

Teknik för låga kväveoxidemissioner vid naturgasförbränning

Del B
Tillämpningar och mätningar

SYDKRAFT

swedegas ab  västgas ab

FUD 87

FORSKNING • UTVECKLING • DEMONSTRATION

Teknik för låga
kväveoxidemissioner vid
naturgasförbränning
Del B
Tillämpningar och mätningar

Ingemar Gunnarsson, Västgas AB

Mars 1988

Teknik för låga kväveoxidemissioner vid naturgasförbränning

Del B
Tillämpningar och mätningar

SYDKRAFT

swedegas ab  västgas ab

FUD 87

FORSKNING • UTVECKLING • DEMONSTRATION

Teknik för låga
kväveoxidemissioner vid
naturgasförbränning
Del B
Tillämpningar och mätningar

Ingemar Gunnarsson, Västgas AB

Mars 1988

INNEHÅLL

	Sid
1. BAKGRUND OCH SYFTE	1
2. MÄTNINGAR	2
2.1 VÄRLDSGASKONFERENSEN 1982	2
2.2 VÄSTTYSKA MÄTNINGAR	3
2.3 SVENSKA MÄTNINGAR	5
3. PANNOR	7
3.1 ALLMÄNT	7
3.2 RÖKGASRECIRKULATION	7
3.3 LÅG NO _x -BRÄNNARE	9
3.4 VATTEN- ELLER ÅNGINSPRUTNING	10
3.5 KOMBINERADE ÅTGÄRDER	12
4. GASTURBINER	13
4.1 BAKGRUND	13
4.2 AVGASEMISSIONER	14
4.3 ÅTGÄRDER	16
4.3.1 Insprutning av vatten eller ånga	16
4.3.2 Bränsle/Luftblandning	18
4.3.3 Brännkammaren	18
4.4 SAMMANFATTNING	20
5. GASMOTORER - primära och sekundära reningsmetoder	21
5.1 ALLMÄNT	21
5.2 PRIMÄRA METODER	21
5.3 SEKUNDÄRA METODER	24
5.4 SAMMANFATTNING - 4-TAKTSMOTORER	26

		Sid
6.	STRÅLNINGSBRÄNNARE	28
6.1	ALLMÄNT	28
6.2	KATALYTISKA STRÅLNINGSBRÄNNARE	28
6.3	CYLINDRISKA STRÅLNINGSBRÄNNARE	29
7.	DIREKTTORKNING MED LÅG-NO _x -BRÄNNARE	33
8.	INDUSTRIELLA PROCESSER	36
8.1	ALLMÄN ÖVERSIKT	36
8.2	NO _x -REDUCERANDE ÅTGÄRDER	37
8.3	GLASSMÄLTNING	39
8.4	GASBRÄNNARE MED "LYSANDE FLAMMA"	40
9.	HUSHÅLLSAPPARATER OCH PANNOR I SMA EFFEKTER	41
9.1	ALLMÄNT	41
9.2	ATMOSFÄRBRÄNNARE	42
9.3	FLÄKTBRÄNNARE	44
9.4	PULSBRÄNNARE	45
9.5	SAMMANFATTNING	46
10.	SLUTSATSER	47

REFERENSLISTA
BILAGEFÖRTECKNING MED BILAGOR

1. BAKGRUND OCH SYFTE

Under 70- och 80-talet har medvetandet om kväveoxidutsläppens skadliga inverkan på vår miljö ökat allt mer. Detta har resulterat i strängare krav från myndigheterna beträffande NO_x-emissioner runtom i världen. Bl a av detta skäl har man infört katalytisk avgasrening för bilar i många länder. Även för förbränningsanläggningar har kraven skärpts, i Sverige används ett generellt riktvärde på 100 mg NO_x/MJ för pannanläggningar. Med naturgasen har man unika möjligheter att klara nuvarande och eventuellt även framtida gränsvärden, utan att behöva ta till sekundära åtgärder som avgasrening.

Denna rapport utgör del B i redovisningen av ett Swedegas-finansierat FUD-projekt som syftar till att klarlägga problematiken kring kväveoxidbildning vid naturgasförbränning. I rapporten redovisas mätningar av NO_x-emissioner från befintliga anläggningar. Dessutom ges exempel på teknik, kommersiellt tillgänglig eller framtida, som utnyttjar naturgasens möjligheter till låga NO_x-emissioner. Rapporten kan med fördel läsas tillsammans med del A där en fyllig bakgrund till NO_x-problematiken ges.

Ingemar Gunnarsson

VÄSTGAS AB

2. MÄTNINGAR

I takt med det ökade medvetandet om NO_x -emissionernas skadeverkningar har också intresset ökat för att mäta och dokumentera NO_x -halter i rökgaser från olika anläggningar. Avsikten med detta avsnitt är inte att beskriva olika mätmetoder. Där-
emot bör nedan redovisade mätresultat ge en god uppfattning om de NO_x -emissioner som uppträder vid praktisk drift med konventionell teknik. I många fall görs jämförelser mellan naturgas och olja.

2.1 VÄRLDSGASKONFERENSEN 1982

I rapporten från Internationella gasunionens kommitté F vid Världsgaskonferensen i Lausanne 1982 redovisas ett omfattande material NO_x -mätningar från gas och oljeeldade anläggningar (se bilaga 1). Mätvärdena som är gjorda under 1970-talet är i första hand hämtade från anläggningar i Holland eldade med Groningen-gas med ett relativt lågt värmevärde (ca 35 MJ/m^3). Man kan av detta skäl vänta sig något lägre NO_x -värden än normalt.

Mätningarna har emellertid jämförts med motsvarande underlag från Tyskland, England och Frankrike och överensstämmelsen har varit god. Följande kommentarer kan göras:

- NO_x -emissionerna är i nästan alla fall lägre vid naturgas än vid oljeeldning och betydligt lägre än vid koleldning.
- Kraftproduktion ger relativt höga NO_x -halter även för naturgas. Orsaken är troligen att anläggningar av denna storlek normalt är utrustade med luftförvärmning samt att förbränningsrummets storlek gör att "vissa molekyler" får en ganska lång uppehållstid i den heta zonen. Dessutom är de förmodligen flerbränsleanläggningar utan speciell anpassning till naturgasbränslet.
- Industrierpannor och eldrörspannor (cylindrical boilers) ger med naturgas NO_x -halter som väl underskrider de idag gällande riktvärdena från Naturvårdsverket (100 mg/MJ).
- Gasmotorer däremot ger extremt höga värden även för naturgas (ca 1000 mg/MJ) beroende på de höga förbrännings-temperaturer som uppstår i alla kolvmotorer.
- Gasturbinerna å andra sidan visar låga NO_x -halter. Det i bilaga 1 redovisade värdet är till och med lägre än vad som normalt anges för gasturbiner utan vatteninsprutning; nämligen $200\text{--}300 \text{ mg/MJ}$.

Kompletteras gasturbinen med en avgaspanna förbättras situationen ytterligare bl a beroende på viss utspädning med rökgaser från ev stöeldning.

- Beträffande olika industriella tillämpningar som ugnar, torkar m m varierar resultaten avsevärt mellan anläggningarna. Det är bara glasugnar som i medeltal ger högre halt än 200 mg/MJ.

2.2 VÄSTTYSKA MÄTNINGAR

Som ett resultat av miljöförstöring och skogsdöd i central-europa har man under senare år skärpt utsläppskraven i ett flertal länder. Tyskland är tongivande i denna utveckling. 1986 skärpte man den s k TA-luftnormen som mycket detaljerat anger gränsvärden för rökgasemissioner. Man har fastlagt olika gränser för olika typer av eldningsanläggningar och dessutom angett olika gränser med hänsyn till anläggningens storlek och typ av bränsle, vilket gör det hela ganska komplicerat. Därtill kommer den norm som reglerar stora kraftverksanläggningar större än 100 MW (GFAVO).

Generellt kan man dock säga att TA-luft har satt en hård press på hela energisektorn i Västtyskland vilket också resulterat i en rad aktiviteter i bl a form av nyutveckling av låg- NO_x -utrustning, men även mätning och dokumentation av vad olika anläggningar verkligen ger för emissioner bl a på NO_x -sidan. TA-luft kräver bl a kontinuerlig mätning av vissa utsläpp på större anläggningar.

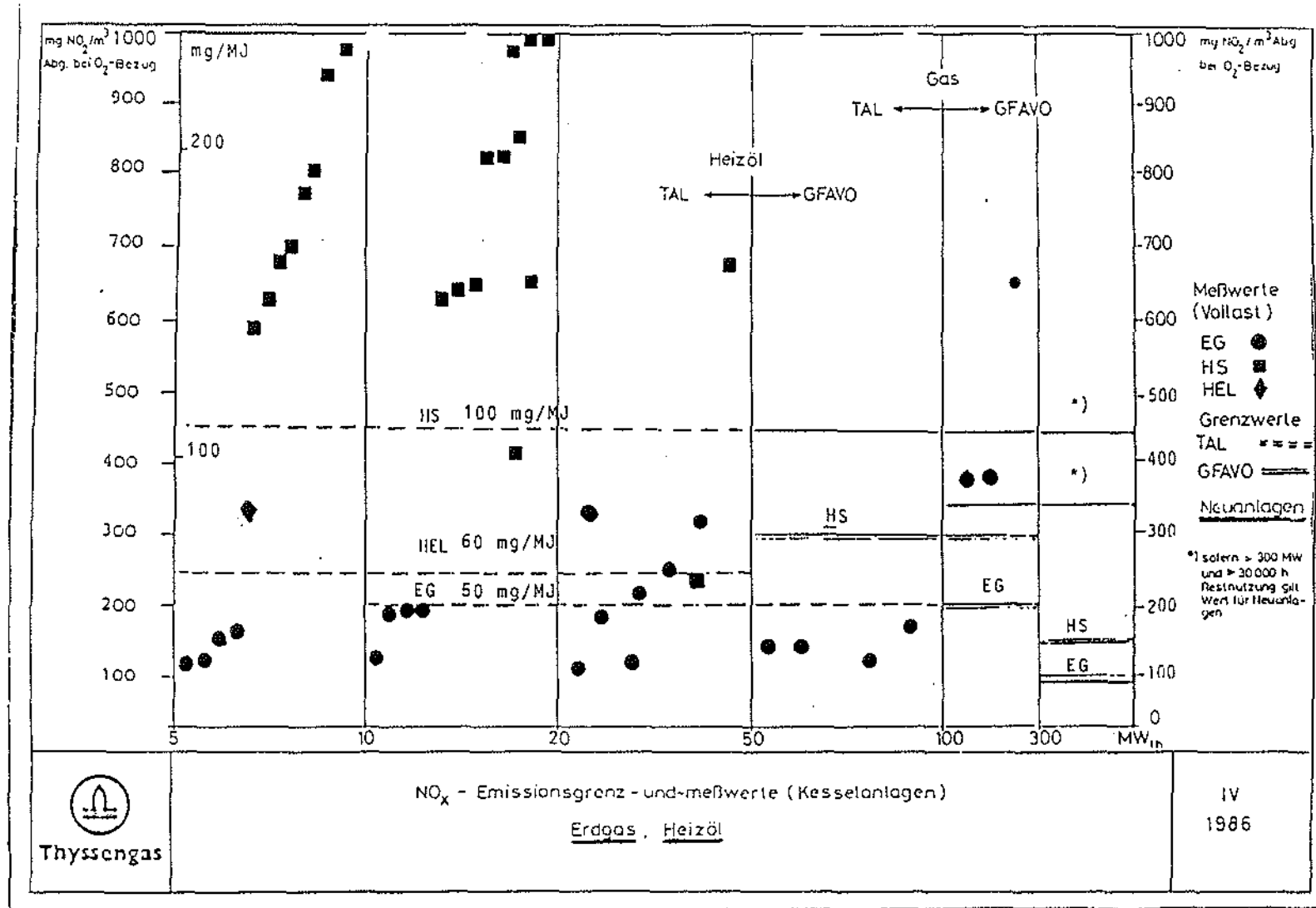
Tyska gasdistributörer har i detta sammanhang gjort ingående studier av NO_x -utsläppen från gaseldade anläggningar, ofta i jämförelse med motsvarande oljeeldade anläggningar.

