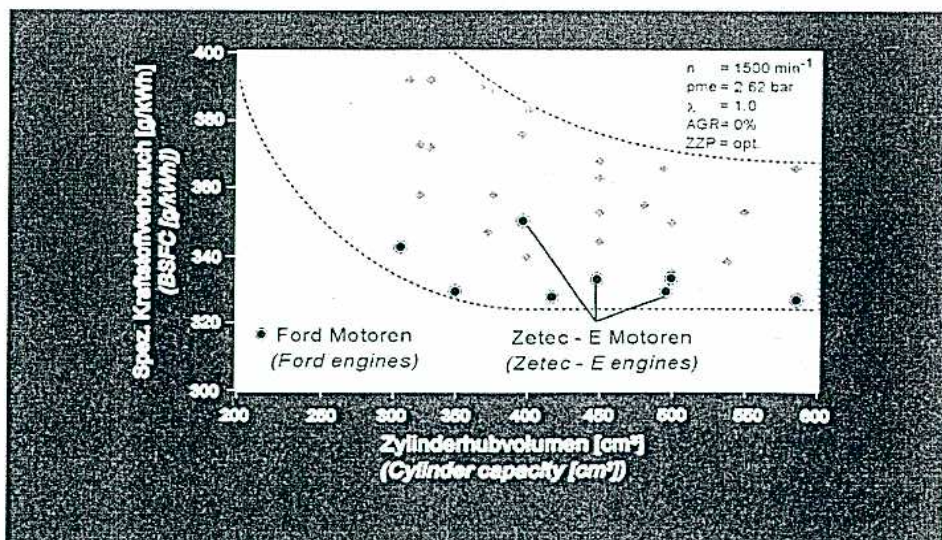


Bild 11: Ventiltriebsreibung des 1,6-l-Motors

Fig. 11: Valve train friction, 1.6 l Zetec-E

Gleichzeitig ist der Einfluß des neu freigegebenen Leichtlauföls auf die Ventiltriebsreibung dargestellt. Die geringeren Ventildruckkräfte senken die Normalkraft im Ventiltrieb und führen gleichzeitig zu einer Verringerung des Mischreibungsanteils bei niedrigen Drehzahlen. Die speziellen Additive des Leichtlauföls sind ebenfalls im Bereich der Mischreibung bei niedrigen Drehzahlen besonders wirksam.

Einen entscheidenden Einfluß auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch übt das Brennverfahren aus. Es wurde im Rahmen der Verbesserung übernommen. Die einlaßgenerierte Tumble-Strömung erzielt bei ihrem Zerfall kurz vor der Zündung eine Turbulenzerhöhung und bewirkt so eine wirkungsgradgünstige Verkürzung der Verbrennung [3] auch bei den für den Alltagsstadtbetrieb typischen niedrigen Drehzahlen und Teillast. Bild 12 verdeutlicht, daß der Kraftstoffverbrauch der Zetec-E Motoren in einem solchen Betriebspunkt (1 500/min, 2,62 bar) äußerst wettbewerbsfähig ist und im unteren Bereich des Streubandes vergleichbarer Mitbewerber liegt. Maximales Drehmoment und Nennleistung der verbesserten Motoren wurden, wie in den Entwicklungszielen gefordert, bewußt konstant gehalten beziehungsweise leicht erhöht, Tabelle 1. Bei allen Varianten konnte das Drehmomentband mit Drehmoment über 90 % des Nenn Drehmoments geringfügig verbreitert und so der Verlauf harmonischer gestaltet werden. Der Kraftstoffverbrauch im neuen europäischen Fahrzyklus wurde für alle Motorvarianten leicht gesenkt und ist für ein Automobil der Größe des Ford Mondeo als gut einzustufen.

2.3 Qualität, Wartungsfreiheit und Motorgewicht

Seit Beginn der Serienproduktion im Jahr 1992 wurden etwa 4 000 000 Zetec-E Motoren für den Einsatz in Europa und Nordamerika gebaut. Aus dieser hohen Stückzahl entstand eine Datenbasis, die zum Teil die Ansatzpunkte zur Verbesserung der bestehenden Motoren hinsichtlich Qualität, Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit lieferte.

