

INSTALLATIEHANDLEIDING

NO_x-MONITORING OP NON-ROAD MOBILE MACHINERY

Dit document beschrijft de wijze van installatie van de NO_x-monitoringstool op bouwmachines.

Versie	Datum	Opmerking
V1.6 door Edo Buskermolen	16-09-2025	Toegevoegd: - Polynoomtabel - Tijdsynchronisatie voorbeeld Diverse verduidelijkingen
V1.5 door Edo Buskermolen	06-05-2025	Artikelnummers MAF sensoren en connectoren uitgebreid
V1.4 door Edo Buskermolen	07-04-2025	CAN matrix NO _x -sensor en schema 24V MAF toegevoegd
V1.4 door Edo Buskermolen	11-03-2025	Bepaling MAF polynoom bij ingelijmd sensorelement toegevoegd
V1.3 door Edo Buskermolen	25-02-2025	Conditionering analoge sensorwaardes MAF sensor toegevoegd
V1.2 door Edo Buskermolen	20-02-2025	Artikel nummer NO _x pins aangepast
V1.1 door Edo Buskermolen	08-01-2025	Terugkoppeling verwerkt - Demontage NO_x / MAF
V1.0 door Edo Buskermolen	21-10-2024	Bijlage A toegevoegd
V1.0 door Edo Buskermolen	23-09-2024	Eerste opzet

1 INLEIDING

Deze handleiding is geschreven voor alle betrokken personen bij het project 'Meten aan de pijp' van Topsector Logistiek die NO_x monitoringinstallaties willen uitvoeren volgens een standaard die TNO in de loop der jaren ontwikkeld heeft. De monitoring biedt een aantal voor- en nadelen ten opzichte van laboratoriummetingen. Een voordeel is dat tegen gelijke kosten, op grotere schaal metingen uitgevoerd kunnen worden voor langere periodes, zonder tussenkomst van een testingenieur.

Het complete systeem waar deze installatiehandleiding betrekking op heeft bestaat uit de volgende hoofdelementen;

- NO_x-sensor (ten behoeve van meten van de NO_x- en zuurstofconcentratie)
- MAF-sensor (Mass air flow- of luchtmassastroom-sensor)
- Controller/datalogger

1.1 WERKINGSPRINCIPE

Het systeem meet de concentraties stikstofoxiden en zuurstof in het uitlaatgas. Om de concentraties om te rekenen in absolute emissiegetallen (grammen) voor CO₂ en NO_x dient de totale stroom lucht en brandstof door de motor bepaald te worden. Het luchtverbruik van de motor wordt ofwel berekend door de dieselcontroller of gemeten door een luchtmassastroommeter. Deze luchtmassastroom (MAF) sensor kan, indien niet aanwezig in de motorconfiguratie, extra bijgeplaatst worden in het inlaattraject. In elk geval dient de waarde geijkt te worden ten aanzien van een gekalibreerde MAF-sensor.

De gemeten concentraties worden vermenigvuldigd met de totale luchtmassastroom door de motor en met de fractie van molaire massa van de emissie die berekend moet worden ten opzichte van

de molaire massa van de samengestelde mengsel van lucht en brandstof. Dit levert een NO_x- en CO₂-uitstoot op in milligram per seconde. Wanneer een bepaalde periode (bijvoorbeeld een dag) van de machine wordt gesommeerd kan zo de uitstoot over een dag bepaald worden.

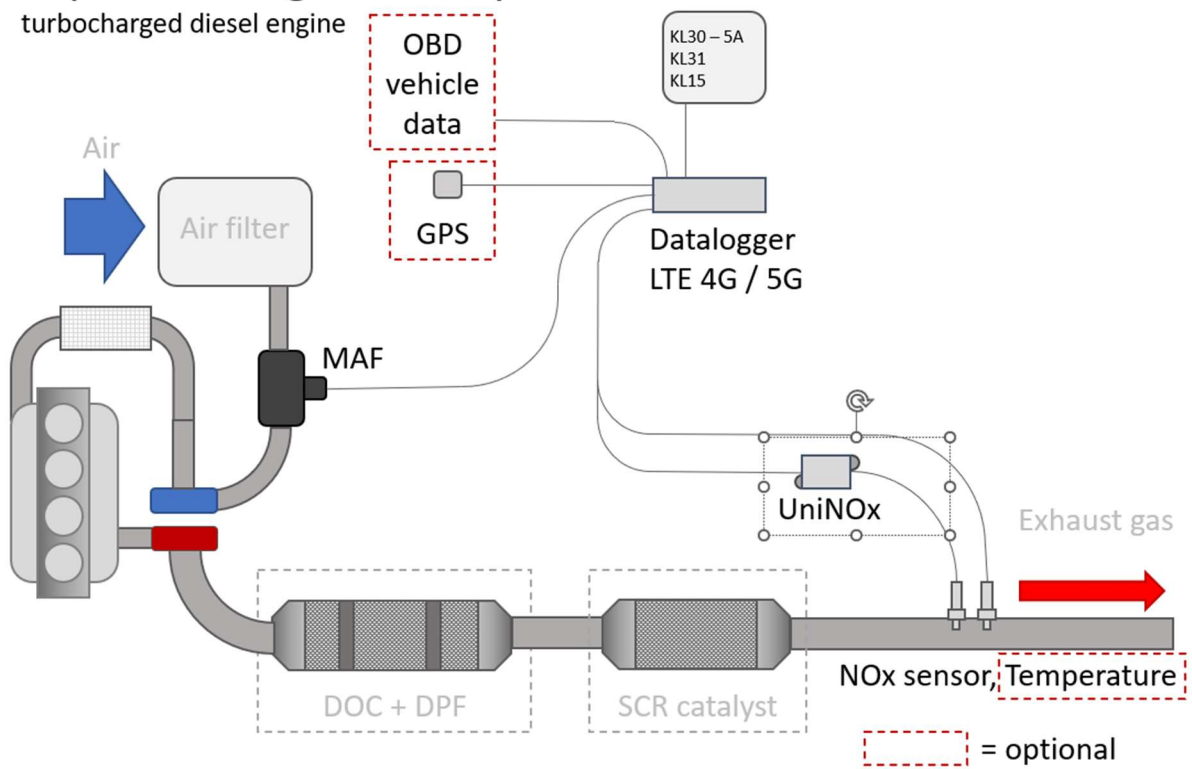
Met additionele signalen uit de dieselcontroller kunnen deze ook omgerekend worden naar gram per kWh of gram per kilometer. Voor deze berekeningen is informatie nodig over het geleverde motorvermogen. Deze kan op verschillende manieren bepaald worden, maar de meest voor de hand liggende is door middel van het motorkoppel en toerental. Deze rekenmethodiek wordt in dit document niet behandeld.

1.2 SCHEMA MEETOPSTELLING

Onderstaand schema betreft een generiek voorbeeld van een mogelijke opstelling. Eventuele varianten en opties op dit voorbeeld zijn verderop in het document te vinden.

Topsector Logistiek 'Supermachine'

turbocharged diesel engine



2 NO_x-SENSOR

2.1 WERKING NO_x-SENSOR

De werking van de NO_x-sensor laat zich in het kort beschrijven door een zirconia katalysator die de zuurstof onttrekt uit het uitlaatgas (O₂-concentratie) en vervolgens de stikstofoxiden opsplijst in stikstof en zuurstof. Deze zuurstof wordt wederom gemeten en wordt omgerekend tot een NO_x-concentratie.

Deze katalytische werking vindt op hoge temperatuur plaats en dus heeft de sensor een verwarmingsfunctie die wordt ingeschakeld door middel van een bericht op de CAN-bus. De opwarmperiode van de sensor is altijd 100 seconden; ook als de sensor reeds deels was voorverwarmd.

De sensor is leverbaar in een 24V boordspanning variant evenals een 12V variant. Beide artikelnummers zijn terug te vinden in de onderdelenlijst.

2.2 KALIBRATIE NO_x-SENSOR

Een nieuwe sensor kan direct toegepast worden. Wanneer een gebruikte sensor wordt toegepast, dient deze eerst gekalibreerd te worden met ijk-gassen voor zowel de NO_x- als zuurstofconcentratie. De ijkingsprocedure wordt in dit document niet behandeld, maar kan wel opgevraagd worden bij TNO.

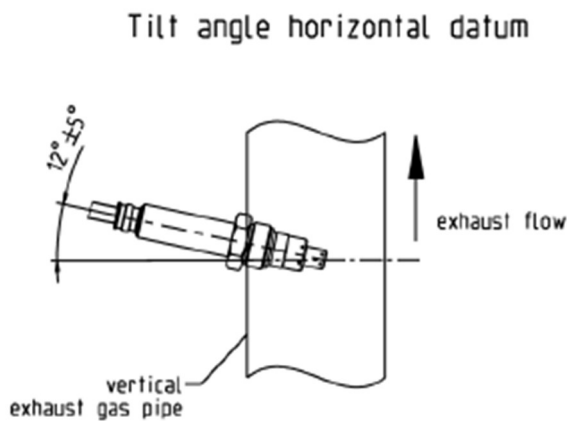
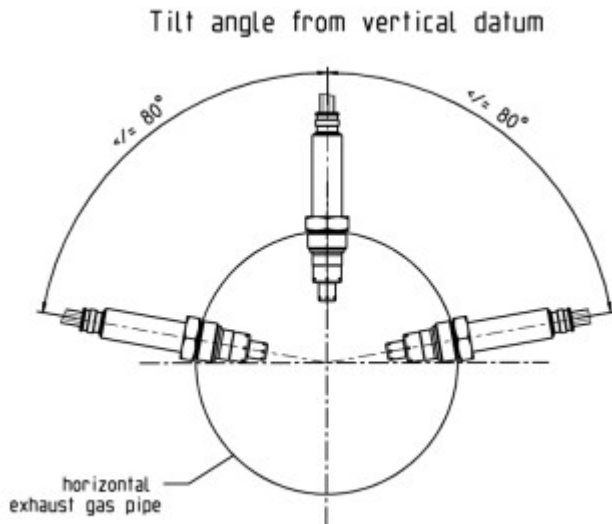
2.3 PLAATSING NO_x-SENSOR

De NO_x-sensor meet zowel stikstofoxiden als zuurstof en dient in de uitlaat geplaatst te worden na alle nabehandelingssystemen van het uitlaatsysteem. Dat wil zeggen, na een eventueel aanwezig roetfilter, Selective Catalytic Reduction (SCR) katalysator en Diesel Oxidation Catalyst (DOC).

