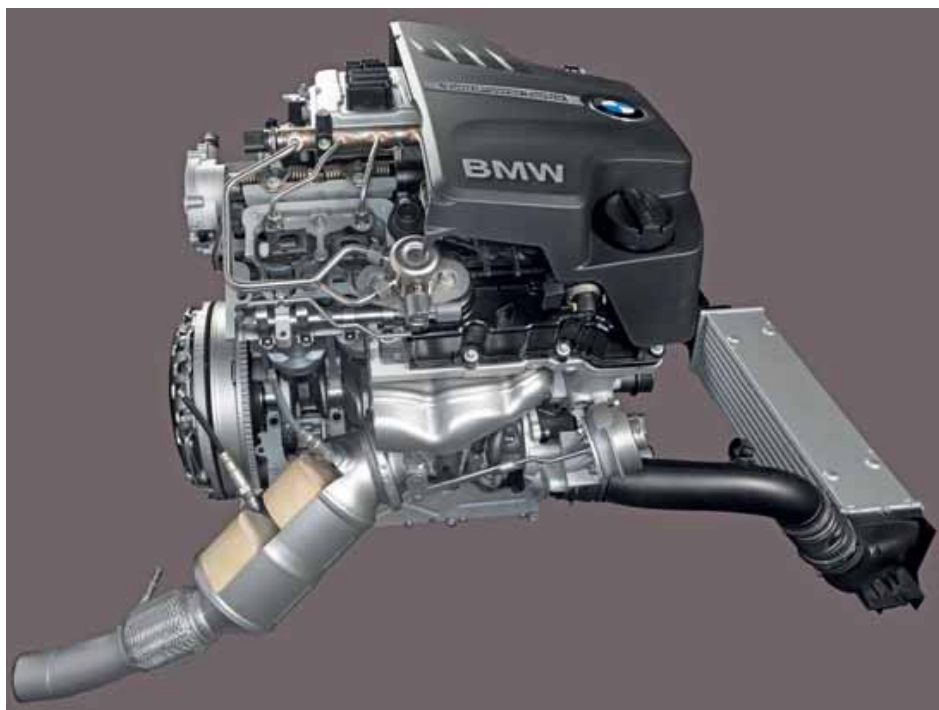


Ontwikkeling van de BMW 2.0 liter turbo ottomotor

Meer presteren met minder cilinders



Dit is de BMW 2.0 viercilinder turbomotor die de vrijaanzuigende zescilinder vervangt. Ingebouwd in lengterichting en naar rechts gekanteld lijkt het gewoon tweederde van de zespijter te zijn. Schijn bedriegt, want deze motor is geheel nieuw en voorzien van een turbocompressor. Het resultaat is een prestatieniveau dat hoger ligt dan dat van de zescilinder, terwijl het gewicht en het brandstofverbruik aanzienlijk zijn afgenomen.

Tot voor kort was de zes-in-lijn motor het meest verkochte BMW-motortype. Het vermogensbereik van 130-200 kW zorgde voor voldoende prestaties. De trillingsvrije motorloop is en blijft het hoofdkenmerk van dit motortype. 'Smeuig' en 'als een turbine' komt de zespijter op toeren. De vrijaanzuigende uitvoeringen kenmerken zich ook nog door een spontane reactie op het gaspedaal. Misschien is het geluid, tegenwoordig 'sound' genoemd, nog het meest kenmerkend. Dit is maar een korte samenvatting van de pluspunten. Minpunten zijn er ook. Daar vallen het brandstofverbruik en de emissies onder. Ook het gewicht helpt niet mee om het verbruik te beperken en de prestaties hoog te houden. Downsizen is het toverwoord. Er is heel wat uit de kast gehaald om uit een 2.0 viercilinder turbomotor het vereiste vermogen en koppel te halen van een vrijaanzuigende 3.0 zescilinder.

Van drie naar twee liter

BMW werkte vanaf 2009 met zescilinder Twin Power Turbomotoren. Het is een uitbreiding van

het EfficientDynamics-concept dat in 2007 werd geïntroduceerd. Dankzij directe inspuiting, variabele klepbediening en één of meer turbo's, stegen het vermogen en koppel zonder het brandstofverbruik sterk te verhogen. Toen er voldoende praktijkervaring met dit concept was opgedaan, werd het downsizen tot stand gebracht. Een nieuwe 2.0 viercilindermotor Twin Scroll turbo, Valvetronic en Directe Inspuiting. Deze motor heeft niet alleen

