

Auto & Motor
TECHNIEK

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

HPI vervangt Valvetronic

BMW's nieuwe huismark

BMW gaat volledig over op straalgeleide directe benzine-inspuiting en verlaat daarmee de Valvetronic-klepbediening. De nieuwe vier- en zescilindermotoren hebben geen drukvulling en draaien met zeer arme mengsels tot hoge snelheden. De winst van HPI is verbluffend: meer rijdynamiciek en een grote brandstofbesparing in de dagelijkse rijpraktijk.

De straalgeleide High Precision Injection (HPI) wordt BMW's huismark. Doel van de volledig variabele inlaatklepbediening Valvetronic, was het brandstofverbruik en dus ook de CO₂-uitwerp te verlagen bij deellast. Omdat de inlaatklep een geringe lichthoogte hebben en gedurende een korte tijd open staan, kan de gasklep vervallen. De inlaatklepspleet regelt de luchttoevoer naar de cilinder. Bij de HPI-motoren ontbreekt de Valvetronic-klepbediening. Alleen de beide nokkenassen zijn nog om hun lengte-as verstel-

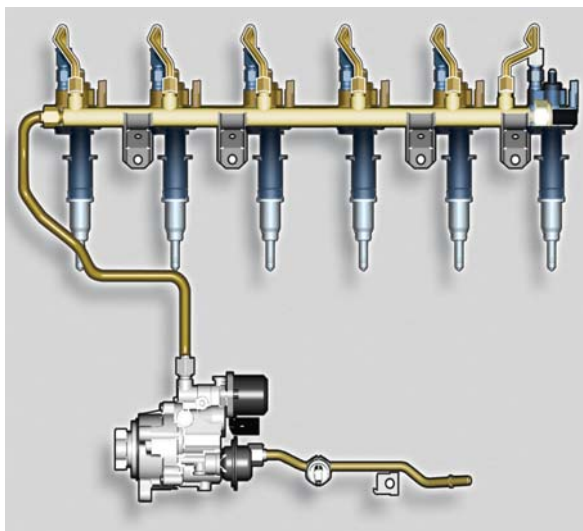
baar, dat wordt bij BMW het VANOS-systeem genoemd.

Met HPI overtreft BMW de resultaten van de Valvetronic-motoren en daar is het nu juist om te doen: Efficiënte Dynamiek. Daarmee wordt bedoeld dat de prestaties hoog zijn, het gewicht laag en het verbruik, ook in de praktijk van alle dag, gering is.

De in AMT 7/8-2007 beschreven HPI Twin Turbo-motor was de eerste stap, nu komt de tweede grote stap: een hele reeks van vier- en zescilin-

De High Precision Injection (HPI) van BMW maakt een straalgeleide inspuiting met hoge nauwkeurigheid mogelijk, ook voor heel arme mengsels.

