

## Grondbeginselen van injectie en ontsteking uitgelegd

Het 'brein' in (vrijwel) alle moderne auto's doet normaal gesproken onopvallend zijn werk: zorgdragen voor een schone en efficiënte verbranding in de motor onder een breed scala aan bedrijfsomstandigheden. Motormanagementsystemen zijn over het algemeen betrouwbaar en vragen zelden of nooit onderhoud. Maar als het dan een keer misgaat, dan zijn er – tot ergernis van de betrokken automobilist – vaak meerdere garagebezoeken nodig om het probleem te traceren en op te lossen. Als het wordt opgelost. Voor een buitenstaander lijkt het motormanagement dan ook een hopeloos ingewikkelde 'toverdoos' die alle pogingen de werking ervan te doorgronden met succes weerstaat.

Bij alle – al dan niet reële – complexiteit wordt vaak vergeten dat zelfs het meest uitgebreide motormanagementsysteem van een benzinemotor uiteindelijk twee basale functies vervult:

Het toedienen van de juiste hoeveelheid brandstof aan de motor

Het op het juiste tijdstip genereren van een vonk

Afgezien daarvan kan een motormanagementsysteem nog een aantal nevenfuncties vervullen zoals het regelen van het stationair draaien van de motor, laaddrukregeling van een eventueel aanwezige turbo- of mechanische compressor.

We zullen hier later op terugkomen. Een volledig motormanagementsysteem bestaat dientengevolge uit (minstens) twee subsystemen; het brandstofinjectiesysteem en het ontstekingsstelsel.

Het is ook mogelijk om slechts één van de twee toe te passen: elektronische brandstofinjectie in combinatie met een conventionele ontstekingsverdeler of computergestuurde regeling van het ontstekingstijdstip in combinatie met carburateurs voor het brandstofmengsel. Het eerste

zien we vaak bij 'oudere' toepassingen van motormanagement, terwijl het laatste veel voorkomt bij motorfietsen en aftermarkettoepassingen (klassiekers, kit cars, autosport e.d.).



### Eisen

Het door een verbrandingsmotor geleverde vermogen wordt bepaald door het beschikbare draaimoment en het motortoerental. Het draai- of koppelingsmoment (in het dagelijks taalgebruik veelal aangeduid met 'koppel') ontstaat uit de door de verbranding gegenereerde kracht (het verbrandingsmoment) verminderd met de wrijvingsverliezen in de motor en de kracht die nodig is nevenaggregaten als dynamo, stuurbekrachtigingspomp en dergelijke te laten draaien. Het verbrandingsmoment wordt in een Ottomotor bepaald door drie grootheden:

De luchtmassa die na het sluiten van de inlaatkleppen voor de verbranding ter beschikking staat

De hoeveelheid brandstof die op datzelfde moment beschikbaar is

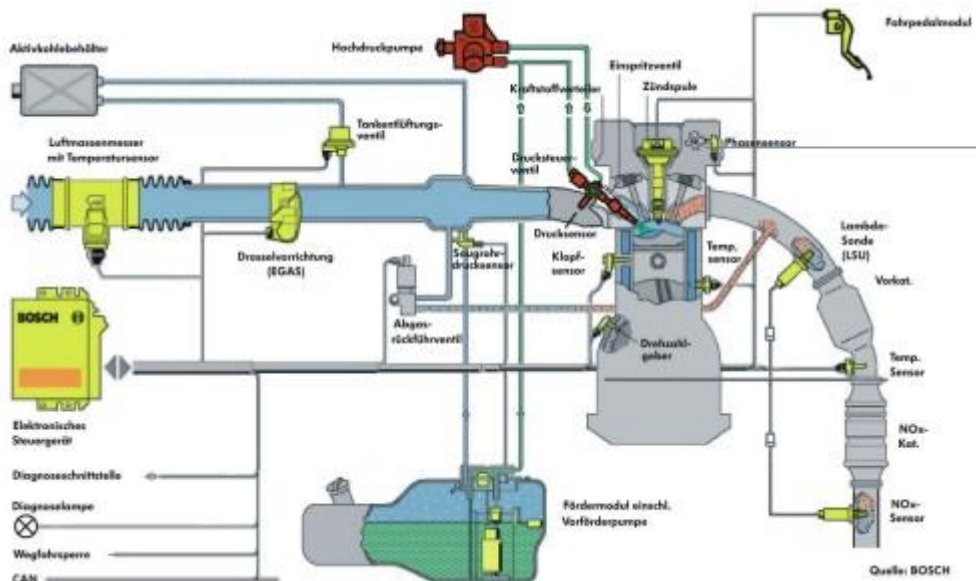
Het tijdstip waarop de ontstekingsvonk de verbranding van het lucht-brandstofmengsel inleidt (ervan uitgaand dat de vonk krachtig genoeg is om in theorie een volledige verbranding te bewerkstelligen)