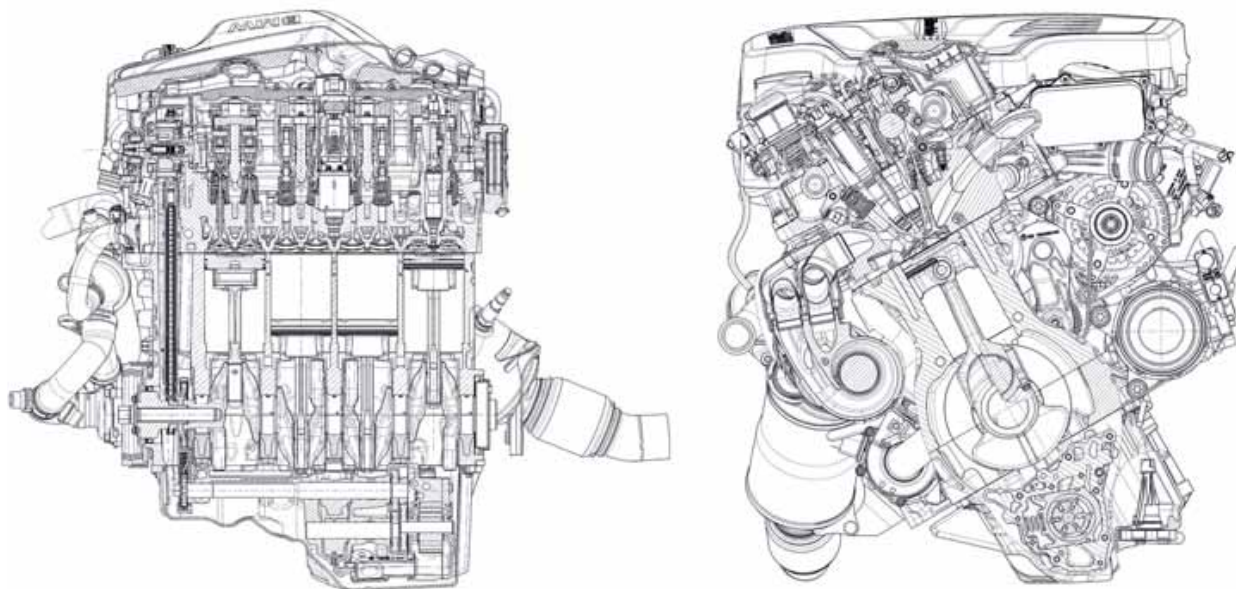
De afgelopen twee jaar is er een snelle downsize-ontwikkeling gaande bij BMW. Aan de hand van de 2.0 viercilinder benzinemotor bespreken we de ontwikkelingen. Het doel ervan is duidelijk: met minder cilinders meer presteren. Eerst komt de viercilinder 2.0 turbomotor zelf aan de orde, dan dezelfde motor met minimale emissies en ten slotte de plaats ervan in het kader van een hele nieuwe motorenreeks.

een volledig aluminium motorblok, nieuw is de eerste toepassing in grote serie van een opgespoten looplaag op de cilinderwanden. De doelstellingen waren: efficiënter, lichter, betere prestaties, compacter en lagere emissies dan de vrijaanzuigende 3.0 zescilinder. Bovendien moest de viercilinder over hetzelfde toerenbereik als de zescilinder trillingsvrij draaien en even spontaan 'aan het gas hangen'. Om met toekomstige eisen

Viercilinder gewicht, zescilinder kracht

Specificatie	Laagste vermogen	Hoogste vermogen
Compressieverhouding	11,0:1	10,0:1
Max. vermogen bij t/min (kW bij t/min)	135/5000	180/5000
Max. koppel bij t/min (Nm bij t/min)	270/1250-4800	350/1250-4800
Max. toerental (t/min)	7000	7000
Specifiek vermogen (kW/l)	67,7	90
Gemiddelde effectieve druk (bar)	17,1	22,1
Motorgewicht (kg)	138	138

Indrukwekkende waarden: 90 kW en 350 Nm uit een motor van 138 kg.



De langs- en dwarsdoorsnede van de BMW 2.0 turbomotor tonen ons veel details. De krukas is zo kort mogelijk gehouden. Kijk maar eens naar de wanddikte tussen de cilinders met de koelwaterboringen. Ook de distributie en de balansas met de oliepompaandrijving besparen bouwleengte. De gescheiden uitlaatgastoevoer naar de turbine is duidelijk te zien. Let op de verstelbare oliepompe en de verzette cilinderhartlijn. De cilinderkop alleen al is een studie waard.

aan het prestatieniveau rekening te houden, kan er met een topdruk van 130 bar probleemloos worden gewerkt. Dus kan er meer koppel en vermogen worden ontwikkeld. We zullen de constructie eens van dichtbij bekijken.

Slijtagevast motorblok

De deling van het motorblok (in een aluminium-silicium-koper legering) vindt plaats over de hoofdslagers. BMW past een 'bedplate' toe, dat is een gesloten ondercarter waar de lagerkappen deel van uit maken. Om de verbrandingsdruk goed op te vangen zijn gietstalen 'bearing inserts' ingegoten. Het geheel doet sterk denken aan de constructie van viercilinder motorfietsmotoren. Om de leibaandruk tijdens de verbranding te verminderen, is de krukas 14 mm verzet. Dat is een bekende methode om de wrijving te verminderen. Er is gezorgd voor een intensieve koeling tussen de cilinders die een hartafstand van 91 mm hebben. De damwand ertussen is 7 mm breed, ruim genoeg om er twee schuin aangebrachte koelboringen in aan te brengen. De meeste warmte moet immers kort na het Bovenste Dode Punt (BDP) worden afgevoerd. Om de warmteafvoer te verbeteren en de slijtage tot een minimum terug te brengen, is er voor het eerst in een grootserie productiemotor een opgespoten looplaag op de cilinders aangebracht. Een hogedruk emulsiestraal, waarschijnlijk een olie-water mengsel, ruwt het alu oppervlak op. Dat zorgt voor weerhaakjes die een mechanisch houvast bieden. Daarna wordt een 0,3 mm dunne ijzerhoudende looplaag door middel van een lichtboog opgespoten. Min-

der gewicht en meer ruimte voor de koelboringen zijn bijkomende voordelen ten opzichte van ingegoten gietijzeren voeringen.

