

Auto & Motor
TECHNIEK

© **WWW.AMT.NL** - Dé internetsite voor de Automotive Professional

Meer kracht bij lager verbruik

Sparen met pit

In de Ford Focus en de C-Max treffen we een nieuw type motor aan: de 1.6 liter Ti-VCT. Die letters staan voor 'Twin independent Variable Cam Timing' ofwel dubbele onafhankelijk variabele nokkenastijden. Hij levert de prestaties van een grotere 1.8 motor, maar gaat spaarzamer met brandstof om.

We kennen het principe dat 'down-sizing' heet: een kleinere motor moet dezelfde prestaties leveren als een groter exemplaar en daarbij een lager verbruik scoren. Ford stond voor de uitdaging de 1.6 liter viercilinder zodanig te modificeren, dat deze de prestaties van een 1.8 ging leveren. Om dit te realiseren heeft Ford alle technische mogelijkheden grondig bekeken. Is directe benzine-inspuiting een optie? Nadeel is dat het draaien op een arm mengsel een gecompliceerd, kwetsbaar en kostbaar uitlaatsysteem vereist. Deze techniek leverde weliswaar het gunstigste verbruik op, maar werd door Ford te duur bevonden.

De volgende optie die Ford bekeek is een tweetraps klepbedieningssysteem, dus met een 'tamme' en een 'wilde' nok. Daarmee valt er over de Europese rijcyclus brandstof te besparen, maar in de dagelijkse rijpraktijk nauwelijks.

Ook EGR kwam in de verbruiksstudie voorbij. Uitwendige uitlaatgasrecirculatie (EGR) zorgt voor een lager verbruik omdat de gasklep verder open moet staan om hetzelfde vermogen te bereiken. Daardoor zijn de pompverliezen kleiner, anders gezegd: de motor werkt niet als een grote vacuümpomp. Dat door de EGR ook de NO_x-vorming afneemt is mooi meegenomen, maar er staan zoveel nadelen tegenover dat er opnieuw nee tegen is gezegd. Hoe regel je de hoeveelheid uitlaatgas, wat voor problemen treden erop met detoneren, is er koeling nodig en

De motor gezien vanaf de uitlaatzijde die bij het schutbord ligt. Om het motorkoppel bij lage toerentallen te verhogen, is er een 4-in-2-in-1 uitlaatsysteem toegepast. De twee geregelde driewegkatalysatoren zijn elk voorzien van een breedband lambdasensor aan de voorkant en een sprongsensor aan de achterkant.

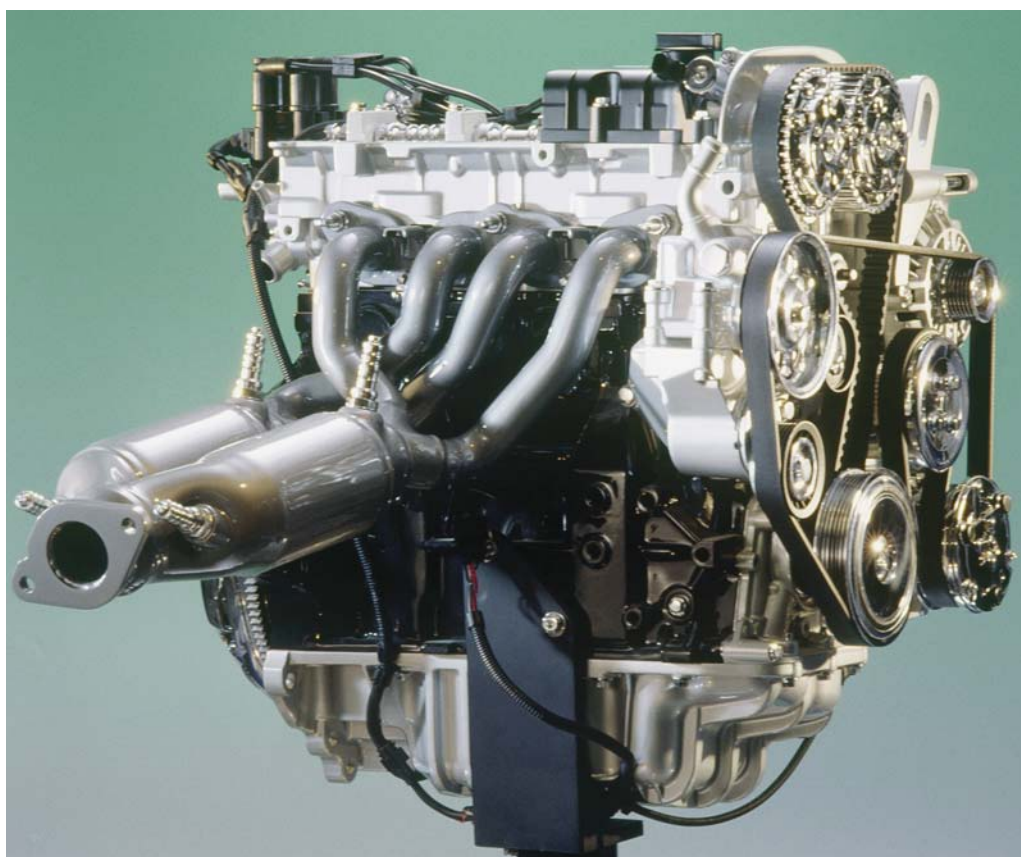
meer van die vragen doemen op. Een belangrijk 'tegenargument' is de toegenomen kans op vervuiling van het inlaatsysteem, met name van de inlaatklepschotels.

