

NOx - REDUKTION

**PM sammanställd för Trafikkontoret
i Göteborgs stad**

av

ECOTRAFFIC R&D AB

Åke Brandberg

NOx - REDUKTION

SAMMANFATTNING

Förmodade krav inom EU (fastställs 1997) på tunga motorers NOx-utsläpp är

Euro III	modellår 2000	max. 5,0 g/kWh NOx
Euro IV	modellår 2005	max. 3 à 3,5 g/kWh NOx

I USA kommer kravet år 2004 troligen vara 2,7 g/kWh.

- Optimering av en dieselmotor är vanligen en avvägning mellan NOx-utsläpp och bränsleförbrukning/partikelutsläpp. Krav på låga NOx-utsläpp medför högre bränsleåtgång. Endast nyutvecklad, katalytisk efterbehandling för NOx-reduktion synes kunna bryta detta mönster.

Motor

- Utveckling av motor, bränslesystem och elektroniskt styrsystem bedöms kunna klara Euro III NOx-krav utan ökad bränsleförbrukning. Möjligen kan EGR (avgasåterföring) eller vatteninsprutning börja användas.
- För att söka nå Euro IV-nivån bedöms utvecklad EGR-teknik (kyld EGR) som lovande men otillräcklig (och med frågetecken för livslängd) och sker till priset av ökad bränsleförbrukning (särskilt om krav på låga partikelutsläpp inte kan uppfyllas utan filter). Avgasrening genom katalytisk NOx-reduktion kommer troligen att behövas.

Avgasrening

- Av alternativ för NOx-reduktion bedöms tekniken med kolväteinsprutning och anpassad katalysator möjlig för 40-50 % reduktion men otillräcklig på längre sikt och medför ökad bränsleförbrukning. Tekniken är nära färdigutvecklad men marknadsförs ännu ej.
- SCR-teknik för NOx-reduktion (redan använd i stationära anläggningar och på fartyg) innebär katalyserad reaktion med ammoniak (tillförd som urea) till kvävgas. Den har potential för att nå Euro IV-krav eller lägre. SCR är inte färdigutvecklad för fordonsanvändning och för sådan ett komplicerat och utrymmeskrävande system. Nackdel är också extra utsläpp av fossil koldioxid, särskilt sedd ur livscykelns synvinkel, kanske också något ökad bränsleförbrukning. Kontroll och ev. styrning av avgas-temperatur kan behövas för bästa resultat i stadskörning.

- För dieseloljedrivna dieselmotorer finns inte i dag något säkert förutsägbart, praktiskt användbart system för att möta framtida Euro IV NOx-krav, som kan uppfyllas *utan att göra avkall på krav på låg bränsleförbrukning och skärpta partikelutsläpp.*

Alternativa drivmedel

- Alternativa drivmedel har större potentiella möjligheter och kan sägas kunna möta Euro IV-krav redan nu även om större mognad för tekniken är önskvärd för att kunna göra allsidig utvärdering.

NO_x - REDUKTION

Denna PM beskriver status och bedömd framtida utveckling för kontroll av utsläpp av NO_x (kväveoxid, NO, och kvävedioxid, NO₂) från motorer med tonvikt på dieselmotorer i tunga fordon, främst bussar.

NO_x-BILDNING OCH REDUKTION

Hur NO_x bildas

Huvudkällan till NO_x i motoravgaser är luftens kväve, som vid förbränningen i motorn reagerar med luftens syre och primärt bildar huvudsakligen NO. Reaktionen gynnas av hög temperatur (viktigaste faktorn), hög syrehalt och lång tid.

Bränslets kväveinnehåll (kemiskt bundet) överföres visserligen till största delen till kväveoxid vid förbränningen men dess bidrag är relativt litet, då kvävehalten i bensin och dieselolja är av storleksordningen några tiotal till 100 ppm. Kvävehalten regleras inte (undantag Kaliforniens certifieringsdieselolja; max. 10 ppm) i motsats till svavelhalten. Bränslekvävet andel av kväveoxidutsläppen från dieseloljedriven fordonsmotor är blott någon procent av kvävebildningen från luftkvävet.

