

Chemische Feitelijkheden

#328

Editie 81

december 2016

Harmen Kamminga



Uitlaatgassen

Aan het einde van de verbrandingsmotor

Vrijwel alle belangrijke transportmiddelen zijn uitgerust met verbrandingsmotoren. Die zetten brandstoffen niet alleen om in de bewegingsenergie voor veel transportkilometers, maar ook in moeilijk te beheersen wolken onbruikbare, gasvormige afvalproducten. Deze uitlaatgassen hebben een slechte naam. Want naast opgewarmde stikstof en waterdamp, bevatten ze

het broeikasgas CO₂ en kleine hoeveelheden onverbrande koolwaterstoffen, koolmonoxide, stikstofoxides, roetdeeltjes en soms zwaveloxides. Die kunnen schadelijk zijn voor mens en milieu. Een scala aan technologische middelen wordt ingezet om die uitstoot aan banden te leggen; alleen CO₂ blijft een probleem om efficiënt af te vangen of om te zetten.

Aan het einde van de

Verbrandingsmotoren in auto's zetten brandstof om in bewegingsenergie. Een bijkomend nadeel zijn de gasvormige afvalproducten. Hoe kun je de uitstoot van schadelijke stoffen beperken?

Autorijden is voor veel mensen bijna net zo vanzelfsprekend als lopen. Als je wegrijdt, sta je zelden stil bij de warme gassen die de atmosfeer in stromen via een uitlaatpijp onder het voertuig. Aan die gassen is meestal ook maar weinig te zien. Op koude winterdagen vallen soms pluimen warme waterdamp op. Maar een auto die echt witte, blauwe of zwarte rook uitbraakt, heeft motorpech en moet langs de garage. Ruiken doe je uitlaatgassen vaker; in de file of wanneer je een zware dieseltruck probeert in te halen. Dat uitlaatgassen niet brandschoon zijn, stelden chemici al vast in de jaren vijftig van de vorige eeuw (zie kader 'Van uitlaatgas naar luchtvervuiling' op pagina 4).

Onvolledig verbrandingsproces

De meeste motorvoertuigen rijden op benzine of diesel. In Nederland tankten vrachtwagens, bussen en personenauto's in 2015 volgens het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) 6,7 miljard l diesel en 5,2 miljard l benzine. Volledige, stoichiometrische verbranding van die koolwaterstoffen met zuurstof zou enkel het gas koolstofdioxide (CO_2) en waterdamp (H_2O) opleveren. Om die ideale situatie te benaderen, zijn moderne automotoren uitgerust met slimme motormanagementsystemen (*engine control units*) die aan de hand van metingen door zuurstofsensoren (zie ook kader 'Zuurstofsensoren' op pagina 5) op twee of meer plekken in de motor en de uitlaat berekenen hoeveel lucht in de verbrandingskamer moet worden toegevoegd. Helaas slaagt geen enkele motor erin on-

der alle omstandigheden alle brandstof volledig te verbranden. Een klein deel slijpt onverbrand door de motor en verlaat de uitlaat als damp. Een ander klein deel verbrandt niet volledig tot CO_2 , maar ontsnapt als koolstofmonoxide (CO). De zuurstof (O_2) die voor de verbrandingsreactie nodig is, halen voertuigmotoren uit de omgevingslucht. Lucht bestaat voor ongeveer 21 % van zijn volume uit O_2 . En daarnaast voor zo'n 78 % uit stikstof (N_2). De aanwezigheid van zoveel stikstof in het luchtmengsel lijkt geen punt, omdat N_2 weinig reactief is. Het stikstofgas passeert voor het overgrote deel onveranderd de motor. Zo'n 72 tot 74 % van het volume van uitlaatgas bestaat daardoor uit N_2 . Toch reageert bij de zeer hoge temperaturen die optreden in de motor een klein beetje van de stikstof wél met zuurstof uit de lucht. Daaruit ontstaat aanvankelijk een mengsel van minder en meer stabiele stikstofoxides, die geleidelijk overgaan in voornamelijk NO en NO_2 . In de emissieregels voor uitlaatgassen wordt het gehalte van alle mono-stikstofoxides samen beschreven onder de naam NO_x .

