



Foto: Carsten R. Kjær

# Den rene os

## - miljøvenlige dieselmotorer

*Udledning af sodpartikler og nitrogenoxider fra dieselmotorer udgør et stort miljøproblem.*

*Man arbejder derfor intenst på at udvikle filtre og katalysatorer, der effektivt kan fjerne de skadelige stoffer fra de ellers brændstoføkonomiske – og dermed CO<sub>2</sub>-besparende – dieselmotorer.*

Af Søren Dahl

■ Dieselmotorer er populære. Og det er der gode grunde til. En dieselmotor kan køre længere på en liter diesel end en benzindmotor kan på en liter benzin, og udleder derfor forholdsvis mindre CO<sub>2</sub>. Levetiden af en dieselmotor er generelt også længere, og derfor er dieselmotorer interessante for både pengepung og CO<sub>2</sub>-regnskab.

Men der er også en bagside

af medaljen. Uanset om man er interesseret i motorer eller ej, er man sjældent i tvivl, når en gammel dieselmotor kører i ens umiddelbare nærhed. Lugten af dieselmotor er meget ubehagelig, og ofte vil man også se en sort røgsky blæse ud fra udstødningen. Forurening fra dieselmotorer udgør et af vore store miljøproblemer, der selvfølgelig først og fremmest er aktuelt i de store byer.

I de senere år er der dog foregået en kraftig udvikling af filtre og katalysatorer, der kan fjerne disse skadelige stoffer fra udstødningen. Udviklingen accelereres de kommende år pga. skærpede krav i EU såvel som i USA og Japan. Derudover har lande som f.eks. Rusland, Kina, Brasilien også indset, at de må gøre noget for luftkvaliteten i deres storbyer og vil snart ind-

føre lovgivning, som svarer til de nuværende europæiske emissionsgrænser. Udviklingen er godt nyt for dansk forskning og industri, der står stærkt inden for dette område.

### **Katalysatorer og dieselmotorer**

Udstødningsgasser fra både benzin- og dieselmotorer indeholder de skadelige stoffer kulmon-

← *Udvikling af partikelfiltre og katalysatorer skal begrænse udledningen af partikler og skadelige gasser fra dieselmotorer.*

oxid (CO), uforbrændt brændstof (HC – fra. "hydro carbon") og nitrogenoxider (NOx), som i denne sammenhæng er summen af NO og NO<sub>2</sub>. Yderligere dannes der specielt i dieselmotorer sodpartikler.

Benzinbiler, der sælges i EU-lande i dag, er alle udstyret med en såkaldt 3-vejs-katalysator, som sørger for næsten fuldstændigt at fjerne de tre skadelige gaskomponenter fra udstødningssagen. I en benzinmotor blandes luft og benzin inden antænding hvilket resulterer i lav soddannelse. For at 3-vejs-katalysatoren kan virke, skal forholdet mellem benzin og luft være afpasset, sådan at al benzinen netop kan oxideres til CO<sub>2</sub> og vand. Det er ikke den mest energieffektive metode at køre en benzinmotor på, men da man på denne måde kan sænke koncentrationerne af alle de skadelige stoffer til et meget lavt niveau, har det indtil videre vejet tungere end lavest mulig CO<sub>2</sub>-udledning.

I en dieselmotor vil der derimod altid være overskud af luft (ilt) i udstødningen, fordi en dieselmotor ville være ineffektiv og sode ekstra meget, hvis den blev kørt med et afstemt forhold mellem ilt og brændstof. Derfor virker 3-vejs-katalysatorer ikke i dieslbiler – og selv om de gjorde, ville de ikke fjerne sod. Katalysatorer af nogenlunde samme type kan dog også i dieselmotorer fjerne CO og HC ved oxidation til CO<sub>2</sub> og vand, og sådanne diesel-oxidations-katalysatorer er monteret på de fleste dieselpersonbiler i dag. Men vil man også fjerne NOx og sodpartikler fra udstødningssagen fra dieslbiler må der anvendes andre metoder.

Ved motorforbedringer har man gennem de seneste år betragteligt nedbragt mængden af både sod og NOx en dieselmotor udleder. Kravene

## Selektiv katalyse

De aktive komponenter i de katalysatorer, som anvendes i biler, er mikroskopisk set alle faste overflader, der kan adsorbere reaktant-molekylerne og derigennem sørge for, at lige netop den ønskede reaktion forløber hurtigt.