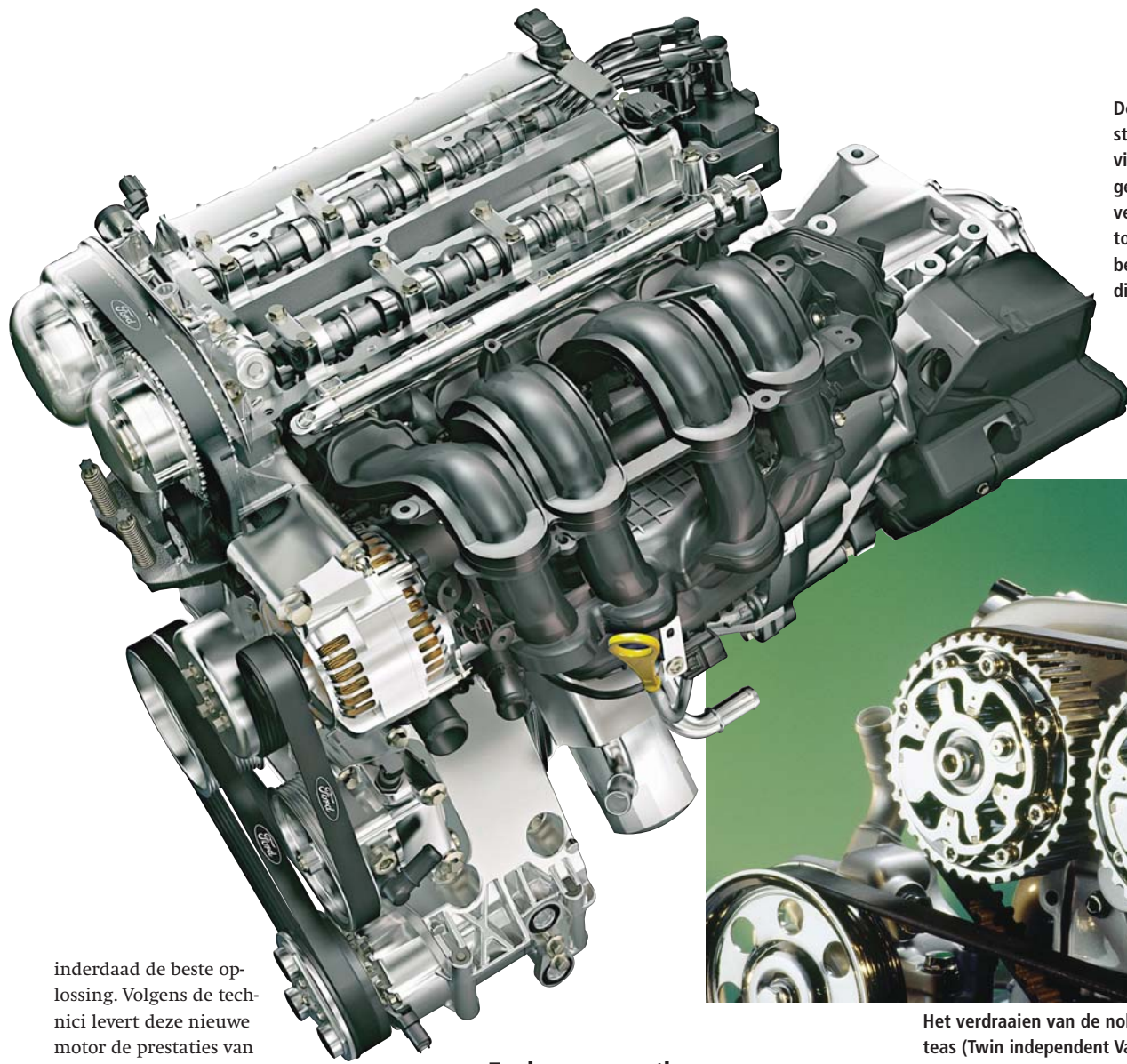
Twee maal verstelbaar

Blijft over: nokkenas(sen) verstellen om de lengte-as. Dit door Alfa-Romeo uitgewerkte systeem kan naar keuze alléén bij de inlaatnokkenas worden toegepast, alléén bij de uitlaatkokkenas

of bij allebei. Ford koos voor het laatste, want alleen een continue verstelling van beide nokkenassen leverde de volgende pluspunten op: meer weggrikkoppel bij 1500 t/min, meer koppel in het middentoereengebied, een hoger maximum koppel, meer top vermogen plus een lager verbruik en lagere emissies.

Zo goed als zeker is het verstellen van beide nokkenassen een weg die juist bij deze motoren, waar het kosten/baten plaatje zo sterk speelt,





De motor heeft een kunststof inlaatspruitstuk met vier korte inlaatbuizen van gelijke lengte. Er is een verdelerloze ontsteking toegepast met twee dubbele bobines, dus geen directe ontsteking.