De las-sok voor dit type sensor dient in het uitlaatdeel gelast te worden met een zelf te kiezen lasmethode. De las-sok is van een speciaal type met een kraag onderaan het schroefdraad die voor de afdichting zorgt. Het artikel is te vinden in de onderdelenlijst. Toepassen van een keramisch vet op het schroefdraad vergemakkelijkt demontage naderhand. De schroefdraad maat is M20 x 1.5 (metrisch fijn). Het te boren gat is circa 18mm in diameter. Het heeft de voorkeur deze uit te voeren in RVS 304. Het aandraaimoment is 50 Nm met steekmaat 22mm.



De maximale uitlaatgastemperatuur die het sensorelement kan verdragen is 800 graden Celsius. Zelfs bij dieselmotoren uitgerust met roetfilter met actieve regeneratie zal de maximale temperatuur deze grens niet overschrijden (circa 550 graden Celsius). De sensor dient volgens voorschrift van de fabrikant geplaatst te worden onder een hoek van maximaal 80 graden ten opzichte van verticaal om te voorkomen dat vloeibaar water zich in het sensor element kan verzamelen bij condensvorming. Zie bijgevoegde tekening.



2.4 PLAATSING REGELEENHEID

De NO_x -sensor bestaat uit een sensorelement en regeleenheid. De regeleenheid is niet los te maken van het sensorelement. De regeleenheid en de bekabeling tussen de sensor en regeleenheid mag in omgevingstemperaturen tussen de -40 en 115 graden Celsius geplaatst worden. Het is dus geen probleem om deze in de nabijheid van uitlaatdelen te monteren, maar wel dient enkele centimeters afstand bewaard te worden tot uitlaatdelen zodat deze temperatuurgrens niet overschreden wordt.

2.5 BEKABELING NO_x -SENSOR

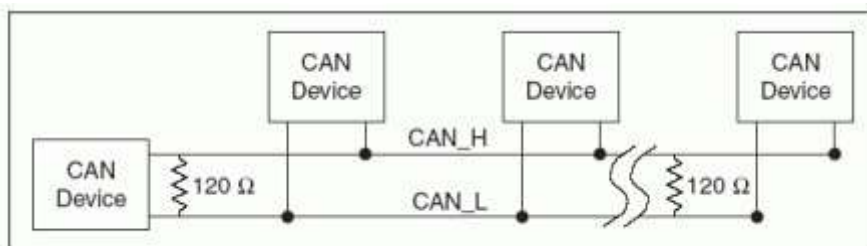
De NO_x -sensor wordt aangesloten door middel van een 2x2 aderige twisted kabel ten behoeve van de geschakelde voeding (24V of 12V DC KL15) en CAN-bus. Zie het hoofdstuk Onderdelen voor de benodigde artikelnummers. De pinbezetting van de connector aan de regeleenheid is weergegeven in de onderstaande tabel. De vijfde pin dient niet aangesloten te worden.

Deze pin kan eventueel aan de massa verbonden worden om de Source Address (SA) en Parameter Group Number (PGN) te laten wijzigen.

Zodoende kan bijvoorbeeld een tweede sensor aangesloten worden die de NO_x-concentraties vóór de SCR-katalysator meet.

Pin	Functie	Opmerking
1	U_batt (24V)	Schakelcontact (KL15)
2	GND	Massa
3	CAN LOW	
4	CAN HIGH	
5	Not connected	Optioneel

De NO_x-sensor dient op een eigen CAN-bus met de datalogger te communiceren en deze CAN-bus niet met bijvoorbeeld de motor CAN-bus te delen om te voorkomen dat er conflicterende berichtgeving ontstaat. Zodoende moeten er ook twee stuks 120 Ohm afsluitweerstand worden toegevoegd om deze separate CAN-bus te laten functioneren.



Bron: National Instruments

2.6 VOORVERWARMEN VAN DE NO_x-SENSOR

Als de NO_x-sensor gevoed wordt, communiceert deze standaard waardes. Om de sensor te verwarmen dient een repetitief (circa 100 ms) CAN bericht gestuurd te worden volgens de specificaties van de fabrikant.

Extended 29 bit ID: 0x18FEDF00 | DLC: 8 | Data: 00 00 00 00 00 00 00 05

2.7 DATA VAN DE NO_x-SENSOR

Wanneer de Continental UniNO_x-sensor uit de onderdelenlijst wordt toegepast is de CAN-bus communicatie tot stand te brengen volgens onderstaande berichtgeving. Na circa 100 seconden is de NO_x-sensor volledig verwarmd en stuurt deze de sensorwaardes doormiddel van onderstaand CAN bericht. Uit de NO_xready- en O₂Ready-bits kan afgelezen worden dat de uitgestuurde data valide is.

Extended 29 bit ID: 0x18F00F52 | DLC: 8 | Data: XX XX XX XX XX XX XX XX

```
BO_ 2565869394 NOxDS: 8 Sender__XXX
SG_ NOx : 0|16 @1+ (0.05,-200) [-200|3076.75] "ppm" DATALOGGER
SG_ O2 : 16|16 @1+ (0.000514,-12) [-12|21.68] "%" DATALOGGER
SG_ PwrInRange : 32| 2 @1+ (1,0) [0|3] "-" DATALOGGER
SG_ TempInRange : 34| 2 @1+ (1,0) [0|3] "-" DATALOGGER
SG_ NOxready : 36| 2 @1+ (1,0) [0|3] "-" DATALOGGER
SG_ O2Ready : 38| 2 @1+ (1,0) [0|3] "-" DATALOGGER
```

	7	6	5	4	3	2	1	0
0 (L-Byte)	NOx concentration ←							
1 (H-Byte)	←	NOx concentration						
2 (L-Byte)	Oxygen concentration ←							
3 (H-Byte)	←	Oxygen concentration						
4	Status Byte							
5	not used**	Status Heater Mode			Error* Heater			
6	Diagnosis feedback status				Error* NOx			
7	not used**	not used**	not used**	Error* O ₂				

2.8 DEMONTAGE VAN DE SENSOR

Wanneer de NO_x-sensor gedemonteerd dient te worden voor kalibratie of vanwege het beëindigen van de monitoringsperiode kan men gebruik maken van zogenaamde lambda-sonde sleutels (steekmaat 22mm) zoals de Hazet 4680-5.



Wanneer de las-sok van de NO_x-sensor (tijdelijk of permanent) afgedicht moet worden kan gebruik gemaakt worden van een DIN 908 M20x1.5 blindplug (HEX sleutel 10mm). Zie hiervoor de onderdelenlijst.

2.9 UITVOERING BIJ 12V BOORDSPANNING

Bij kleinere bouwmachines is vaak een 12V boordspanning toegepast en ligt het meer voor de hand om een 12V NO_x-sensor toe te passen. Het artikelnummer hiervoor is genoemd in de onderdelenlijst. De aansluitwijze en pinbezetting van deze sensor is identiek aan de 24V variant met als enige verschil dat de geschakelde batterijspanning 12V is in plaats van 24V.

3 MASS AIR FLOW SENSOR

De luchtmassastroom-sensor of mass air flow (MAF) sensor die wordt besproken in dit hoofdstuk is van Bosch type HFM-5.

3.1 WERKING MAF SENSOR

De werking van de sensor berust op een hittedraad die op een constante temperatuur wordt gehouden doormiddel van elektrische stroom. De doorstromende lucht koelt de draad en de elektrische stroom die nodig is om de draad op temperatuur te houden vormt de maat voor de hoeveelheid kilogram lucht die per tijdseenheid door de sensor stroomt. Elke dwarsdoorsnede inlaatbuis waarin de sensor gemonteerd wordt heeft zijn eigen karakteristiek.

3.2 PLAATSING MAF SENSOR

De luchtmassastroom-sensor dient bij voorkeur na het luchtfilter, maar voor de eventueel aanwezige turbo geplaatst te worden.

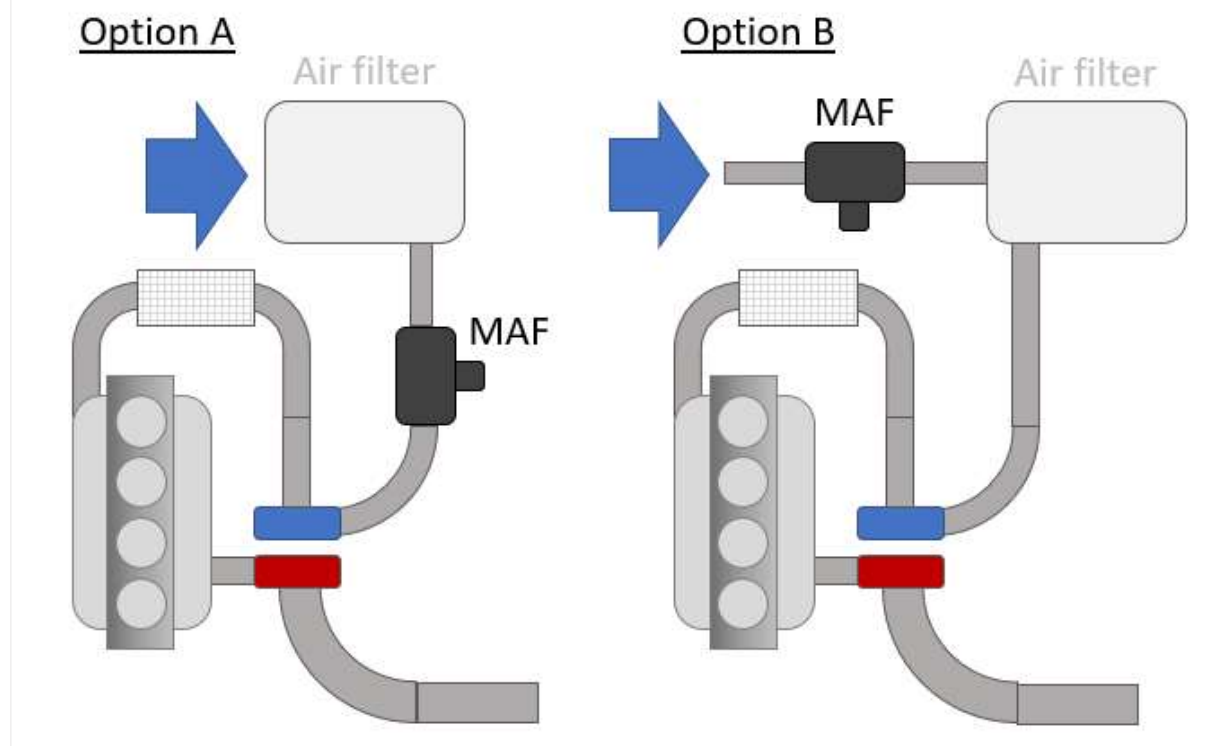
De keuze voor de beste of meest praktische locatie is afhankelijk van:

- Materiaal inlaattraject
- Vorm en route van inlaatkanalen
- Aanwezigheid van een turbo of compressor

Bij aanwezigheid van een turbo of compressor dient de MAF sensor altijd in het lagedruk inlaattraject geplaatst te worden. De voorkeur heeft altijd om deze dan na het luchtfilter te plaatsen om de vervuiling van de sensor te verminderen.