Annorlunda är det för t.ex. fartygsmotorer, som drivs med tjocka oljor med kvävehalter på flera tusen ppm, vilket innebär att bränslekvävet andel är av storleksordningen 10 %. Bränslen av WRD-typ (tjocka destillatolja), särskilt hydrerade sådana, har mycket lägre kvävehalter (och svavel-, PAH- och metallhalter) och bör föreskrivas för motorer åtminstone i fartyg i kustfart.

Luftkvävet oxidation till kväveoxid sker främst vid höga temperaturer (termisk NO_x) via radikalreaktioner, vars hastighet ökar starkt med stigande temperatur och gynnas av stort luftöverskott och lång tid. Detta är typiska förhållanden i dieselmotorn. Det finns emellertid också en annan (mindre betydelsefull) reaktion för kväveoxidbildning, som anses kunna ske i flammen, ev. via cyanid vid luftunderskott (prompt NO_x). Detta kan sätta en gräns för hur långt kväveoxidbildningen förbränningstekniskt kan undertryckas.

Kväveoxidbildningen vid olika luftöverskott illustreras av den klassiska Figur 1. Bildningen är störst vid litet luftöverskott för att sedan minska genom att ett ökande överskott (magrare luft-bränsleförhållande) leder till att flammans temperatur blir lägre och tar över inflytandet av högre syrehalt. Vid alltför mager blandning blir emellertid förbränningen instabil och den gränsen påverkas av bränslets tänd- och brinnegenskaper. Dieselolja kan i kolmotorer förbrännas i mycket magra blandningar (begränsningen är önskat effektuttag) men bensin (och propan) endast i måttligt magra blandningar. Metan (naturgas, biogas) och motoralkoholer intar en mellanställning.

Förbränning i kontinuerlig flamma som i gasturbiner, stirlingmotor och olje-

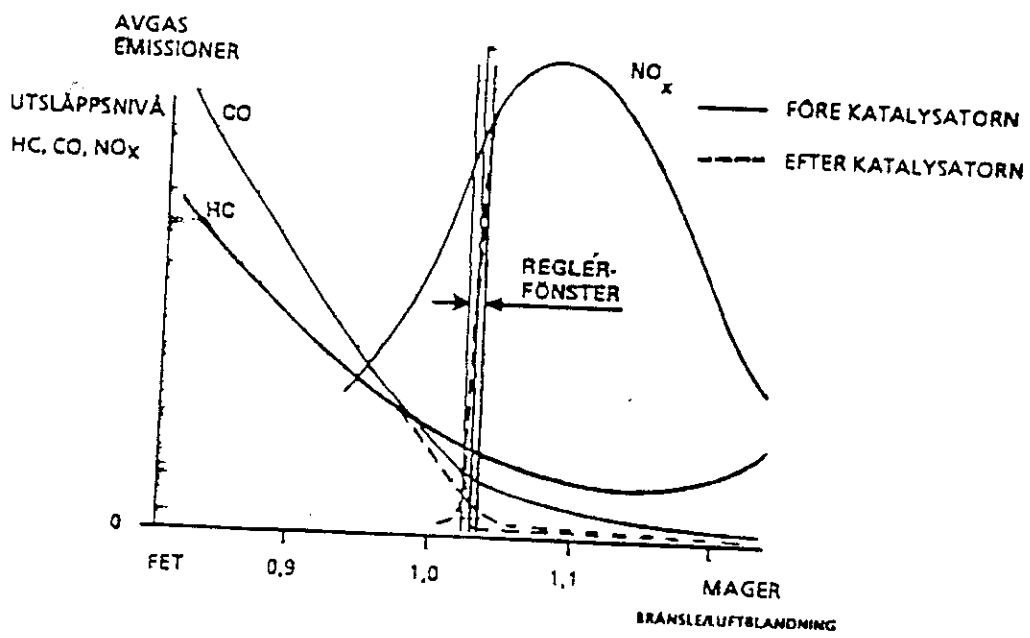


Fig. 1

brännare, etc sker med stort luftöverskott och lågt effektuttag, vilket är förklaringen till dessa energiomvandlares mycket låga NO_x-bildning. Vid den kalla, katalytiska förbränningen, som sker i elektrokemiska bränsleceller, är temperaturen så låg att NO_x-bildning inte sker. De representerar en kanske inte alltför avlägsen möjlighet (provverksamhet med vätgas eller metanol som bränsle i bl.a. bussar pågår) för eliminering av NO_x-problematiken.