De hoeveelheid lucht die door de motor wordt aangezogen is afhankelijk van de constructie ervan (inclusief in- en uitlaatsysteem); omgevingsfactoren (luchttemperatuur en -vochtigheid); de staat van onderhoud van de motor en de stand van de gasklep; die laatste kan door het motormanagement worden geregeld (throttle by-wire), terwijl de controle over de andere factoren altijd de taak van de motorsturing is. In feite kan men zeggen dat een motormanagementsysteem verantwoordelijk is voor het realiseren van het door de motor te genereren draaimoment.

Om te weten hoeveel brandstof er ingespoten moet worden en wanneer de ontsteking plaats moet vinden, heeft het motormanagement gegevens nodig over het motortoerental en de vullingsgraad van de motor, en over de motortemperatuur (voor een juiste verbranding heeft een koude motor een rijker mengsel nodig). Het motortoerental kan worden afgeleid uit de ontstekingspuls aan de negatieve pool van de bobine of worden 'afgelezen' van een krukas- of nokkenaspositiesensor; de vullingsgraad van de motor wordt door het motormanagement geëxtrapoleerd aan de hand van de aangezogen luchthoeveelheid, de stand van de gasklep, de absolute druk in het inlaatspruitstuk (MAP = Manifold Absolute Pressure) of een combinatie hiervan.

## Tabellen

Motormanagementsystemen zijn programmeerbaar, dat wil zeggen dat het ontstekingstijdstip en/of de hoeveelheid ingespoten brandstof op basis van de input van voornoemde sensoren door de in het geheugen van het systeem opgeslagen data wordt bepaald. Die data bestaan uit zogenoemde 'maps' voor ontstekingstijdstip, brandstofinjectie en eventueel (bijvoorbeeld) turbolaaddruk.



De allermodernste benzinemotoren werken met directe brandstofinjectie, waarbij de injectors in de verbrandingskamer inspuiten. Het principe is overigens erg oud: de Mercedes 300 SL uit de jaren vijftig had het ook.

Deze 'maps' zijn niets anders dan tabellen, waarbij voor een bepaald motortoerental en een bepaalde waarde die de vullingsgraad van de motor aangeeft (gaspedaalstand, aangezogen luchthoeveelheid of druk in het inlaatspruitstuk) een getal staat die de openingsduur van de brandstofinjector, of het ontstekingstijdstip bepaalt. Een 'map' kan ook weergegeven worden in een driedimensionale grafiek, waarop de eerste as het motortoerental aangeeft, de tweede de luchthoeveelheid en de derde hoe lang de brandstofinjectoren open staan (oftewel: hoeveel benzine er wordt ingespoten). Deze waarden worden bepaald voor bijvoorbeeld zestien motortoerentalen en zestien verschillende belastingsgraden, waardoor een 'map' van 256 door de ontwikkelaar gedefinieerde punten ontstaat. Alle waarden voor motortoerental en belasting die niet in de 'map' staan worden in het systeem berekend door interpolatie tussen de twee dichtstbijzijnde punten. Op deze 'map' kan nog een correctiefactor worden losgelaten voor bijvoorbeeld de koelvloeistoftemperatuur (temperatuur beneden een bepaalde waarde = meer brandstof). Een dergelijke 'map' wordt ook geschreven voor de ontsteking: bij hogere toerentalen wordt het ontstekingstijdstip vervroegd, terwijl bij hoge belastingen het tijdstip later wordt ingesteld dan bij lage belastingen – bij een hoge vullingsgraad ontbrandt het mengsel immers sneller en is er dus minder vóórontsteking nodig.