MAF sensor placement

Turbo charged engine

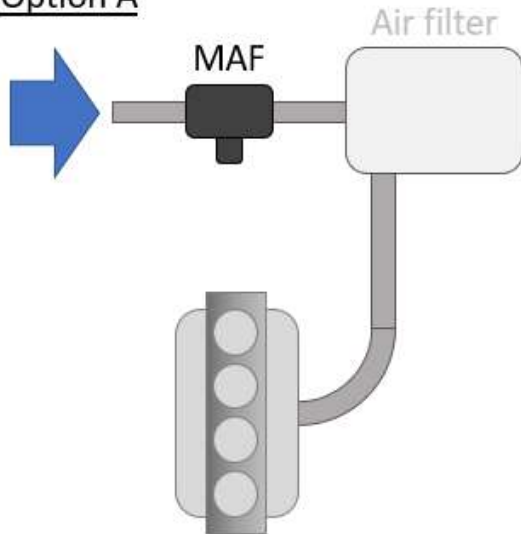


Wanneer de motor geen turbo heeft, heeft het juist voordelen om de MAF sensor voor het luchtfilter te plaatsen omdat daar de pulsaties van de aanzuigslagen minder hevig zijn. Het treedt wel vervuiling in de hand. Waardoor regelmatig controle moet plaatsvinden of de MAF sensor nog juiste waardes geeft. Dit kan bijvoorbeeld door de gemeten luchtmassastroom bij een gegeven toerental en motorbelasting over de tijd te vergelijken.

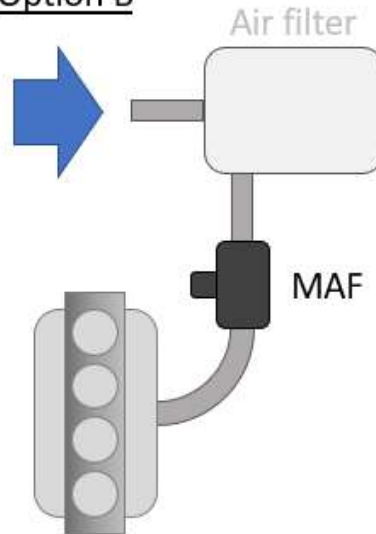
MAF sensor placement

Atmospheric engine

Option A



Option B



Als montage van een MAF sensor niet past binnen de configuratie van het inlaattraject of omdat de beschikbare diameters MAF sensoren niet toereikend zijn kan gekozen worden voor het inlijmen van een los sensorelement.

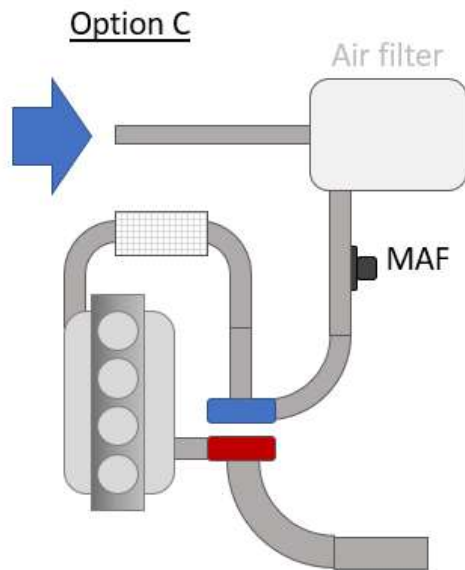
Bij het monteren van een los sensorelement dient de volgende werkwijze aangehouden te worden:

1. inlaatbuis demonteren;
2. gat boren of snijden in de inlaatbuis;
3. binnendiameter opmeten van de buis met behulp van een schuifmaat en deze registreren;
4. de flens van een MAF sensor element zagen (de variant met 60 mm buitendiameter aansluitmaat heeft de langste kraag);
5. de flens in het gat lijmen met een hybride polymeer kit (bv Soudaseal 240 FC);
6. droogtijd hanteren volgens de specificaties van het lijmetiket;
7. het sensorelement met 5-kant hex-schroeven (ofwel Stern bits, zie onderdelenlijst) monteren in de sensor flens;
8. inlaatbuis monteren.

Wanneer de MAF sensor gedemonteerd wordt kan het aangepaste inlaatdeel vervangen worden voor een nieuw deel, of afgedekt worden met een zelf te vervaardigen afdekplaatje. Deze keuze kan worden gemaakt in overleg met de machine-eigenaar.

MAF sensing element

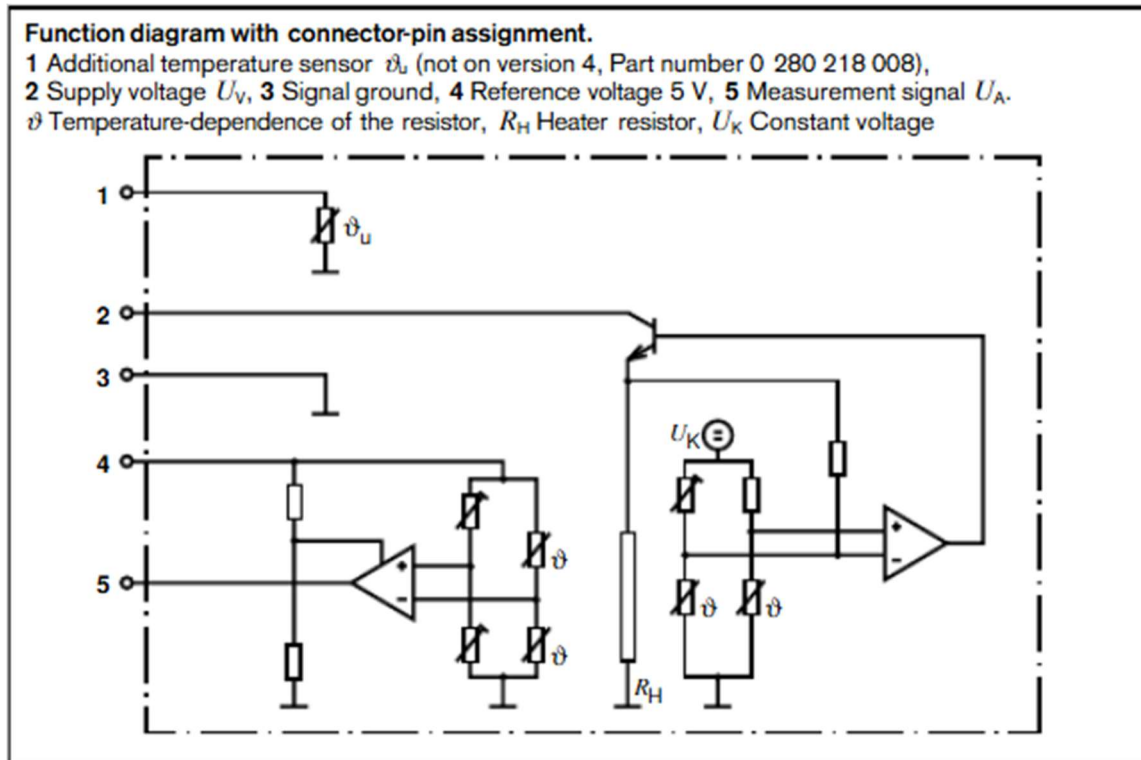
Atmospheric and turbo charged engines



3.3 BEKABELING MAF SENSOR

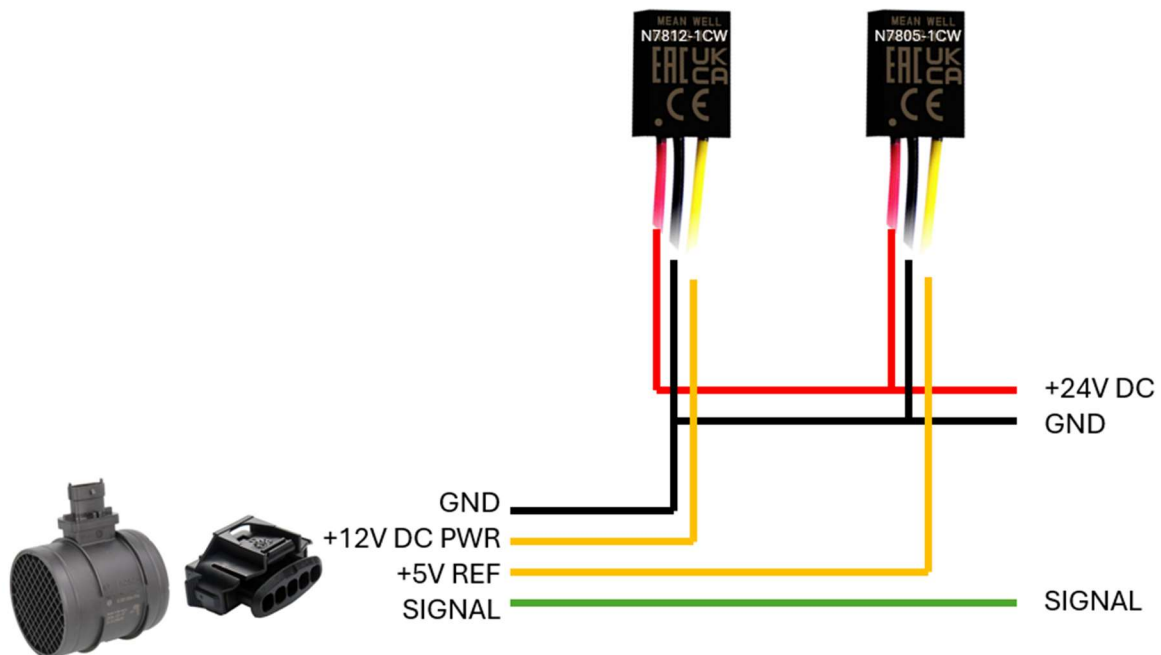
De MAF sensor wordt aangesloten door middel van een vier-aderige kabel. De sensor heeft een voeding nodig in de vorm van gelijkspanning tussen 8V en 17V DC en massa nodig. Het stroomverbruik is lager dan 100 mA bij 14V.