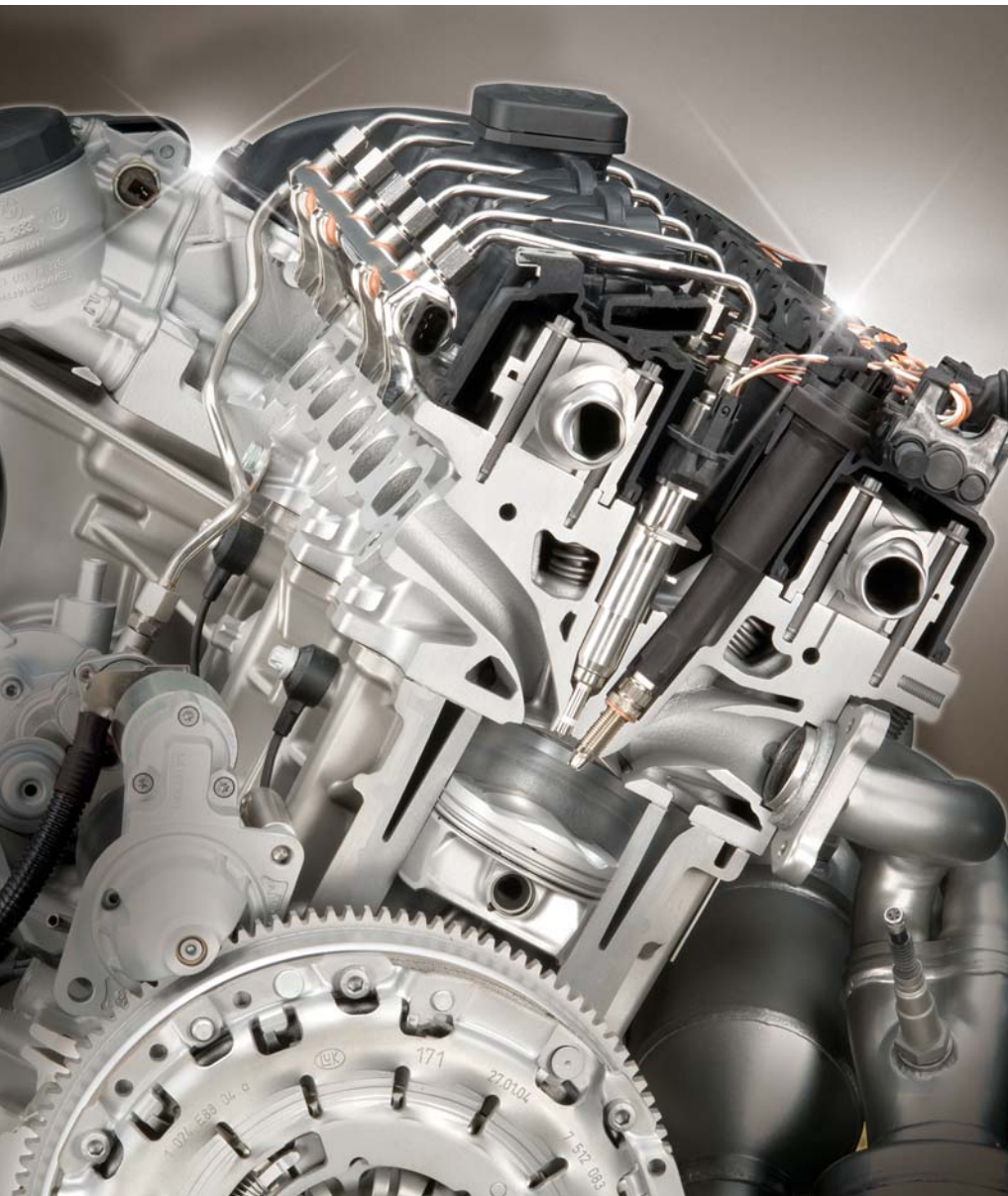
De onderdelen van het hogedruk-inspuitsysteem, inclusief de piëzo-verstuivers, zijn bij een lijnmotor compact in te bouwen. Let op de holle nokkenassen met opgeperste nokken.



De onderdelen van het hogedruk-inspuitsysteem omvatten de hogedrukpomp, de common rail met druksensor, de inspuitleidingen en de piëzo-verstuivers.



De kern van de zaak: om arme mengsels te kunnen verbranden is niet alleen een piëzo-verstuiver en een speciale bougie nodig, maar ook een juist gevormde zuigerbodem. De kom heeft een uitgekiende diameter en diepte, de 'squish' of wegpersranden dragen hun wervels bij.



De bovenliggende nokkenassen, elk met een VANOS-systeem, de oliepompe en de balansassen worden door kettingen aangedreven. Elke cilinder heeft maar één contragewicht.



der HPI-motoren. Deze draaien met (zeer) arme mengsels en zijn vrijaanzuigend. Kostprijsstechnisch gezien ruilt BMW de Valvetronic-klepbediening tegen de piëzovertuivers, de nieuwe motoren zijn verder gebaseerd op de Valvetronic-exemplaren. Dat wil zeggen: met het magnesium-aluminium blok bij de zespitter en het aluminium blok met gietijzeren (GY) voeringen bij de viercilinders.

Straalgeleide inspuiting

Er is sprake van een gelaagde verbranding als de lucht-brandstofverhouding in laagjes vanaf de verstuiver verandert van rijk naar arm. Gemiddeld wordt er met een arm mengsel gewerkt, maar dat komt anders tot stand dan wanneer zo'n mengsel homogeen, dus overal met dezelfde lucht-brandstofverhouding, wordt gevormd.