Gevolgen voor mens en milieu

Onverbrande brandstofresten bestaan uit mengsels van allerlei mogelijke verzadigde, onverzadigde en aromatische koolwaterstoffen. Kleine sporen CO en NO_x hebben samen met fijnstof de afgelopen decennia geleid tot toenemende zorg om gezondheid en milieu en geleidelijk strengere regelgeving. Van sommige koolwaterstoffen wordt vermoed dat zij kankerverwekkend zijn. Koolstofmonoxide is een verraderlijk kleur-, geur- en smaakloos gas dat al in

kleine hoeveelheden giftig is bij inademing. CO bindt 240 keer sterker dan O_2 aan het enzym hemoglobine, dat in rode bloedcellen van gewervelden zorgt voor het zuurstoftransport. Opname van CO via de luchtwegen in de bloedbaan kan daardoor snel leiden tot zuurstofgebrek in weefsels en dood door verstikking. Daarom is het zaak mens en milieu zo weinig mogelijk bloot te stellen aan CO . CO is zwaarder dan lucht en zakt dan ook naar de grond. In bijvoorbeeld ondergrondse parkeergarages bevinden zich meestal CO -sensoren die



verbrandingsmotor



waarschuwen wanneer zich daar te hoge concentraties van het giftige gas ophopen. Stikstofoxides irriteren de luchtwegen en remmen de plantengroei. Met water reageren stikstofoxides tot anorganische zuren, zoals salpeterzuur en salpeterigzuur. Ze vallen daarom onder de stoffen die het milieu verzuren ('zure regen'). Van stikstofoxides hoog in de stratosfeer is aangetoond dat ze de ozonlaag aantasten die het leven op aarde beschermt tegen een overschot aan ultraviolette zonnestraling. Laag bij de grond kan NO_x in combinatie met onver-

Tabel 1. De gassen uit de uitlaat van moderne voertuigmotoren op diesel (dieselmotor) en benzine, lpg, aardgas, etc. (Ottomotor) (in volume %).

Gas	Dieselmotor	Ottomotor
N_2	73,8	72,1
O_2^*	9	0,7
H_2O	9	13,8
CO_2	8	12,3
Schadelijke stoffen	0,2**	1,1***

*inclusief edelgassen (afkomstig uit lucht)

** NO_x , CO, koolwaterstoffen, SO_2 en fijnstof

***CO, NO_x , koolwaterstoffen en fijnstof

Bron: www.ngk.de

► Van uitlaatgas naar luchtvervuiling

In 1943 opende bij Los Angeles (VS) een butadiëenfabriek, een component voor synthetisch rubber, waaraan tijdens de Tweede Wereldoorlog grote behoefte was. Binnen de kortste keren hing rond de fabriek en in een steeds groter deel van California een oranje damp die de ogen irriteerde. Tot het eind jaren veertig bleef onduidelijk waaruit die 'smog' bestond. Onderzoek wees uiteindelijk zwaveldioxide (SO_2) aan als belangrijke oorzaak van de luchtvervuiling. De staat vaardige strenge regels uit voor de uitstoot van SO_2 . Gaslekkages uit de fabriek werden sterk verminderd, maar de smog werd elke zomer dikker.

In die smog woonde Arie Jan Haagen-Smit. Geboren en opgeleid in Utrecht, was Haagen-Smit daar in 1929 gepromoveerd in de organische chemie van plantenstoffen.