Daarnaast is een +5V DC referentiespanning nodig en de vierde draad is het uitgangssignaal (1 tot 5 V DC). Deze signaalspanning is om te rekenen in een luchtmassastroom. Deze rekenmethode wordt besproken in hoofdstuk 3 en de polynoomwaarden voor afwijkende diameter inlaatbuizen is opgenomen in Bijlage B.



Bij machines met een 12V boordspanning is de voedingsspanning dus binnen het bereik van de bovenstaande MAF-sensor.

Bij machines met een 24V boordspanning is het wel noodzakelijk om een DC/DC omvormer te gebruiken om de tot een correcte voedingsspanning te komen. Het stroomverbruik van de MAF sensor is dusdanig laag, dat een kleine in-line DC/DC omvormer een praktische oplossing kan zijn.



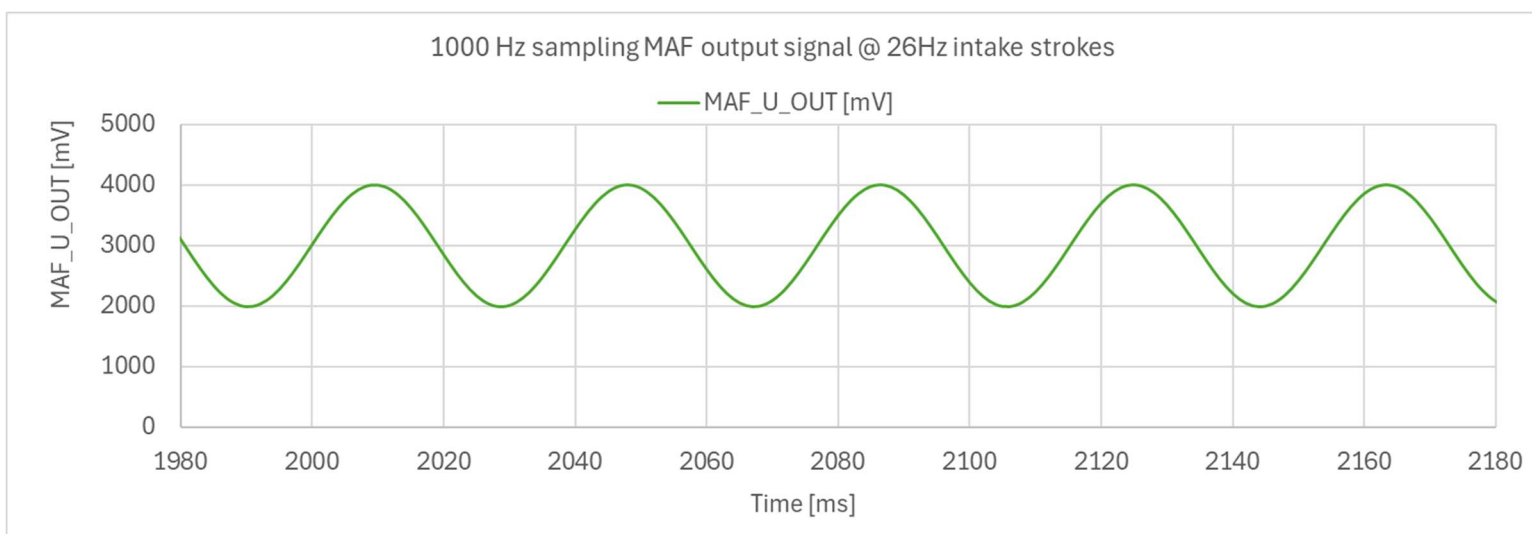
Bron: Bosch (luchtmassameter)

3.4 BEMONSTEREN VAN MAF SIGNAAL

Het MAF signaal zal ten opzichte van de gemiddelde spanning een kleine sinusvormige rimpel bevatten die wordt veroorzaakt door de aanzuigslagen van de motor.

De amplitude van deze sinusvorm wordt beïnvloed door meerdere factoren:

- afstand van de sensor tot de motor;
- aanwezigheid van een turbo of compressor tussen de MAF sensor en motor;
- MAF sensor plaatsing voor of achter het luchtfilter;
- toerental van de motor; een lager toerental geeft een grotere amplitude;
- cilinderinhoud- en aantal.



Het voorschrift is om de analoge uitgangsspanning van de MAF sensor met een hogere frequentie te bemonsteren dan de frequentie die te berekenen is voor het hoogste toerental. In vrijwel alle gevallen zal een frequentie van 120Hz of hoger afdoende moeten zijn om niet het gevaar te lopen synchroon te bemonsteren met de aanzuigslagen van de motor.

De toelichting op deze frequentie is vinden in Bijlage C.

3.5 BEREKENEN MAF SIGNAAL

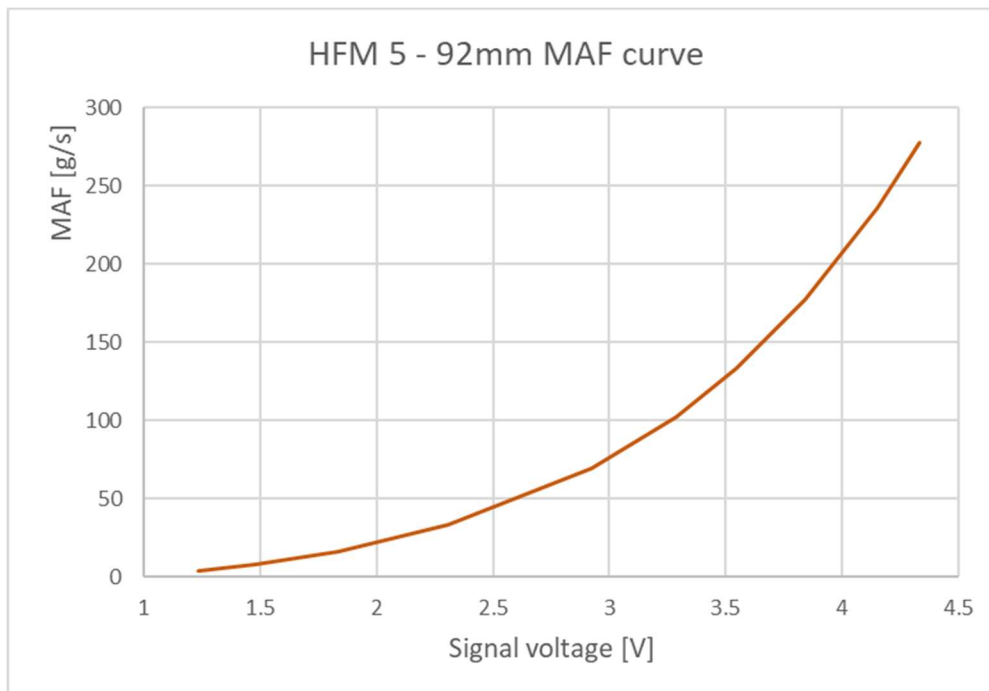
De spanning op de signaaldraad kan worden omgerekend tot een luchtmassastroom in gram per seconde door middel van een op voorhand bepaalde polynoomvergelijking. Als voorbeeld staat hier de polynoomvergelijking die volgt uit het specificatieblad van de 92mm sensor van Bosch.

$$MAF \left[\frac{g}{s} \right] = 1.3507 * U^4 + -6.4268 * U^3 + 21.642 * U^2 + -19.905 * U + 4.7853$$

Waarbij;

- MAF: Luchtmassastroom [g/s]
- U: Spanning op de signaaldraad [V]

Bovenstaande vergelijking komt voort uit een polynoomvergelijking die onderstaande karakteristiek kent. Deze is alleen geldig wanneer de sensor met 92mm aansluitmaat wordt gebruikt.



3.6 POLYNOMVERGELIJKING LOS SENSORELEMENT

Wanneer gekozen wordt om een los sensor element in het inlaattraject van de motor te verlijmen, dient de polynoomvergelijking bepaald te worden voor die specifieke opstelling.

Dit kan op drie verschillende wijzen:

- **Methode 1: Rekenkundige benadering**
Polynoomwaarden berekenen doormiddel van rekenkundige formule op basis van de binnendiameter van de aanzuigbuis ter hoogte van het sensorelement.
- **Methode 2: Referentiesensor**
Tijdelijk in serie geplaatste luchtmassastroom sensor met een bekende karakteristiek. (referentiesensor)
- **Methode 3: IJken op kalibratieopstelling**
De inlaatbuis opnemen in een kalibratieopstelling met ventilator waarbij een geijkte sensor de werkelijke luchtmassastroom bij een gemeten sensor spanning bepaalt.

METHODE 1: REKENKUNDIGE BENADERING

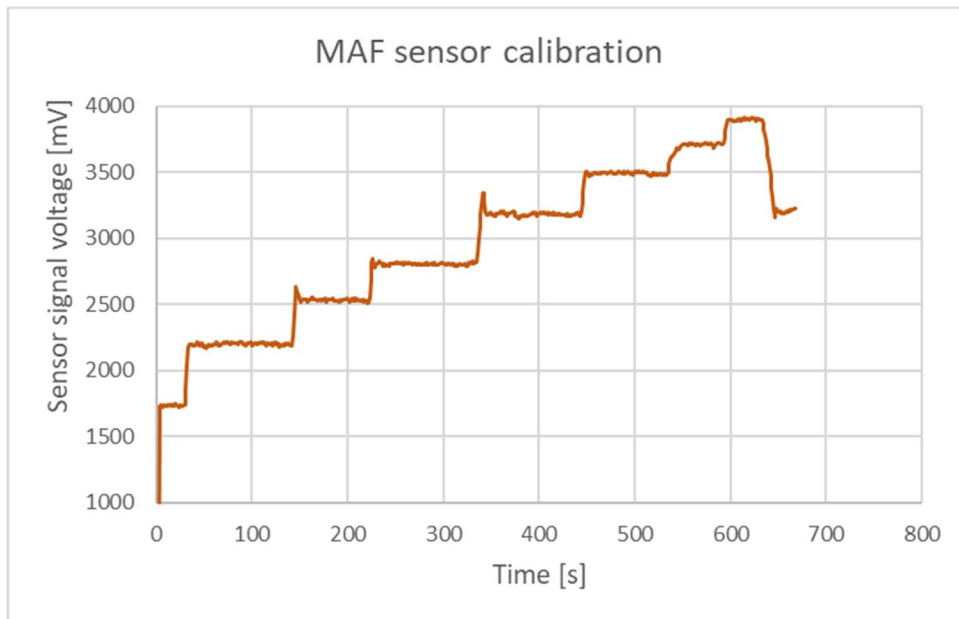
De rekenkundige methode berust op een TNO onderzoek waarbij een zestal MAF-sensoren met variërende diameters zijn geijkt tegen een tweetal sensoren die extern gekalibreerd zijn. Voor elke van deze zes sensoren is vervolgens de luchtmassastroom teruggerekend naar lichtsnelheid. Het verband tussen de lichtsnelheid en sensorspanning blijkt bij al deze zes sensoren overeenkomst te hebben. Op basis van dat verband is vervolgens een opzoektabel gemaakt voor een veelvoud aan diameters. Deze polynoomwaardes uit de opzoektabel kunnen vervolgens in onderstaande formule toegepast worden wanneer een MAF-sensorelement in een niet-standaard diameter geplaatst is.