Bij DI-motoren kan er in de inlaatslag worden ingespoten. Er is dan aardig wat tijd om de ben-

Ondanks de iets andere boring/slagmaten van de viercilinder is de overeenkomst met de zescilinder HPI-motor groot, alleen de zuigerbodem is iets anders. Let op de ingegoten gietijzeren cilindervoering en de andere koelkanalen in de cilinderkop.

zine te verdampen en goed te mengen met de aangezogen lucht. Het gevormde mengsel is dan redelijk homogeen. Als er tijdens de compressieslag wordt ingespoten, is er onvoldoende tijd voor het verdampen van de benzine en het mengen met de lucht. Er ontstaat een gelaagd mengsel. Uiteraard kan er ook zowel in de inlaatslag als de compressieslag worden ingespoten. Waar Renault en Honda in de problemen kwamen, is dat er niet bij elke verbrandingslag het juiste ontsteekbare mengsel tussen de bougie-elektroden zat. Er moet een zodanige inspuitsabiliteit zijn, dat er altijd de juiste lucht-brandstofverhouding tussen de bougie-elektro-

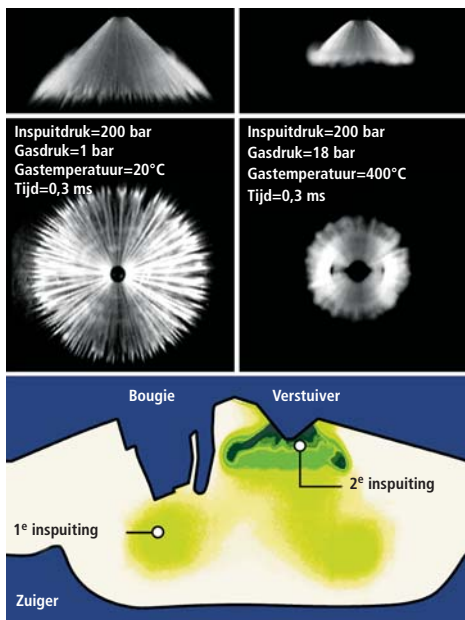
den zit op het moment van ontsteken. Vandaar de detailontwikkeling van de bougie-elektroden zoals later aan bod komt.

Verstuiver en bougie bepalend

Het blijkt dat de nodige stabiliteit alleen te verkrijgen is met een verstuiver met naar buiten toe openende klep en een holle kegelstraal die zowel aan de binnen- als aan de buitenkant terugstromende wervels heeft. Deze wervels ontstaan door de wrijvingsweerstand die de fijne druppeltjes ondervinden bij hun voortbeweging in de lucht. Voorwaarde voor de fijne druppeltjes is een voldoende hoge inspuitedruk. Boven-

MOTOREN

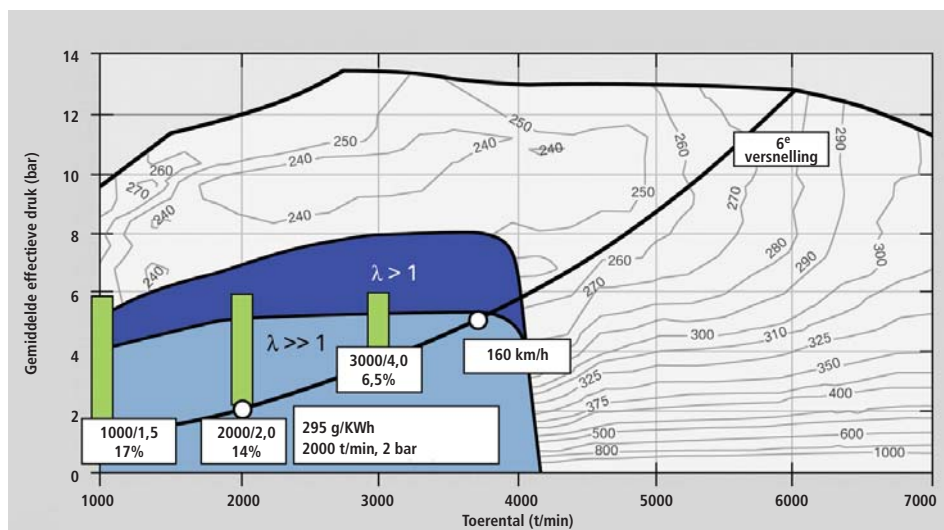
Zuiniger rijden met High Precision Injection



Beelden van de inspuitstraal in een hogedruk/hogetemperatuurkamer (boven) en in een doorzichtige motor (onder). Let op de randwervels.