Sinds 1940 bestudeerde hij als hoogleraar aan het California Institute of Technology smaakstoffen in ananas. In 1948 vroeg de overheid Haagen-Smit zich te verdiepen in de smogsamenstelling. Haagen-Smits onderzoek wees ozon, onverbrande koolwaterstoffen en stikstofoxides aan als voornaamste aanstichters van de smog. Bovendien stelde hij vast dat al die gassen direct en indirect afkomstig waren uit de uitlaten van auto's en industriële verbrandingsmotoren. De auto- en olie-industrie reageerden furieus en huurden zelfs collega-wetenschappers in om zijn werk onderuit te halen. Daarop intensiverde Haagen-Smit zijn onderzoek. Mede door die volharding was het verband tussen auto's en smog al halverwege de jaren vijftig breed wetenschappelijk geaccepteerd. Vanaf halverwege de jaren zestig voerde de auto-industrie schoorvoetend de eerste maatregelen door om uitlaatgassen schoner te maken.



Smog boven Los Angeles 5 januari 1948



brande koolwaterstoffen juist aanleiding geven tot de vorming van ozon (O_3). Hier vormt het irriterende gas een belangrijke component van smog.

Samenstelling fijnstof

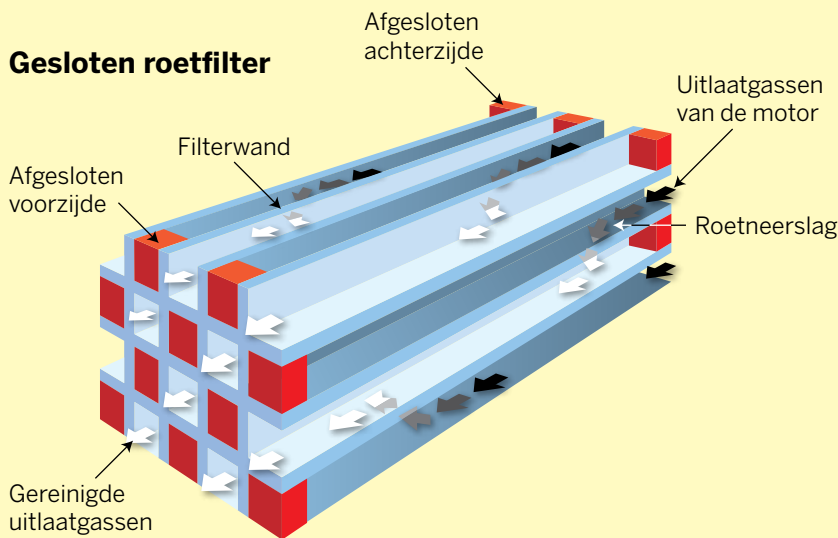
Inademen van in de lucht zwevende deeltjes kleiner dan $10 \mu\text{m}$ blijkt schadelijk voor de gezondheid. Het merendeel van dit fijnstof vindt zijn oorsprong in de natuur, zoals kleine korreltjes zand, zeezout of plantenpollen. Maar ook bij menselijk handelen komt het ongezond fijne stof vrij. Zo blijkt uit metingen langs drukke wegen dat het wegverkeer aanzienlijk bijdraagt aan de uitstoot en verspreiding van fijnstof. Bij de registratie van de uitstoot van fijnstof kijk je alleen naar de grootte van de

deeltjes, niet naar hun chemische samenstelling. Die samenstelling kan sterk uiteenlopen. Fijnstof in uitlaatgassen bestaat bijvoorbeeld uit (deels) onverbrande koolwaterstoffen en koolstof, maar ook uit verbindingen van metaaldeeltjes uit de brandstof of door slijtage van de motor.