inderdaad de beste oplossing. Volgens de technici levert deze nieuwe motor de prestaties van een 1.8 liter met een bijzonder laag verbruik en een aangenaam rijgedrag. Dat de motor in productie niet veel duurder uitvalt dan de standaard 1.6 liter komt ook omdat er zeer veel onderdelen gelijk zijn en op dezelfde bewerkingsmachines gemaakt worden.

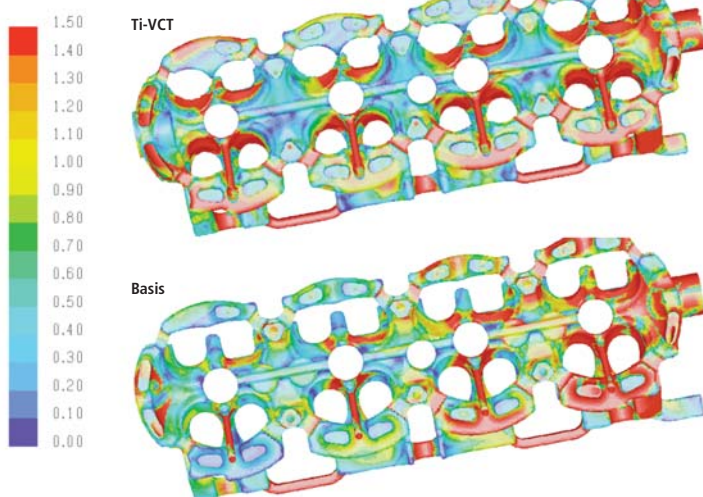
Zoeken naar optimum

Goed, twee continu verstelbare nokkenassen. Maar hoe krijg je nu een optimaal resultaat als het gaat om een zo laag mogelijk verbruik? Eerste optie: het hogedrukproces verbeteren door de compressieverhouding te verhogen.

Het verdraaien van de nokkenassen om hun lengtes (Twin independent Variable Cam Timing, vandaar Ti-VCT) bleek tal van voordelen op te leveren. De verstellers zijn van het vleugeltype met een blokkeerpen die de nokkenassen vastzet als er onvoldoende oliedruk is.