dien moeten er onder bepaalde condities meerdere inspuitingen kort na elkaar kunnen plaatsvinden. Vandaar de piëzo-elektrische verstuivers. De bougie-elektroden moeten precies in de wervels aan de buitenmantel van de brandstofkegel

Zuiniger dan Valvetronic



Eierdiagram met bepaalde bedrijfspunten van de 3 liter zescilinder motor. De verbetering in verbruik is ten opzichte van de Valvetronic-motor.

steken. Daar vindt immers de verdamping van de benzine en de intensieve menging met de lucht plaats, zodat steeds de juiste lucht-brandstofverhouding voor een stabiele ontsteking aanwezig is. Dat lukte tien jaar geleden niet, nu wel. Met een stabiel randwervelgebied van de inspuitkegel valt of staat de straalgeleide directe inspuiting.

Bij het inspuiten in de compressieslag is de gasdruk in de cilinder zo hoog, dat de inspuitdiepte gering is. Er komt dus vrijwel geen brandstof op de zuigerbodem terecht. Problema-

atisch wordt dit type inspuiting als er in de inlaatslag wordt ingespoten. De gasdruk in de cilinder is dan laag, dus is de inspuitdiepte groot. Er moet voor gezorgd worden dat de brandstof de zuigerbodem niet raakt. Een hoge HC- en CO-uitwerp en zelfs roetvorming zijn dan de ongewenste gevolgen. De zuigerkom heeft daarom een zodanige diameter en diepte dat de kegel geheel wordt omsloten en de bodem niet wordt gehaald. Uiteraard speelt ook het inspuitmoment een grote rol.

De HC-waarden van de HPI-motoren liggen op

Ontwikkeling van straalgeleide DI-benzinemotoren

De eer als eerste een straalgeleide DI-benzinemotor in productie te hebben genomen, komt Renault toe. In 1999 verscheen de tweeliter viercilinder IDE-motor met centraal geplaatste verstuiver en schuingeplaatste bougie in een vierklepsverbrandingskamer. De compressieverhouding van de $\lambda=1$ -motor bedroeg 11,5:1. Zonder drukvulling leverde de motor 103 kW bij 5500 t/min en 200 Nm bij 4000 t/min.

Waarom werd de motor enkele jaren later uit productie genomen? Omdat er niet de juiste verstuivers werden gebruikt en de inspuitdruk 'slechts' 100 bar haalde. Het was destijds niet mogelijk de straalgeleide directe inspuiting probleemloos te laten werken. Ook Honda ging bijna in de fout. Eerst werd een driecilinder DI-motor met straalgeleide inspuiting ontwikkeld, later ook een viercilinder. Tot een productie is het

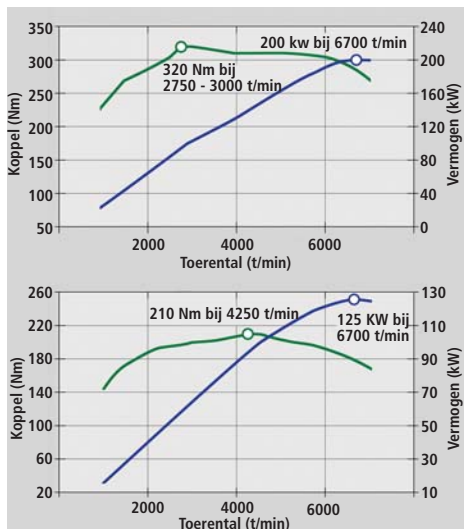
echter niet gekomen, want net op tijd werd vastgesteld dat de verbranding niet onder alle omstandigheden voldoende stabiel verliep. Zelfs BMW toonde de hier beschreven straalgeleide DI-motor al eerder zonder de productie te starten. Als we de verstuivers en bougies van toen met die van de huidige motoren vergelijken, zien we uit de verschillen waar de problemen met dit type inspuiting zitten.

Ook Mercedes-Benz heeft de weg naar de productie van de CGI-motoren niet zonder lange ontwikkelingstijd gelopen. In AMT 3/2007 staat de motor beschreven en een vergelijk met de motoren van BMW toont de grote overeenkomsten. Kennelijk is er niet zoveel speelruimte in de keuze van de verstuiver, de inspuitdruk en de positie en vorm van de bougie-elektroden.



Renault kwam in 1999 als eerste fabrikant met een straalgeleide DI-benzinemotor op de markt. De Injection Directe Essence was zijn tijd vooruit, want de juiste verstuiver was toen nog niet beschikbaar. Het was een $\lambda=1$ motor die aan de Euro 3-emissie-eisen voldeed.