Roetfilter beperkt uitstoot fijnstof

Om schade aan de gezondheid van mensen en hun leefomgeving door uitlaatgassen te beperken, zijn in de loop der jaren steeds verdergaande beperkingen aan de uitstoot door voertuigen opgelegd. Door technische aanpassingen tracht de auto-industrie hieraan te voldoen. Zo is het wegverkeer tussen 1990 en 2010 zo'n 55 % minder

Gesloten roetfilter



Bij een gesloten roetfilter wordt 100 % van de uitlaatgassen door een filterpakket geleid, terwijl dat bij een halfopen filter ongeveer 30 tot 50 % is.

fijnstof gaan uitstoten door de toepassing van roetfilters in met name dieselveertuigen. Een roetfilter werkt als een soort microscopische zeef met een grote oppervlakte van keramisch materiaal of metaalgaas met fijne poriën en een katalytische coating. De poriën houden de grotere roetdeeltjes tegen, terwijl de kleinste deeltjes aan het ma-

teriaal worden geadsorbeerd. Roetfilters verwijderen fijnstof zeer efficiënt uit uitlaatgas.

Om ervoor te zorgen dat een roetfilter niet verstopt raakt door toenemende roetneerslag, moet je het regelmatig opschonen. Vaak doe je dit door de temperatuur van de uitlaatgassen die erdoor stromen tijde-

lijk flink te verhogen. In de uitlaatgassen van dieselmotoren is altijd nog ongeveer 9 % O_2 aanwezig, dat bij temperaturen boven $550\text{ }^\circ\text{C}$ de koolstof in de roet verbrandt tot CO_2 .

Uitlaatgas bereikt alleen bij zeer hoge motorbelasting zulke hoge temperaturen. Zelfs in een roetfilter dat zo dicht mogelijk achter de motor in de uitlaat is geplaatst, lopen de temperaturen onder veel omstandigheden onvoldoende hoog op voor spontane 'thermische regeneratie'. Daarom worden aan het roetfilter of soms aan de dieselbrandstof katalysatoren toegevoegd die het roet in het filter al bij lagere temperaturen doen ontbranden.

Sommige autofabrikanten kiezen een alternatieve optie en benutten de in het uitlaatgas aanwezige NO_x door dit via een oxidatiekatalysator voor het roetfilter om te zetten in NO_2 . Al bij temperaturen rond de $250\text{ }^\circ\text{C}$ reageert NO_2 met koolstof uit het roetfilter tot CO_2 en N_2 . Na het 'schoonbranden' kan het roetfilter weer zo'n 1.000 km fijnstof vangen zonder verstopt te raken.

Een nadeel van roetfilters is dat ze zorgen voor weerstand in de stroom uitlaatgas.

► Zuurstofsensoren

Het enige gas waaraan in het uitlaatgas van vrijwel elke benzineauto voortdurend wordt gemeten is zuurstof. Vaak zit op minimaal twee plaatsen in de uitlaat, voor en na de driewegkatalysator, een zuurstofsensoren; een 'lambdasonde'. De eerste sensor bepaalt voor de *engine control unit* hoeveel zuurstof met het uitlaatgas de verbrandingskamer heeft verlaten. Als het zuurstofgehalte hoog is, wordt voor de volgende vonk minder lucht of meer brandstof in de verbrandingskamer gelaten. Is het zuurstofgehalte laag, dan wordt meer lucht of minder brandstof toegevoerd. De voortdurende terugkoppeling via de zuurstofsensoren zorgt ervoor dat de motor steeds efficiënt en zuinig blijft lopen en dat er weinig CO en onverbrande koolwaterstoffen ontstaan.

Door met beide sensoren voor en na de katalysator het zuurstofgehalte te bepalen, kan het systeem bovendien vaststellen wanneer in de katalysatorruimte zuurstof is verbruikt om CO en koolwaterstoffen te oxideren en wanneer de omstandigheden in de katalysator

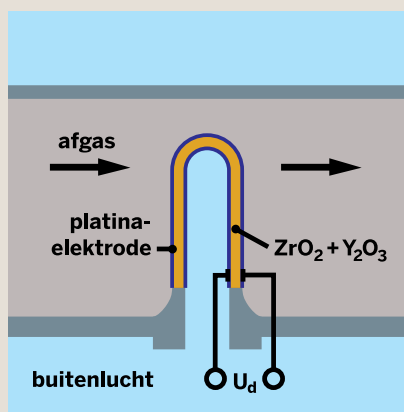
goed zijn voor NO_x -reductie. Door aanpassingen in de luchtinlaat in de motor zijn de omstandigheden in de katalysator optimaal te houden voor de afbraak van schadelijke stoffen.