Cilinderkop met grote stijfheid

De cilinderkop van een aluminium-silicium-magnesium-koperlegering is gegoten onder zwaartekracht in een stalen mal, kokille genoemd. Dankzij een warmtebehandeling krijgt het materiaal een hogere sterkte. De koeling van de heetste plekken is door een optimale warmteafvoer tot stand gebracht. Om de stijfheid van het geheel te vergroten, zijn de lagerbokken voor de nokken- en excenterassen meegegoten met de cilinderkop. Vrijwel de complete klepbediening komt van de zescilindermotor. De nokkenassen zijn opgebouwd. De uitlaatkokkenas heeft een drielobbig nok die de hogedrukspuitpomp aandrijft. De éénplunjerpomp is kenveldgeregeld en werkt met maximaal 200 bar. De vacuümpomp zit op het eind van deze kokkenas. De hydraulische verstellers van de nokkenassen verdraaien de inlaatkokkenas maximaal over 70 krukgraden. De uitlaatkokkenas wordt over hooguit 55° verdraaid. BMW blijft bij zesgats (diameter 0,2 mm) magneetverstuivers die een geluiddempende zitting hebben, dus geluidsarm werken. Eén van de kenmerken van dit type verstuiver is de zeer kleine én constante inspuithoeveelheid.

Start-stopbestendig drijfwerk

De gesmede krukas is vijfmaal gelagerd en heeft, om gewicht te besparen, slechts vier contragewichten. Alle lagertappen hebben eenzelfde

BMW-standaardmaten

Basisafmetingen

Cilinderinhoud (CM3)	1995
Boring (mm)	84
Slag (mm)	90
Slag/boring verhouding	1,07
Slagvolume (CM3)	499
Drijfstanlengte (mm)	144,35
Kruk/drijfstanverhouding	0,312
Blokhoogte (mm)	221,35
Cilinderhartafstand (mm)	91

Lagers

Diameter hoofdlager (mm)	50
Diameter Drijfstanlager (mm)	50

Zuigers

Compressiehoogte (mm)	32,4
Vuurdamhoogte (mm)	7,9

Zuigerpen

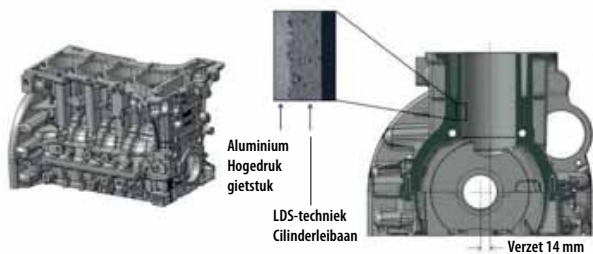
Diameter (mm)	22
Lengte (mm)	52

Kleppen

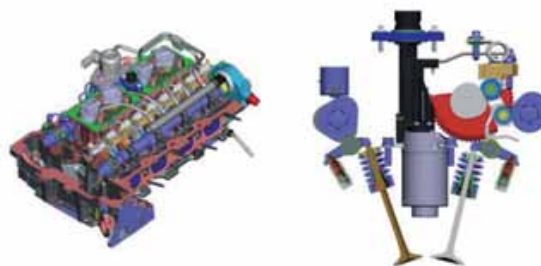
Diameter inlaat/uitlaat (mm)	32/28
Lichthoogte inlaat/uitlaat (mm)	9,9/9,3
Steeldiameter inlaat/uitlaat (mm)	5,0/6,0

Veel van deze afmetingen komen terug in wat voor BMW de standaardcilinder gaat worden.

diameter van 50 mm. Ze zijn inductief gehard. Door het harden nemen de oppervlaktehardheid en de vermoeingssterkte toe. Het oppervlak van de tappening heeft een zeer geringe ruwheid om de wrijving te verlagen. De hoofdslagers hebben



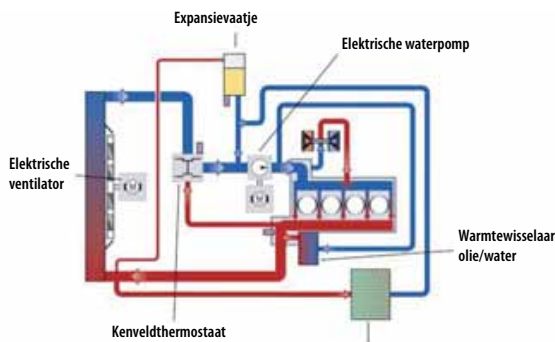
Het alu-motorblok is opgebouwd zoals we dat van motorfietsmotoren kennen, dus met een boven- en ondercarter. Dat zorgt voor veel stijfheid. Het verzet van de cilinderhartlijn bedraagt 14 mm. Bijzonder is de 0,3 mm dikke ijzerlegering die als looplaag dienstdoet. Met behulp van een lichtboog wordt het materiaal op het aluminium gespoten.