2.3.1 Qualität und Zuverlässigkeit

Unter dem Gesichtspunkt weiter verbesserter Qualität und erhöhter Zuverlässigkeit wurden folgende Systeme betrachtet:

- Dichtung des hinteren Radialwellendichtringhalters gegen den Zylinderblock
- Dichtung der Ölpumpe gegen den Zylinderblock
- Zylinderkopfdichtung
- Ventile.

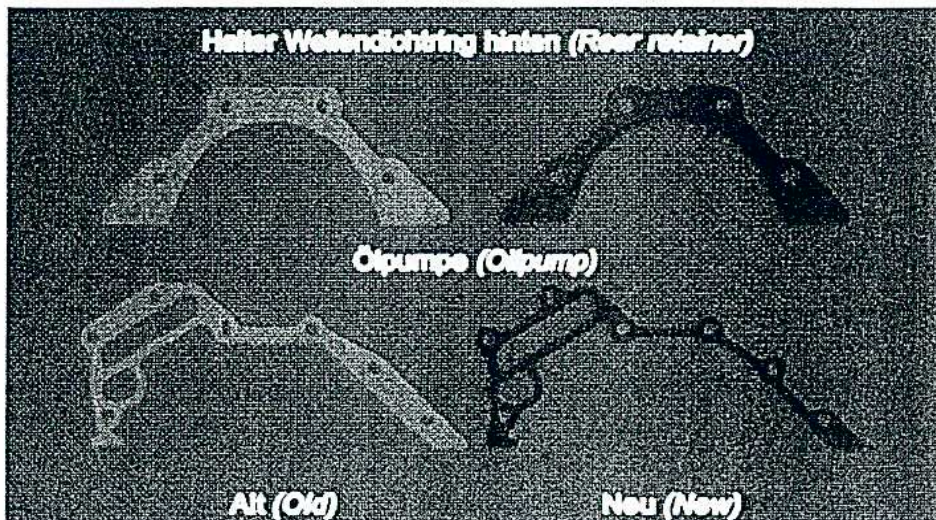


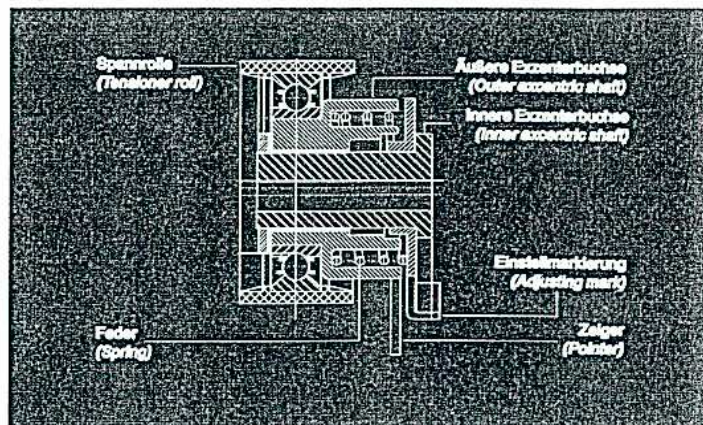
Bild 12: Spezifischer Kraftstoffverbrauch

Fig. 12: Specific fuel consumption

Weichstoffdichtungen zeigen ein Setzverhalten über der Motorlebensdauer. Dies kann zu einem Drehmomentverlust der Befestigungsschrauben führen, wodurch Undichtigkeiten möglich werden. Daher wurde sowohl für den Halter des hinteren Wellendichtrings als auch für die Ölpumpendichtung anstelle der bisher eingesetzten Weichstoffdichtung eine Vollsicken-Metallträgerdichtung mit Elastomer-Beschichtung entwickelt, Bild 13. Diese bietet über die gesamte Motorlebensdauer volle Sicherheit gegen Undichtigkeit. Zur Verbesserung der Temperaturbeständigkeit und Robustheit gegenüber Öl-Wasser-Leckagen wurde die 1,6 mm dicke Weichstoff-Zylinderkopfdichtung durch eine 1,0 mm dicke Vierlagen-Stahldichtung ersetzt. Brennraumseitig erfolgt die Abdichtung durch Vollsicken, während die Dichtungsbereiche um die Öl- und Wasserkanäle als Halbsicken ausgeführt sind. Durch das kleinere Totvolumen im Brennraum setzt die neue Zylinderkopfdichtung die HC-Rohemissionen der Motoren weiter herab.