	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
1	10	20	18	30	35	38	40	
2	10	15	18	27	32	35	38	
3	10	12	18	22	26	32	36	
4	10	12	17	22	26	32	34	
5	10	12	16	21	25	32	32	
6	10	12	16	21	25	30	31	
7	10	12	16	21	25	30	31	

Hierboven een voorbeeld van een ontstekingstabel met acht keer acht velden; de rijen 0-7.000 geven het motortoerental aan, de kolommen 0-7 staan voor de motorbelasting. De motorbelasting (de hoeveelheid lucht die door de luchthoeveelheids- of luchtmassameter stroomt, de input van de gaskleppositie sensor of de MAP-sensor) neemt toe met de hoogte van het cijfer (0=onbelast, 7=vollast). Wanneer de motor 4000 toeren draait, en de mate van belasting overeenkomt met 3 in de tabel, zal de voorontsteking 22 graden bedragen. Bij belastingindex 3 en een toerental van 4.500 zal het motormanagement het gemiddelde nemen van de waarden die bij 4.000 en 5.000 toeren per minuut horen, in dit geval 32,5 graden. Het is duidelijk dat hoe meer punten in de tabel door de programmeur gedefinieerd kunnen worden, hoe nauwkeuriger het managementsysteem aan de omstandigheden kan worden aangepast. Zo kan de motor in dit geval bij 4.500 toeren per minuut juist op het punt zijn, dat hij op zich zijn maximale koppel kan ontwikkelen en daarom om een andere waarde voor het ontstekingstijdstip 'vraagt' dan je op basis van de twee naastgelegen velden zou verwachten.

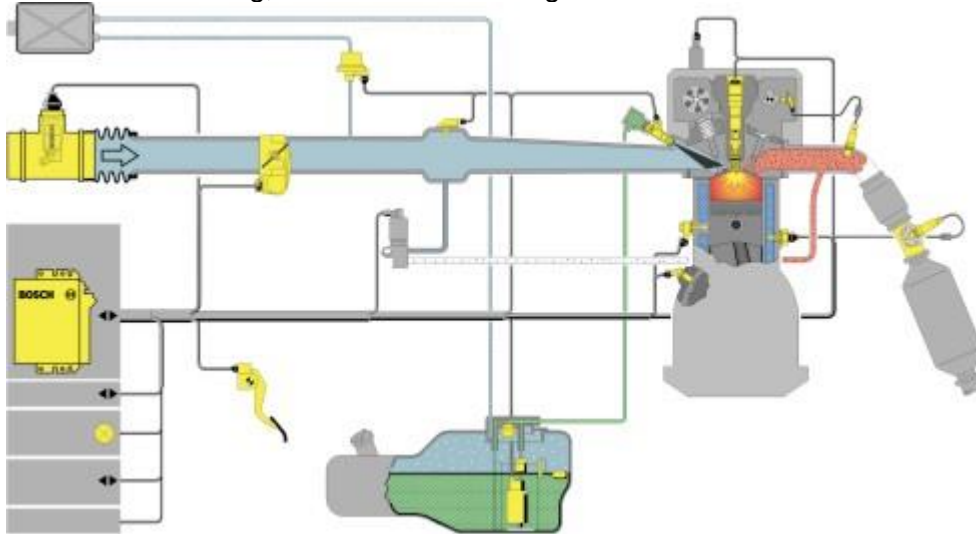
### Programmering

De motormanagementsystemen die worden toegepast in productievoertuigen zijn vrijwel zonder uitzondering 'gesloten', dat wil zeggen dat de programmering van ontsteking en brandstofinjectie 'vast' staat en in principe niet door de gebruiker kan worden veranderd. Om te voorkomen dat er door derden met het systeem wordt 'gerommeld' ontwikkelen autofabrikanten steeds geavanceerdere beveiligingssystemen, die vervolgens dan weer door 'chiptuners' worden 'gekraakt'. Tot voor enkele jaren werd deze programmering altijd opgeslagen in een eeprom (de 'chip'); bij chiptuning werd deze eeprom losgehaald en vervangen door eentje met nieuwe programmatuur. Tegenwoordig verloopt de programmering vaak via de OBD-aansluiting. Zo kan in het geval van motormanagementproblemen door de dealer snel nieuwe software worden gedownload.