Thyssengas är en av de gasdistributörer som har utfört mätningar på ett antal gas- eller oljeeldade anläggningar i storlekar från 5 MW till 150 MW. Resultatet redovisas nedan i diagramform (fig 1).

I diagrammet finns även gällande TA-luft-normer för NO_x -emissioner för olje- och gaseldade anläggningar upp till 50 resp 100 MW. Över dessa effektgränser finns gällande norm för stora kraftverksanläggningar (gross feuierungsanlagen).

Som synes ligger de flesta gaseldade anläggningar väl samlade under gränsvärdet, ca 50 mg/MJ. Några undantag finns emellertid. De mest extrema ligger på stora anläggningar mellan 100 och 300 MW. I dessa fall rör det sig säkerligen om "fler-bränsleanläggningar" för kraftproduktion med luftförvärmning. Luftförvärmningen ökar pannverkningsgraden men orsakar också en kraftig ökning av den termiska NO_x -bildningen.

De flesta pannorna är tjockoljeeldade och visar NO_x -emissioner i området 130-220 mg/MJ vilket ger ett genomsnitt 2-3 gånger högre än för motsvarande gaseldade anläggningar. Skillnaden mellan de olje- respektive gaseldade pannorna i diagrammet tycks onormalt stor.



EG = Erdgas
 HS = Heizöl schwer
 HEL = Heizöl leicht

GFAVO = Gross Feuerungs Anlagen Verordnung
 TAL = Technischen Anleitung Luft (TA-Luft)

Även Ruhrgas har redovisat ett stort antal mätningar av NO_x -emissioner från naturgas och oljeeldade anläggningar. Mätningarna är gjorda 1984 och 1985, d v s strax innan nuvarande TA-luft trädde i kraft och omfattar såväl pannanläggningar som olika typer av ugnar.

Generellt har följande konstaterats beträffande NO_x -emissioner vid pannanläggningar:

- Alla tjockoljeeldade anläggningar ligger väl över 100 mg/MJ och i många fall över 200 mg/MJ, d v s långt över gränsvärdet enligt TA-luft.
 - De anläggningar för lätt eldningsolja som redovisas ligger i området 60-90 mg/MJ vilket också är över gällande gränsvärde.
 - Av de gaseldade pannorna ligger flertalet (15 st) under gällande gränsvärde på 50 mg/MJ. 7 st ligger i området 50-65 mg/MJ, d v s strax över gränsvärdet.
 - De gaseldade anläggningar som uppvisar höga NO_x -värden är vattenrörspannor med höga ångtryck i storleksordningen 100 MW. Två av dem har dessutom luftförvärmare. Att luftförvärmning ökar NO_x -bildningen är ett känt fenomen.
- Mätningarna på konventionella ugnsanläggningar gav ett något mer blandat resultat, dock kan konstateras att:
- I flera fall redovisas mycket låga NO_x -värden (runt 50 mg/MJ), vilket delvis går att koppla till relativt låga ugnstemperaturer.
 - Högst värden redovisas för de två gaseldade glasvannor som undersökts. I det mest extrema fallet är såväl förvärmningstemperatur som ugnstemperatur mycket höga.

2.3 SVENSKA MÄTNINGAR

Från och med naturgasintroduktionen i södra Sverige 1985 har ett antal större ång- och hetvattenpannor samt vissa industriprocesser konverterats från olja till naturgas.

I samband med konverteringen har Länsstyrelsen begärt att NO_x -halten i rökgasen skall mätas och dokumenteras. På detta sätt har ett relativt omfattande material tagits fram beträffande NO_x -emissioner från i första hand industriella anläggningar.

I bilaga 2 redovisas mätningar från pannor som också sammanställts i diagram (fig 2). I bilaga 3 redovisas mätningar från industriella ugnar och torkprocesser. Observera att nästan alla konverteringar från olja till naturgas skett utan byte av pannor eller ändring av process. Dessutom har i många fall befintliga brännare behållits. Följande kommentarer kan lämnas.

- Samstämmigheten med tyska och holländska mätningar är god - även om de svenska mätningarna i viss mån visar ännu lägre värden, vilket troligen beror på att de svenska pannanläggningarna är relativt nya och genomgående av en god kvalitet redan före konvertering.

- Alla gaseldade pannor uppfyller Naturvårdsverkets riktvärde på 100 mg/MJ utan att vara utrustade med låg- NO_x -brännare.

- Det är ingen påvisbar skillnad mellan stora och små anläggningar.

- De flesta processtillämpningarna ligger runt 100 mg/MJ men några undantag finns. B1 a visar ett antal ugnar relativt höga värden.

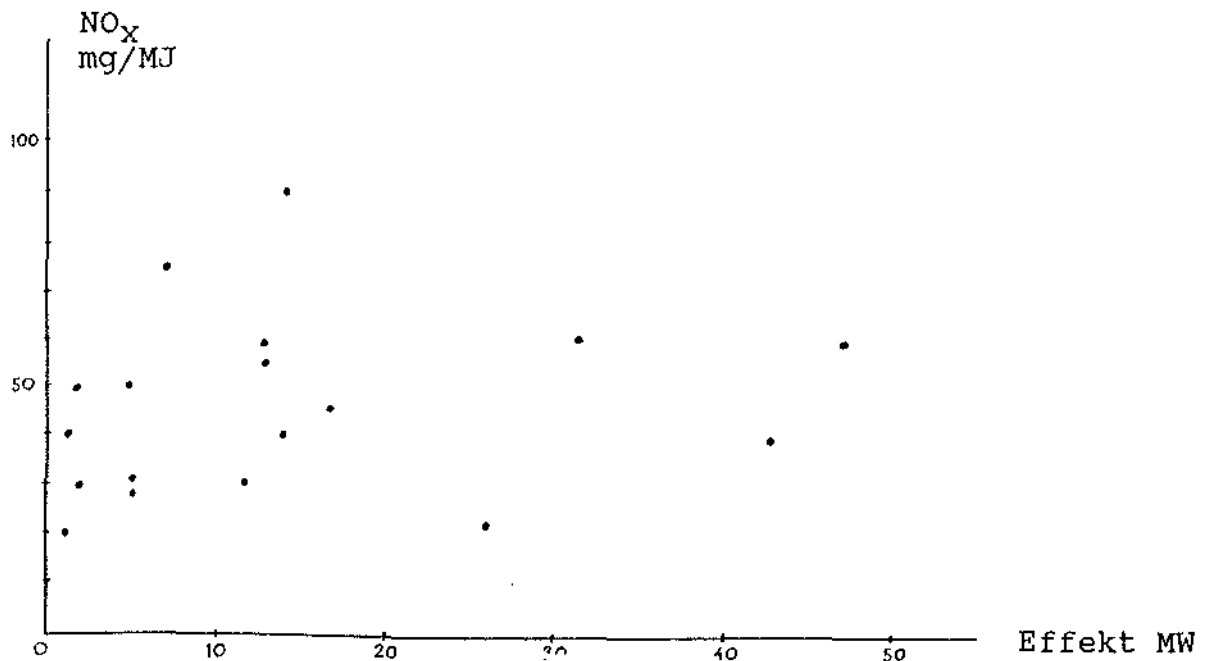


Fig 1 NO_x -emissioner uppmätta på naturgaseldade pannanläggningar i Malmöhus län

3. PANNOR

3.1 ALLMÄNT

Idag svarar ång-, het- och varmvattenpannorna av olika slag för en dominerande del av naturgasförbrukningen i Sverige. Detta förhållande kommer troligen att råda även ett antal år framåt. Därför är det naturligtvis mest intressant att åstadkomma låga NO_x -emissioner vid denna typ av anläggningar. Det framgår av de redovisade mätningarna att NO_x -halterna från konverterade oljeanläggningar är relativt låga med dagens mått mätt. Dock finns vissa avvikande anläggningar som visar höga NO_x -värden i området 200-300 mg/MJ och däröver.

Vid nyinstallation bör man med låg- NO_x -teknik kunna sänka nivån ytterligare och helt undvika "höga värden". Naturgasen ger en möjlighet att möta eventuella skärpta krav i framtiden. Ett intensivt utvecklingsarbete pågår runtom i världen för att ta fram nya typer av brännare som motsvarar miljökraven och bibehåller hög verkningsgrad.

Nedan redovisas ett antal exempel på s k låg- NO_x -teknik. Hur och varför NO_x bildas förutsätts vara känt från del A i denna rapport.

Strålningsbrännare som installeras i eldrörspannor bl a för att minska NO_x -emissionerna beskrivs i avsnitt 6.

3.2 RÖKGASRECIRKULATION

I befintliga pannanläggningar kan NO_x -emissionerna ofta begränsas genom extern rökgasrecirkulation, d v s en viss del av utgående rökgas återförs till förbränningsrummet oftast efter kylning.

Detta beror på att den återförda rökgasen verkar som inertgas och kylmedel i förbränningsrummet varvid flamtemperaturen sänks, syrgaskoncentrationen sänks och uppehållstiden förkortas. Dessa faktorer samverkar till en sänkt NO_x -halt.

Normalt brukar den recirkulerade rökgasmängden ligga mellan 10 och 20 % av totalt flöde. Vid högre rökgasåterföring blir flammen lätt instabil. I fig 3 visas exempel på hur stor NO_x -reduktion som kan åstadkommas.

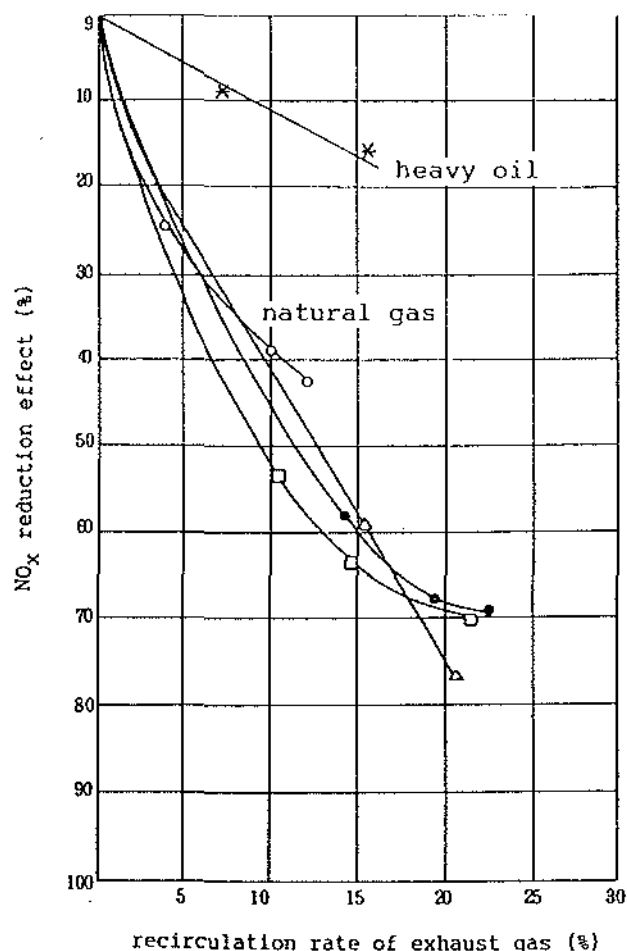


Fig 3 NO_x-reduktion p g a rökgasrecirkulation som funktion av halten recirkulerad rökgas vid några olika typer av gasbrännare.