$$\text{MAF [g/s]} = C * U^4 + D * U^3 + E * U^2 + F * U + G$$

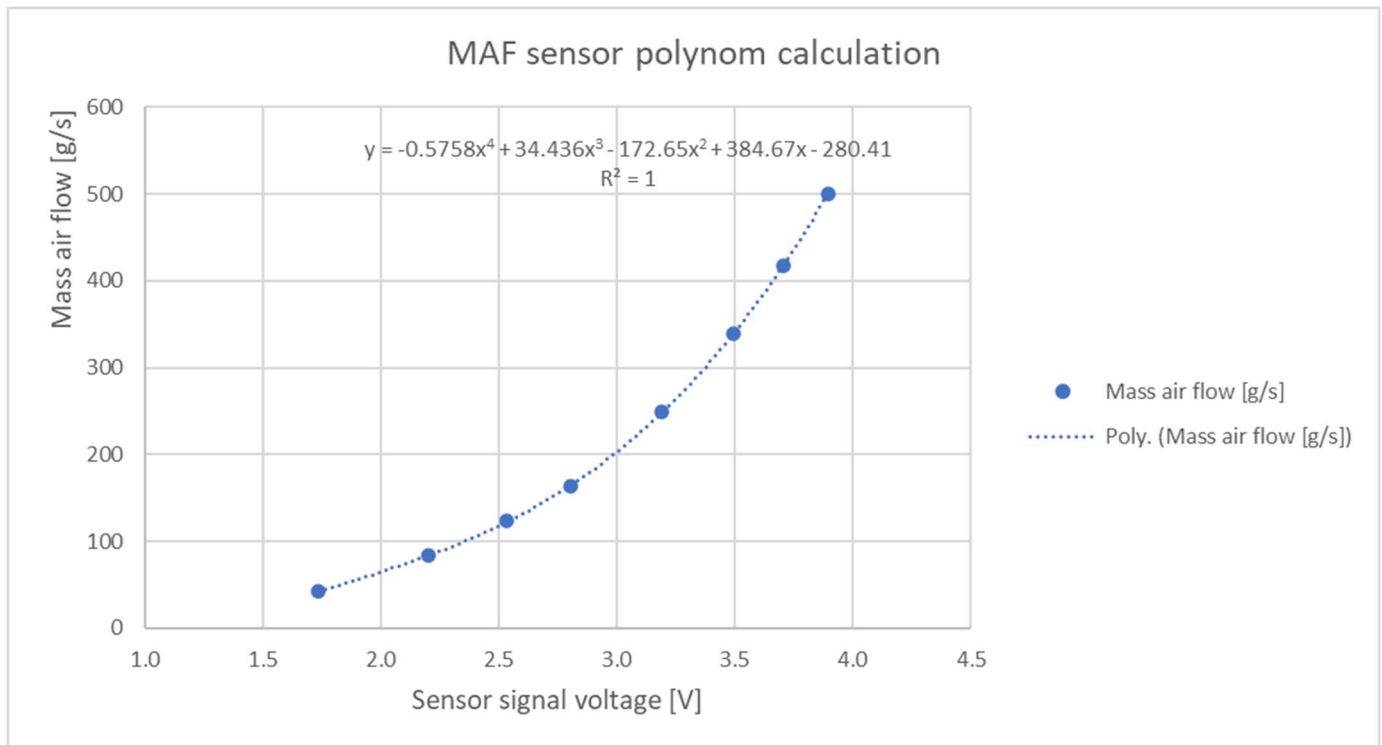
OEM	Bosch	Bosch	Bosch	TNO	TNO	TNO
OD [mm]	60	70	92	110	130	150
Binnen-diameter [mm]	49.5	60.5	82.5	101.5	122	142
C	0.4265	1.3573	0.5717	2.0198	1.7177	3.5610
D	-4.1740	-12.4996	-1.4844	-11.1440	-3.3836	-13.6065
E	19.6975	47.7352	6.3805	33.2352	3.9580	32.2796
F	-31.4516	-66.3182	4.0138	-20.9871	33.3304	7.0214
G	14.9968	29.2557	-10.0622	-3.4446	-36.0019	-29.2123

METHODE 2 & 3: IJking

In methode 2 en 3 is het van belang dat vrijwel het gehele verwachte bereik van de luchtmassastroom voor de specifieke machine wordt afgedekt in de ijking. De ijking wordt uitgevoerd door een reeks luchtmassastroomniveaus in stappen enige tijd constant te houden en de gemiddelde sensorspanning te registreren. Een voorbeeld van een dergelijke ijking wordt getoond in onderstaande grafiek.



De sensorspanning wordt gemiddeld over meerdere seconden bij een bekende luchtmassastroom van een geijekte referentiesensor. Wanneer deze gemiddelden worden uitgezet in een spreidingsgrafiek ontstaat de mogelijkheid om een niet-lineaire trendline door de meetpunten te plaatsen. Deze laat zich het beste vertalen in een vierde graads polynoomvergelijking.



4 TEMPERATUURSENSOR

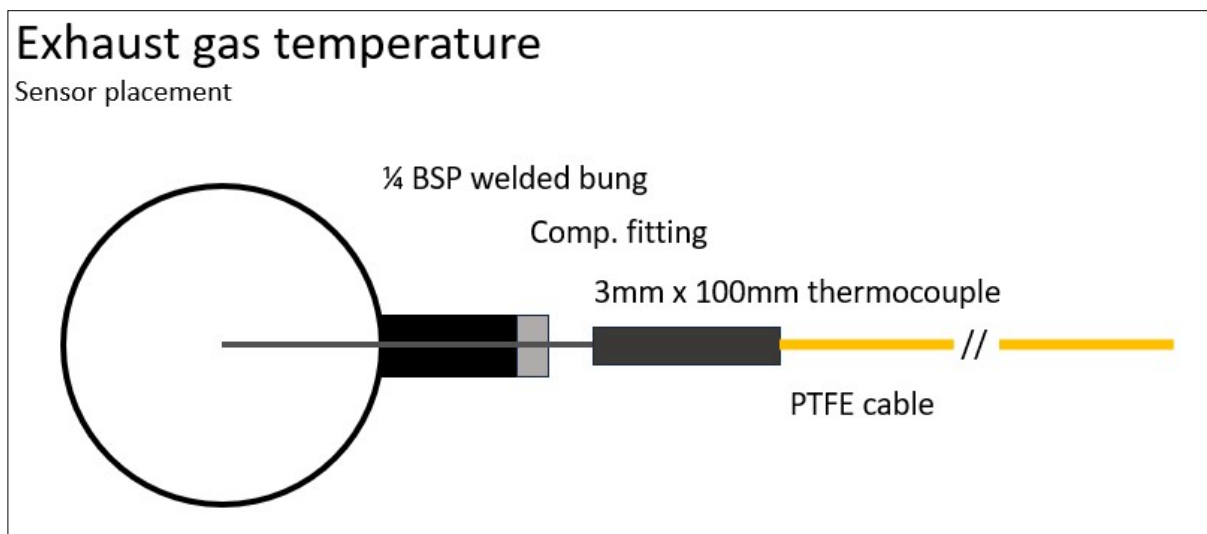
Om de efficiency van een Selective Catalytic Reduction (SCR) systeem beter te kunnen beoordelen wordt een temperatuursensor geplaatst in de uitlaat nabij de NO_x-sensor. Het meten van de temperatuur kan de onderzoeker inzicht geven in situaties waarin verhoogde NO_x emissies worden waargenomen door bijvoorbeeld het niet op temperatuur zijn van de SCR.

4.1 TYPE TEMPERATUURSENSOR

De sensor moet tenminste kunnen meten boven de te verwachten maximale temperatuur van 350 graden Celsius (of 550 graden Celsius bij aanwezigheid van een roetfilter of DPF). Dit kan onder andere een PT1000 of K-type thermokoppel zijn. In de onderdelenlijst is een voorbeeld opgenomen van een te gebruiken thermokoppel met aansluitmateriaal.

4.2 SENSOR PLAATSING

Doorgaans hebben temperatuursensoren geen gewenste oriëntatie maar dient de sensorkop waar de temperatuurmeting plaatsvindt in het midden van de uitlaatbuis te worden gepositioneerd. De las-sok die als voorbeeld is opgegeven is bedoeld voor een K-type thermokoppel met een diameter van 3mm. De bijbehorende knelwartel heeft een buitendraad van ¼ BSP. De las-sok is vervaardigd uit RVS en de uitlaat dient voorgeboord te worden met ~8mm.



In het geval een thermokoppel gebruikt wordt, kan deze na het knellen op een afstand van circa 20mm boven de wartel in elke gewenste bocht gebogen worden.

4.3 BEKABELING

De bekabeling dient zorgvuldig gekozen te worden met oog voor temperatuurbestendigheid en voldoende lengte bieden om de datalogger te bereiken (bij aangesloten sensoren).

De voorbeeldkabel is uitgevoerd met een PTFE mantel met een metalen scherm vanwege de hoge temperatuurbestendigheid en weerstand tegen mechanische belasting.

5 CONTROLLER / DATALOGGER

De controller of datalogger wordt gebruikt voor het verzamelen, opslaan en overdragen van de benodigde gegevens uit de sensoren en eventueel een motorcontroller. Tevens wordt de controller gebruikt om de NO_x-sensor in te schakelen via CAN-bus en kan een analoge input gebruikt worden om een temperatuursensor uit te lezen.