Bild 13: Dichtungen der Ölpumpe und des hinteren Wellendichtringhalters

Fig. 13: Gaskets, oil pump and rear retainer



Durch die neuen Dreirillen-Ventilkeile als Ersatz für die bisher verwendeten Einrillenkeile sinkt die Drehzahl, ab der die Ventile sicher in Rotation versetzt werden, um 22 %. Damit treten derartige Betriebsbedingungen im Kundenbetrieb erheblich öfter auf, was eine verbesserte Dichtigkeit und Standfestigkeit der Ventilsitze zur Folge hat. Die zur Verringerung des Kaltlaufspiels zur Verbesserung des Kaltlauf-Geräusches eingeführte Grafal-Beschichtung der Pleuellensätze, Bild 2, bewirkt gleichzeitig eine Verbesserung der Notlaufeigenschaften des Pleuellensatz-Zylinder-Tribo-Systems und erhöht damit seine Robustheit.

2.3.2 Wartungsfreiheit, Motorgewicht

Verlängerte Wartungsintervalle sind für den Kunden durch weniger häufige Werkstattaufenthalte und in der Regel geringere Betriebskosten direkt spürbar. Daher gehen 1998 für die Zetec-E Motoren in Serie:

- verlängertes Wechselintervall der Zündkerzen (von bisher 45 000 km auf 60 000 km)

- automatischer Zahnriemenspanner ersetzt die bisherige, feste Spannrolle.

Das auf 60 000 km verlängerte Wechselintervall für die Zündkerzen wird durch die beidseitige Beschichtung der Zündkerzenelektroden mit Platin und eine hohe Qualität des keramischen Isolators ermöglicht.

Bisher wies der Zahnriementrieb der Nockenwelle eine im Produktionswerk eingestellte feste Spannrolle im Leertrum auf. Dies erfordert einen hohen Aufwand zur Einstellung der korrekten Riemen Spannung (im Werk und im Service) und kann Längenänderungen des Zahnriemens aufgrund der unterschiedlichen Motor- und Riemen- dehnung bei Erwärmung sowie durch das Setzverhalten des Riemens und die Riemenabnutzung nicht kompensieren.

Der neue automatische Zahnriemenspanner, **Bild 14**, besteht aus zwei gegeneinander mit einer Feder verspannten Exzenterbuchsen.

Die korrekte Einstellung des Spanners auf die Mittelstellung seines Arbeitsbereiches erfolgt, indem man zwei jeweils auf den Exzenterbuchsen angebrachte Markierungen zur Deckung bringt. In dieser ohne weitere Prüfungen einzustellenden Position ist einerseits gewährleistet, daß der Spanner erhöhte Riemen Spannungen durch eine Drehung aus dem Leerturm heraus und damit mit größerem Vorspannweg der Feder kompensieren kann.

Andererseits gleicht er ebenfalls auftretende Riemenlängungen (Setzen und Abnutzung des Zahnriemens) mittels Hineindre- hen der federbelasteten äußeren Exzenter- rolle und somit auch der auf dieser sitzenden Spannrolle in den Leerturm aus (ver- ringerter Vorspannweg der Feder).

Im Rahmen der Änderungen für den ver- besserten Motor wurde das Motorgewicht nochmals signifikant reduziert. Im Vergleich zum ursprünglich eingeführten Design wurden je nach Hubraumvariante Gewichtsre- duzierungen zwischen 7 und 8 % erreicht.