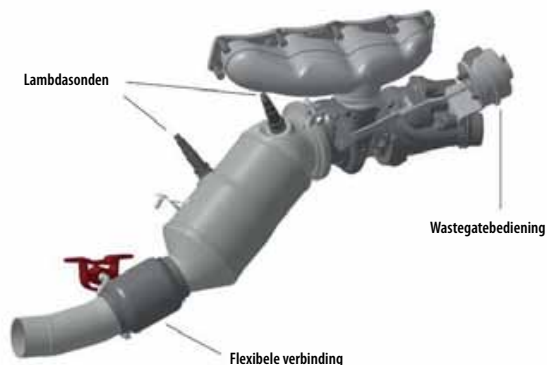
Het Valvetronic klepbedieningssysteem is grotendeels overgenomen van de zescilindermotoren. Op de uitlaatnokken zit een nok met drie lobben. Die zorgt voor de aandrijving van de hogedrukspuitpomp. De uitlaatkleppen zijn hol en worden met natrium gekoeld. In het midden zit de verstuiver. Richting uitlaatverzet zien we de penbobine.



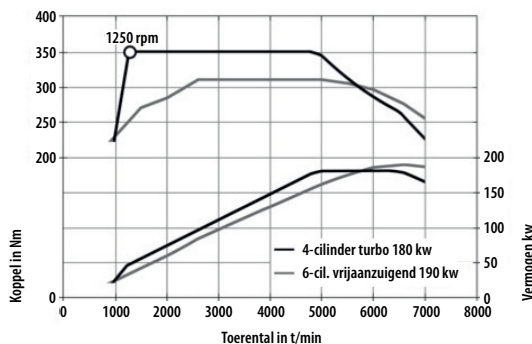
Het oliecircuut begint met een verstelbare oliepompe die in de carterpan bij het vliegwiel zit. De olie wordt naar een warmtewisselaar gepompt en gaat vandaar via het vlakbij gemonteerde oliefilter naar het hoofdoliekanaal. Een oliedruksensor zorgt, via een kenvel, voor de regeling van de oliepompe. De olietemperatuursensor, die gecombineerd is met de oliedruksensor, informeert het motormanagement.



Het koelsysteem wordt via het warmtemanagement geregeld. Zowel de elektrisch aangedreven waterpompe, de kenvelthermostaat als de elektrische ventilator worden geregeld vanuit de ECU. Daarmee kan onder alle bedrijfscondities de juiste temperatuur worden ingesteld. De kenvelthermostaat zit op de watertoevoer naar de motor.



Het 'Hot End' aan de rechterkant (gezien in de rijrichting) van de motor. Het dubbelwandige uitlaatspruitstuk combineert cilinders 1 en 4 en 2 en 3 en leidt de uitlaatgassen gescheiden naar het turbinehuis. Dat systeem wordt Twin Scroll genoemd. De 'Wastegate' wordt met een 'vacuümdoos' bediend.



Als we de prestaties van de sterkste 2.0 viercilinder turbomotor vergelijken met die van de vrijaanzuigende 3.0 zescilindermotor vallen enkele zaken op. De viercilinder heeft zowel bij lage toerentallen als in het middengebied aanzienlijk meer koppel. Zelfs bij 1000 t/min volgas liggen de vermogens gelijk.

lagers die uit twee materiaalsoorten bestaan, de drijfstaaglagers hebben vijf materiaalsoorten. Dat is nodig vanwege het start-stopsysteem, daarbij wordt de olietoevoer immers veel vaker onderbroken dan wanneer de motor stationair

blijft draaien. De drijfstaagen zijn gesmeed om een hoge vermoeiingssterkte te verkrijgen. Anders dan bij een dieselmotor gaat het bij een benzinemotor niet alleen om een drukbelasting, maar ook om grote trekkrachten. Die treden op

tijdens hoge toerentallen in de klepoverlap. De bronzen bus in het kleine oog wordt koud in zijn boring geperst. De boring van de bus is geslepen en voorgevormd om met de doorbuiging en de afplattung van de pen rekening te houden.