Då befintlig anläggning kompletteras med rökgasrecirkulation måste eventuell ändrad belastning av värmeytorna i pannan beaktas. Dessutom riskerar man att kapaciteten på befintliga rökkanaler och fläktar blir begränsande. Dessa faktorer kan medföra att endast en ringa rökgasåterföring är möjlig.

Vid ombyggnad av värmecentral på 3x8 MW i Västtyskland uppnåddes följande resultat (ref 24) inkl utökning av värmeytor.

Investering ca 240 000 kr (100 kr/kW)

Avgasåterföring 15 %

NO_x-emission ca 30 mg/MJ

Ökad kapital- och driftkostnad ca 1 % jämfört med total värmekostnad (ca 0,25 öre/kWh.)

Weisshaupt har utvecklat ett system för rökgasåterföring, anpassat till deras brännare, som idag finns tillgängligt i Sverige. Systemlösningen framgår av fig 4. Med detta system kan man förvänta sig NO_x-halter på 15-20 mg/MJ (50 mg/m³ med naturgas). Propan och olja ger något högre halter.

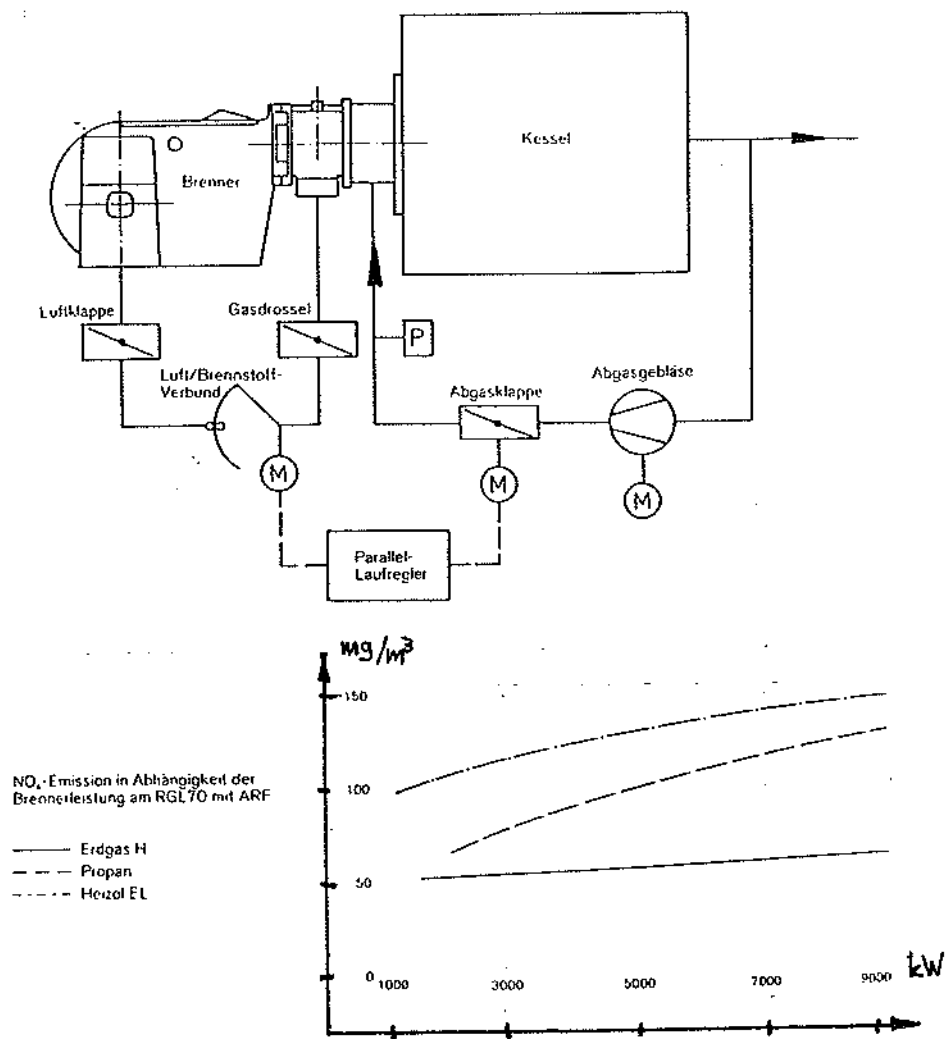


Fig 4 Weisshaupt system för rökgasåterföring

3.3 LÅG NO_x-BRÄNNARE

Vad kan man då göra i brännaren för att reducera NO_x-bildningen? Jo, en hel del. Det är ju där NO_x-bildningen börjar och har sin grund och det är här de mest kostnadseffektiva åtgärderna kan sättas in.

I en konventionell brännare kan NO_x-bildningen normalt minskas med ca 10 % genom att luftöverskottet minimeras och gas och bränsle blandas väl. Mätningarna från Sverige och utomlands visar att en väl injusterad brännare ger god förutsättning för låg NO_x-bildning (jmf avsnitt 2). För installationer i eldrörspannor är 50 mg/MJ normalt vid naturgaseldning.

När man vid konstruktionen av brännaren väljer nya lösningar för att minska NO_x -bildningen kallar vi dessa brännare för låg- NO_x -brännare.

Ett exempel på en sådan brännare är Babcocks ASR-brännare (ASR = Axial-Stufen Rückstrombrenner) vars funktionsprincip framgår av nedanstående bild (fig 5). I denna låg- NO_x -brännare utnyttjas en del rökgasrecirkulation internt i brännaren genom att en del av den förbrända avgasen återblandas med förbränningsluften och tillförs flaman via primär- och sekundärluft.

Dessutom tillförs förbränningsluften i tre steg så att förbränningen sker i en understökiometrisk och syrefattig miljö ända tills slutförbränningen sker.

I diagrammet (fig 5) visas en NO_x -reduktion på 30-40 % jämfört en standardbrännare. Den aktuella brännaren som är en kombinationsbrännare för olja och naturgas ger klart lägre NO_x -värden vid naturgas.

I en annan typ av låg- NO_x -brännare den s k MSM-brännaren tillförs förblandad luft/bränsleblandning i steg på ett sådant sätt att förbränningen sker med relativt stort luftöverskott i första steget men slutsteget har underskott på förbränningsluft, d v s reducerade miljö. Denna typ av brännare har vid försök gett reduktion av NO_x -bildning på ca 50 %.

För att komplettera låg- NO_x -brännaren installeras ibland munstycken som blåser in luft för slutförbränning i själva pannan, s k luftinjektion.

3.4 VATTEN- ELLER ÅNGINSPRUTNING

Vatten- eller ånginsprutning i oljebrännare har ofta använts för att åstadkomma bättre finfördelning av oljedropparna och därmed minska mängden oförbränt.

I en gasbrännare kan detta vara ett sätt att sänka flamttemperaturen i förbränningsrummet och därmed minska NO_x -bildningen. Försök har gjorts utomlands vilka pekar på en möjlig NO_x -reduktion på ca 20-60 %.

Metoden medför emellertid försämrade total verkningsgrad för anläggningen om ej vattnets kondensationsvärme utnyttjas. Vid försök har man fått följande resultat:

Ånginsprutning (kg/100 kWh bränsle)	NO_x -reduktion (%)	Energiförlust (%)
100 kWh		
ca 2	25 %	1,5 %
ca 4	45 %	3,0 %
ca 6	60 %	6,0 %

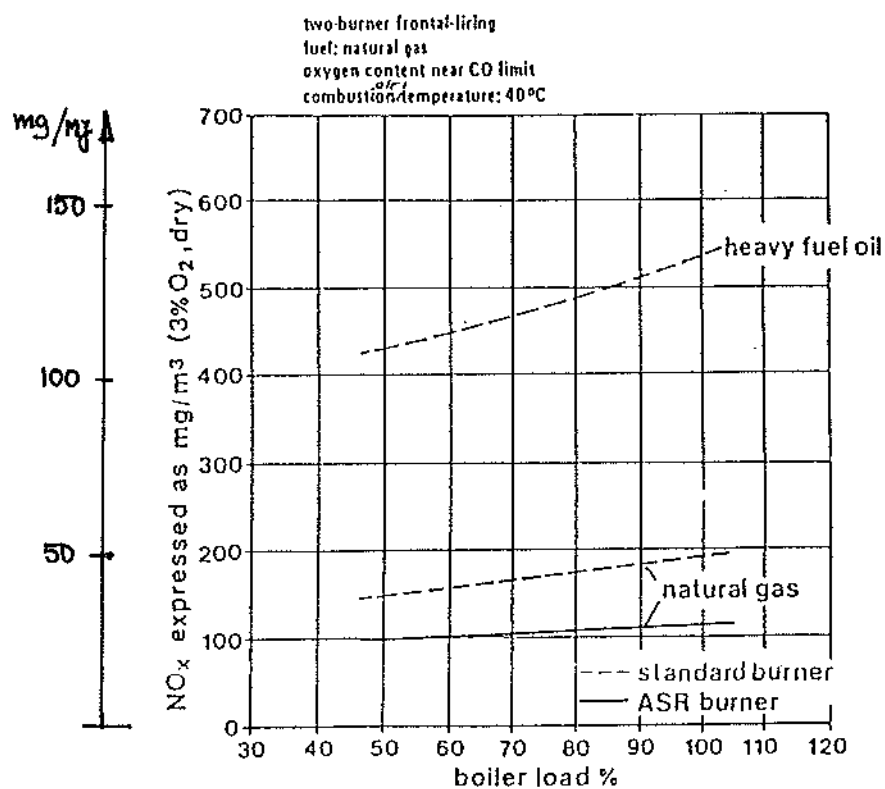
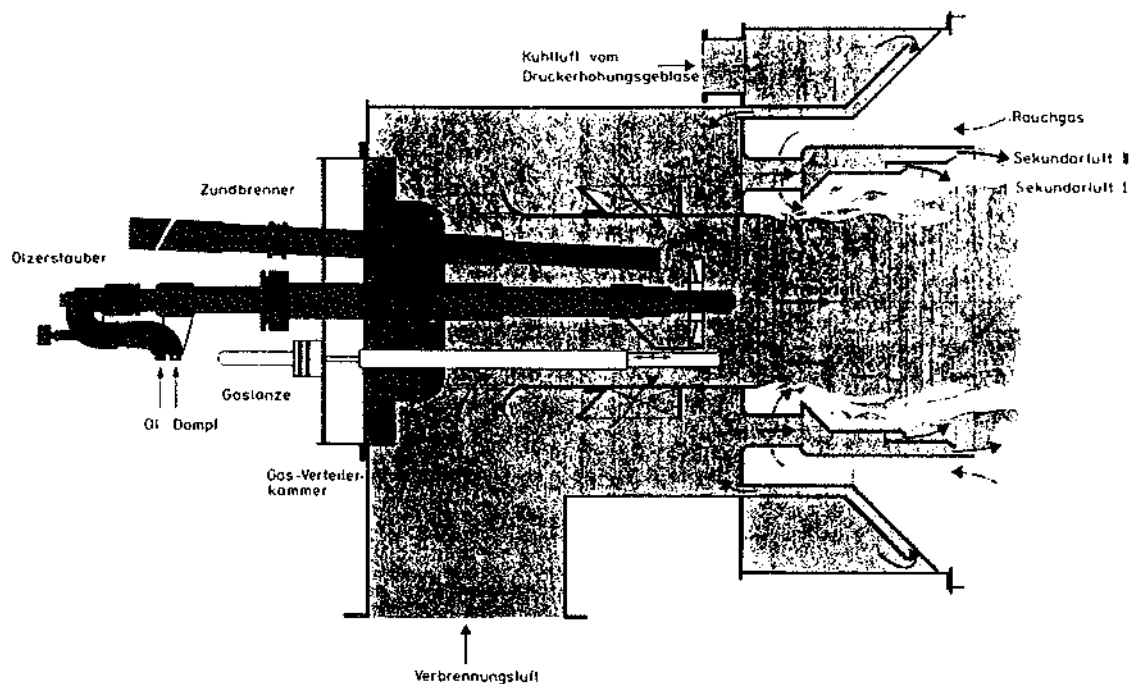


Fig 5 ASR-brännaren funktionsprincip samt uppmätt NO_x -emission

I Sverige har man vid KTH utfört test på en panna i villastorlek. Vattnet sprutades direkt in i eldstaden från motsatt sida jämfört med brännaren. NO_x-reduktionen var mycket god. Vid insprutning av relativt stora mängder vatten eller ånga bör med hänsyn till energiekonomin en kondenserande rökgaskylare installeras.