Insikten om NO_x-bildningens mekanismer ger också ledning för hur den kan minskas. Lean burn-drift (stort luftöverskott) och avgasåterföring (EGR) leder till lägre flamtemperatur och därmed lägre NO_x-bildning. EGR verkar både genom att syrehalten sänks och att värmekapaciteten höjs, vilket minskar bildningshastigheten resp. ger lägre flamtemperatur. Bränslen med högt avdunstningsvärme (motoralkoholer, främst metanol) har lägre flamtemperatur, som ytterligare sänks genom att avgaserna har större massa.

Bränsleval, motorval och motortekniska åtgärder kan göra mycket för att minska NO_x-utsläpp men kan troligen inte svara mot behoven av framtida reduktioner. Efterbehandling av avgaserna för minska NO_x-utsläpp måste då tillgripas. Tydligast är detta för bensinmotorn, som inte kan drivas extremt magert, och NO_x-kraven kan endast mötas genom katalytisk NO_x-reduktion. Detta är nu standard på nya bilsbilar världen över.

Motortekniska åtgärder för NO_x-reduktion

I det följande behandlas dieselmotorn (med diesellojdrift) beträffande motortekniska åtgärder för att minska NO_x-bildningen. Detta var ämnet för det SAE-workshop, som nyligen avhölls i Göteborg och ger underlag för beskrivningen nedan. (Avgasrening och alternativa drivmedel och motorer för lägre NO_x-utsläpp behandlas i senare avsnitt.)

Motortekniska åtgärder för att minska NO_x (från dagens Euro II-krav på 7 g/kWh) syftar till att reducera topptemperaturen vid förbränningen, minska syrehalten och förkorta tiden. Åtgärder för att minska NO_x kan emellertid leda till ökad bränsleförbrukning och högre partikelutsläpp och, omvänt, önskan om effektivare motor med lägre bränsleförbrukning kan leda till ökade NO_x-bildning. Det blir därför en avvägning mellan olika åtgärder.

Turboladdning ger högre luftöverskott, men för att inte laddluftens högre temperatur skall förta effekten måste den kylas (intercooler, aftercooler) för att NO_x-bildningen skall bli lägre. Detta är nu standard på moderna motorer men kan förstärkas ("super intercooling"). Ökat kompressionförhållande, tändvilligare bränsle (högre cetantal), bättre olje-luft blandning genom högre insprutningstryck och central insprutning kombinerade med senarelagd och långsammare men längre utsträckt insprutning förkortar tändfördröjningen och medverkar till att undvika lokala zoner med hög temperatur och sänker topptemperaturen, varigenom NO_x-bildningen blir lägre. EGR och EGR-kylning och ev. vatteninsprutning (eller ev. emulsion av vatten eller alkohol med oljan) ger ytterligare möjlighet till temperatursänkning.

Med åtgärder av dessa slag räknar man med att klara kommande krav på nästa generation av dieselmotorer, Euro III 5 g/kWh NO_x (eller något lägre; nivån är ännu inte beslutad) från modellår 2000 (jämför med USA-krav på 5,4 g/kWh från 1998). Tillverkarna måste utveckla för minst 10 % lägre värde för att ha erforderlig marginal. Olika tillverkare kommer att välja olika kombinationer av åtgärder men gemensamt torde vara den utvecklade insprutnings-tekniken kombinerad med mer detaljerad elektronisk styrning av insprutningen efter avkänning av driftförhållandena. Det är emellertid inte helt klart om detta kan klaras av alla till år 2000 för ny motorgeneration och om det kan ske med oförändrad bränsleförbrukning (utebliven minskning för ny effektivare motor).

För Euro IV, $\leq 3,5$ g/kWh NO_x, för modellår 2005 bedöms styrd, kyld EGR som ett "måste", men denna är ännu inte färdigutvecklad och har frågetecken för systemets funktion och livslängd vid tunga motorer (p.g.a. partikelbildning). Kraven på bränslet kommer att bli högre, och kombination med annan åtgärd, t.ex. vatteninsprutning, o.d., synes sannolik utan att man kan vara säker på att nå målet, särskilt om detta skall nås utan ökad bränsleförbrukning och ökade utsläpp av partiklar. Behövs för minskning av partikelutsläppen, blir det än svårare att klara NO_x-reduktion enbart genom åtgärder i motor och bränslesystem. De flestas (allas?) bedömning synes vara att Euro IV NO_x-krav inte klaras med dieselolja som bränsle utan katalytisk reduktion.