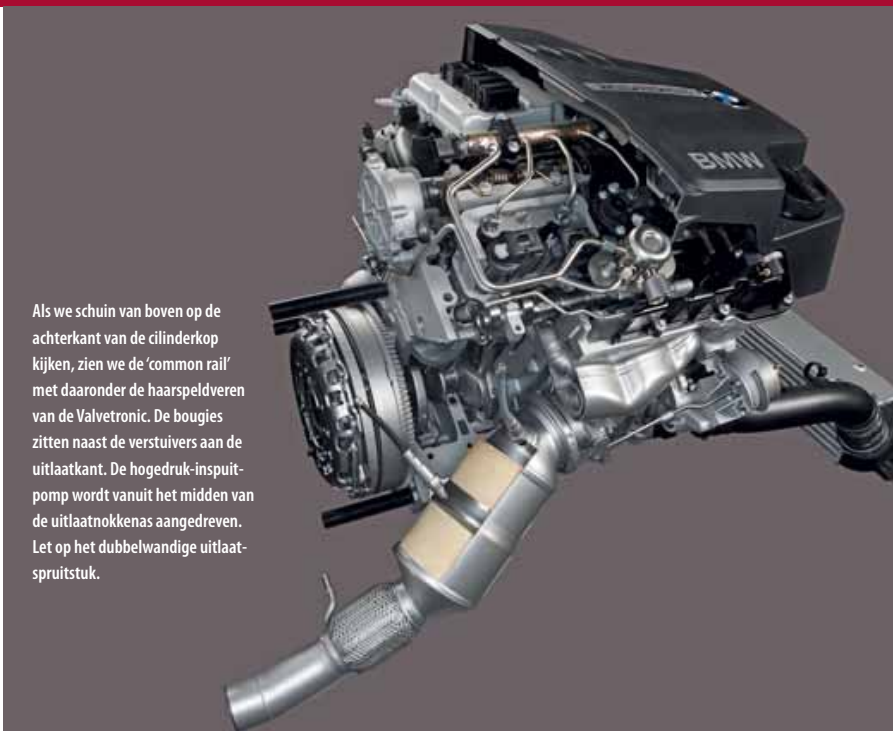
De zuigers zijn gegoten in een aluminium-siliciumlegering. Het gaat om lichtgewicht 'slipper-zuigers'. Die naam duidt op het model van een bepaalde pantoffel. Er zijn drie zuigerveren die voor het afdichten van de verbrandingskamer zorgen en om te voorkomen dat er smeerolie boven de zuiger komt. Het gaat om een rechthoekige topveer, een 'neusminuten' tweede veer en een driedelige olieschraapveer, allemaal met een geringe voorspanning. Daardoor wordt de wrijving laag, het is de gasdruk zelf die vooral de bovenste veer tegen de cilinderwand drukt. Op het hemd van de zuiger is een grafiethoudende looplaag aangebracht om de wrijving laag te houden. Bovendien wordt metaalcontact met de cilinderwand tijdens de koude start en het opwarmen voorkomen. De zuigerkom is vrijwel vlak met een ondiepe kom en niet te grote klepuitsparingen. De compressieverhouding bedraagt 10,0:1 bij de motor met het hoogste koppel. De motor met het lagere koppel heeft een compressieverhouding van 11,0:1.

Oliepomp en balancering

De oliepompe heeft een verstelbare opbrengst door het verschuiven van het excentrisch gelagerd 'hart' van de pomp. Samen met de balansassen vormt de oliepompe een module. De aandrijving vindt plaats door middel van een geruisloze tandketting die aan de voorkant van de motor zit. Uiteraard draaien de balansassen in tegengestelde richting en met het dubbele krukastorental. Het was de Engelsman Lanchester die 105 jaar geleden deze vorm van balanceren invoerde en het is nu 25 jaar na de herintroductie door Mitsubishi. Door het hoogteverschil in de positie van de balansassen ontstaat er ook nog een koppel dat het leibaandruckoppel gedeeltelijk opheft. BMW heeft een nieuwe versie van dit balanceringsysteem uitgebracht. Eén van de contragewichten is zwaarder om het geringe hoogteverschil tussen de balansassen te compenseren. Op deze manier loopt de viercilinder motor net als de zescilinder nagenoeg trillingsvrij tot 7000 t/min.

Kleppendecksel, carterontluchting en olieafscheider

Het kleppendecksel is van kunststof. Daarin opgenomen zijn de carterontluchting en de olieafscheider. Bij deellast gaan de carterdampen, ontdaan van vrijwel alle olie, naar de inlaatkanalen. Bij hoge belastingen worden de carterdampen vóór het compressorwiel in het inlaatsysteem gebracht. Bijzonder is dat er een geregelde, continue toevoer van frisse lucht naar het carter is. Daardoor wordt voorkomen dat er condensatie plaatsvindt, die anders voor schuim- en sludgevorming zorgt. Een olie-wateremulsie zet zich af als 'mayonaise' op koude wanden, een mengsel van olie en brandstof kan voor black-sludge zorgen. Iedere motor is van binnen kleetsnat tot ongeveer 70°C, het dauwpunt, omdat pas daarboven het vocht niet meer condenseert. Bedenk



Als we schuin van boven op de achterkant van de cilinderkop kijken, zien we de 'common rail' met daaronder de haarspeldveren van de Valvetronic. De bougies zitten naast de verstuivers aan de uitlaatkant. De hogedruk-inspuitpomp wordt vanuit het midden van de uitlaatkokken aangedreven. Let op het dubbelwandige uitlaatspruitstuk.

dat de motoren over de hele wereld worden verkocht, ook op de markten waar het (zeer) koud is en/of de brandstofkwaliteit afwijkt van die in West-Europa.

Oliecircuit met thermomanager

De kenveldgergelde oliepompe zit in het achterste deel van de carterpan. De olie wordt eerst naar de warmtewisselaar gepompt. Daarin zorgt het motorkoelwater voor het opwarmen, later voor het afkoelen van de olie. Vervolgens gaat de olie via het oliefilter naar het hoofdoliekanaal. In dat kanaal zit een gecombineerde oliedruk- en temperatuursensor. Het druksignaal zorgt voor informatie voor de ECU die via een kenveld de oliedruk instelt door de opbrengst van de oliepompe te regelen. Daardoor is er minder aandrijfvermogen nodig. De olietemperatuur wordt gebruikt bij het regelen van de motortemperatuur door de 'thermomanagementcoördinator'. Een thermische olieniveausensor in de carterpan waarschuwt voor een laag peil dat ook handmatig kan worden opgevraagd.