3.5 KOMBINERADE ÅTGÄRDER

En lämplig kombination av ovanstående åtgärder ger ofta det bästa resultatet även om det naturligtvis är så att det totala resultat är mindre än summan av effekterna för varje enskild åtgärd var för sig. Dock kan man räkna med att åstadkomma en reducering av NO_x-utsläppen i en befintlig panna med mellan 50 - 70 % genom att kombinera ett antal åtgärder.

Nedanstående bild (fig 6) visar hur man på en industriångpanna på drygt 100 MW kombinerat följande åtgärder:

1. Låg-NO_x-brännare
2. Rökgasrecirkulation (både varm och kyla)
3. Luftinjektion i pannan

Observera att pannor i denna storlek ofta är utrustade med luftförvärmare vilket höjer förbränningsluftens temperatur och därmed ökar NO_x-bildningen.

I det aktuella fallet har man som en följd av de NO_x-reducerande åtgärderna dessutom varit tvungen att utöka vissa värmeöverföringsytor. Trots detta bedöms kostnaden för dessa primära åtgärder vara låg (ca 1/5) jämfört med vad det kostar att installera rökgasrening.

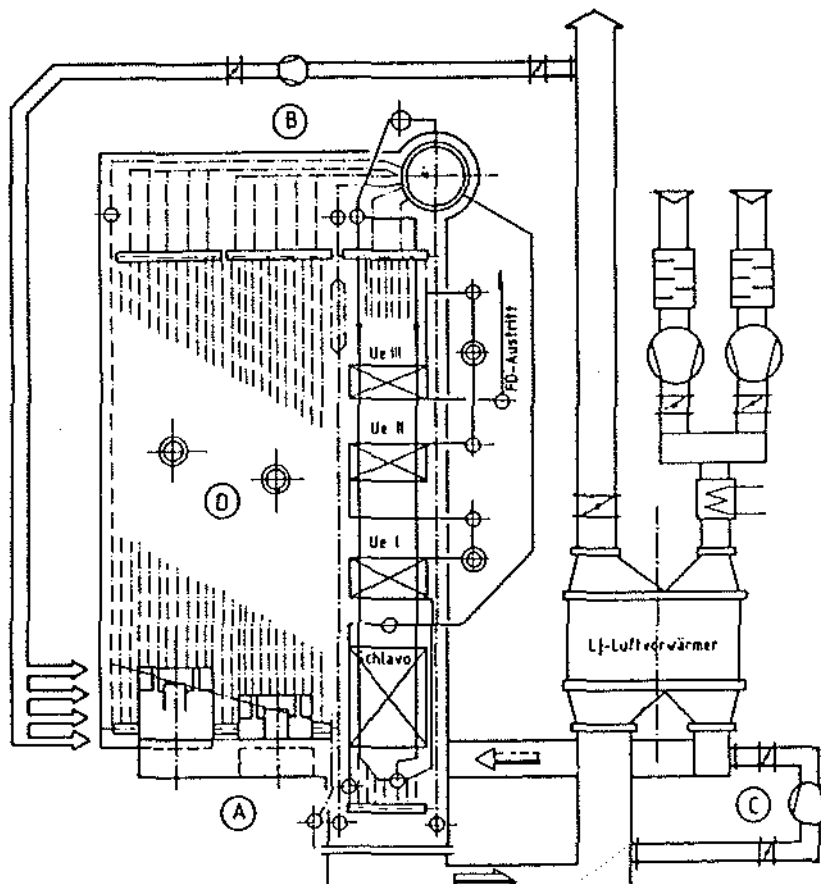


Fig 6

Ångpanna på 112 MW i vilken en kombination av primära åtgärder för att minska NO_x-emissionerna har vidtagits.

4. GASTURBINER

4.1 BAKGRUND

Gasturbiner som användes första gången i Neuhatel i Schweiz 1939 har sedan dess fått allmän användning inom flygplansindustrin. Under början av 1950-talet kom de första tillämpningarna för kraftproduktion. I detta fall ställs högre krav beträffande verkningsgrad och drifttid. Däremot är det inte lika viktigt med en lätt konstruktion.

Gasturbinprocessen består i huvudsak av tre steg, nämligen:

1. Kompression av förbränningsluften i en "turbo"-kompressor (motsvarar kompressionssteget i en kolvmotor).
2. Förbränning i en brännkammare där bränslet sprutas in (motsvarar "explosionen" i en kolvmotor). Temperaturförloppet i en normal brännkammare framgår av fig 7.
3. Expansion av de varma avgaserna sker i en kraftturbin som, förutom att den genererar kompressionsenergi för luftkompressorn, även ger kraft, t ex för elproduktion (motsvarar expansionssteget i en kolvmotor).

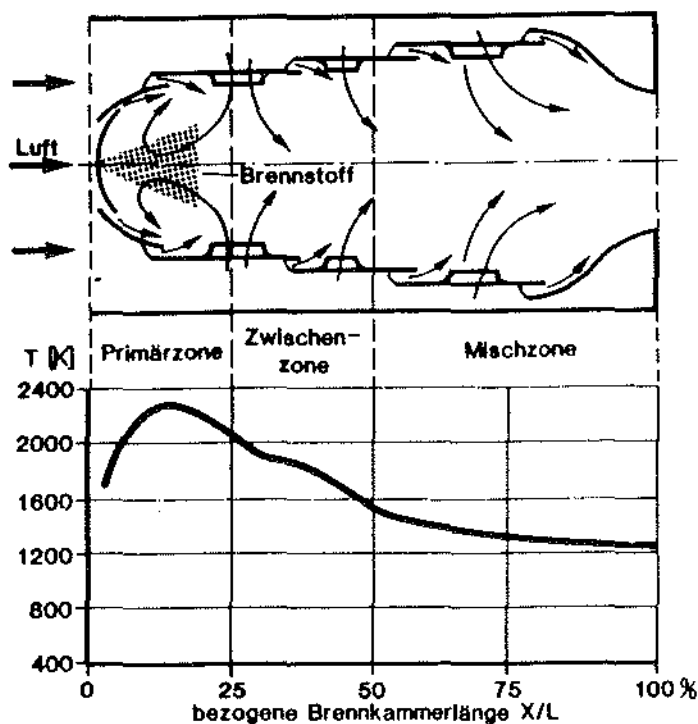


Fig 7 Temperatur och strömningsförlopp i en konventionell gasturbinbrännkammare

4.2 AVGASEMISSIONER

Vid förbränning av naturgas i en gasturbin innehåller avgaserna förutom koldioxid och vatten även föroreningar som:

- koloxid (CO)
- kväveoxider (NO_x)
- kolväten (oförbränt)

Används olja som bränsle tillkommer även

- svaveldioxid (SO_2)
- stoft
- tungmetaller

Eftersom dessa senare ämnen ingår som en förorening i bränslet kan man minska dessa utsläpp enbart med sekundära åtgärder, d v s rening av rökgaserna.

Under 1960-talet, då gasturbinmarknaden tog fart, ansträngde man sig för att minska utsläpp av svaveldioxid och rök. Under slutet av 70-talet och början av 80-talet har NO_x -emissionerna kommit allt mer i fokus. Idag pågår ett flertal utvecklingsprojekt med målet att kraftigt minska dessa utsläpp.

Konstruktion av gasturbiner har traditionellt gjorts med avsikten att optimera kapacitet och verkningsgrad utifrån givna förutsättningar. Därmed har halter av brännbara ämnen i rökgasen, såsom koloxid och kolväten, hållits låga. Kväveoxiderna har däremot ej ägnats någon större uppmärksamhet. Detta har, som resultat, gett konstruktioner som inte är optimala ur kvävedioxidsynpunkt. För gasturbiner ligger man i området 200-300 mg NO_x per MJ med naturgas som bränsle och 400-500 mg NO_x per MJ med olja som bränsle.

Kväveoxidbildningen är, som vid andra typer av förbränning, beroende av:

1. Temperaturförloppet i brännkammaren
2. Uppehållstiden
3. Luft/bränsleförhållandet

Dessa förhållanden beror i sin tur bl a på brännkammarens konstruktion, typ av bränsle, belastning av turbinen m m.

NO_x -bildningen ökar normalt vid stigande belastning medan CO-bildningen sjunker. Jmf fig 8.

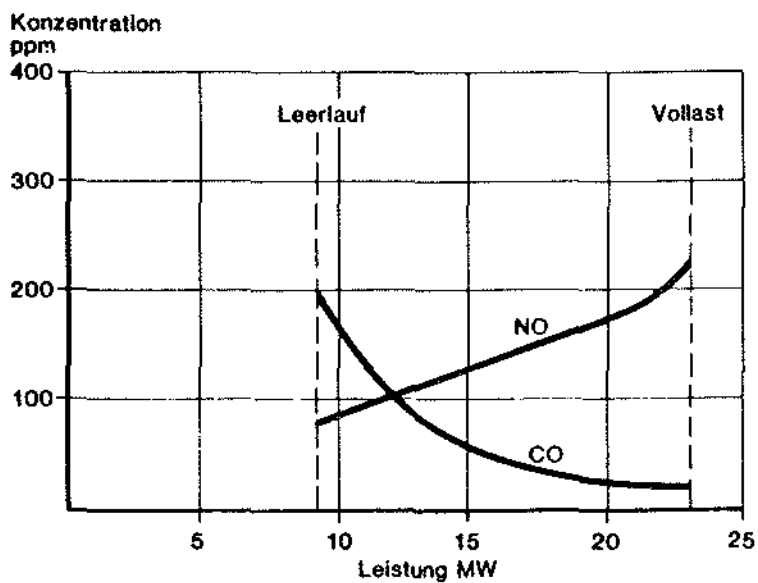


Fig 8 NO_x och CO utsläpp från en konventionell gasturbin vid olika belastning.

Det pågår runtom i världen intensivt arbete på att konstruera brännkammare som ger låga NO_x -utsläpp. Detta arbete är resurskrävande och långsiktigt till sin karaktär. Innan sådana lösningar blir kommersiellt tillgängliga kan man emellertid reducera bildning av NO_x i befintliga brännkammare, t ex genom insprutning av ånga eller vatten. Nedan följer en sammanställning av låg- NO_x -teknik idag och i framtiden.

4.3 ÅTGÄRDER

Åtgärder som minskar kväveoxidbildningen i förbränningsprocessen kallas primära. Sekundära kallas de åtgärder som innebär rening av rökgaserna efter turbinen.

I första hand bör primära åtgärder utnyttjas för de naturgaseldade gasturbinerna eventuellt kombinerade med sekundära åtgärder bör långtgående reningskrav kunna uppfyllas. Den tyska TA-luftnormen anger 300-350 mg/m³, vilket motsvarar ca 250-300 mg/MJ, vilket normalt uppnås med konventionella naturgaseldade gasturbiner.

Emissionskrav runt 100 mg/MJ, vilket diskuteras i Sverige, bör kunna uppfyllas med lämpliga primäråtgärder. Nedan följer en genomgång av olika åtgärder och dess effekt.