Haldor Topsøe har udviklet en katalysator, der selektivt kan katalysere reaktion mellem nitrogenoxid, ammoniak og ilt, så det giver uskadelig N<sub>2</sub> og vand – dvs. reaktionen:  $4NO + 4NH_3 + O_2 = 4N_2 + 6H_2O$ . Den aktive overflade består af vanadiumoxid (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) spredt ud i et få atomer tyndt lag på en overflade af titaniumoxid (TiO<sub>2</sub>). Uden at gå i detalje kan man sige, at det er de afpassede redox- og syrebaserede egenskaber af denne overflade, der gør, at den er god til at katalysere reaktionen.

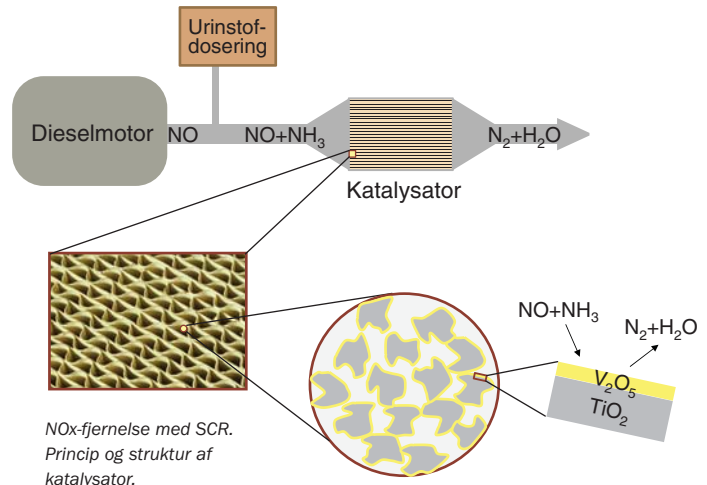
I en katalysatorenhed, som skal monteres i en udstødning, gælder det om at tillade udstødningssagen at komme i kontakt med et tilstrækkeligt stort areal af den katalytisk aktive overflade. Samtidig skal man minimere den energi, der skal bruges på at presse gassen gennem enheden, dvs.

til udledning er dog strammet betydeligt inden for EU så selv de mest moderne dieselmotorer kan ikke leve op til kravene uden en eller anden form for efterbehandling af udstødningssagen.

## Partikelfiltre koster effektivitet

Løsningen er at forsyne dieslbilerne med filtre, der fanger sodpartiklerne og særlige katalysatorer, der netop fjerner NOx fra udstødningssagen. På grund af de skærpede krav er udviklingen af disse teknologier i vækst, og danske virksomheder er med i fronten af denne udvikling.

Et partikelfilter vil alt andet lige nedsætte effektiviteten af en dieselmotor – dels fordi det koster energi at presse udstødningssagen gennem filteret, og dels fordi filtret jævnlige skal rengøres for sod. Det sid-

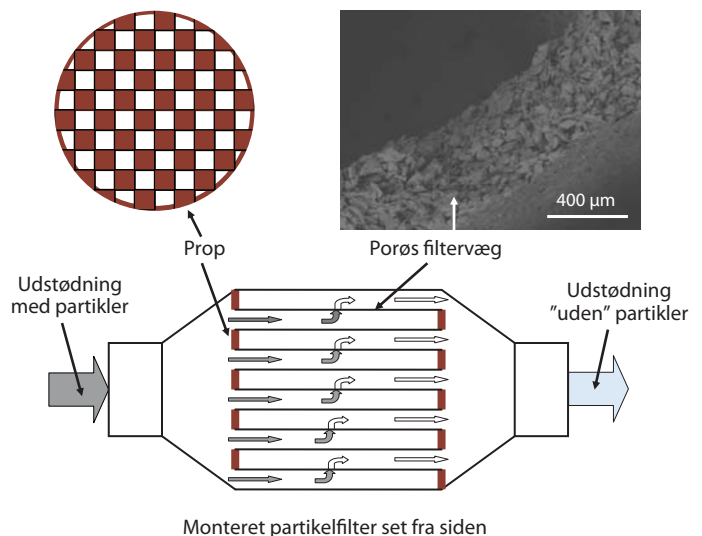


trykfaldet over enheden skal minimeres. Et stort areal opnås ved at anvende porøs TiO<sub>2</sub> med et specifikt overfladeareal på op til 100 m<sup>2</sup>/g, som udgangspunkt for katalysatoren. Trykfaldet minimeres ved at udforme enheden som en kanalstruktur, hvor det aktive katalysatormateriale udgør en stor del af væggene.