De olie zorgt ook voor de koeling van het heetste deel van de zuigerbodems via oliesproeiërs. De kettingen, alle bewegende delen van de Valvetronic, inclusief de vertanding van de stelmotor en de uitlaatkokken, worden gericht gesmeerd én gekoeld.

Intelligent koelcircuit

Via een kenveld in de ECU wordt de koeling van de motor ook weer via een thermomanagementcoördinator geregeld. Er zijn drie regel mogelijkheden: de elektrisch aangedreven waterpompe, de kenveldthermostaat en de elektrisch aangedreven

ventilator. De thermostaat zit aan de water-toevoerkant van de motor, daardoor ontstaat er een snelle reactie op belastingwisselingen. Het was overigens BMW dat samen met Behr zo'n veertig jaar geleden de thermostaat op de koelwateringang naar het motorblok plaatste. Daardoor wordt voorkomen dat er bij het openen van de thermostaat een plons koud water het blok ingaat. Wat wel oploopt bij deze plaatsing van de thermostaat is een verhoging van de wateruitgangtemperatuur uit de cilinderkop. De coördinator zorgt ervoor dat de waterpompe niet wordt aangedreven zolang de motor koud is. Na het afzetten van de motor loopt de pompe nog door zolang het turbolagerhuis nog te heet is.

Drukvvulling en emissiezaken

Het verkrijgen van een spontane reactie op het gaspedaal is bij een turbomotor niet eenvoudig. BMW scheidt de uitlaatgassen van cilinders 1 en 4 en van 2 en 3 van elkaar om ze daarna via twee aparte kanalen naar het turbinehuis te leiden. Dat wordt een Twin-Scroll turbo genoemd. Tussen de plaatsen waar de uitlaatgassen binnenstromen, zit een hoek van 30°. Om het uitlaatgas heet te houden, is het uitlaatspruitstuk dubbelwandig uitgevoerd. Een kort gehouden wastegate-kanaal in het turbinehuis zorgt ervoor dat de driewegkatalysator snel op temperatuur komt. De beide katalysatoren zitten dichtbij het turbinehuis. De eerste kat heeft 600 cells per square inch (cpsi), de tweede 400 cpsi. Dat betekent dat er omgerekend 93 respectievelijk 62 cellen per cm² zijn. Elke cel heeft dus een oppervlak van 1,1 en 1,6 mm². Een breedband lambdasensor voor en één tussen de twee kat's in zorgen respectievelijk voor de



De nokken zitten aan weerszijden van de lagerbokken met de hydraulische stelpluniers helemaal aan de rand van de cilinderkop. De zuigers hebben een ondiepe kom met niet al te diepe klepuitsparingen. Het is duidelijk dat de turbocompressor heel compact is.



De 2.0 turbomotor gezien vanaf de inlaatkant. Dat er veel lucht wordt verbruikt door de motor blijkt uit de diameter van de inlaatbuis. De motor is heel compact en zelfs geschikt om dwars te worden ingebouwd. Ook vierwielaandrijving is mogelijk zonder veranderingen aan de motor.

regeling van de lucht-brandstofverhouding en de controle op de juiste werking van de katalysator. Er zijn twee regelkleppen aangebracht op de turbocompressor. De wastegate of omloopklep aan de turbinekant is nodig om een te hoge inlaatdruk te voorkomen. Om bij gasloslaten geen ongewenste drukopbouw aan de inlaatkant te krijgen, is er een luchtomloopklep aangebracht. Wat opvalt, is de compactheid van het 'hot-end', dat is het hete geheel vanaf de cilinderkop tot en met de katalysatoren.

Prestaties en verbruik

De nieuwe viercilinder dekt met meerdere uitvoeringen het bereik van de vrijaanzuigende zescilinders. Mede dankzij het hoge koppel van 350 Nm dat al bij 1250 t/min wordt ontwikkeld, liggen de prestaties van de automodellen met deze turbo benzinemotoren op een nog hoger niveau dan met de 3.0 vrijaanzuigende zescilinder motoren. De gaspedaalreactie is snel omdat de Valvetronic er voor zorgt dat het inlaatsysteem altijd gevuld

is met lucht op omgevingsdruk. Bovendien wordt de kleplichthoogte aangepast aan het volumetrisch rendement. Daardoor is er minder restgas en meer vers mengsel in de cilinders dan bij een zelfaanzuigende motor. Bij lage toerentallen wordt er met lucht gespoeld in de klepoverlap zodra de inlaatdruk hoger is dan de uitlaatdruk. Het spoelen zorgt, naast het verwijderen van het restgas, ook voor meer uitlaatgas zodat het turbinetoerental toeneemt.

Het brandstofverbruik daalt, niet alleen over de Europese en andere rijcycli, maar ook tijdens het dagelijks gebruik. De verklaring hiervoor ligt bij een combinatie van maatregelen. De compressieverhouding is voor een turbomotor hoog en de Valvetronic zorgt vooral bij deellast voor lagere pompverliezen. Ook de directe inspuiting, de kenvelgestuurde oliedruk en oliepomp, de elektrische waterpomp en de geringe wrijving van het drijfwerk dragen hun deel bij aan het lage verbruik.