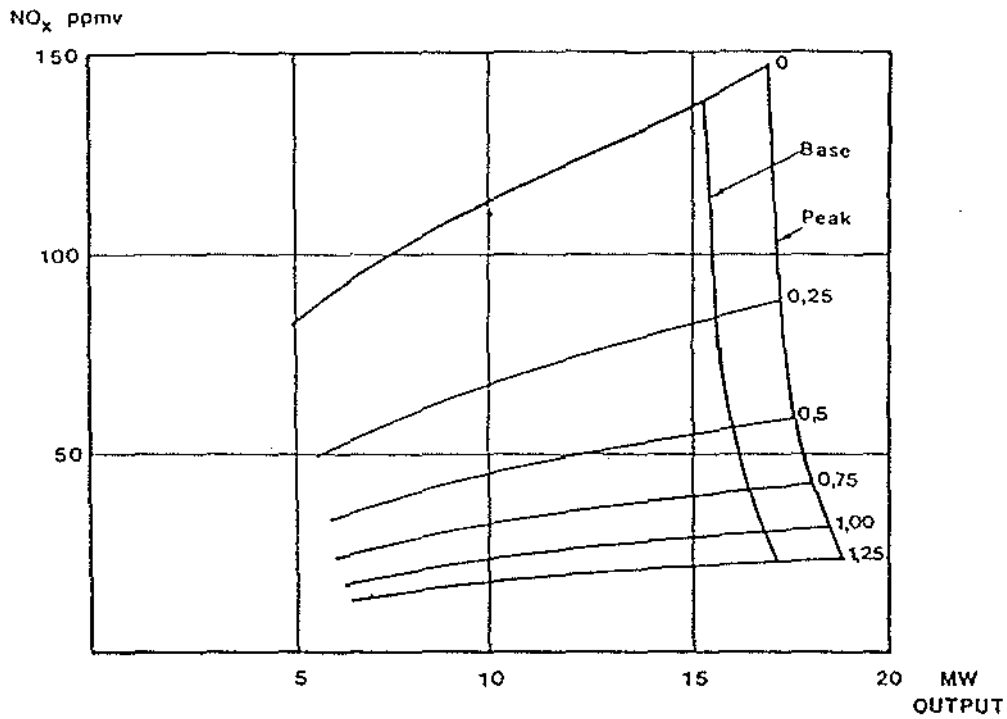
4.3.1 Insprutning av vatten eller ånga

Insprutning av vatten eller ånga före eller i början av brännkammaren är ett effektivt sätt att sänka förbränningstemperaturen och därmed minska NO_x-bildningen. Metoden lämpar sig bäst vid stationära anläggningar där man har tillgång till vatten och/ eller ånga av tillräcklig kvalitet. NO_x-reducering på 70-90 procent är fullt realistiskt - jmf fig 9.

Nackdelarna med metoden är:

1. Risk för ökat slitage på turbinskovlar
2. Risk för högre CO-halter i avgaserna
3. Sänkt verkningsgrad

En lägre verkningsgrad kan man ej komma ifrån med detta kompenseras i viss mån av en ökande effekt (kapacitet) på turbinen i och med att "massflödet" genom kraftturbinen ökas med en viss mängd vatten utan att kompressionsarbetet ökar.



Exempel på hur vatten i flaman kan minska NO_x halten.
 NO_x emissionen från en naturgaseldad gasturbin GT35 i Holland.
 vatten/bränsle [kg/kg] är parameter.

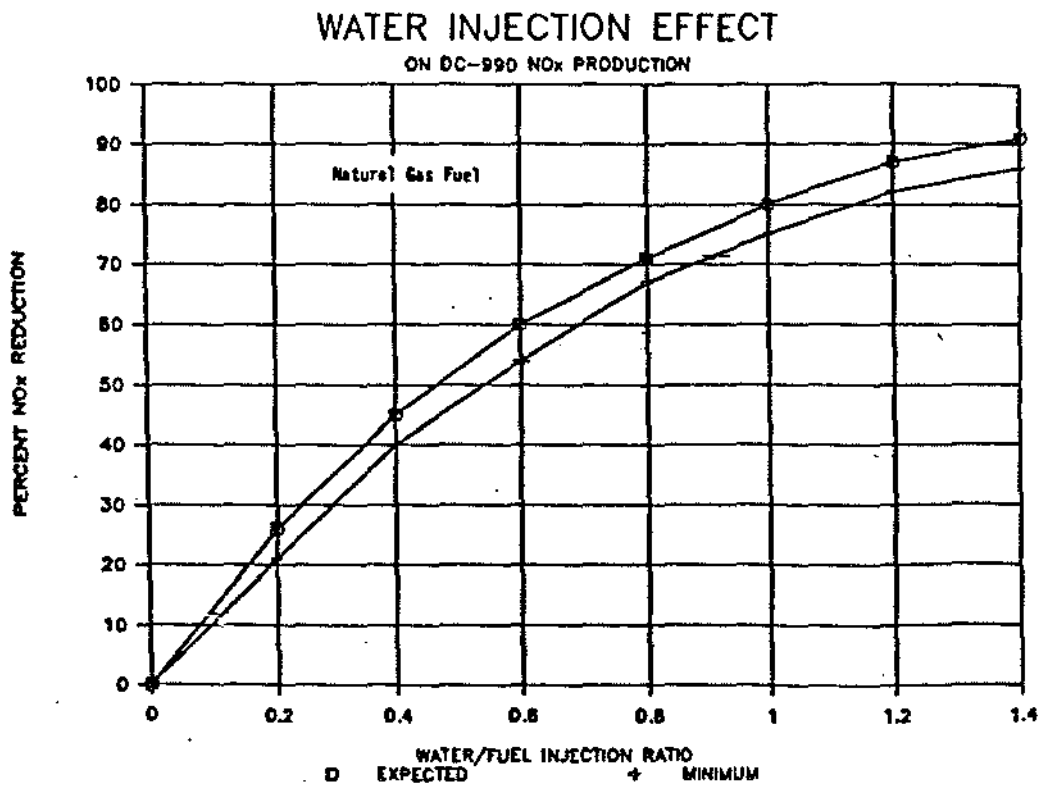


Fig 9 NO_x-reduktion vid vatteninsprutning på en GT35 (Asea Stal) resp en DC990 (ca 5 MW).

4.3.2 Bränsle/luftblanding

NO_x-bildningen kan även minskas genom att på andra sätt "späda ut" luftbränsleblandningen och därmed sänka förbränningstemperaturen. Nedan följer några av dessa metoder.

Höjt primärluftflöde sänker förbränningstemperaturen i brännkammarens primärzon med lägre NO_x-bildning som följd. Det finns risk för ökad CO-bildning, men denna kan motverkas genom att brännkammaren förlängs så att en fullständig förbränning hinner ske. Vid försök har en reduktion av NO_x-innehållet i avgaserna med ca 30 procent uppnåtts.

Avgasrecirkulation kan åstadkomma en upp till 60-procentig NO_x-reduktion. Det är emellertid viktigt att den recirkulerade luften är kyld, t ex i en avgaspanna för att uppnå den önskade effekten. Även om så är fallet blir tillloppstemperaturen högre än normalt, vilket minskar turbinens kapacitet och verkningsgrad.

I befintliga anläggningar kan ett sätt att minska NO_x-bildningen vara att späda ut bränslet med inert-gas som N₂ eller CO₂.

Med en tillsats av 20 % N₂ i bränslet har en sänkning av NO_x-halten med 20-25 % åstadkommit.

4.3.3 Brännkammaren

Brännkammarens utformning och funktion har stor betydelse för gasturbinens NO_x-egenskaper. Idag arbetar man på att utveckla nya typer av brännkammare som inte bara har hög verkningsgrad utan också goda NO_x-egenskaper.

* Förblandningsbrännkammaren eller LPP (Lean Premix Prevaporisation) är ett exempel på ny teknik under utveckling. Principen är att blanda luft och bränsle väl med högt luftöverskott i en separat blandningskammare innan blandningen sprutas in i primärzonen för förbränning vid relativt låg temperatur. Flera projekt av denna typ pågår bl a hos BBC. Målsättningen är att uppnå så låga NO_x-halter som ca 10 mg/MJ.

- * Ett annat projekt är det s k Sinox III-metoden som håller på att utarbetas av Ruhrgas i samarbete med turbintillverkare. Även i detta fall arbetar man med höga luftöverskott i primärzonen och en god blandning mellan luft och bränsle. Se fig 10.

En viktig förutsättning är att kunna reglera primär och sekundärluftflöde oberoende av varandra. När konceptet är färdigutvecklat räknar man med att uppnå ca 10-20 mg NO_x per MJ.

- * RBQQ (Rich Burn Quick Quench) är en metod som går ut på att elda i två steg, där det första steget sker med bränsleöverskott och det andra steget med låg temperatur och stort luftöverskott se fig 11. Metoden har i praktiken visat sig mycket svår att genomföra utan rökbildning.
- * Slutligen bör den katalytiska brännkammaren nämnas som kan ge inloppstemperaturer till brännkammaren på ca 1200°C. Ännu har ingen driftsäker katalytisk brännare av denna typ konstruerats. Bl a kan katalysatorn lätt förgiftas av bränslet, varvid livslängden avsevärt förkortas.

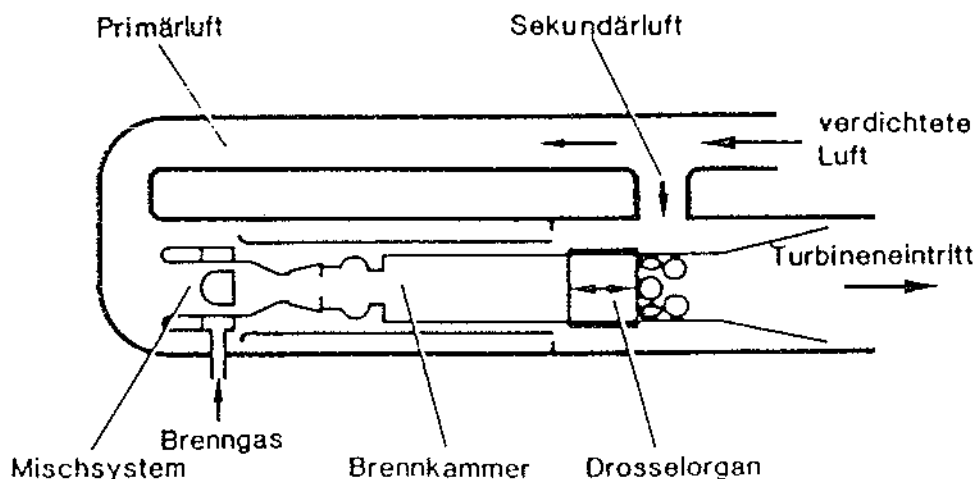


Fig 10

Principen för SINOX III som är en låg-NO_x-gasturbin under utveckling

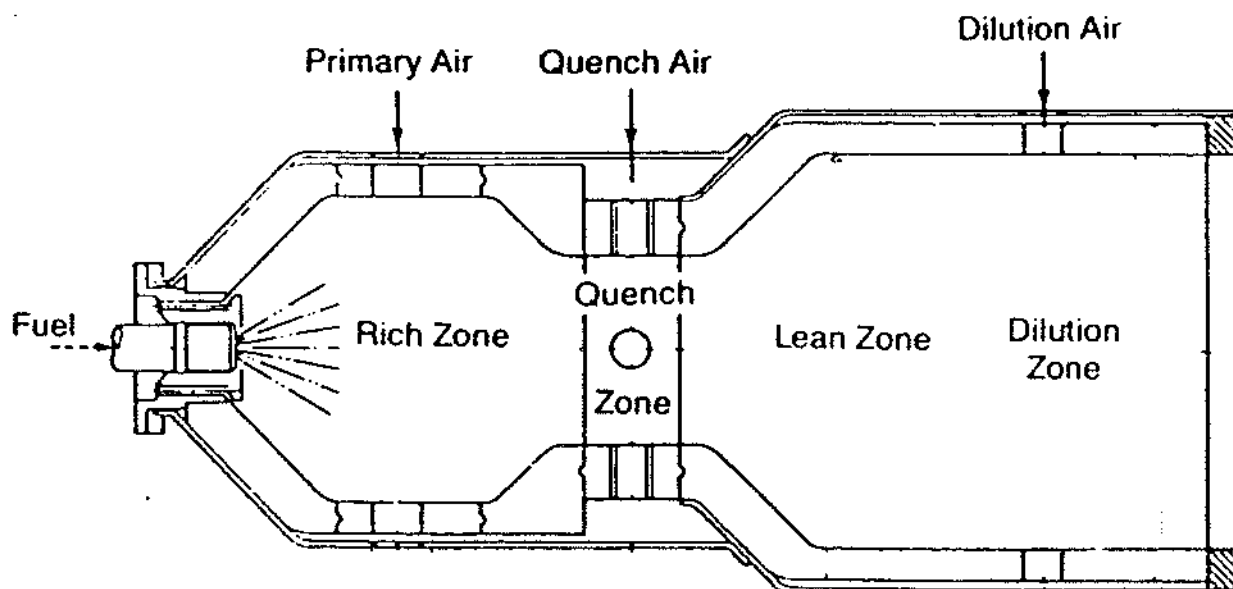


Fig 11 Principen för RBQQ

4.4

SAMMANFATTNING

Idag pågår ett intensivt och resurskrävande utvecklingsarbete hos gasturbintillverkare runtom i världen för att utveckla låg- NO_x -brännkammare av olika slag. Det finns goda förutsättningar att på detta sätt komma ner i halter på 50 mg/MJ och därunder, men ännu är lösningarna inte färdigutvecklade.