Ud over disse ting er der også andre udfordringer i udviklingen af katalysatorer til køretøjer. Da

katalysatoren under drift befinder sig i et aggressivt kemisk miljø og både er udsat for høje temperaturer og kraftige mekaniske påvirkninger, er det vigtigt at sikre sig at katalysatorenheden er holdbar og funktionsdygtig i hele køretøjets levetid. Af alle disse grunde er det ikke en simpel ting at producere anvendelige katalysatorer til køretøjer. Der er tale om masseproduktion med meget høje kvalitetskrav.

## Indgang/udgang af partikelfilter



Princippet for et såkaldt "wall-flow" partikelfilter. Filteret er opbygget som en kanalstruktur af porøse vægge, hvor de enkelte kanaler skiftevis er tilproppet i hver sin ende. På den måde må al udstødningssagen, der løber gennem filteret, passere de porøse kanalvægge. Hovedparten af sodpartiklerne fanges dermed i selve filtervæggen eller som en sodkage på denne.

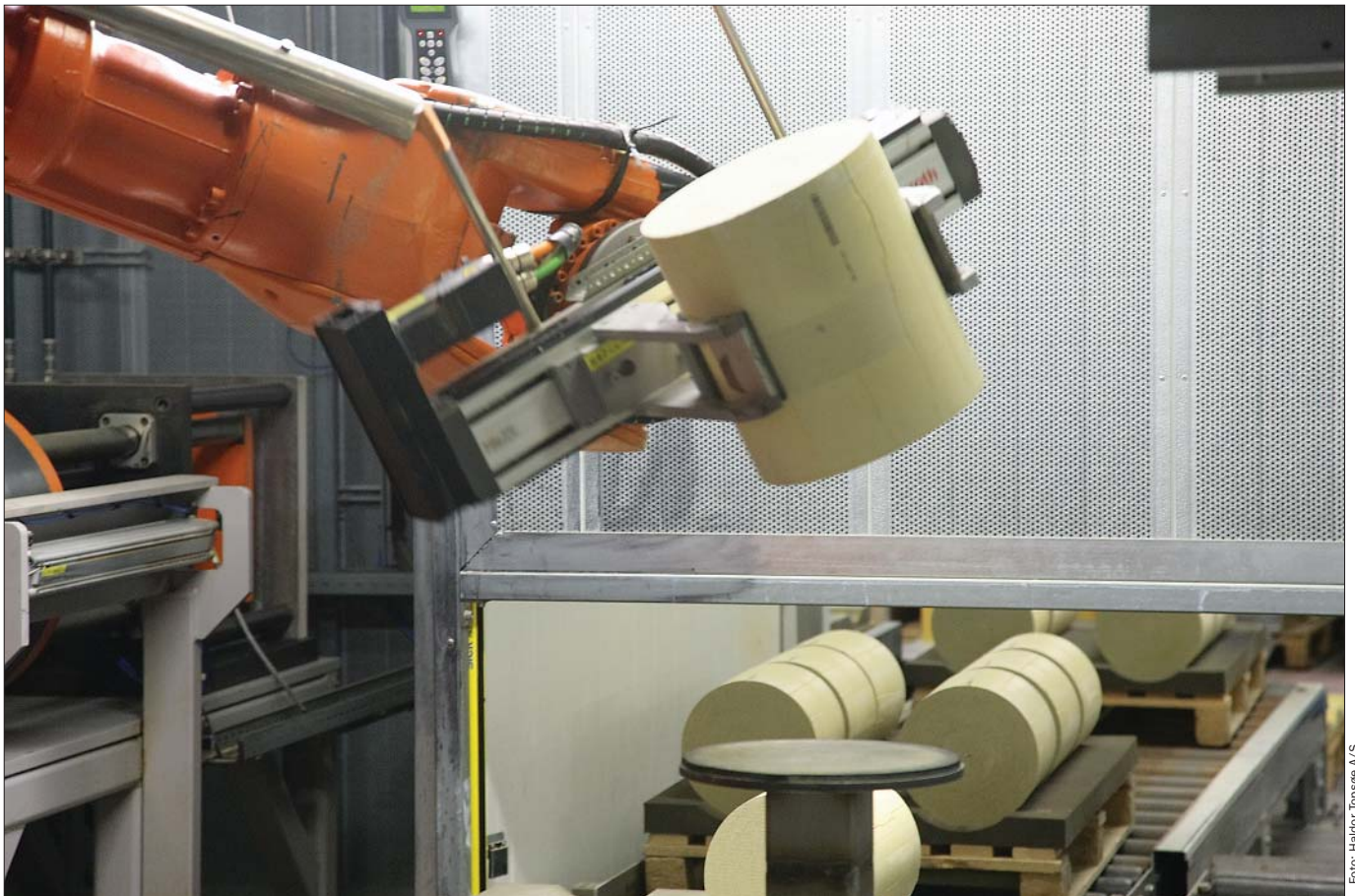


Foto: Haldor Topsøe A/S

Foto fra produktionen af SCR-katalysatorer til tunge køretøjer på Haldor Topsøe. Fabrikken forsyner ca. 15% af verdensmarkedet.

ste foregår ved at hæve temperaturen i filteret til omkring 600 °C, hvorved soden oxideres til CO<sub>2</sub>. Men det koster selvfølgelig brændstof, og derfor forsøger man at udvikle metoder til at sænke den temperatur, der skal til for at afbrænde soden. En af metoderne til dette er at sørge for, at soden kommer i kontakt med et stof, der kan katalysere oxidationen af sod. En sådan katalysator kan til sættes brændstoffet, sådan at soden så at sige bliver født med en katalysator i sig, eller alternativt placeres i eller på filtervæggen. Haldor Topsøe A/S har udviklet en sådan katalysator til sod-oxidation, som hovedsageligt er baseret på et metaloxid.

Katalysatoren har den fordel i forhold til eksisterende katalysatorer, at den samtidigt med at oxiderer sod fjerner en stor del af den NO<sub>2</sub>, der ellers dannes over diesel-oxidations-katalysatoren, og som er den mest sundhedsfarlige af de to NO<sub>x</sub>-komponenter.