De zuurstofsensoren werken dankzij een bijzondere chemische eigenschap van kristallijn zirkoniumoxide ($Zr(IV)O_2$).

Membranen van die vaste stof laten slecht elektronen door, maar wel gemak-

kelijk oxide-ionen (O^{2-}). De beweging van de negatief geladen oxide-ionen door het membraan geeft een potentiaalverschil tussen gasdoorlatende elektrodes aan beide kanten van het membraan. Zo ontstaat een elektrochemische brandstofcel. In gasmengsels met een hoge concentratie zuurstof ontstaan relatief veel oxide-ionen, in gas met weinig zuurstof minder. Als het zirkoniumoxide-membraan zich tussen twee gasmengsels met een verschillende zuurstofconcentratie bevindt, zullen oxide-ionen van de zuurstofrijkere naar de meer zuurstofarme kant door het membraan gaan stromen.

In een zuurstofsensoren stroomt langs de ene kant van het zirkoniumoxide-membraan buitenlucht met een stabiele zuurstofconcentratie. Langs de andere kant stroomt het uitlaatgas. De veranderingen in het potentiaalverschil over het membraan maken het mogelijk op elk moment het zuurstofgehalte in het uitlaatgas te bepalen. De zuurstofsensoren zorgen dus zowel voor een goede, schone verbranding in de motor als voor de bewaking van de werking van de katalysator.



De werking van de lambdasonde.

De energie die nodig is om de uitlaatgassen door het roetfilter te persen, komt van de verbrandingsmotor en gaat ten koste van de voortbeweging. Roetfilters verhogen daardoor het brandstofverbruik en de productie van uitlaatgas enigszins.

Katalysator

Een fysisch roetfilter volstaat om roetdeeltjes weg te vangen. Om schadelijke moleculen als CO, koolwaterstoffen en NO_x uit uitlaatgassen te verwijderen, is echter meer chemie nodig. Dat blijkt alleen al uit de naam waaronder het technische hulpmiddel om de schadelijke gassen weg te werken bij een breed publiek bekend werd. Na 1980 zijn vrijwel alle voertuigen met een benzine-motor uitgerust met een katalysator.

In de scheikunde is een katalysator een stof die een chemische reactie beïnvloedt zonder zelf verbruikt te worden. Onder een auto is het een compartiment van de uitlaat dat is gevuld met een keramisch materiaal met een hoog smeltpunt, meestal het cyclosilicaat cordieriet (Mg₂Al₄Si₅O₁₈). Dit materiaal heeft van nature een gasdoorlatende honingraatstructuur. Dit geeft de wanden van de cellen in een voertuigkatalysator de oppervlakte van ongeveer een voetbalveld. Een coating van aluminiumoxide (Al₂O₃) verlengt de levensduur van de katalysator en werkt als drager voor de chemisch actieve katalysatordeeltjes. Die bestaan meestal uit het kostbare edelmetaal platina (Pt) en het overgangsmetaal rodium (Rh), en soms palladium (Pd). In de coating wordt ook cerium(IV)oxide (CeO₂) en cerium(III)oxide (Ce₂O₃) verwerkt. Die stoffen fungeren als buffer voor zuurstof in het katalysatorcompartiment. Bij hoge zuurstofconcentraties leggen ze de zuurstof vast, om die bij lage concentraties weer af te staan.