Optimale warmteafvoer

Stroomsnelheid (m/s)



Foto's/Tekeningen: Ford

Er is veel aandacht geschonken aan een gelijke temperatuurverdeling in de cilinderkop. Hoe hoger de watersnelheid, hoe beter de warmteafvoer. Let vooral op de uitlaatklepzittingen die nu veel beter gekoeld worden.

Bij de standaard motor bedraagt die 11,0:1. Het heeft weinig zin hoger te gaan omdat er dan detoneren optreedt. Dat betekent het verlaten van het ontstekingstijdstip, dus weg voordeel. Draaien op de nieuwste 'hightech' benzine is voor zo'n motor geen optie. De meeste klanten vinden RON 95 (Euro)Super al duur genoeg.

Je kan ook een arm mengsel gebruiken om een laag verbruik te halen, maar daar heeft zo langzamerhand geen autofabrikant meer zin in. De meeste automobilisten zijn ook niet gelukkig met armmengselmotoren, of ze nu indirect of direct ingespoten zijn.

Tweede optie is de mechanische verliezen te beperken. Daar moet je die van alle hulpapparatuur bij optellen. Stroomverdeler, oliepompe, waterpompe, dynamo, aircocompressor, stuurbevestigingspompe en wat er nog meer is, vraagt allemaal aandrijfvermogen. Er viel op dit punt echter niets te verbeteren aan de standaard 1.6