Op de aftermarket vinden we het vrij programmeerbare systeem (KMS, Emerald, Motec, Dastek, Weber Alpha, SDS, enz) dat géén programmatuur bevat en door de gebruiker met behulp van een laptop op een specifieke motor kan worden ingesteld. Dit wordt op basis van parameters als de brandstof/luchtverhouding, de koelvloeistof- en inlaatluchttemperatuur, de uitlaatgastemperatuur e.d. gedaan op de rollentestbank en/of tijdens tests op de weg. Een vrij programmebaar systeem wordt in de autosport of bij tuning gebruikt wanneer de specificaties van een motor of de gebruiksomstandigheden teveel afwijken van de toleranties waarin door het bij de motor horende 'standaard' motormanagementsysteem in is voorzien, en dit ook niet door middel van 'chiptuning' (=aanpassing van het van fabriekswege gebruikte systeem) kan worden opgelost.

## Brandstofinjectie

Een typisch elektronisch multi-point brandstofinjectiesysteem bestaat in de basis uit een brandstoftank met elektrische brandstofpomp, een brandstoffilter, brandstofleidingen voor aanvoer en een retourleiding, een brandstofdrukregelaar en een brandstofrail met injectors.

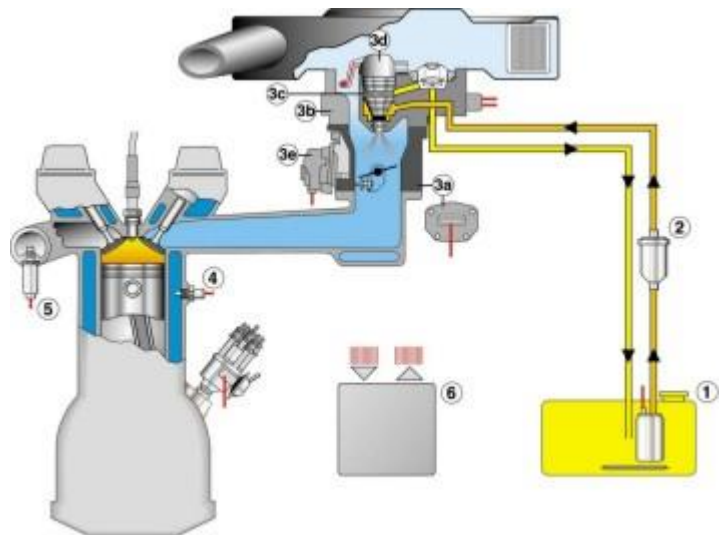


Het multipoint injectiesysteem (Bosch Motronic). Een luchtmassameter zorgt hier voor het signaal dat de belastinggraad representeert (afbeelding Bosch).