### Selektiv katalyse

Katalysatorer er også nøglen til at fjerne den samlede mængde af nitrogenoxider fra dieseludstødningen. Ved at tilsætte et reduktionsmiddel til udstød-

ningsgassen og derefter lade den passere en passende katalysator, kan den problematiske NO<sub>x</sub> reduceres til uskadelig N<sub>2</sub>. Som tommelfingerregel kan man fjerne 80-90 % af NO<sub>x</sub> på

denne måde. Præcist hvor meget afhænger af flere faktorer som motorens design, katalysatorens placering i udstødningsrøret og kørselsmønster. Den vigtigste parameter er temperaturen i katalysatoren, og den bestemmes af alle de nævnte faktorer.

Ammoniak (NH<sub>3</sub>) er det eneste reduktionsmiddel, der har vist sig at kunne anvendes i praksis til dette formål. Ammoniak kan katalytisk reagere med NO<sub>x</sub> og ilt og danne N<sub>2</sub> og vand. Det er vigtigt, at den katalytiske reaktion er selektiv, således at det er netop er denne reaktion, der forløber. Ud fra de samme komponenter kunne der nemlig også dannes mere NO<sub>x</sub> eller lattergas (N<sub>2</sub>O), som er en meget kraftigere drivhusgas end CO<sub>2</sub>. Derfor kalder man den ønskede proces for selektiv katalytisk reduktion (eller SCR efter den engelske forkortelse). Kunsten er derfor at udvikle katalysatorer, der netop får den ønskede reaktion til at forløbe og ikke alle mulige andre.

## Sundhedsfarlig os

De sundhedsskadelige komponenter i udstødningen fra dieselmotorer har forskellige effekter på vores organisme. Kulmonoxid (CO) har den uheldige egenskab, at det binder stærkere til røde blodlegemer end ilt, og derfor kan det medføre kvælning, hvis man indånder det i for store mængder.

NO<sub>2</sub> er en rødbrun gas med en stikkende lugt, der kan give åndedrætsbesvær.

Sodpartikler – i særlig grad netop fra dieselmotorer pga. af deres ringe størrelse – har alvorlige virkninger som astma og allergi, og på længere sigt kræft og hjerte-kar-sygdomme.