Katalytisk avgasrening

Katalytisk NO_x-reduktion som sker i bensinbilar, som drivs utan luftöverskott, genom att CO och HC reducerar NO_x till kvävgas, kan inte tillämpas vid dieselmotorer, som alltid drivs med luftöverskott, utan endast i bensinbilar.

Viss reduktion av NO_x kan dock ske om extra kolväten (helst dieselolja) tillförs avgaserna och särskilt om katalysatorbäraren anpassas för att lokalt absorbera kolväten. NO_x-reduktion kan då ske i aktiva lokala områden på katalysatorytan. Närvaro av kolväten höjer dock katalysatorns (ädelmetall) tändtemperatur och tillförseln måste styras efter reduktionsbehovet och avgastemperaturen kan behöva upprätthållas med konstlade medel (t.ex. avgasbroms).

Ädelmetallkatalysatorers förmåga till NO_x-reduktion avtar med stigande temperatur och får då kompletteras med t.ex. en kopparkatalysator, som visserligen tänds först vid högre temperatur (över ca 350°C) men bibehåller reduktionsaktiviteten vid högre temperaturer.

NO_x-reduktion genom kolväteinjektion har begränsad potential, ca 40 - 50 %, och sker till priset av ökad bränsleförbrukning (några procent i bästa fall) och kan vara förknippad med ökad bildning av växthusgasen N₂O (lustgas). Tekniken är nära färdigutvecklad men ännu inte marknadsförd. Eftermontering på moderna befintliga fordon kan tänkas men förutsätter sammanlagring med motorns styrsystem och kommer i konflikt med certifieringsbestämmelser.

Bedömningen synes vara att NO_x-reduktion genom kolväteinsprutning har för låga prestanda för att möta framtida behov (Euro IV och följande), som innebär mer än halvering av kraven vid slutet av 90-talet.

SCR, selektiv katalytisk reduktion med ammoniak har betydligt större potential (upp till 90 %) och tilldrar sig större intresse. SCR tillämpas redan i stor omfattning vid fasta förbränningsanläggningar och börjar komma vid stationära motorer och på större fartyg.

Reaktion är att ammoniak, NH₃, reducerar NO_x till kvävgas. Katalysatorn har relativt brett funktionsområde för god aktivitet, 200/250 -550/600°C, d.v.s. där motorn ger avgastemperaturer som följd av måttlig till hög belastning. Funktionen vid låg belastning som vid delar av busscykeln måste uppmärksammas och verifieras.

Ammoniak är emellertid svårhanterlig, då den är en giftig och frätande gas, som måste hanteras i tryckkärl i flytande form. Man har därför i stället använt ofarliga ämnen som urea, från vilken ammoniak termiskt eller katalytiskt kan frigöras när den behövs. På fordon kan detta ske genom insprutning av en vattenlösning av urea i avgassystemet före katalysatorn. Viss nackdel med urea är att samtidigt som ammoniak frigörs bildas också koldioxid av fossilt ursprung och vid dess tillverkning förbrukas fossilt bränsle.

Överskott av ammoniak behövs för hög NO_x-reduktion, men ammoniak får inte släppas ut med avgaserna och i praktiken fordras en efterföljande oxidationskatalysator, som också tar hand om CO. Hög bildning av lustgas, N₂O, har dock erfarits och är ett problem som måste lösas.

Prover har visat att vid konstanta driftförhållanden kunde 90 % NO_x-reduktion uppnås och 60-70 % under transienta förhållanden. N₂O-bildningen var så hög som 10 % av NO_x.