5.1 DATA LOGGEN

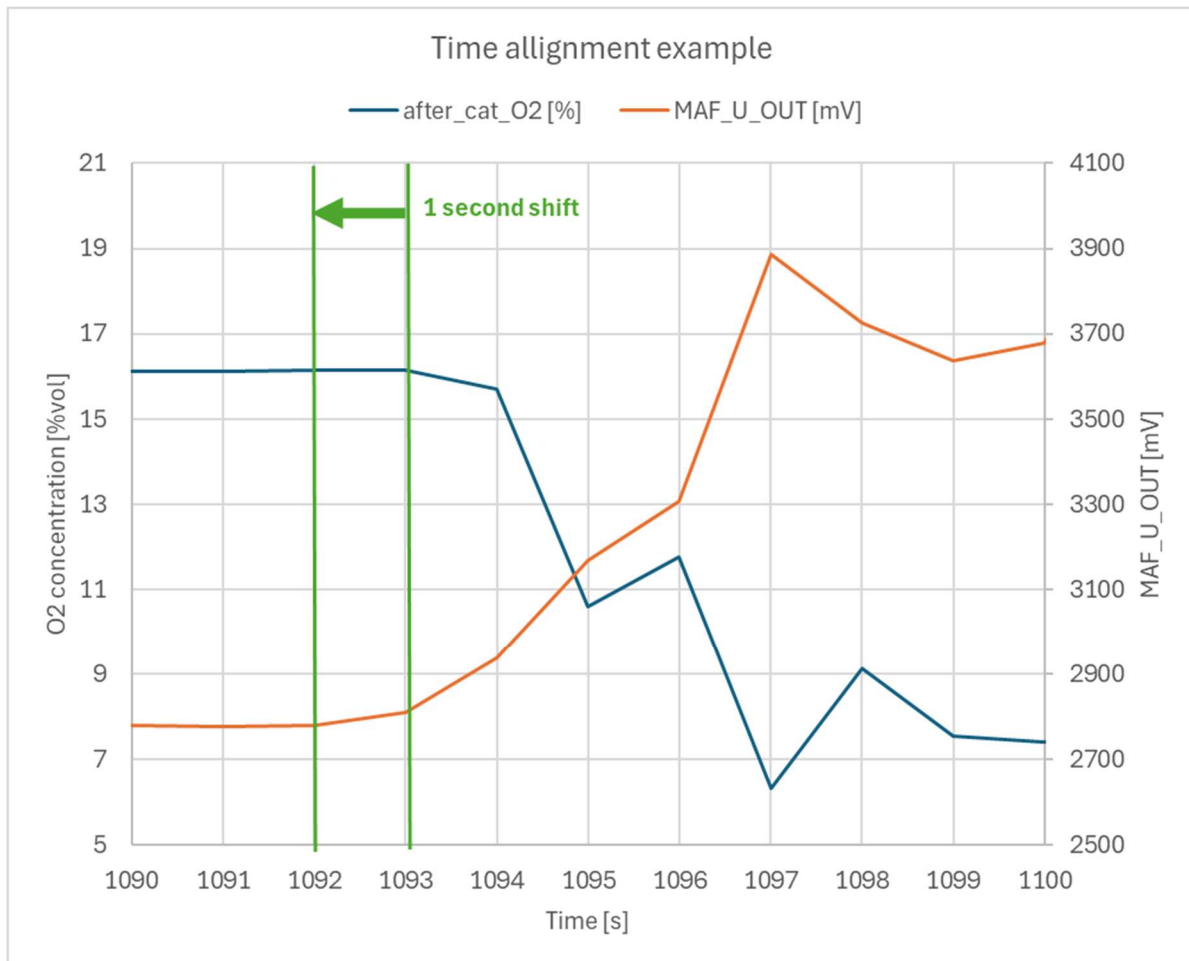
De voorgestelde formules in hoofdstuk 6 dienen toegepast te worden op data die ten minste op 1Hz verzameld is. Het verdient de voorkeur om alle data op 1Hz te loggen en de gehele dataset over te dragen op een server om nadien de data-analyse uit te voeren. Het is echter ook mogelijk om bepaalde berekeningen al op de controller uit te voeren en deze aan de data toe te voegen.

5.2 GEGEVENSOVERDRACHT

De wijze waarop data wordt overgedragen naar een server kan vrij gekozen worden. Men dient rekening te houden met circa 500 tot 1500 kilobytes aan data per uur dat de machine aan staat. De verzamelde gegevens kunnen direct worden overgedragen of er kan gekozen worden om de data eerst lokaal op te slaan en naderhand als verzamelbestand te verzenden naar een server. Bij toepassing van de laatste methodiek dient men rekening te houden dat bij sommige machines na afschakelen een hoofdschakelaar wordt uitgeschakeld. De data dient dan op een later tijdstip alsnog verzonden te worden.

5.3 TIJDSYNCHRONISATIE

Voor de juiste berekening van de uitlaatgasstroom dienen de signalen van NO_x, zuurstof en luchtmassastroom in de tijd gesynchroniseerd te worden. Dit is noodzakelijk omdat beide signalen op een andere plek gemeten worden. De instromende hoeveelheid lucht wordt gemeten in de inlaatbuis, terwijl de NO_x- en zuurstofconcentratie pas worden gemeten na alle nabehandelingssystemen. De synchronisatie kan het eenvoudigst gedaan worden door een dynamisch punt in de data te zoeken waar de luchtmassastroom sterk toeneemt. De zuurstofconcentratie zal op dat moment gelijktijdig moeten dalen. Een synchronisatiecorrectie zal maximaal enige seconden zijn.



In bovenstaande figuur wordt een toename in de luchtmassastroom (door optoeren) geobserveerd ten opzichte van de daling in zuurstofconcentratie in het uitlaatgas. De afname van de zuurstofconcentratie wordt 1 seconde later waargenomen dan de toename in motortoerental. De datareeks van de NO_x- en O₂-concentratie dient dan één seconde vervroegd te worden ten opzichte van het MAF-sensorsignaal. De vastgestelde correctie dient op alle databestanden van de onderzochte machine toegepast worden.

5.4 ONDERSTEUNING J1939

Indien de datalogger ook een tweede CAN bus aansluiting heeft die een J1939 protocol ondersteunt, kan het interessant zijn ook de motor- of machinedata te laten verzamelen. Zodoende verkrijgt men extra informatie over bijvoorbeeld het motortoerental of geleverde vermogen van de motor.

6 BEREKENINGEN

De berekeningen van de totale luchtstroom door de motor met behulp van de luchtmassastroom en zuurstofconcentratie wordt gedaan met een 1Hz dataset. De 1Hz dataset mag ontstaan zijn uit de laatst ontvangen sensorwaarde in de betreffende seconde, of als alternatief een gemiddelde van de ontvangen datapunten in de gehele seconde.

6.1 MINIMALE DATASET

De dataset die tenminste nodig is om de berekeningen uit te kunnen voeren staan in onderstaande tabel.

UNIX tijdstempel	UNIX	[s]
NO _x -concentratie uitlaatgas	DS_NOX	[ppm]
O ₂ -concentratie uitlaatgas	DS_O2	[%vol]
Luchtmassastroom	MAF	[g/s]
MAF-sensor signaalspanning	MAF_U	[mV]
NO _x -ready bit	DS_RDYNOX	[0-3]
O ₂ -ready bit	DS_RDYO2	[0-3]

6.2 FILTERING

De NO_x- en O₂-ready bits geven aan of de sensor volledig opgewarmd is en betrouwbare data geeft. Data waarbij deze bits nog niet 1 zijn, dienen uitgesloten te worden van de berekeningen.

De NO_x-concentratie kan in specifieke gevallen, zoals tijdens momenten dat de brandstofinspuiting gepauzeerd wordt, negatief worden. De concentratie dient in dat geval op 0 ppm gezet te worden om te voorkomen dat met negatieve emissies gerekend wordt.

In dezelfde situatie kan de gemeten zuurstofconcentratie hoger worden dan de buitenluchtconcentratie die gehanteerd wordt in de berekeningen. De buitenluchtconcentratie dient in dat geval gelijk gesteld te worden aan de concentratie die in de berekeningen gesteld is.

Wanneer de MAF sensor geen bewegende luchtstroom waarneemt zal de sensor spanning rond de 1000 mV zijn. De polynoom-vergelijking kan bij die spanning een licht positieve- of negatieve luchtmassastroom opleveren. Met deze luchtmassastroom dient echter geen emissieberekening uitgevoerd te worden. Beter is het, om een bepaalde drempelwaarde te hanteren waarbij het zeker is dat de motor aan staat. In de meeste gevallen is een spanning van 1200mV een goede ondergrens om de luchtmassastroomberekeningen uit te voeren. Op de momenten dat de spanning lager is, zet men de luchtmassastroom op 0 g/s.

6.3 BEREKENING VAN NO_x- EN CO₂-EMISSIONS OP BASIS VAN MAF

De formules die benodigd zijn om de absolute NO_x- en CO₂-emissies te berekenen staan in Bijlage A.

7 ONDERDELENLIJST

De voorgestelde onderdelen voor het aan elkaar koppelen van alle sensoriek kan bij verschillende leveranciers gekocht worden.

	Omschrijving	Merk	Art nr.	Leverancier
NO_x sensor				
Sensor (24V)	UniNO _x v2.8	Continental	5WK9 6756A	Continental
Sensor (12V)	UniNO _x v2.8	Continental	5WK9 6755A	Continental
Connector	MCON 1.2 locking lance 5 pin	TE Connectivity	1-1718806-1	RS-online
Female pins	MCON 1.2 pins 0.5-0.75 mm ²	TE Connectivity	7-1452656-3	RS-online
Kabel	2x2 twisted aderig	LAPP	22260789	Conrad
Seal		TE Connectivity	967067-2	RS-online
Blind plug bekabeling	3.6mm	TE Connectivity	967056-1	RS-online
Las sok	M20 x 1.5 met voet	Slaats	TNO lasmoer-M20x1.5_NO _x	Slaats Fijnmech. Techniek
Dopsleutel	Steek 22	Hazet	4680-5	Conrad
Blindplug M20x1.5	DIN 908 sleutel HEX 10mm	Fabory	07661200150	Fabory
MAF				
Sensor (60 mm OD)	HFM-5 60mm	Bosch	0 280 217 123	??
Sensor (70 mm OD)	HFM-5 70mm	Bosch	0 280 218 019	??
Connector (5-pin)	HFM-5 60/70mm OD 1.1 connector	Bosch	1 928 403 836	Deytrade
Female pins (1.0-1.5 mm ²)		Bosch	1 928 498 056	Deytrade
Female pins (0.5-1.0 mm ²)		Bosch	1 928 498 054	Deytrade
Seal		Bosch	1 928 300 599	Deytrade
Blind plug			??	
Sensor (92 mm OD)	HFM-5 92mm	Bosch	0 280 218 135	
Connector (5-pin)	HFM-5 92mm OD SLK 2.8 series	Kostal	9441582	Deytrade
Female pins (0.5-0.75mm ²)		Kostal	22 140 492 060-L	Deytrade
Seal (0.22-1.0 mm ²)		Kostal	10800 444 522	Deytrade
Blind plug		Kostal	10800 472 631	Deytrade
Polymeer lijm	Soudaseal	Soudal	Soudaseal 240 FC	Eriks
Stern bit set	TPI 1204/8	Stahlwille	96081113	Conrad
Kabel	4 aderig 0.75 mm ²	LAPP	AB-PC4-2,0PUR-M12FS	Conrad
Temperatuur sensor				
K-type Thermokoppel	3mm x 100mm mini ANSI 7 meter	Thermo Electric	TK4J1H0100E7000KBX	Thermo Electric Waddinxveen
Knel wartel	3mm, ¼ BSP thread	RS Pro	381-7362	RS-online
Las sok	¼ BSP sok	RVS-products.nl	31553	RVS-products.nl
Blindplug ¼ BSP	Plug	Fabory	07670.063.001	Fabory
Ring t.b.v blindplug	Koper ring	Fabory	50301.130.018	Fabory

BIJLAGE A: BEREKENINGEN

De rekenstappen die nodig zijn om absolute CO₂- en NO_x-emissies te berekenen gaan uit van de aanwezigheid van de onderstaande sensorwaardes die in de tijd gesynchroniseerd zijn. Als eerste uitgangspunt zou genomen kunnen worden dat de zuurstof- en NO_x-concentratie 1 seconde later worden geregistreerd dan de MAF, zoals eerder beschreven dient dit wel gevalideerd te worden in de dataset.