MOTOREN

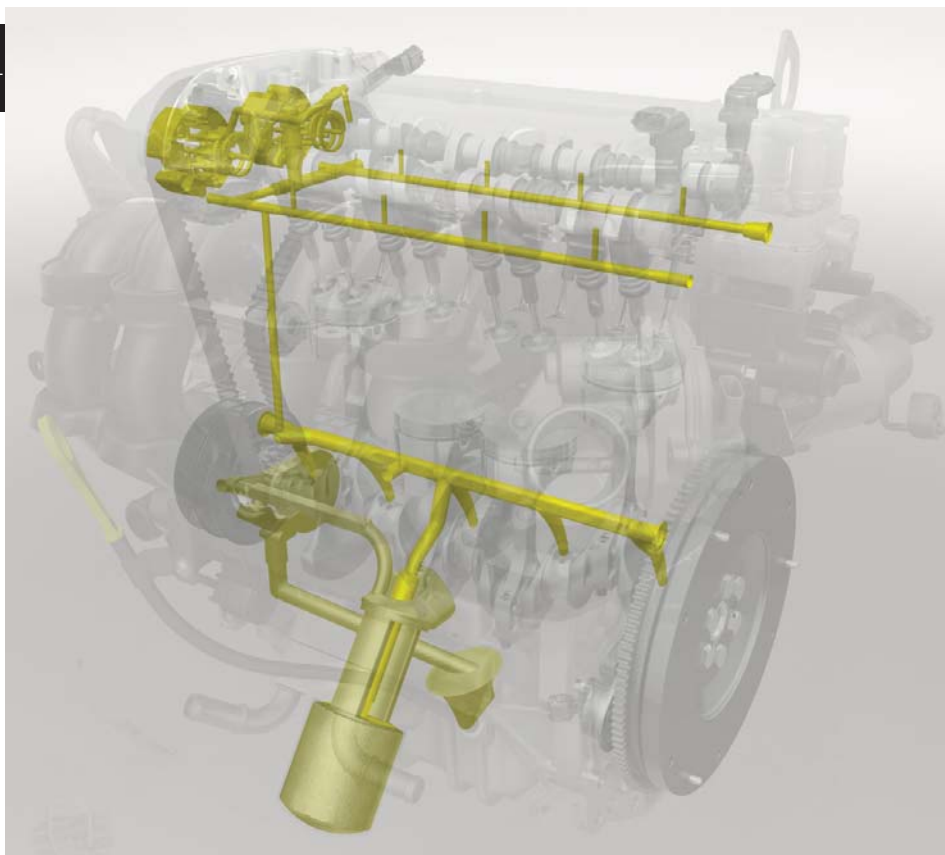
Ford 1.6 Ti-VCT technisch bekeken

liter zonder onverantwoord hoge kosten te maken. Derde optie is het verlagen van de pompverliezen, want bij deellast werkt elke ottomotor als een grote vacuümpomp. Dat komt omdat de gasklep gesloten wordt om het vermogen te regelen. Een ottomotor heeft immers een vrijwel constante lucht-brandstofverhouding. Dit in tegenstelling tot een dieselmotor die het vermogen regelt door meer of minder brandstof in te spuiten in een ongesmoorde luchthoeveelheid. Door het terugvoeren van de uitlaatgassen wordt de cilinder niet alleen met vers mengsel, maar ook met uitlaatgas gevuld. Omdat dit gas niet deelneemt aan de verbranding, maar wel ruimte in de cilinder inneemt, moet de gasklep verder open om het gewenste vermogen te halen. Uitwendige EGR heeft bepaalde nadelen die al ter sprake zijn gekomen, dus werd inwendige EGR nader onderzocht. Als er inwendige EGR wordt toegepast, reageert de motor sneller op gasgeven of gasloslaten dan wanneer er uitwendige EGR is. De procestemperatuur daalt als er EGR wordt toegepast, dus wordt er minder NO_x gevormd. Er kan gekozen worden voor een arm mengsel, maar daar zijn zoals uitgelegd bezwaren tegen. Bovendien is er ook een De-Nox-opslagkatalysator nodig die een complexe regeneratieprocedure nodig heeft. Als er met $\lambda=1$ wordt gewerkt, kan er met één grote of twee kleine geregelde driewegkatalysatoren worden volstaan.

Al spoedig bleek dat het mogelijk is om de kleplichthoogtes (dus de kleppentijden en de kleplichthoogtes) te kiezen voor een 15% hoger vermogen zonder in het lage en midden toerengebied in de problemen te komen. Sterker nog: door een goede vormgeving van het inlaat- en uitlaatsysteem zijn ook in die toerengebieden forse verbeteringen te bereiken.

Grote variaties

De inlaatnokkenas kan over 52 krukgraden worden verdraaid, het uitlaatemplaar moet het met 47° doen. Het openen van de inlaatkleppen verloopt van 20° na het Bovenste Dode Punt (BDP) tot 32° ervoor, dus in de richting vroeger. De uitlaatklinken begint bij 1° voor het BDP en gaat naar 46° na het BDP met het sluiten van de kleppen, dus in de richting later. Dat betekent dat de grootste klepoverlap 78° bedraagt. Het andere uiterste is de situatie dat de uitlaatkleppen 21° eerder sluiten dan de inlaatkleppen openen. Dit is de start- en stationairstand, want er is daarbij zo weinig restgas in de cilinder dat de motor aanslaat bij min 40°C en heel stabiel stationair loopt. De lichte hoogte van de inlaatkleppen is toegenomen van 7,3 tot 8,9 mm, de openingsduur van 232° tot 240°. De waarden voor de uitlaatkleppen zijn van 6,93



Het olieschema met de module voor de olie-water warmtewisselaar en het oliefilter. Voor op de cilinderkop zijn de twee hydrauliekkleppen geplaatst die de verstellers aansturen. In de twee oliegaleries in de kop zitten restricties van Ø2 mm.

tot 8,94 mm en van 224° naar 240° gestegen. Dat zorgt voor een betere ademhaling dus voor meer vermogen. Het starten en stationair draaien en het leveren van veel vermogen is nu opgelost, maar wat moet er daartussen gebeuren?