3 Zusammenfassung

1998 startet Ford die Serienproduktion der verbesserten Zetec-E Motoren. Diese sind den gestiegenen gesetzlichen Anforderun- gen angepaßt und weisen weitere wesent- liche Verbesserungen im Bereich der Lauf- ruhe bei gleichbleibend gutem Kraftstoffver- brauch und Drehmoment-/Leistungsver-

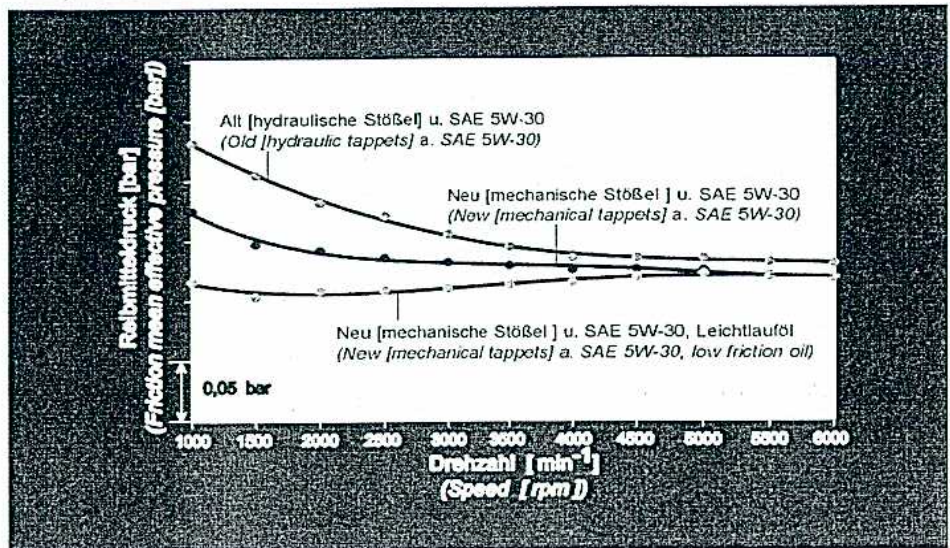


Bild 14: Schnittdarstellung des automatischen Zahnriemenspanners im Ventiltrieb

Fig. 14: Automatic timing belt tensioner (cross section)

halten auf. Auch Qualität, Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit wurden weiter ge- steigert.

Die neue Generation der Zetec-E Motoren ist die konsequente Weiterentwicklung der mittleren Vierzylinder-Motorenfamilie von Ford. Sie wird im komplett neu entwickel- ten Ford Focus, im Ford Mondeo und im Cou- gar zum Einsatz kommen und einen ent- scheidenden Beitrag zur Kundenzufrieden- heit leisten.

Literaturhinweise

- [1] Brandstetter, W.; Finch, J.; Hirsch, W.: Die neue DOHC-16-Ventil-Motorenbaureihe von Ford. Teil 1: Projektierung und Grundmotor. In: MTZ 53 (1992) Nr. 2, S. 52-59
- [2] Menne, R. J.; Heuser, G.: Leichtbau am Beispiel des Ford Zetec-SE Motors. Vortrag im Haus der Tech- nik in Essen, Tagung: Leichtbau im Antriebstrang, 14.-15.11.1995
- [3] Brandstetter, W.; Morris, G.; Myers, D.: Die neue DOHC-16-Ventil-Motorenbaureihe von Ford. Teil 2: Entwicklung, Abstimmung und Motorman- agement, MTZ 53 (1992) Nr. 3, S. 107-112

Die Verfasser

Dr.-Ing. Martin Wölfle ist Koordinator Motorenent- wicklung der Ford Werke AG.



Dipl.-Ing. Thomas Grünert ist technischer Spezialist Strukturanalyse der Ford Werke AG.



Dipl.-Ing. Andreas Kuske ist Entwicklungsingenieur der Ford Werke AG.



Glenn A. Warren ist Chefindingenieur Motoren- entwicklung der Ford Werke AG.



You can read the English version of this article in **MTZ worldwide**.

Subscription Hotline: ++49 / 6 11 / 78 78 151