Over power geen klagen!



Vermogens- en koppelkrommen van de topuitvoering van de vier- en de zescilinder motoren.

een laag niveau, veel lager dan bij de eerste generatie wandgeleide DI-benzinemotoren. Er is geen krachtige luchtbeweging nodig, hetzij als koprolwervel hetzij als kurketrekkerwervel, respectievelijk tumble en swirl genoemd. De inlaatkanalen kunnen optimaal voor een hoog vermogen bij vollast worden gevormd en dat is mooi meegenomen.

Uitgekiend verbrandingsverloop

Omdat het mengsel bij deellast arm is, kan de gasklep ver open staan. Zelfs zover dat de motor net als een dieselmotor ongesmoord lucht aanzuigt. Daardoor vervallen de pompverliezen die de benzinemotor met gasklep zo'n hoog specifiek brandstofverbruik bij deellast bezorgen. Het ideale verbrandingsproces kan beter worden benaderd met een arm dan met een rijk mengsel. Voorwaarden zijn dan wel dat er geen contact van de brandstof met de wanden is en de CO- en HC-emissies laag blijven door een hoge omzettingsgraad tijdens de verbranding. Daartoe moet de verbranding zodanig verlopen dat ongeveer de helft van alle brandstof rond het Bovenste Dode Punt is verbrand. In vaktermen ligt dan het thermodynamisch zwaartepunt van de verbranding juist.

BMW benadrukt dat pas met de beschikbaarheid van de naar buiten openende verstuivernaald de problemen met de straalgeleide inspuiting waren op te lossen en de piëzo-elektrische uitvoering voor voldoende snelheid bij het openen en sluiten zorgde. Niet weg te denken bij de ontwikkeling zijn de moderne computersimulaties en de motormeetsystemen, bijvoorbeeld die systemen welke gebruik maken van laserstralen. Dat ook de bougie een belangrijke rol speelt, blijkt alleen al uit de verschillen tussen de motoren die twee jaar geleden werden getoond en de huidige uitvoering. Zowel de bougie-elektro-



Het uitlaatsysteem van een BMW zes-in-lijnmotor is altijd bijzonder om naar te kijken. Vanaf de achterste drie cilinders wordt het uitlaatgas voor de externe recirculatie afgetakt, dat gebeurt na de geregelde driewegkatalysator.

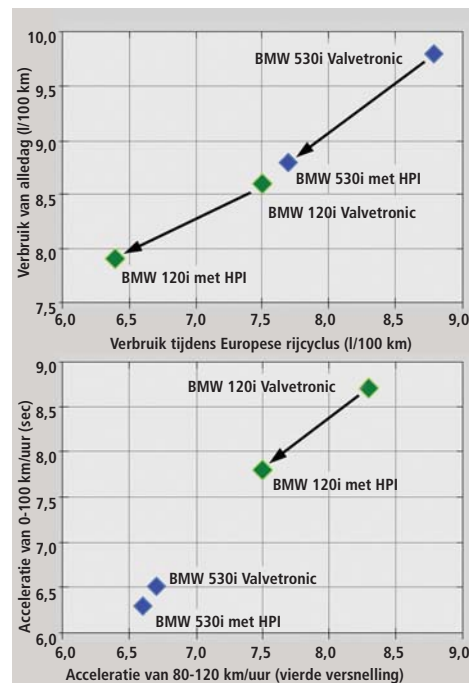
den als de kom in de zuiger zijn veranderd. De bougie krijgt het extra zwaar te verduren als door een onstabiele straalfvorm thermische schokken en roetvorming optreden. Het kan dan zomaar gebeuren dat de bougie 'nat slaat' of nog erger een beschadigd porcelein oploopt. Dankzij hoge energie-bobines en glijvonktechniek blijven de bougies in staat steeds opnieuw het mengsel te ontsteken.

Het gaat bij de verstuivers om dezelfde uitvoering als die van de Twin Turbo HDI-motor die in AMT 7/8-2007 beschreven is. Omdat het stapeltje plaatjes, dat samen het piëzo-elektrische element vormt, een andere uitzettingscoëfficiënt heeft dan het stalen huis, is een thermische compensator nodig om de druk op het platenpakket (in het Engels: piëzostack) constant te houden. Er zijn meerdere, snel opeenvolgende inspuitingen mogelijk, zelfs met een verschil in lichthoogte van de naald! Uit de afbeeldingen blijkt dat de verstuivers iets gekanteld zijn naar de inlaatkant. De bougies staan juist richting uitlaatkant onder een hoek. Op die manier is er net voldoende ruimte tussen de kleppen en kanalen.