	Dato	CO	HC+NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM
Euro 3	2000.01	0,64	0,56	0,50	0,05
Euro 4	2005.01	0,50	0,30	0,25	0,025
Euro 5	2009.09	0,50	0,23	0,18	0,005
Euro 6	2014.09	0,50	0,17	0,08	0,005

Tabel. Europæiske emissionskrav til diesel-personbiler i enheden g/km. Datoerne angiver hvornår de forskellige krav blev/bliver indført for nye biler. PM (Particulate Matter) angiver sodpartikler m.m.

Haldor Topsøe A/S har udviklet og producerer nu en sådan katalysator, hvor det aktive stof er vanadiumoxid ( $V_2O_5$ ) spredt ud i et få atomer tyndt lag på en overflade af titaniumoxid ( $TiO_2$ ). Denne overflade kan binde begge de to reaktanter –  $NO_x$  og  $NH_3$  – og sørge for, at den ønskede reaktion forløber hurtigt. Denne type katalysator bliver monteret på mange europæiske lastbiler i dag.

### En fremtid med både og

Ammoniak er en giftig gas, og derfor ledes den til udstødningsgassen i form af en vandig opløsning af urinstof,  $CO(NH_2)_2$ . Når denne opløsning varmes op, reagerer den med vand og danner ammoniak og  $CO_2$ . Det er en udfordring at dosere mængden af urinstof, dels fordi mængden af  $NO_x$  kan svinge meget under kørslen, og dels fordi det er meget vigtigt at urinstoffet fordeles jævnt i udstødningsgassen inden den rammer katalysatoren. En SCR-katalysator med tilhørende urinstoftank og doseringssystem er derfor et kompliceret system, som mange bilproducenter helst vil undgå. Men der er dog klare fordele i forhold til alternative løsninger.

En dieselmotor kan designes så den udsender mindre

## Dansk teknologi

En række danske virksomheder er med i udviklingen af systemer, der skal gøre fremtidens dieselmotorer mere miljøvenlige. Haldor Topsøe udvikler og fremstiller katalysatorer samt algoritmer til styring af urinstofdoseringsystemet. Virksomhederne Liqtech og Notox fremstiller partikelfiltre baseret på siliciumcarbide. Grundfos fremstiller pumper, dyser mm. til indsprøjtning af urinstofopløsning i systemer, der er baseret på selektiv katalyse (SCR). Virksomheden Dinex integrerer forskellige komponenter i udstødningssystemer og fremstiller også partikelfiltre.

$NO_x$  eller sodpartikler. Men man må gå på kompromis, da den indstilling af motoren, der giver den mindste udledning af  $NO_x$  giver en stor mængde sod, og omvendt. Det skyldes, at hvis man skal sænke indholdet af  $NO_x$  i udstødningsgassen, skal den maksimale forbrændingstemperatur i motoren sænkes, men dermed bliver forbrændingen af brændstoffet mindre fuldstændig og der dannes flere sodpartikler. Derfor står valget ofte mellem enten et partikelfilter eller en SCR-katalysator for at opfylde kravene til udledning fra et køretøj.

Set ud fra et rent brændstoføkonomisk synspunkt er det fordelagtigt at tune motoren, så den udsender tilstrækkelig få partikler, og så anvende en SCR-katalysator til at bringe mængden af  $NO_x$  ned på et acceptabelt niveau. Det er den

løsning, man ofte ser på lastbiler i Europa. De fleste personbiler er derimod udstyret med partikelfiltre, fordi det er et mindre kompliceret system som derfor foretrakkes selv om det koster effektivitet. Da lastbiler i deres levetid kører mange flere kilometer end personbiler vejer en forbedret brændstoføkonomi tungere her.

Med de stadigt strengere krav til udledning, vil fremtidens køretøjer over en vis størrelse skulle udstyres med både filter og SCR for at overholde kravene – og det vil alt andet lige betyde, at dieselmotorerne får et højere forbrug af brændstof. På trods af dette vil de stadig være mere effektive end benzinmotorer, og forholdsvis flere dieselmotorer på vejene vil derfor være en af måderne at sænke udledningen af  $CO_2$  i forbindelse med transport. ■

### Om forfatteren



Søren Dahl er projektleder ved Haldor Topsøe A/S  
Tlf.: 4527 2487  
E-mail: sda@topsoe.dk

### Videre læsning

Tim Johnson, *Diesel Engine Emissions and Their Control*, *Platinum Metals Rev.*, 2008, 52, (1), 23–37  
2. Martyn V. Twigg, *Progress and future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions*, *Applied Catalysis B: Environmental* 70 (2007) 2–15