Draaien in deellast

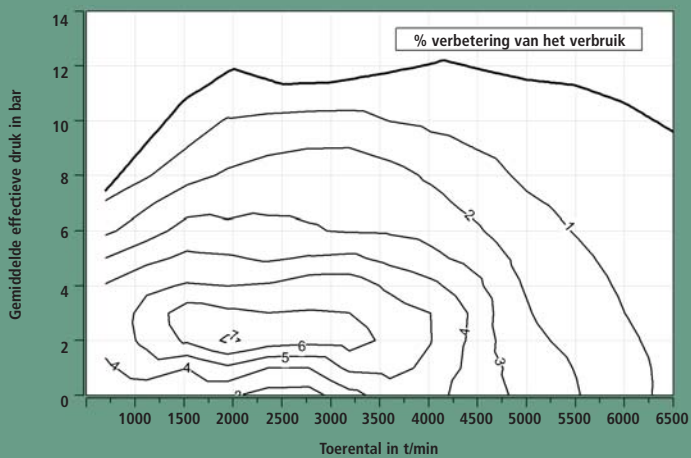
Omdat het de situatie tijdens de stadsritcyclus goed beschrijft, worden sinds vele jaren motoren voor deellast geoptimaliseerd bij 2000 t/min en een gemiddelde effectieve druk van 2 bar. We noemen dit voor het gemak even het 2000/2 werkpunt. Het specifiek brandstofverbruik van tientallen motoren onder deze condities is inmiddels bekend. Bij een 1.6 liter motor gaat het om een vermogen van iets meer dan 5 kW. Het valt niet mee om bij een ottomotor onder die condities een laag verbruik te halen, want de gas- of smoorklep staat vrijwel dicht. De standaardmotor heeft per inlaatklep een koprolwervel zoals vrijwel alle vierkleppemotoren. Het (bijna) sluiten van één van de inlaatkleppen of kanalen zorgt voor een krachtige wervel in de cilinder. Dat vonden de Ford technici te gecompliceerd dus werd één van de inlaatkanalen zodanig gewijzigd dat er minder koprol en meer wervel ontstaat. Dit gasbewegingssysteem werkt zo goed dat de motor tot

40% EGR accepteert. Met 35% EGR is bij 2000 t/min en 2 bar een specifiek verbruik van 354 g/kWh bereikt. De laagste waarde bedraagt 236 g/kWh, het grote verschil toont aan hoezeer deellast bij een ottomotor het verbruik nadelig beïnvloedt. De Duratec HE motor met 1.8 liter heeft een 2000/2 verbruik van 374 g/kWh, de Duratec Sci van 319 g/kWh op een arm mengsel. Meer dan 35% EGR is te bereiken door de uitlaatkleppen nog later te sluiten, maar dan kunnen ze de zuigerbodemp raken. Bovendien zorgt een teveel aan EGR ervoor dat de motor onregelmatig loopt door een te langzame verbranding. Daardoor neemt het verbruik toe. Als de inlaatkleppen nog later sluiten, stroomt er mengsel terug in de inlaat. Daardoor moet de gasklep nog verder open dus nemen de pompverliezen af. De effectieve compressieverhouding daalt echter, dus neemt het verbruik toe. Een pluspuntje is wel dat de kans op detoneren afneemt als de effectieve compressieverhouding daalt.

Van deellast naar vollast

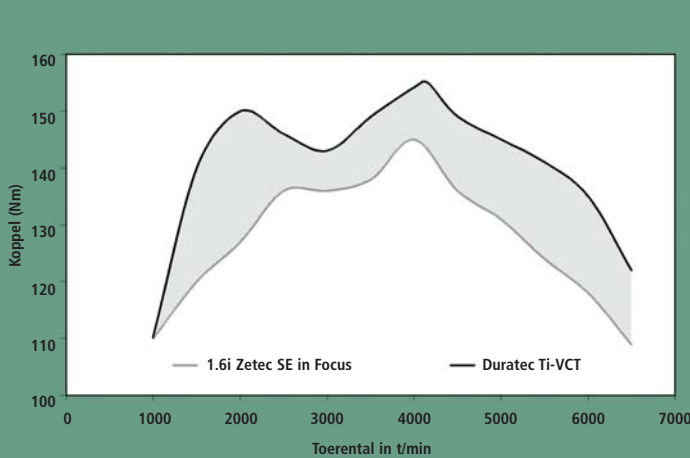
Toen de condities voor het werkpunt 2000/2 waren vastgelegd, bleef de vraag: hoe variëren we nu de nokkenassen? Eerst wordt de uitlaatklinken naar laat veresteld. Daardoor valt de klepoverlap na het BDP en blijft er dus restgas achter in de cilinder. Met toenemende belasting gaat de inlaatklinken vroeger staan, in welke mate hangt ook af van het toerental. Bij vollast verdraait de inlaatklinken met toenemend

Echt zuiniger!