De achttrapsautomaat, vooral die met een lange

eindoverbrenging, maakt niet alleen het wegrijden gemakkelijk, maar houdt ook de toerentallen laag. Dat is mogelijk omdat deze transmissie een grote spreiding heeft. Anders gezegd: de verhouding tussen de overbrenging in 1 en 8 is groot. Wat niet door BMW wordt benadrukt, is het lagere rijklaar gewicht van de auto met de viercilinder motor ten opzichte van dezelfde auto met de zescilinder erin. Hoe dan ook, BMW verwacht dat er in dagelijks gebruik ongeveer 15% brandstofbesparing bereikt wordt ten opzichte van modellen met zescilinder motor.

Conclusie

Deze nieuwe viercilinder is een bijzonder voorbeeld van downsizen. Om uit een 2.0 viercilinder met turbo een hoger prestatieniveau te halen dan uit een 3.0 zescilinder is een knap staaltje motorontwerpkunde. Er is bij alles één belangrijk punt onbesproken gebleven: hoe klinkt de turbo vierpitter vergeleken met de typerende zescilinder sound?



Vanaf de inlaatkant gezien is het duidelijk dat de Valvetronic klepbediening flink veel ruimte inneemt. We zien de haarspeldveren die de speling in het stelmechanisme voorkomen, een soort "hulpklepveren". We kijken tegen de as aan met de stelnokken die het kleplichthoogte wijzigen. Let op de ovale inlaatpoorten.

WWW.AMT.NL

De BMW-toekomst

In AMT oktober 2012 is de complete BMW motorenfamilie voorgesteld. Daarmee is voorlopig het downsizen voltooid. De V12 is vervangen door een V8, de V8 vervangen door een L6, vervolgens de L6 door een L4 en de L4 door L3 motoren. Die laatste stap is niet zo vreemd als het lijkt, want het gaat immers om een halve zes-in-lijn motor. De viercilinder is een halve V8 en dat betekent: veel onderdelen hebben deze motoren gemeenschappelijk, tot wel 60% aan toe. Wat opvalt in het artikel, is de zin: 'Het geluid van de (driecilinder) motor lijkt beter bij BMW te passen dan dat van de viercilinder'. Waarvan acte! U leest het artikel terug in het maandossier op www.AMT.nl/februari2013 of scan de QR-code.

De 'schoonste' uitvoering

De California Air Resources Board, de CARB, heeft de uitlaatgasnorm SULEV uitgevaardigd op basis van de LEVII uitlaatgaswetgeving. SULEV staat voor: Super Ultra Low Emission Vehicle. De voorschriften gelden niet alleen voor Californië, maar ook voor andere staten in de VS. Om een auto toegelaten te krijgen als Partial Zero Emission Vehicle (PZEV) moeten de emissiegrenswaarden over 15 jaar en 150.000 mijl, dat is 240.000 km, aangehouden worden. Ook mag er geen verdampingsemissie zijn en moet On Board Diagnose 2 (OBD 2) aanwezig zijn. In 2015 komt LEVIII met nog lagere grenswaarden uit. De druk staat dus op de (emissie)ketel!

Er zijn steeds meer SULEV-auto's nodig om aan de emissievoorschriften te kunnen voldoen die voor de hele modellereeks van elk merk gelden. Anders gezegd: SULEV's worden de standaard.

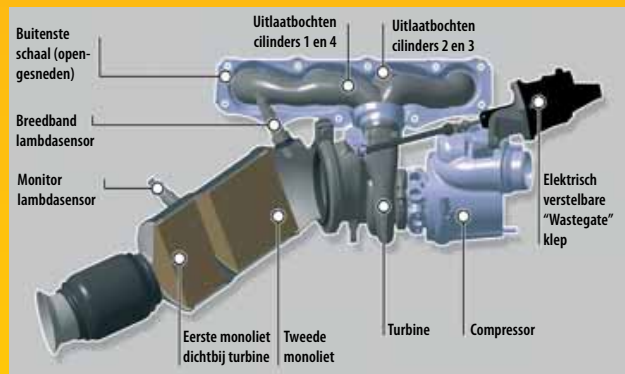
De sleutels die de deuren naar lagere emissies openen, hebben betrekking op de 'ruwe' uitwerp bij de koude start en de daarop volgende opwarming van de katalysator. Kortom: de eerste dertig seconden na de koude start zijn bepalend! Bijkomende zaken zijn nog: het verbruik moet laag blijven, de motor moet geruisarm draaien en moet goed reageren op het gaspedaal. Alsof dit niet al problematisch genoeg is, wordt het bij een turbomotor helemaal lastig. De katalysator zit immers achter de turbine en er gaat veel warmte verloren in het turbinehuis.