NO _x -concentratie uitlaatgas	DS_NO _x	[ppm]
O ₂ -concentratie uitlaatgas	DS_O2	[%vol]
Luchtmassastroom	MAF	[g/s]

Er worden een aantal aannames gedaan met betrekking tot de uitlaatgascondities en omgevingscondities die reeds zijn opgenomen in de onderstaande rekenstappen.

Dichtheid uitlaatgas gelijk aan dichtheid omgevingslucht	28.97	[g/mol]
Verhouding koolstof/waterstof reguliere diesel	1.95	[-/-]
Molaire massa NO _x (hiervoor wordt NO ₂ gehanteerd)	46	[g/mol]
Zuurstofconcentratie buitenlucht	20.9476	[%vol]

De onderstaande rekenstappen worden toegepast om vier afzonderlijke massastromen te berekenen in het uitlaatgas.

$$\text{Fuel mass flow } \left[\frac{g}{s} \right] = \text{MAF} \left[\frac{g}{s} \right] * \left(\frac{20.9476 - \text{DS_O2} [\%vol]}{304.557} \right)$$

$$\text{Exhaust mass flow (EMF)} \left[\frac{g}{s} \right] = \text{MAF} \left[\frac{g}{s} \right] * \left(1 + \frac{20.9476 - \text{DS_O2} [\%vol]}{304.557} \right)$$

$$\text{NOx mass flow } \left[\frac{mg}{s} \right] = \frac{1.5330 * \text{DS_NOx} [ppm] * \text{EMF} \left[\frac{g}{s} \right]}{1000}$$

$$\text{CO2 mass flow } \left[\frac{g}{s} \right] = 3.1571 * \text{fuel mass flow} \left[\frac{g}{s} \right]$$

BIJLAGE B: POLYNOOMWAARDEN

De onderstaande tabel weergeeft de benadering van de polynoomwaarden die gekozen kunnen worden bij afwijkende inlaatbuisdiameters. Voor de nominale diameter (DN) dient de inwendige buisdiameter gebruikt te worden. Indien een inwendige diameter niet in de tabel staat, dient de eerstvolgende gekozen te worden zodat een overschatting ontstaat.

$$MAF \left[\frac{g}{s} \right] = A * U^4 + B * U^3 + C * U^2 + D * U + E$$

MAF	Mass air flow in gram per seconde [g/s]
U	Uitgangsspanning sensor in volt [V]

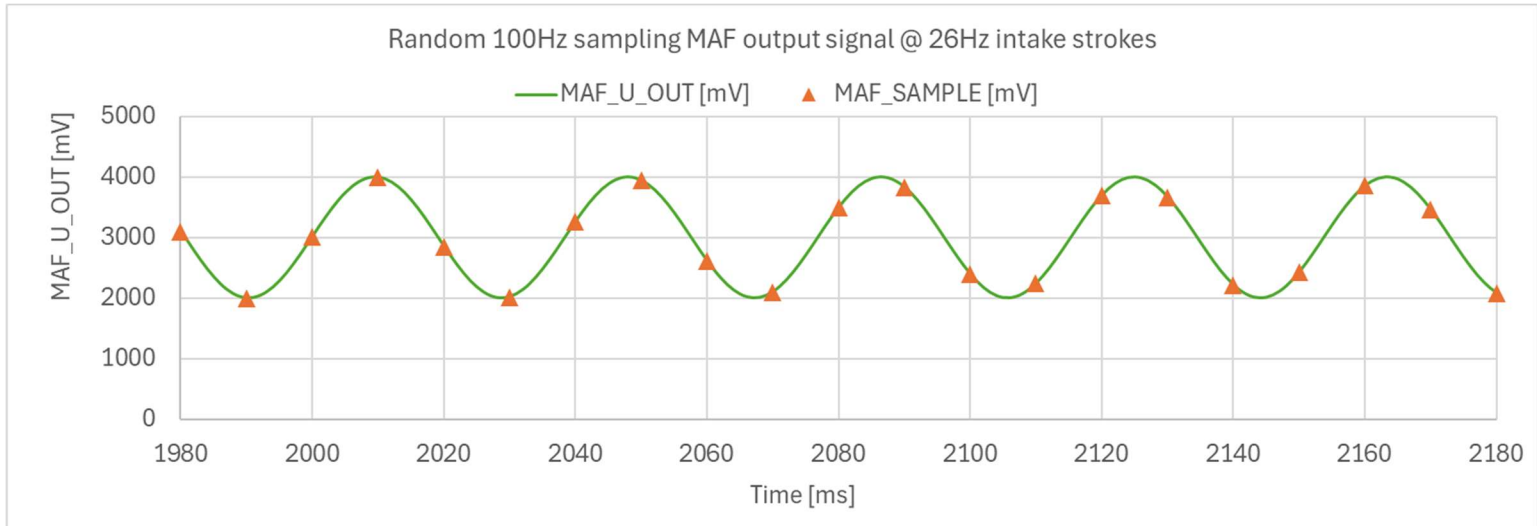
Tabel versie 2: 16 september 2025

DN	A	B	C	D	E
50	0.37913	-2.60514	9.88924	-11.54865	3.70825
52	0.42627	-2.92908	11.11895	-12.98469	4.16936
54	0.47526	-3.26573	12.39687	-14.47706	4.64855
56	0.5261	-3.61508	13.72302	-16.02573	5.14583
58	0.57879	-3.97713	15.0974	-17.63072	5.66119
60	0.63333	-4.35189	16.51999	-19.29203	6.19463
62	0.68972	-4.73935	17.99081	-21.00966	6.74616
64	0.74796	-5.13951	19.50986	-22.78359	7.31577
66	0.80804	-5.55238	21.07713	-24.61385	7.90346
68	0.86997	-5.97795	22.69262	-26.50042	8.50923
70	0.93376	-6.41623	24.35634	-28.4433	9.13309
72	0.99939	-6.86721	26.06828	-30.44251	9.77503
74	1.06687	-7.33089	27.82844	-32.49802	10.43505
76	1.1362	-7.80728	29.63682	-34.60985	11.11315
78	1.20737	-8.29637	31.49344	-36.778	11.80934
80	1.2804	-8.79816	33.39827	-39.00247	12.52361
82	1.35528	-9.31266	35.35133	-41.28324	13.25597
84	1.432	-9.83986	37.35261	-43.62034	14.0064
86	1.51057	-10.37976	39.40211	-46.01375	14.77492
88	1.59099	-10.93237	41.49984	-48.46347	15.56152
90	1.67326	-11.49768	43.64579	-50.96951	16.36621
92	1.75738	-12.0757	45.83997	-53.53187	17.18897
94	1.84335	-12.66642	48.08237	-56.15054	18.02982
96	1.93117	-13.26984	50.37299	-58.82553	18.88876
98	2.02083	-13.88597	52.71184	-61.55683	19.76577
100	2.11235	-14.5148	55.09891	-64.34445	20.66087
102	2.20571	-15.15633	57.5342	-67.18839	21.57405
104	2.30092	-15.81057	60.01772	-70.08863	22.50532
106	2.39798	-16.47751	62.54946	-73.0452	23.45466
108	2.49689	-17.15715	65.12943	-76.05808	24.42209

110	2.59765	-17.8495	67.75762	-79.12728	25.40761
112	2.70025	-18.55455	70.43403	-82.25279	26.4112
114	2.80471	-19.27231	73.15866	-85.43462	27.43288
116	2.91101	-20.00276	75.93152	-88.67276	28.47264
118	3.01917	-20.74593	78.75261	-91.96722	29.53048
120	3.12917	-21.50179	81.62191	-95.31799	30.60641
122	3.24102	-22.27036	84.53944	-98.72508	31.70042
124	3.35472	-23.05164	87.5052	-102.18848	32.81251
126	3.47027	-23.84561	90.51918	-105.7082	33.94269
128	3.58766	-24.65229	93.58138	-109.28424	35.09095
130	3.70691	-25.47168	96.6918	-112.91659	36.25729
132	3.828	-26.30377	99.85045	-116.60526	37.44171
134	3.95094	-27.14856	103.05732	-120.35024	38.64422
136	4.07574	-28.00605	106.31242	-124.15154	39.8648
138	4.20238	-28.87625	109.61574	-128.00915	41.10348
140	4.33087	-29.75915	112.96728	-131.92308	42.36023
142	4.4612	-30.65476	116.36705	-135.89332	43.63507
144	4.59339	-31.56307	119.81504	-139.91988	44.92799
146	4.72743	-32.48408	123.31125	-144.00276	46.23899
148	4.86331	-33.4178	126.85569	-148.14195	47.56808
150	5.00104	-34.36422	130.44835	-152.33746	48.91525
152	5.14063	-35.32335	134.08924	-156.58928	50.2805
154	5.28206	-36.29517	137.77835	-160.89742	51.66383
156	5.42534	-37.27971	141.51568	-165.26187	53.06525
158	5.57046	-38.27694	145.30123	-169.68264	54.48475
160	5.71744	-39.28688	149.13501	-174.15972	55.92233
162	5.86627	-40.30952	153.01702	-178.69312	57.378
164	6.01694	-41.34487	156.94724	-183.28284	58.85174
166	6.16946	-42.39292	160.9257	-187.92887	60.34357
168	6.32384	-43.45367	164.95237	-192.63122	61.85349