Den idag konventionella gasturbintekniken ger NO_x -emissionerna på 200-300 mg/MJ vid naturgaseldning utan reningsåtgärder. Ett effektivt sätt att sänka NO_x -emissionerna i konventionella gasturbiner är vatten- eller ånginsprutning. På detta sätt har man goda möjligheter att komma under 100 mg NO_x /MJ i rökgaserna. Vill man nå längre är man idag hänvisad till sekundärrening med katalysatorer, vilket beskrivs utförligare i avsnittet om gasmotorer.

5. GASMOTORER - primära och sekundära reningsmetoder

5.1 ALLMÄNT

Konventionella förbränningsmotorer ger generellt höga halter av kväveoxider i rökgaserna. De flesta gasmotorer ligger inom intervallet 500-2000 mg/MJ bl a beroende på typ av motor och storlek.

Orsaken till de höga utsläppsnivåerna är höga tryck och temperaturer i motorcylindrarna ger förutsättning för NO_x -bildning. Dessutom har utvecklingsresurserna satsats på att förbättra verkningsgrad och prestanda medan avgasemissionerna varit av underordnat intresse.

Idag däremot satsas mycket på utveckling av ny förbrännings- och reningsteknik för att minska kväveoxidutsläppen. Åtgärderna kan delas in i två typer nämligen

1. Primära åtgärder, d v s förändring av förbränningsprocessen.
2. Sekundära åtgärder, d v s rökgasrening.

Stora lågvarviga gasdieselmotorer med stor effekt per cylinder ger ofta höga utsläpp. Det är också mycket svårt att åtgärda dessa med primära metoder. Man är i detta fall hänvisad till rökgasrening. Mindre 4-taktsmotorer är Otto typ ger normalt lägre utsläpp och det är också möjligt att med primära metoder ytterligare sänka NO_x -emissionen.

5.2 PRIMÄRA METODER

Nedanstående beskrivning gäller i första hand 4-takts gasmotorer som är bäst lämpade för primära åtgärder. Avgasemissionen från en motor beror på en rad parametrar som luftfaktor, belastning, varvtal, tändningsinställning och kompressionsförhållande. Starkast inflytande har dock luftfaktorn. Detta förhållande illustreras av nedanstående diagram i fig 12.

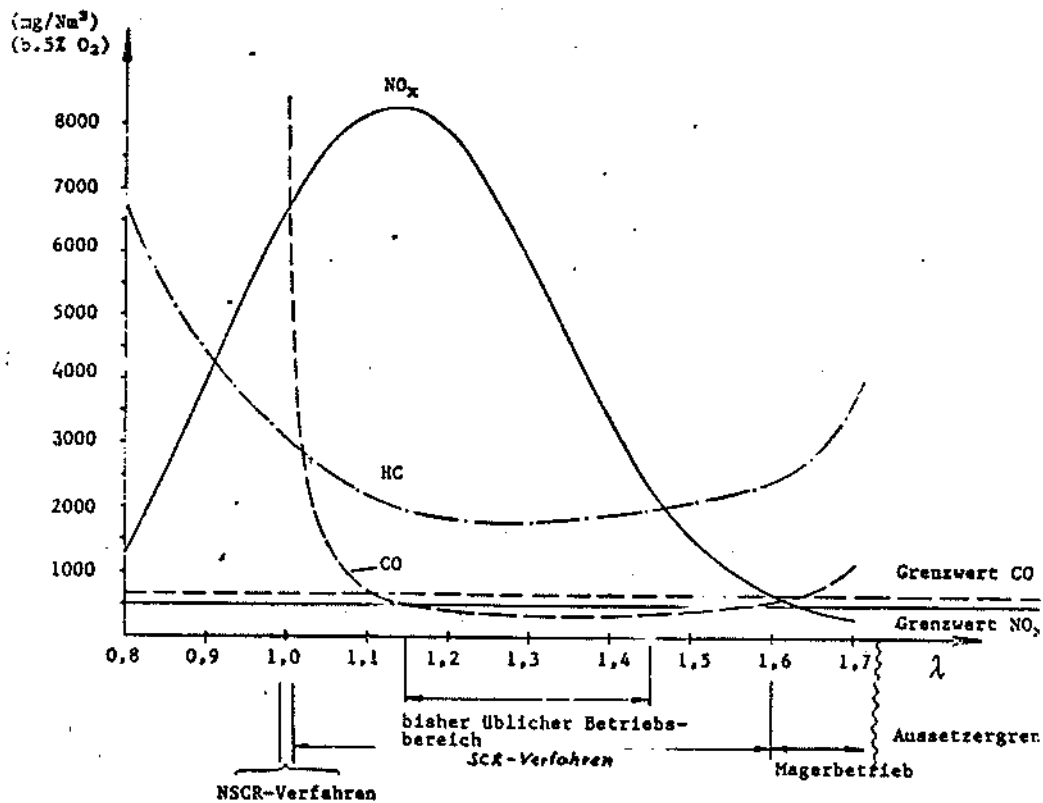


Fig 12 Avgasemissioner från 4-takts Otto-motorer vid olika luftöverskott

NO_x -halten i avgaserna har ett maximum vid ca 10-20 % luftöverskott ($\lambda = 1,1-1,2$) för att sedan bli lägre vid "mager" respektive "fet" luft/bränsleblandning. Normalt dimensioneras motorn för en luftfaktor mellan 1,2 och 1,4 vilket ger den maximala verkningsgraden. Om man väljer att bibehålla denna dimensioneringspunkt måste man räkna med en selektiv katalytisk rening för att NO_x -emissioner ska kunna bergränsas.

Om man däremot väljer en fet bränsleblandning (nära stökiometrisk förbränning) kan en selektiv katalysator användas.

Den tredje möjligheten är att låta motorn arbeta med en mycket mager bränsleblandning ($\lambda = 1,5-1,7$) vilket möjliggör låga NO_x -emissioner utan avgasrening. Därmed undviks stora investeringar. I gengäld får man betala i form av ökad bränsleförbrukning och försämrad verkningsgrad. Bränsleförbrukningen ökar med ca 5 % vid $\lambda = 1,65$ jämfört med optimum.

Dessutom finns en rad andra åtgärder att göra för att förbättra förbränningsprocessen ur NO_x -synpunkt:

1. Utformningar av förbränningsrummet optimeras så att ej extrema tryck- och temperaturförhållanden uppstår på olika punkter i förbränningsrummet.

2. Justering av tändsystemet, så att tändning sker något senare. I samband med "mager drift" bör även tändningseffekten förstärkas.

3. Förblandning av luft och naturgas.

4. Ökat laddningstryck och minskat avgasmottryck.

5. Avgasåterföring.

6. Vatteninsprutning.

Ett exempel hur man försöker minimera NO_x -bildningen i en gasmotor med primära åtgärder är den s k "Jenbach LEANOX Gasmotormotor". Med denna konstruktion klarar man TA-luft-normen för 4-taktsmotorer d v s mindre än 150 mg/MJ.

Genom att blanda bränslet med ett relativt stort luftöverskott sänks förbränningstemperaturen och därmed NO_x -bildningen. Den optimala luft/bränsleblandningen ligger mellan 1,6 och 1,7 där låg NO_x -halt kombineras med låga halter av oförbränt. För att uppnå detta förhållande måste följande kompletteringar av motorn göras.

1. Förbränningsrummet justeras så att en jämn temperaturfördelning uppnås.

2. Tändsystemet förstärks för att klara den magra bränsleblandningen.

3. "Blandningssträcka" för bränsle och luft tas till så lång så att en homogen blandning åstadkommes.

4. Utveckling av en lastberoende λ -styrning, som kan anpassas till olika typer av brängas, jmf styrschema i fig 13 nedan.

Fördelarna med detta system, jämfört med rökgasrening med katalysator, är bl a en lägre investeringskostnad och en säkrare drift, då man inte riskerar att utrustningen "åldras" med försämrad funktion som följd.

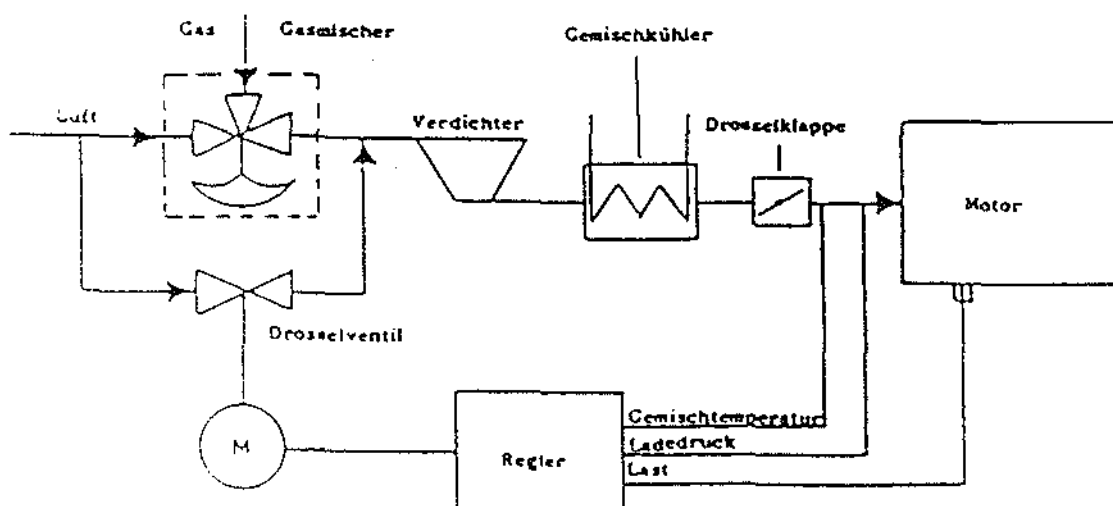


Fig 13

Jenbach Leanox
gasmotor -
reglerprincip

5.3

SEKUNDÄRA METODER

Trevägs-katalysatorn som också kallas NSCR (Non Selective Catalytic Reduction) fungerar enbart på fyrtakts Ottomotorer som arbetar utan luftöverskott. Det är samma rening som idag installeras i de flesta nya bilar. Namnet trevägskatalysator kommer av att den reducerar såväl NO_x som oförbränt (CO och kolväten). Reglering av luftbränsleblandningen inom det optimala området $\lambda = 0,986 - 0,990$ ställer stora krav på reglerutrustningen.