Maatregelen

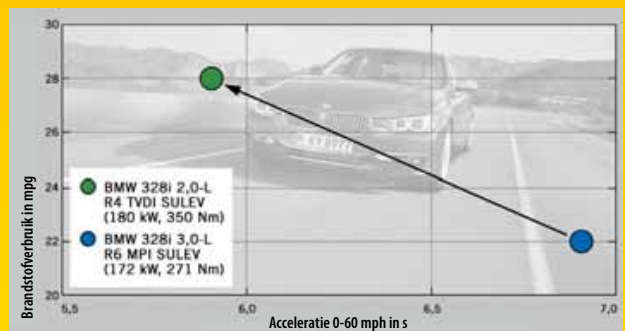
Het High Precision Injection-systeem (HPI) werkt met Directe en meervoudige Inspuiting en een veel later ontstekingstijdstip dan bij Indirecte Inspuiting motoren (IDI). Dat is een voordeel, want daardoor heeft het uitlaatgas een hogere temperatuur die de katalysator sneller opwarmt. De nieuwe BMW turbo viercilinder heeft een tweevoudige inspuiting. Eerst in de inlaatslag om voldoende tijd te hebben om een homogeen lucht-brandstofmengsel te vormen. Daarna wordt er een beetje brandstof ingespoten in de compressieslag kort na de vonk. Daarmee wordt bereikt dat de verbranding zich sneller uitbreidt. Tijdens de koude start en het warmdraaien bedraagt de lucht-brandstofverhouding λ 1,02. Er is dus geen mengselverrijking nodig en dat is opvallend. Bovendien kan het ontstekingstijdstip heel laat worden ingesteld met als gevolg dat er naverbranding in de uitlaat plaatsvindt. Daardoor neemt de uitlaatgastemperatuur snel toe, met een lage uitwerp van koolmonoxide (CO) en onverbrande koolwaterstoffen (HC) tot gevolg. De SULEV-uitvoering werkt bij de koude start met een inspuitdruk van 200 bar om een fijnere brandstofnevel te vormen. Daardoor worden er veel minder roetdeeltjes gevormd dan bij de ULEV/ECE-motor die met 120 bar inspuitdruk werkt bij het starten. "Er is echter geen voordeel zonder nadeel", zegt de wet van behoud van ellende. De grotere indringdiepte van de brandstofstralen zorgt voor contact met de koude zuigerbodem. Door de afkoeling vertraagt de verbranding en ontstaat er meer HC. Dit probleem kan met aangepaste kleppentijden en door meer restgas met een hogere temperatuur worden gecompenseerd. En dan is er nog de stikstofoxiden uitwerp (NOx). Die is door de langzame verbranding met een lagere toptemperatuur gering, er gaat immers zo'n 22 kW aan uitlaatgaswarmte de uitlaat in!

Lange tijd stabiliteit

Het bleek dat er iets gedaan moest worden om de inspuihoeveelheid bij de bougie over de hele termijn constant te houden. De inspuihoeveelheid hangt af van de tijdsduur en het lichthoogteverloop van de verstuiver-naald. Een extra regeling door middel van een terugkoppeling houdt nu de inspuihoeveelheid constant. De gesloten regelkring zorgt er ook voor dat



De SULEV uitlaatgasmodule is een verfijnde uitvoering van het standaard systeem. Er is een elektrisch verstelbare wastegateklep en de beide katalysatoren hebben kleine gasdoorvoeropeningen.



Het downsizen heeft ook bij SULEV-motoren zin. Het brandstofverbruik neemt af en de acceleratietijd eveneens. Het brandstofverbruik in miles per gallon is over de VS-rijcyclus bepaald. 30 mpg komt overeen met 12,8 km/l ofwel 7,8 l/100 km. De acceleratie geldt van 0 tot 60 mph, dat komt overeen met 0 tot 96 km/uur.

de vorming van roetdeeltjes constant laag blijft. Dat is mooi meegenomen, want roetdeeltjes spelen ook bij de Euro 6 emissie-eisen een grote rol. Onder bepaalde condities zijn er 94% minder roetdeeltjes gemeten. In het turbinehuis gaat er maar liefst 300°C 'verloren' aan uitlaatgastemperatuur. De oplossing van dit probleem bleek eenvoudig: stuur het uitlaatgas via de wastegate, dus via de omloopklep van de turbine, direct naar de katalysator. Daartoe bleek een grotere openingshoek van 45° in plaats van 25° van de turbine omloopklep nodig te zijn. Een elektrische verstelling van de klep zorgt voor de benodigde snelheid. Beide maatregelen samen zorgden ervoor dat er geen 40%, maar 70% uitlaatgas rechtstreeks naar de katalysator stroomt. De gastemperatuur wordt nu 220°C hoger dan zonder deze maatregelen.

Extra maatregelen

De twee katalysatorblokken hebben bij de SULEV-motor 900 cpsi en 600 cpsi. Dat wil zeggen: 140 cellen en 93 cellen per cm². De eerste kat heeft dus doorstroomopeningen van slechts 0,72 mm² per cel. Bovendien is de verhouding aan edelmetaal, dat als katalysator werkt, anders gekozen dan bij de ULEV/ECE-motor. De breedband lambdasonde werkt al na enkele seconden vanaf de koude start. Bedenk dat er dus geen secundaire luchtinjectie is. Wat verder nog opvalt, is dat er op de radiator een Prem Air-laag zit. Deze laag zet ozon (O₃) om in zuurstof (O₂) tijdens het rijden. Zo'n PZEV is dus een soort rijdende luchtreiniger!