De brandstofpomp levert een druk van ongeveer 6 bar; de druk in de brandstofrail (een klein reservoir waaraan de injectors zijn gemonteerd) wordt door de brandstofdrukregelaar op een meestal vaste waarde boven de druk die in het inlaatspruitstuk heerst (meestal 2,5-3,5 bar) wordt gehouden. Dat wil zeggen dat bijvoorbeeld een 3,0 bar brandstofdrukregelaar bij vol geopende gasklep (waarbij de druk vrijwel atmosferisch is) een druk van  $3,0 + 1,0$  (atmosferische druk) = 4,0 bar is. Bij een motor met drukvulling kan de druk in het inlaatsysteem hoger dan atmosferisch zijn: bij een 2,5 bar brandstofdrukregelaar en een maximale turbodruk van 0,8 bar kan de brandstofdruk oplopen tot  $2,5 + 1,0 + 0,8 = 4,3$  bar. Het teveel aan door de brandstofpomp aangevoerde benzine loopt via de retourleiding weer terug in de brandstoftank. Injectors zijn elektromagnetische kleppen die doorgaans voor de inlaatpoort van elke cilinder zijn geïnstalleerd (een uitzondering is bijvoorbeeld de Rover A-series in de 'oude' Mini, waar de inlaatpoorten voor cilinders 1+2 en 3+4 'siamese tweelingen' zijn en die dientengevolge voor vier cilinders slechts twee injectoren heeft) door middel van pulsbreedtemodulatie worden aangestuurd, waarbij de ingespoten hoeveelheid brandstof wordt bepaald door de openingsduur (pulse width) oftewel de duty cycle, en de capaciteit van de injectoren (aangeduid in ml per minuut). Vuistregel voor het vaststellen van de juiste brandstofcapaciteit is dat de 'duty cycle niet boven de 80-85% mag uitstijgen (oftewel de injector staat 80-85% van de tijd open) wanneer de motor zijn maximale vermogen levert (en dus ook zijn grootste 'brandstofbehoefte' heeft). De injectors kunnen op twee manieren worden aangestuurd door het motormanagement: batch fired (waarbij alle injectoren tegelijkertijd open staan en het mengsel net als bij carburateurs of het mechanische Bosch K-Jetronic injectiesysteem) continu wordt gevormd, of sequentieel waarbij de injectors één voor één worden aangestuurd en de brandstof wordt ingespoten op het optimale tijdstip vóór de verbranding. Dit kan alleen wanneer het motormanagement 'weet' waar de zuigers 'staan' door middel van een nokkenas- of krukaspositiesensor. Voor wat betreft het maximaal bereikbare motorvermogen zijn beide systemen gelijkwaardig; het sequentiële systeem is alleen licht in het voordeel voor wat betreft emissiewaarden en de motorresponse bij gaswisselingen.

### Single

Het multipoint injectiesysteem is tegenwoordig de standaard. Een jaar of tien geleden, toen veel merken en modellen omschakelden van (enkele) carburateurs naar elektronische brandstofinjectie, kwamen we als 'overgangsfase' heel vaak single- of monopoint injectiesystemen tegen, waar één enkele injector in de buurt van de gasklep (waar de lichtsnelheid het hoogste is) was gemonteerd, en de mengselvorming in de plenum (een 'luchtreservoir') van het inlaatspruitstuk plaatsvond.



Het monopoint injectiesysteem werkt in principe gelijk aan het multipointsysteem hierboven, alleen is er slechts een injector, die boven de gasklep is geplaatst. Voor het vaststellen van de motorbelasting wordt hier een gasklepsensor gebruikt (afbeelding Bosch). Legenda: 1 = brandstoftank met pomp; 2 = brandstoffilter, 3a = gasklepositiesensor; 3b = brandstofdrukregelaar; 3c = injector; 3d = aansluitstekker met inlaatluchttemperatuurvoeler; 5 = lambdasonder; 6 = stuureenheid.

Omdat er slechts één injector is, heeft een singlepoint injectiesysteem geen brandstofrail: het principe is verder hetzelfde als bij de multipoint systemen. Een bekende vertegenwoordiger van dit genre is de Bosch Mono-Jetronic. Bij de Mono-Jetronic is de injector op het gasklephuis gemonteerd. Om te voorkomen dat er op de wanden een brandstoffilm wordt opgebouwd, is bij zulke systemen de brandstofstraal dusdanig gevormd, dat de brandstof in de spleet tussen gasklep en gasklephuis wordt gespoten, waar het door het grote drukverschil optimaal wordt gemengd.

### Closed-loop

Alle personenauto's die na 1 januari 1994 op de weg zijn gekomen, hebben een 'zelflerend' motormanagementsysteem op basis van een lambda-regeling. Hiermee kunnen toleranties en veranderingen in de motor of de brandstofinspuiting worden gecorrigeerd, zodat de motor onder normale bedrijfsomstandigheden altijd het meest optimale brandstofmengsel van 14,7 delen lucht op 1 deel benzine ( $\lambda = 1$ ) krijgt toegediend. Het systeem werkt dan in closed loop: afwijkingen van de juiste lambda-waarde worden door de lambdasensor geconstateerd, waarna het motormanagement de brandstofinspuiting corrigeert. Onder vollast is een (veel) rijker mengsel gewenst dat zich buiten het werkingsgebied van de algemeen toegepaste lambdasensors bevindt: het systeem werkt dan in open loop modus en baseert de in te spuiten hoeveelheid brandstof dan geheel op de in het motormanagement geprogrammeerde tabellen.