Drie reacties

Zuurstof speelt een cruciale rol bij een goede werking van de voertuigkatalysator. Om vrijwel gelijktijdig onverbrande koolwaterstoffen, koolstofmonoxide en NO_x uit het uitlaatgas te verwijderen, moeten in de katalysator drie verschillende hoofdreacties plaatsvinden; vandaar de naam 'driewegkatalysator'. De omzetting van CO in CO₂ en koolwaterstoffen in CO₂ en H₂O zijn oxidatiereacties, die het best verlopen bij een ruime beschikbaarheid van O₂. De gewenste omzetting van NO in N₂



en O₂ is echter een reductiereactie.

Om die voor elkaar te krijgen, is het zaak NO met CO te laten reageren tot N₂ en CO₂. Bij veel O₂ in de katalysator, oxideert de meeste CO echter snel tot CO₂ en blijft onvoldoende over voor de omzetting van NO_x. Om die reden heeft het weinig zin dieselmotoren uit te rusten met een driewegkatalysator. Dieselmotoren werken met een veel grotere luchtvermaat dan benzinemotoren, waardoor de uitlaatgassen relatief rijk zijn aan O₂. Onder die condities kan een driewegkatalysator de gevormde NO_x niet effectief omzetten in N₂.

Bij benzinemotoren speelt het motormanagementsysteem met de zuurstofsensoren (zie kader 'Zuurstofsensor' op pagina 5) in motor en uitlaat en de chemische zuurstofbuffer in de katalysator een belangrijke rol bij het effectief laten verlopen van alle drie de reacties. Door in de tijd het zuurstofgehalte in het uitlaatgas te laten variëren, worden beurtelings de reductie van NO_x met CO naar N₂ en CO₂ of de oxidatie van koolwaterstoffen en CO naar H₂O en CO₂ bevoordeeld, zodat uiteindelijk alle schadelijke componenten in het uitlaatgas worden afgebroken.

NO_x uit dieselmotoren

Voor dieselmotoren volstaat een driewegkatalysator niet om NO_x uit het uitlaatgas te verwijderen. In de afgelopen jaren zijn nieuwe dieselmotoren soms uitgerust met systemen voor de recirculatie van uitlaatgas door de verbrandingskamer. Hergebruikt uitlaatgas bevat minder zuurstof, zodat de verbrandingssnelheid en temperatuur in de motor afnemen. Bij lagere temperaturen vormt zich minder NO_x. Wel draait een dieselmotor minder goed op zuurstofarme uitlaatgas en vervullen uitlaatgassen de motor sneller dan schone lucht. Dit beperkt de mogelijkheden om uitlaatgassen te recirculeren en dus de mate waarin dit de productie van NO_x kan verminderen.

Selectieve katalytische reductie

Om dieselmotoren te kunnen laten voldoen aan de steeds strengere eisen op het gebied van NO_x-uitstoot, bouwen autofabrikanten sinds enkele jaren technologie in diesels die selectieve katalytische reductie (*selective catalytic reduction*, SCR) van stikstofoxides mogelijk maken. Bij die techniek spuit je een oplossing van ureum



in gedemineraliseerd water in het uitlaatgas. Wanneer de oplossing in contact komt met het hete uitlaatgas, ontleedt de ureum met water in ammoniak (NH_3) en CO_2 . De ammoniak reageert vervolgens met de aanwezige NO_x en zuurstof tot stikstof en water. Om die gewenste reactie te versnellen, spuit je de ureumoplossing over een katalysatorbed van titanium(IV)oxide (TiO_2), wolfram(VI)oxide (WO_3) en/of vanadium(V)oxide (V_2O_5). Met die technologie is het in beginsel mogelijk binnen de huidige meest strenge emissienormen te blijven. Het vergt wel een relatief dure katalysatorinstallatie en de ureumoplossing verbruikt je bij de reactie. Die moet je dus regelmatig bijtanken. In 2015 werd bekend dat autofabrikanten deze technologie misbruiken om alleen tijdens tests zeer schoon uitlaatgas te produceren (zie kader 'Dieselgate' rechts op deze pagina).