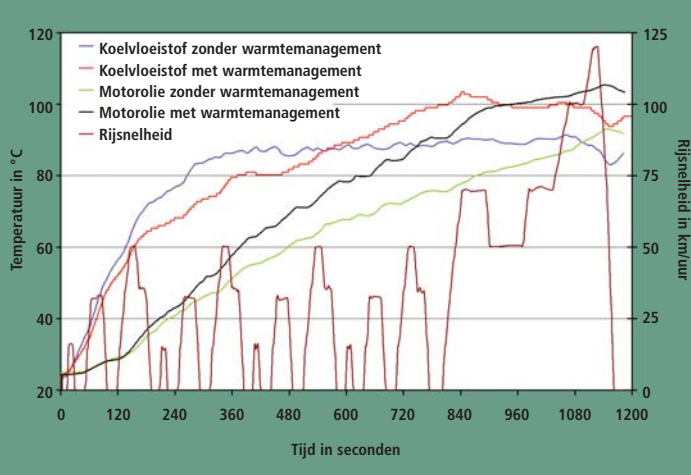
Voor een grootserieproductiemotor bereikt de Ti-VCT een hoge gemiddelde effectieve druk. De brandstofbesparing ten opzichte van de standaard motor bedraagt maximaal 7%, gemeten over de Europese rijcyclus.

En veel potenter!



Hoe gunstig de dubbele verstelbare nokkenassen en het nieuwe in- en uitlaatspruitstuk het koppelverloop en de hoogte ervan beïnvloeden is hier duidelijk te zien.

Heel snel op temperatuur



Gemeten over de Europese rijcyclus en startend bij +25°C zien we het effect van de warmtewisselaar met de motorolie. De kritische waarde van 60°C wordt 100 seconden eerder bereikt. Aan het einde van de rijcyclus zien we het effect van de hogere koelvloeistoftemperatuur.

toerental naar laat. Daardoor werkt de gasdynamica beter, neemt de vullingsgraad toe en daarmee het motorkoppel.

Aankankelijk leek het niet mogelijk om ook bij lage toerentallen een hoge gemiddelde effectieve druk te halen want de klepoverlap is gewoon groot. Dankzij het speciale uitlaatspruitstuk lukte het om zelfs bij 2000 t/min een gemiddelde effectieve druk van maar liefst 12 bar te halen.

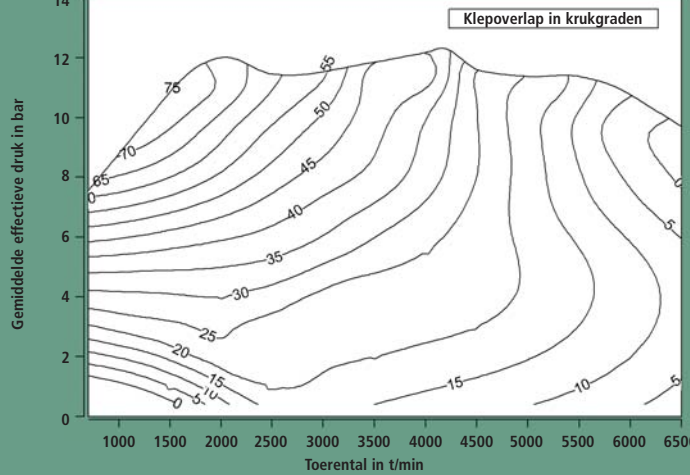
Het inspuitsmoment is heel nauwkeurig gekozen anders zou er doorspoeling van vers mengsel plaatsvinden in de klepoverlap. Dat is niet alleen slecht voor het verbruik, ook de katalysatoren zouden door oververhitting schade oplopen. Al met al levert de motor over een toerenbereik van 1500 tot 5800 t/min 90% van het hoogste koppel. Dat komt overeen met een gemiddelde

effectieve druk van 11,1 bar. Het verbruik over de Europese rijcyclus daalde met 4%. Dat was nog niet genoeg, bovendien zijn de praktijkcondities anders. Dus gingen de technici een stap verder.