BIJLAGE C: ONDERBOUWING BEMONSTERINGSFREQUENTIE

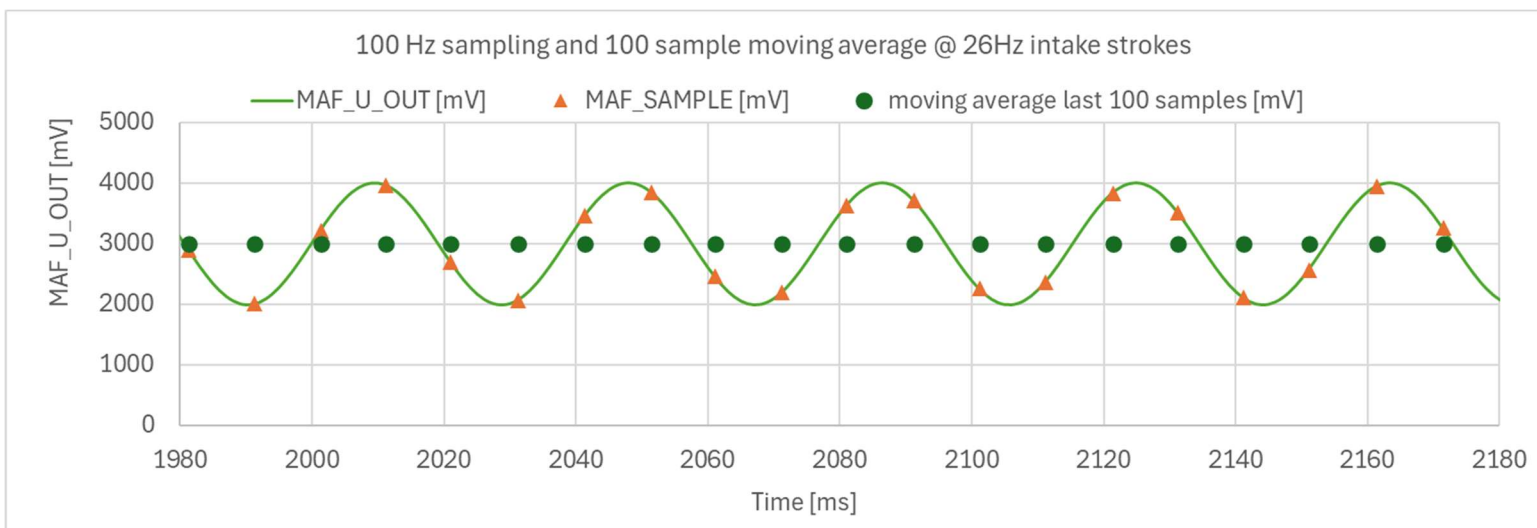
Wanneer de bemonstering van de MAF-uitgangsspanning uitgevoerd zou worden op 100 Hz, zouden zeer willekeurige punten op de sinusoïde verkregen worden zoals te zien in de



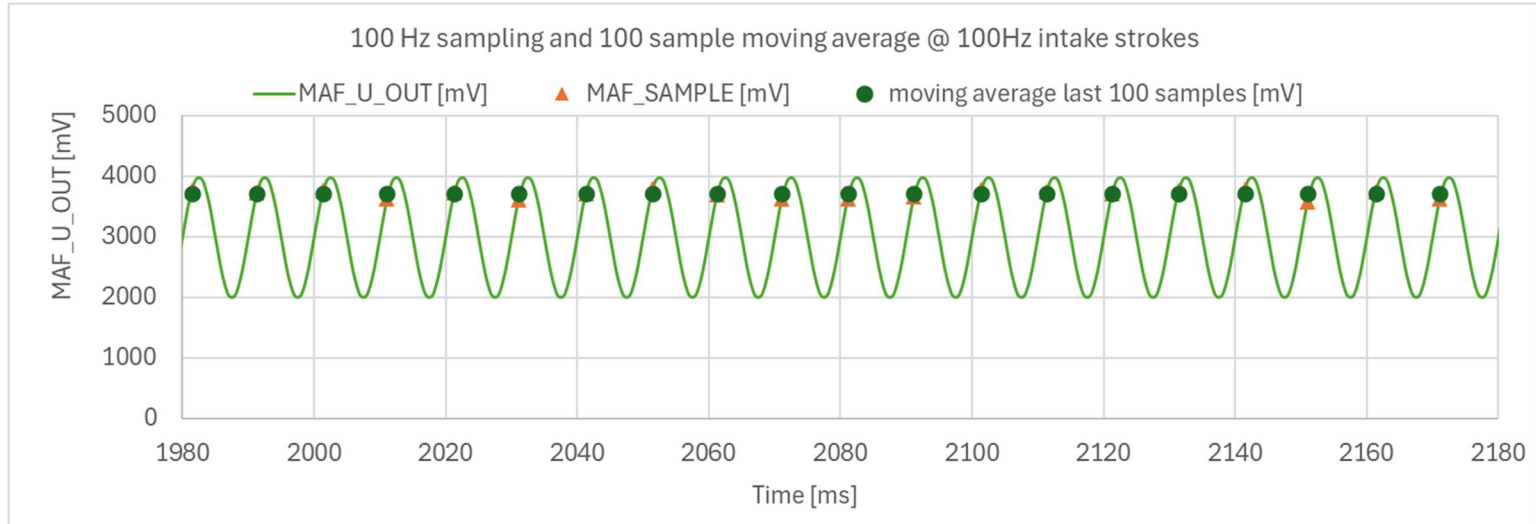
onderstaande figuur.

Dit toont aan dat het noodzakelijk is om een voortschrijdend gemiddelde te nemen over meerdere bemonsteringen uit het verleden.

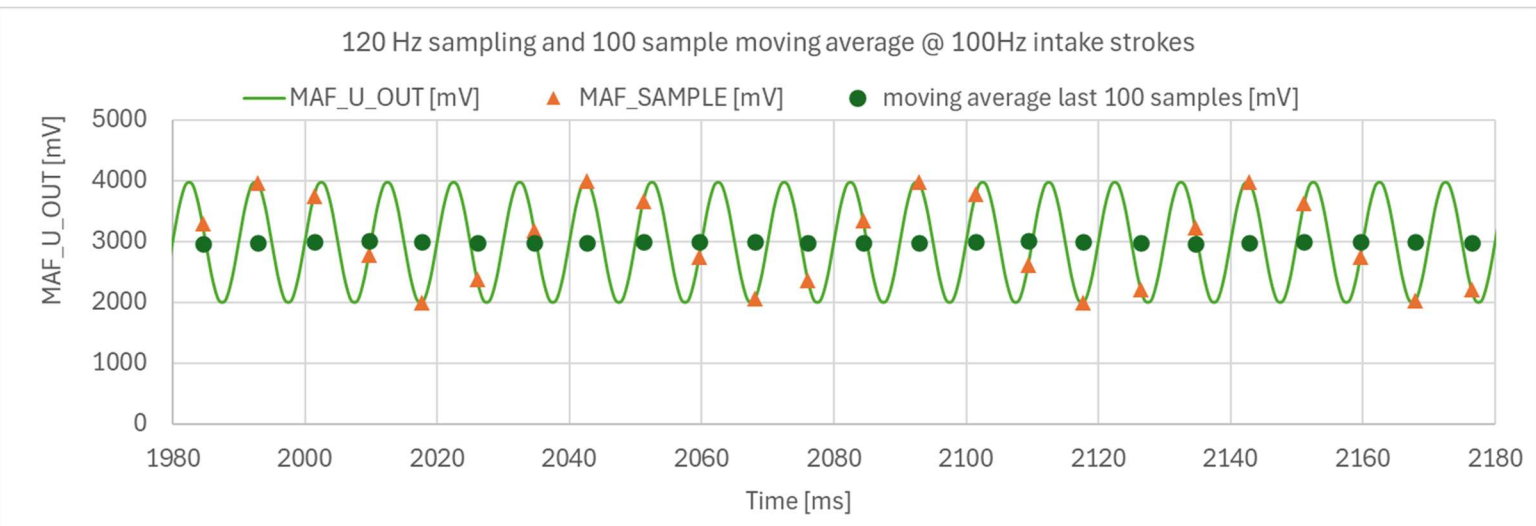
Bij een 4-taktmotor met 4 cilinders is de aanzuigfrequentie bij stationair toerental (bijv. 800 RPM) circa 26 Hz. Bij een hoog toerental (bijv. 3000 rpm) is dit 100Hz. Wanneer men bemonstert met een frequentie van 100Hz kan vervolgens het voortschrijdend gemiddelde over de laatste 100 monsters (100 ms). Het berekende voortschrijdend gemiddelde wordt getoond in onderstaande figuur.



Deze figuur toont aan dat het nemen van een voortschrijdend gemiddelde over meerdere samples belangrijk is om een stabiele lezing van de werkelijke spanning te krijgen. Zoals eerder vermeld zou een 4-cilinder 4-takt motor bij 3000 rpm circa een aanzuigfrequentie hebben van 100Hz. Wanneer men een 100Hz bemonstering zou toepassing loopt men het risico dat deze allen onder of boven de sinusoïde liggen zoals te zien in onderstaande figuur.



Dit benadrukt het belang om tenminste hoger frequent te bemonsteren dan de hoogste aanzuigfrequentie van de motor. Zoals te zien is dit probleem reeds opgelost als een bemonsteringsfrequentie van 120Hz toegepast zou worden.



De formule om een voortschrijdende gemiddelde te bepalen over een hoogfrequent bemonstert signaal verloopt dan via de onderstaande reeks.

U_{t-99}	U_{t-98}	U_{t-97}	...	U_{t-3}	U_{t-2}	U_{t-1}	U_t	$U_{avg, 100 \text{ samples}} \text{ [mV]}$
3597	2593	2030	...	2275	3246	3988	3790	2988

Dit kan softwarematig ook bereikt worden door middel van een iteratie die de laatste 100 monsters optelt en dan deelt door 100.

```
1  #define BUF_SIZE 120
2  #define N_SAMPLES 100
3  uint16_t MAF_U_buf[BUF_SIZE];
4
5  uint32_t MAF_U_sum = 0; //variable to increment the sum
6
7  for (uint16_t i = BUF_SIZE-N_SAMPLES; i < BUF_SIZE; i++)
8  {
9      MAF_U_sum += MAF_U_buf[i];
10 }
11
12 float MAF_U_avg = MAF_U_sum / N_SAMPLES;
13
```