NO_x-reductie

Bij elke armmengselmotor vormt de uitstoot van NO_x een probleem. Er is een speciale katalysator nodig die de NO_x opslaat tot er een verzadiging is bereikt. Dan gaat de motorafstelling gedurende korte tijd naar rijk om de NO_x uit de opslagkatalysator te reduceren, dus van de zuurstof te ontdoen. Om zo min mogelijk NO_x te produceren, is

Lager verbruik en toch sneller



Verbruik en prestaties van enkele BMW-modellen met respectievelijk een Valvetronic-motor en de nieuwe motor met HPI.

er zowel een interne recirculatie van uitlaatgas (tijdens de klepoverlap) als een uitwendige. Via een watergekoelde EGR-klep worden de uitlaatgassen aan de inlaatlucht toegevoegd. Het moment en de tijdsduur worden elektronisch geregeld.

Tijdens het rijden van de Europese rijcyclus wordt het mengsel zesmaal verrijkt om de op-

MOTOREN

Zuiniger rijden met High Precision Injection

slagkat te reinigen, dat kost 4% extra brandstof. De totale vermindering in verbruik is echter zo groot dat dit extra verbruik geen probleem oplevert.

Lager verbruik

Met HPI is BMW in staat de auto's tot 160 km/uur te laten rijden met een zeer arm mengsel, daarbij wordt alleen in de compressieslag ingespoten. Daarboven is er nog een gebied met een arm mengsel, daarbij wordt er ook in de in-

Het meest opvallend is de hoogte die nodig is om de directe ontsteking, dus bougies plus bobines, en de piëzoverstuivers met common rail en leidingen onder te brengen. De hogedrukbrandstofpomp is links op de voorgrond goed te zien, de aandrijving vindt plaats via de distributieketting.

laatslag ingespoten. Bij 2000 t/min en een gemiddelde effectieve druk van 2 bar heeft de HPI-motor een specifiek brandstofverbruik van 295 g/kWh. Dit is 14% lager dan dat van de Valvetronic-motoren en meer dan 20% gunstiger dan een conventionele vierkleppenmotor. Dat is overigens slechts 5 g/kWh meer dan het verbruik van de Mercedes-Benz CGI-motor!

Voor een laag verbruik in de praktijk is er ook gezorgd voor een korte warmdraaitijd door de elektrische koelwaterpomp uit te schakelen. Ook de airco wordt afgekoppeld als dat kan. Hetzelfde gebeurt met de elektrische stuurbekrachtiging. Bij de viercilinder zorgt een Auto Start Stop functie voor een behoorlijke brandstofbesparing in de stad en bij fileverkeer. Voeg er nog een intelligente generatorregeling aan toe die bij gasloslaten en afremmen op de motor energie terugwint en de winst is groot. De prestaties komen niet te kort, want de motoren draaien tot 7000 t/min en leveren een hoog koppel over een breed toerengebied. Opvallend



is ook de spontane reactie op het gaspedaal, nog sneller dan bij de Valvetronic-motoren, omdat niet eerst inlaatdruk moet worden opgebouwd en de inspuiting direct bij de bougie plaatsvindt.

De nieuwe BMW 118i verbruikt over de Europese rijcyclus slechts 5,9 l/100 km en zorgt daarbij voor 130 gram CO₂ per km. De 530i zescilinder heeft nu dezelfde CO₂-uitstoot als de viercilinder 120i met Valvetronic en dat ondanks een fors verschil in gewicht. Geen wonder dat BMW HPI tot huismerk verheven heeft. ●

Paul Klaver

www.AMT.nl

Dé internetsite voor de Automotive Professional

De in dit artikel genoemde eerder in AMT verschenen artikelen kunt u nalezen op www.AMT.nl. Ga naar het Archief, rubriek Motoren. Onder de respectievelijke auto-merken vindt u BMW's 3.0 liter DI-benzinemotor (AMT 2007-7/8), de Mercedes V6 DI-benzine (AMT 2007-3) en Renault IDE directe benzine-injectie (AMT 1999-9).