Vid optimal drift blir reningseffekten för NO_x nära 100 %. Vissa motorleverantörer garanterar att NO_x -halter på 50 mg/MJ ej överskrids.

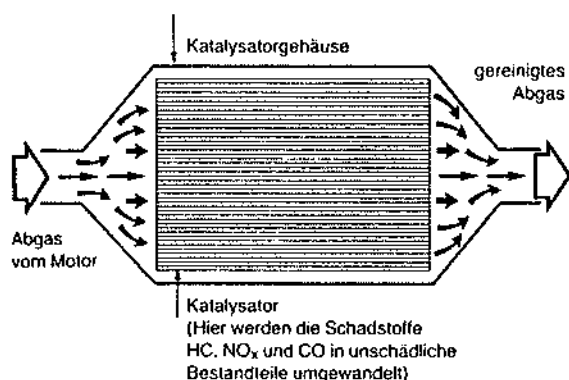
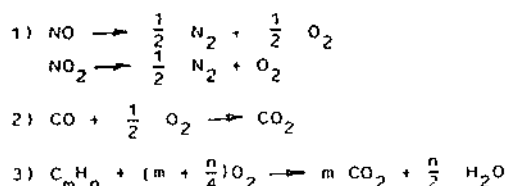


Abb. 2: Dreiwegkatalysator

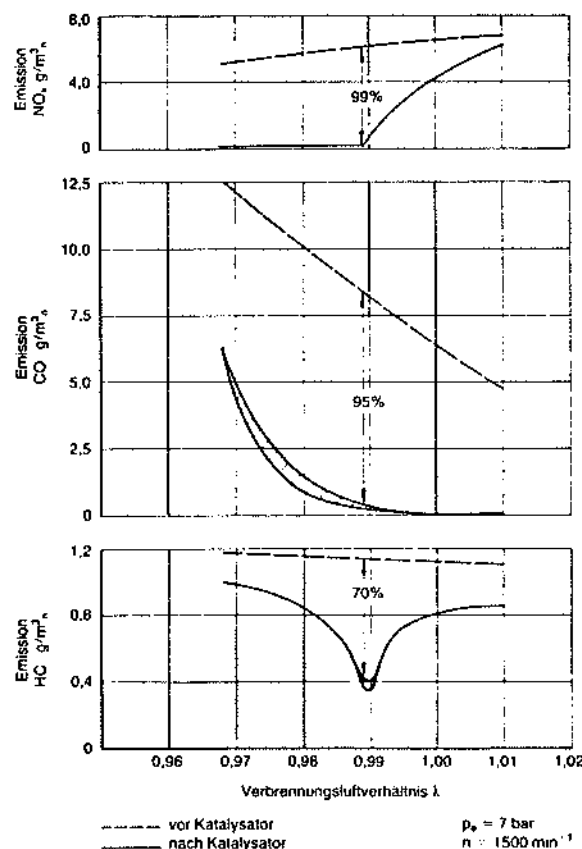


Abb. 3: Schadstoffanteile vor und nach Katalysator

Fig 14 Reningseffekt av en icke selektiv trevägskatalysator (NSCR).

För gasmotorer som arbetar med luftöverskott (såväl 2- som 4-taktsmotorer) är man hänvisad till s k selektiv katalytisk reduktion (SCR) med ammoniak. Denna teknik reducerar NO_x till kvävgas och vatten.

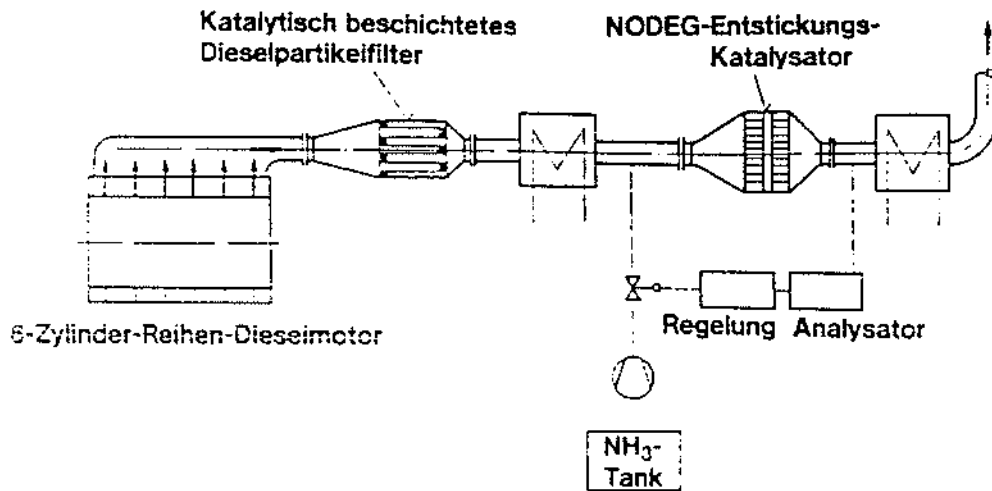


Fig 15 Selektiv katalytisk rening med ammoniak (SCR)

Reaktionen förutsätter att avgastemperaturen hålls låg. Optimal temperatur är ca 350 - 420 °C. Därför har man normalt en rökgaskylare före katalysatorbatteriet. Om det finns användning för lågtemperaturvärme, kylv rökgasen ytterligare efter katalysatorn. Om reningsanläggningen ska fungera väl vid olika belastning, erfordras dessutom en doseringsutrustning för ammoniak som styrs via en kontinuerlig mätning av NO_x -halten i rökgasen efter rening. Metoden, som är under utveckling, kan förväntas ge en NO_x -reduktion på ca 80-95 %, jmf fig 16.

Trots att såväl investerings- som driftkostnader är betydande för ovan nämnda system anger svenska motortillverkare att inte mer än ca 10 % av total elproduktionskostnad eller ca 2,5 öre/kWh är att hänföra till reningsutrustningen, trots att man räknar med en högeffektiv rening från ca 2500 till 60 mg/MJ.

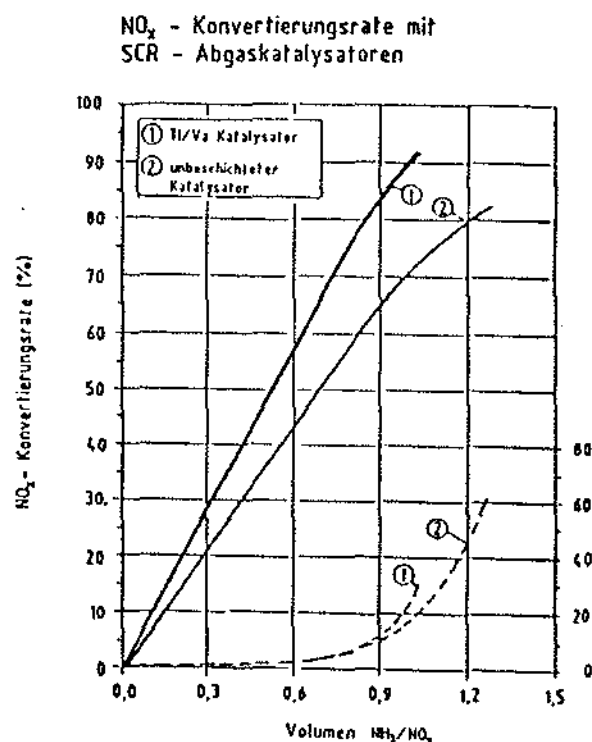
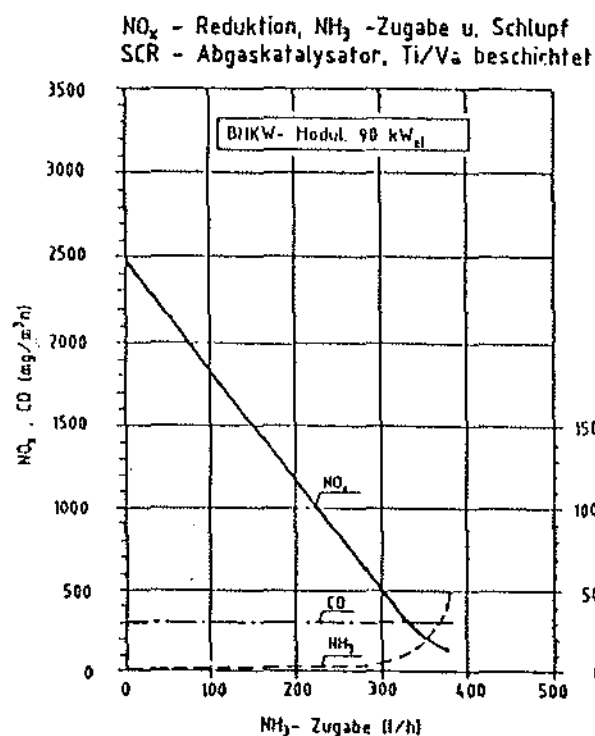


Fig 16 NO_x-reduktion med selektiv katalytisk rening (SCR).

5.4 SAMMANFATTNING - 4-TAKTSMOTORER

Sammanfattningsvis låter vi nedanstående figur 17 visa tillämpbarheten av de olika låg-NO_x-metoderna på 4-takts Otto-motorer.

Som synes ger magerkonceptet tillräckligt låga NO_x-halter för att klara TA-luft. Dock är man begränsad till motorer under 1 MW.

Verkningsgraden blir något lägre för "mager-motorer" och NCSR än för SCR vilket å andra sidan vägs upp av höga investerings- och driftkostnader vid SCR.

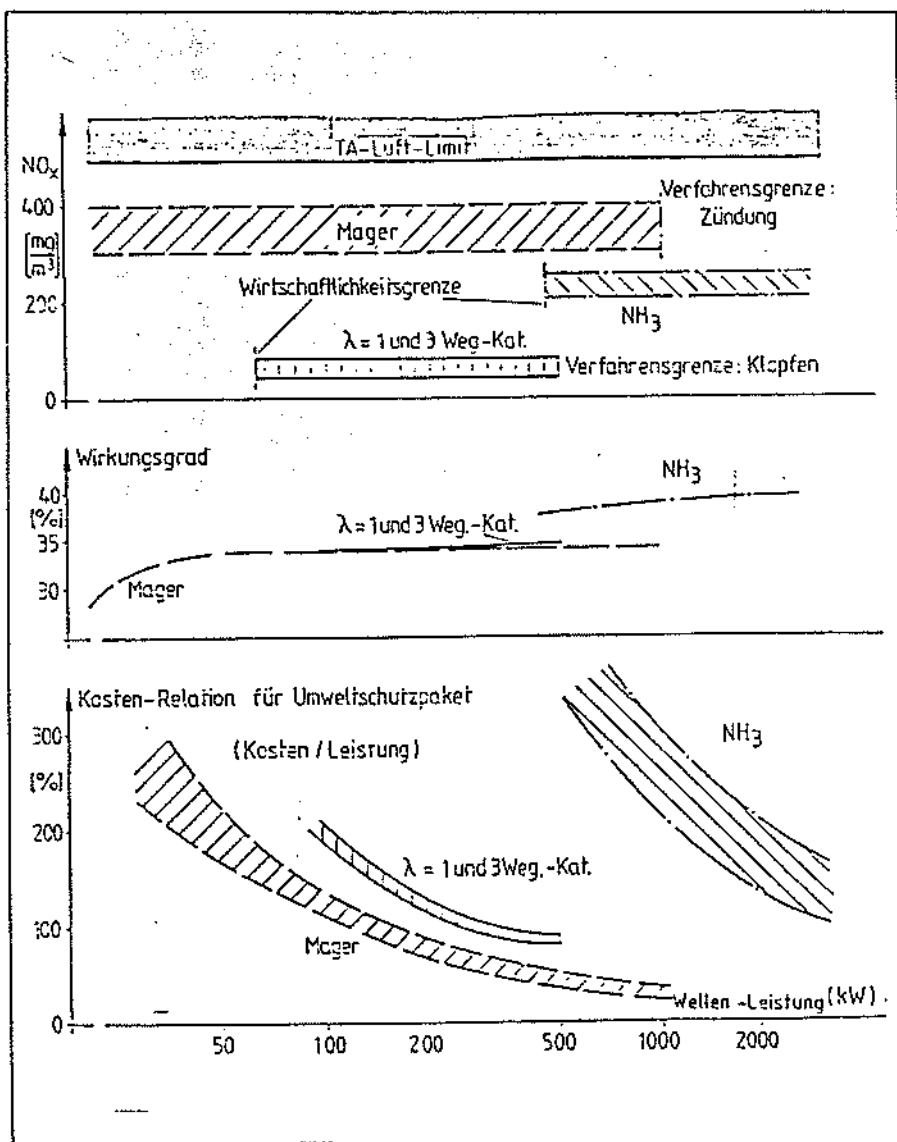


Fig 17 Jämförelse av NO_x-reduktion, verkningsgrad och kostnad vid olika låg-NO_x-metoder för 4-takts Ottomotorer.