Behalve uitlaatgas recirculeren en NO_x selectief reduceren, proberen autofabrikanten ook technieken om NO_x te adsorberen door een soort aangepaste roetfilters. Tot op heden is de toepassing van dergelijke NO_x traps nog beperkt doordat het moeilijk is 'volle' filters te regenereren.

Broeikasgas CO_2

Onder invloed van steeds strengere emissiewetgeving heeft de auto-industrie de laatste decennia veel moeite gedaan om uitlaatgassen schoner te maken. Door alle aandacht voor NO_x , fijnstof, CO en koolwaterstoffen, zou je bijna vergeten dat een van de hoofdbestanddelen van uitlaatgas het broeikasgas CO_2 is. En dat je daarmee blijft zitten zolang je koolwaterstoffen blijft verbranden voor de voortbeweging.

Uitgaande van het eerder genoemde brandstofgebruik in 2015 en een CO_2 -productie van 2,64 kg per l diesel en 2,39 kg per l benzine, stootten motorvoertuigen in Nederland vorig jaar ruim 30,1 miljoen ton CO_2 uit, ongeveer een vijfde van de hele Nederlandse CO_2 -uitstoot. De beste kans om dat omlaag te krijgen, lijkt voornamelijk te komen van motoren die draaien op duurzaam opgewekte elektriciteit. Als eenmaal de hele wereld elektrisch rijdt, behoren uitlaatgassen en alle problemen die daarbij horen tot het verleden. Tot die tijd blijven chemie en technologie nodig om milieueen gezondheidschade door uitlaatgassen te helpen beperken. ●

► Dieselgate

In september 2015 gaf Volkswagen toe dat minstens 11 miljoen van zijn nieuwere dieselauto's van de merken Volkswagen, Audi, Seat en Skoda niet voldoen aan de huidige normen voor de uitstoot van stikstofoxides. Om de auto's in de VS en Europa op de markt toegelaten te krijgen, waren de stuurprogramma's van de motoren uitgerust met 'sjoemelsoftware' die signaleerde wanneer de auto werd onderworpen aan een emissietest.

Tijdens de tests werden motoren en katalysatoren zodanig geregeld dat een uitstoot binnen acceptabele waarden ontstond. Dit ten koste van het brandstofverbruik.

Eenmaal op de weg schakelde het sjoemelprogramma over op een zuiniger motormanagement. De uitstoot van NO_x schoot daardoor omhoog naar soms wel veertigmaal de geteste waarde. In de praktijk voldoen de diesels daarmee lang niet aan de geldende emissienormen.

Al snel bleek dat ook voertuigen van veel andere grote autofabrikanten in de praktijk in hun uitlaatgassen meer milieuschadelijke stoffen uitstoten dan is toegestaan. Tevens werd duidelijk dat overheden al veel langer wisten dat door fabrikanten opgegeven en door testinstanties gemeten emissiewaarden weinig overeenkomst vertonen met de werkelijke uitstoot.

Het schandaal beschadigde het imago van de auto-industrie en kostte het Volkswagen-concern zijn hoogste directeur en inmiddels tientallen miljarden euro's aan boetes en pogingen om de schade te beperken.

In juni 2016 sprak de nieuwe directeur van Volkswagen na tegenvallende verkoopcijfers de hoop uit dat rond 2025 tussen de 20 en 25 % van de door de Duitse auto-industrie verkochte auto's elektrisch aangedreven is. Kennelijk gelooft Volkswagen niet meer in technische mogelijkheden om uitlaatgassen van verbrandingsmotoren zonder te sjoemelen schoner te maken.





Volgens TNO produceert een gemiddelde elektrische auto in 2020 van bron tot wiel ongeveer 35 % minder CO₂ dan een gemiddelde auto met een verbrandingsmotor. De bezitkosten van een elektrische auto liggen volgens Duits onderzoek gemiddeld € 8.000 hoger (over zes jaar) dan die van een vergelijkbare, conventioneel aangedreven auto.