Thermisch management

Als je bij het rijden op korte afstanden het verbruik laag wilt houden, moet de inwendige wrijving omlaag. Ford wil geen dure synthetische SAE 0W-30 olie toepassen, een redelijk conventionele SAE 5W-30 moest volstaan. De tweede mogelijkheid is de olie snel op te warmen. Dat kan met behulp van de koelvloeistof. Er is dus een forse warmtewisselaar aangebracht die inderdaad de olie in 360 seconden in plaats van na 460 seconden op 60°C brengt als de auto bij 25°C start.

Continu variabele klepoverlap



Dat de klepentijsen inderdaad continu worden versteld, blijkt uit deze grafiek. De lijnen geven aan welke klepoverlap bij een bepaald toerental en gemiddelde effectieve druk wordt ingesteld. Opvallend is de grote overlap bij lage toerentallen.

Vanaf 60°C worden de additieven in de olie chemisch actief, verdwijnt het condenswater in het blok en komt de carterventilatie goed op gang zodat mayonaise wordt vermeden. Dit geheel resulteerde in een 1,5% lager verbruik. Door het toepassen van een kenveldgestuurde koelvloeistofthermostaat kon de openingstemperatuur van 82°C naar 98°C worden verhoogd. Dat leverde in het laatste deel van de rijcyclus (buitenweg plus snelweg) nog eens een 0,5% lager verbruik op. Bij vollast wordt de koelvloeistoftemperatuur verlaagd opdat de olietemperatuur onder de 130°C blijft.

Verstelprobleem

Bij deze hoge olietemperatuur bleek het verstelen van de nokkenassen te lang te duren. Vooral het tegen de draairichting in verstelen van de

uitlaatnokkenas moest worden versneld. Een grotere oliepomp zou het probleem kunnen verhelpen, maar daarmee gaat het verbruik omhoog. Uiteindelijk bleek dat het verplaatsen van de ene restrictie in de olietoevoerleiding naar de cilinderkop naar twee restricties in de oliegalerijen in de kop voor de oplossing zorgde. Er kan nu volop olie naar de beide verstellers zonder een te groot oliedrukverlies over de lagers van de beide nokkenassen. Er gaat voldoende olie naar de kleppentrein als de restricties een doorsnede hebben van 2 mm. Er is een zelfreinigend staalfilter van 200µm in de olietoevoerleiding naar de kop aangebracht. Zorg voor detail wordt dat genoemd.

Constructieve wijzigingen

Zoveel mogelijk onderdelen van de standaard- of basis 1.6 liter motor zijn overgenomen.

Sommige wijzigingen zijn nu ook bij de standaardmotor toegepast, deze vorm van kruisbestuiving heeft alleen maar voordelen.

De zuigers zijn versterkt omdat de topdruk behoorlijk is gestegen. Een dikkere bodem en steviger zuigerpengaten zorgen voor minder vervorming. Ingegoten klepuitparingen van 3,5 mm diep voorkomen dat de kleppen de zuiger raken.

Opvallend is de 2,3 kg lichtere krukas met dezelfde buigstijfheid en een hogere torsiestijfheid dan het voorheen gebruikte exemplaar. Er zijn nu vier in plaats van acht contragewichten. De cilinderkop is sterk gewijzigd. De verbrandingskamers zijn compacter om een hogere klopvastheid te bereiken. Daartoe is de bougie 1,5 mm omhoog gehaald bij dezelfde compressieverhouding van 11,0:1. Bovendien is de koeling aanzienlijk verbeterd en gelijkmatiger over de cilinders verdeeld. De stroming vanuit het motorblok naar de kop is herzien en de ontluchting (op de heetste plekken kookt de koelvloeistof) is verbeterd.

Het nieuwe inlaatspruitstuk bestaat uit een 'drieschalen' constructie van polyamide en heeft een volume van 3,3 liter. De Ø36 mm inlaatbuizen zijn met 350 mm lengte 150 mm korter dan die van de standaard motor. De buizen worden vanuit een verzamelleiding van lucht voorzien. Dat zorgt voor een aangenaam geluid. Ook het uitlaatspruitstuk is nieuw. De twee keramische katalysatoren hebben elk een volume van 0,75 liter en zijn om kosten te besparen voornamelijk op palladium en rhodium gebaseerd, en bevatten dus minder platina. Al met al is Ford er knap in geslaagd om met relatief weinig middelen een groot resultaat te boeken! ●

Paul Klaver