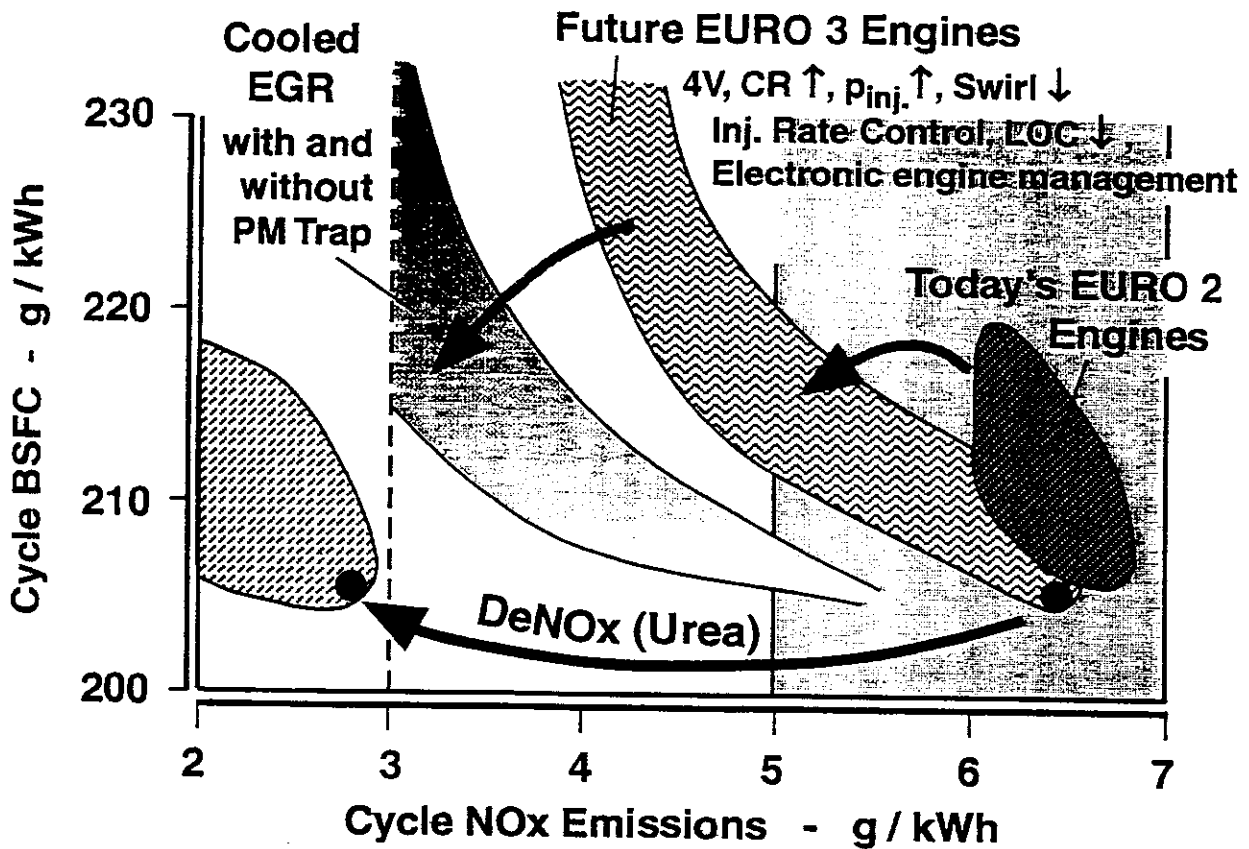
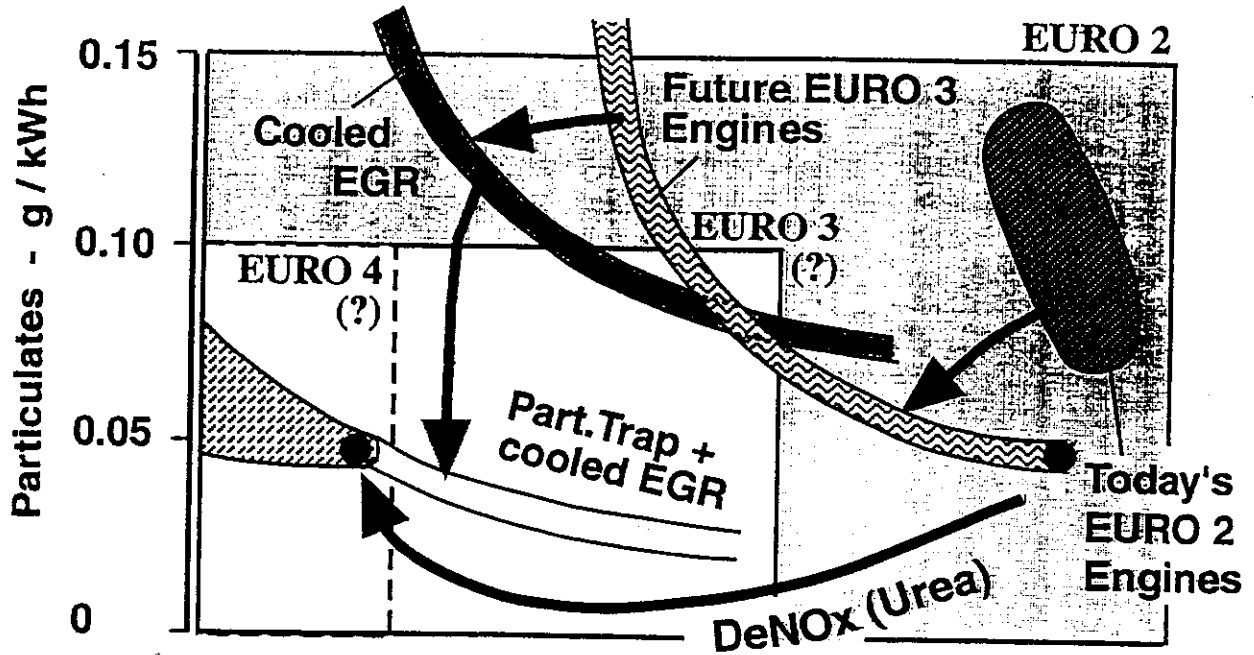
SCR-systemen är ännu voluminösa (flera gånger motorns cylindervolym) och komplexa (och dyrbara). SCR-tekniken är m.a.o. ännu inte mogen för användning i fordon eller som system och ytterligare utveckling krävs. Det är därför för tidigt att säkert kunna bedöma framgången i utvecklingen av tekniken och överblicka kostnader för utrustning och drift.