Meer weten

- <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=7374hvv&D1=2-11&D2=0&D3=a&HDR=T&STB=G2,G1&VW=T>: In Statline van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) staan tabellen met informatie over het aantal transportmiddelen en hun brandstofconsumptie.
- www.ngk.de/nl/techniek-in-detail/lambdasondes/grondbegin-selen-van-de-kennis-over-uitlaatgassen/uitlaatgassen-en-schadelijke-stoffen: De website van technische toeleverancier voor de autoindustrie NGK Spark Plug Europe biedt goede Nederlandstalige informatie over de samenstelling van uitlaatgassen en het meten daaraan.
- www.rivm.nl/Onderwerpen/F/Fijn_stof: De website van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) bevat veel informatie over fijnstof.
- www.betase.nl/chemie-achter-het-roetfilter: C2W beschreef in 2007 de chemie achter het roetfilter.
- www.youtube.com/watch?v=rmtFp-SV0tY: Een Engelstalig youtube-filmpje op Science Channels maakt de werking van de driewegkatalysator inzichtelijk.
- www.nap.edu/read/1645/chapter/9: Het California Air Resource Board (CARB) beschrijft het levensverhaal van Arie Jan Haagen-Smit.
- www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/haagen-smit-arie.pdf: James Bonner, National Academy of Sciences, 1989.
- https://nl.wikipedia.org/wiki/Emissieschandaal_Volkswagen: Naast de archieven van de landelijke kranten en autobladen, biedt Wikipedia een aardig vertrekpunt om meer te weten te komen over het verloop 'dieselgate'.

Editie

Uitlaatgassen

editie 81 | nummer 328 | december 2016
www.chemischefeitelijkheden.nl
coverbeeld: tractorpulling is populair in de VS

Colofon

Over Chemische Feitelijkheden

Chemische Feitelijkheden is een actuele encyclopedie over moleculen, mensen, materialen en milieu. Het is een losbladige uitgave van de KNCV en verschijnt driemaal per jaar met in totaal tien onderwerpen.

Redactie
KNCV BETA PUBLISHERS

dr. Erwin Boutsma (hoofdredacteur), drs. Franny Scholte (eindredacteur), Harmen Kamminga (tekst)

Vormgeving & Opmaak

Marije van de Linde/Twin Media BV

Uitgever

Roeland Dobbelaer, Bèta Publishers BV

Postbus 19949, 2500 CX Den Haag

070-2629100, info@betapublishers.nl

Abonnementen

MijnTijdschrift.com

088-2266626

chemischefeitelijkheden@mijntijdschrift.com

Wij hanteren de opzegregels uit het verbintenissenrecht. Wij gaan ervan uit dat Chemische Feitelijkheden altijd wordt ontvangen uit hoofde van het beroep. Hierdoor wordt het abonnement automatisch met een jaar verlengd tenzij twee maanden vóór de einddatum een opzegging is ontvangen. Een abonnement op Chemische Feitelijkheden geeft via de website toegang tot tien nieuwe edities per jaar en het totale online archief. Daarnaast ontvangen abonnees in drie zendingen per jaar de losbladige edities.

Tarieven (2016)

Voor particulieren: online toegang met inlogcode en papieren editie (inclusief verzamelmap) kost € 87,75*; leden van de KNCV, KVCV en NVON krijgen € 10 korting.

Voor bedrijven en (onderwijs)instellingen: onbeperkt toegang tot de digitale edities op basis van IP-adres en papieren editie in drievoud (inclusief verzamelmappen) kost € 262,50*. Losse nummers kosten € 9,95* per stuk en zijn te bestellen bij Abonnementenland.

* Bij betaling per acceptgiro wordt € 2,95 administratiekosten in rekening gebracht.