En summerande överblick av effekter av motortekniska åtgärder och avgasrening för NO_x-reduktion ges i Figur 2.

ALTERNATIVA DRIVMEDEL

Svårigheten att komma tillrätta med utsläpp från dieselmotorer, särskilt vad gäller NO_x och partiklar, gör det nödvändigt att beröra vad som kan åstadkommas med alternativa drivmedel. Aktuella sådana är motoralkoholer (metanol, etanol), etrar och metangaser (naturgas, biogas), som

Fig. 2



K&lla: AVL

Development Directions of Efficient Low Emission HD Diesel Engines

också ger möjligheter att komma över på biogas som medel att skapa ett uthålligt transportsystem.

Prover och demonstrationer har lett till slutsatsen att dessa drivmedel har potential att redan nu möta framtida krav (Euro IV).

I Sverige har etanoldrift av främst dieselmotorer i bussar i uppföljningar klart visat NO_x-utsläpp på ≤ 4 g/kWh och med metanol kan än lägre värden nås enligt främst utländska erfarenheter (beroende på dess lägre flamtemperatur). Då alkoholerna brinner utan sotbildning (uppmätta partikelutsläpp härrör från smörjolja), kan EGR för än lägre utsläpp användas med mindre problem än med dieselolja som bränsle.

Metangasdrivna tunga motorer (ombyggda till drift enl. ottocykeln) har som "lean burn-motor" certifierats för 2,5 g/kWh NO_x. Uppföljningen av bussar i drift är dock inte lika övertygande, sannolikt beroende på att styr- och bränslesystem ännu behöver utvecklas något för ökad tillförlitlighet under transienta förhållanden. Användning av EGR kan ge lägre NO_x-utsläpp, då förbränningen kan ske utan sotbildning. Mycket lägre NO_x-utsläpp från gasmotorn kan erhållas genom stökiometrisk drift ($\lambda=1$) och användning av trevägs-katalysator som på bensinbilar men till priset av ökad bränsleförbrukning.

Etrar som DME (dimetyleter; en gas som kan hanteras som propan) har under senare tid tilldragit sig intresse, då den har goda egenskaper som dieselmotorbränsle (mycket god tändvillighet, sotfri förbränning) och kan produceras med samma teknik som för metanol. Endast preliminära resultat från en provmotor föreligger ännu. NO_x-utsläpp på nivån 3 g/kWh indikeras. Utvecklingspotential till lägre utsläpp finns.