6. STRÄLNINGSBRÄNNARE

6.1 ALLMÄNT

Strålningsbrännare av olika slag är ett exempel på hur man med låga förbränningstemperaturer (normalt 700 - 1 000°C) får en låg NO_x-bildning som resultat.

Grundprincipen är att gas och luft förblandas i en blandningskammare och förs genom ett poröst eller perforerat temperaturbeständigt material, vanligen en keram, på vars yta förbränningen sker. Genom att ytan är relativt stor och en stor del av energimängden (40 - 50 %) avges via strålning kan förbränningstemperaturen hållas låg.

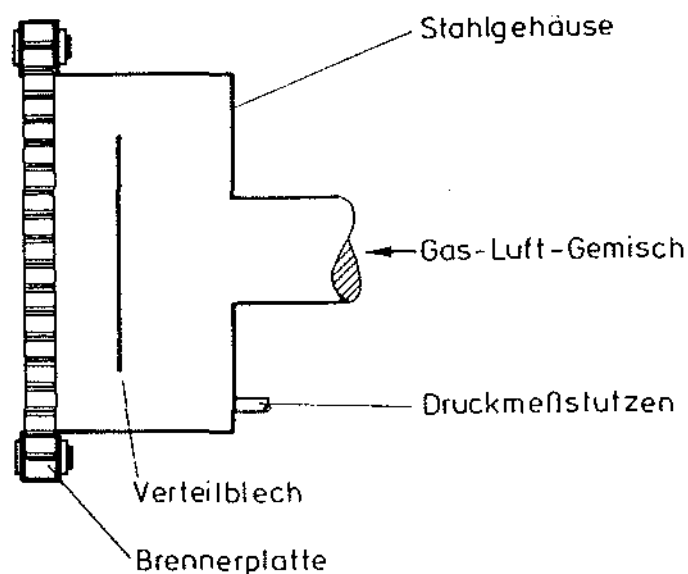


Fig 18 Strålningsbrännare med förblandning av gas och luft

6.2 KATALYTISKA STRÄLNINGSBRÄNNARE

Beläggs brännaren med en katalysator kan förbränning av bränsle/luftblandningar ske vid så låg temperatur som 300 - 400°C. Ett sådant exempel är den s k termoreaktorn, som tillverkas av det franska företaget ACIR. Funktionsprincipen framgår av fig 19.

Primärluft och gas förblandas i brännaren och passerar i en homogen blandning genom den porösa keramiska plattan på vars yta förbränningen sker. I detta fall är ytan belagd med en katalysator som möjliggör förbränning vid låg temperatur. Genom att via en fläkt tillföra omgivande luft till brännaren kan eventuella föroreningar i luften som t ex lösningsmedel förbrännas.

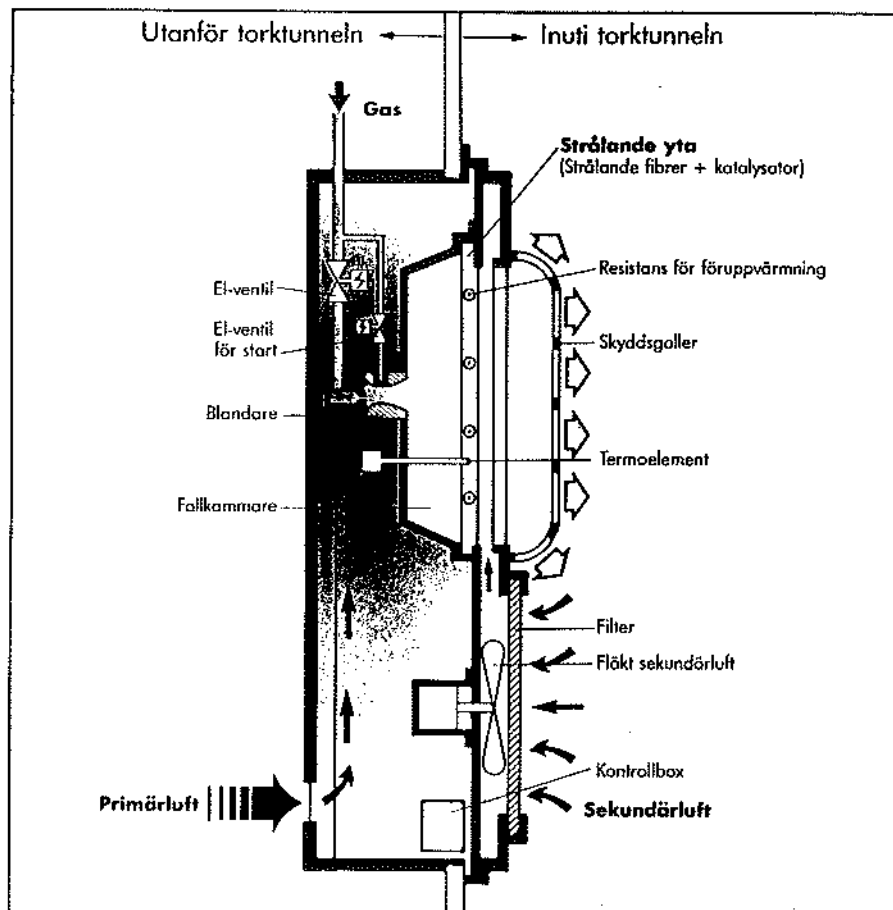


Fig 19 Termoreaktorn en katalytisk strålningsbrännare

Termoreaktorn har använts utomlands sedan länge, i första hand för lacktorkning. Som en följd av den låga förbränningstemperaturen bildas normalt endast försumbara mängder av NO_x . Dock bör man vara noga med att ha en homogen förbränning hela brännarytan så att inte höga temperaturer med NO_x -bildning som följd uppstår punktvis på brännaren. Detta gäller generellt för att strålningsbrännare.

6.3 CYLINDRISKA STRÅLNINGSBRÄNNARE

En typ av strålningsbrännare som utvecklats för att installeras i pannor och ugnar är den cylindriska brännaren, vars uppbyggnad framgår av fig 20.

Det som skiljer denna brännare från andra strålningsbrännare är i första hand den cylindriska formen vilken möjliggör värmeavgivning runtom. Den är därför lämplig att installeras i cylindriska förbränningsrum t ex i en eldrörspanna. Dessa pannor tar normalt upp en ganska stor del av värmen i form av strålning vilket passar väl i detta fall.

Alzeta Corporation i Kalifornien marknadsför en brännare av denna typ vars mantelyta består av "aluminiumsilica" - fibrer - ett keramiskt material.

Nedan angivna data refererar till denna brännare.

I Europa pågår dessutom utveckling av en liknande brännare som är baserad på en metall-fibermantel som har en bättre hållfasthet och därmed kan göras tunnare. Denna är ännu ej kommersiellt tillgänglig.

Tekniska data - Alzeta-brännaren

Förbränningstemp på brännarytan 900-1100°C

Värmeavgivning ca 60 % strålning
40 % konvektiv

Kapacitet ca 300 kW/m² mantelyta

Effektstorlekar 5 kW - 2,2 MW

Försök med Alzeta-brännaren visar på mycket "goda NO_x-egenskaper". I tabellen i fig 2 redovisas mätvärden i området 10-40 mg/MJ. Dessutom kan halten av oförbränt hållas låg trots att luftöverskottet minskas och därmed verkningsgraden ökas. Såväl Alzeta-brännaren och dess europeiska motsvarighet har dragits med stora utvecklingsproblem. Det har helt enkelt varit svårt att tillverka en cylindrisk brännare med tillräckligt god hållfasthet. För större brännare är dessa problem ännu ej lösta trots att stora utvecklingsresurser satsats. Man räknar dock med att ha kommersiellt och kvalitetsmässigt konkurrenskraftiga brännare framme under början av 90-talet.

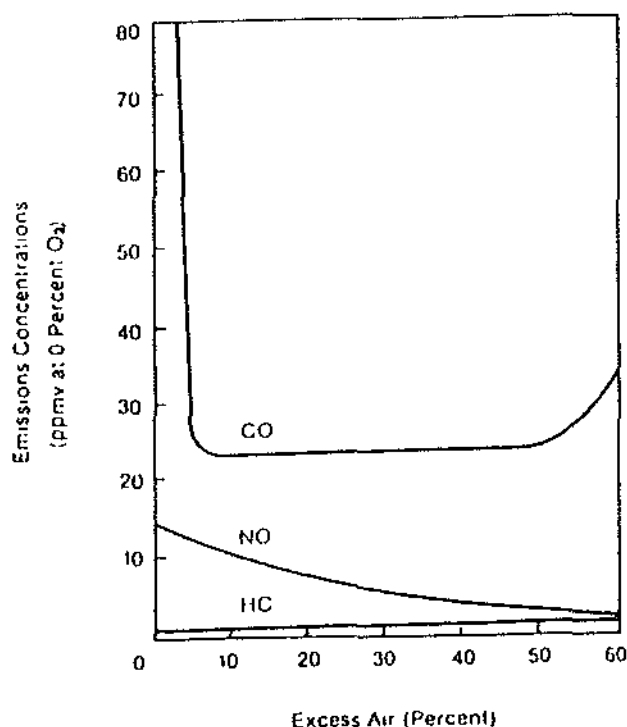
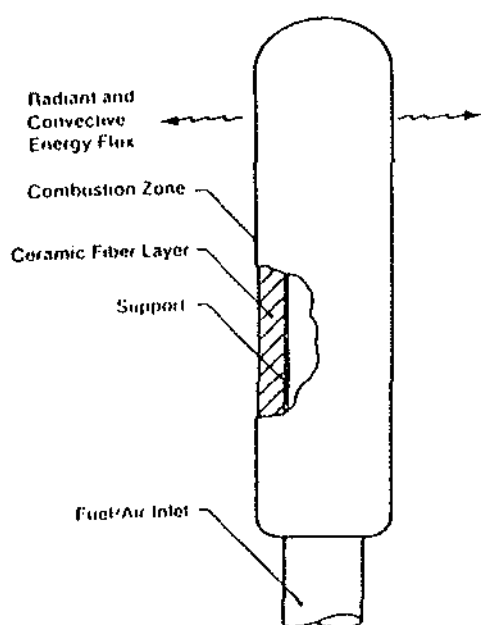


Fig 20 Alzeta Pyrocore-brännaren. Uppbyggnad och emissioner

Site	Boiler Size (kW)	Burner Type	Excess Air (%)	CO (ppm)	NO (ppm)	HC (ppm)	Boiler Eff. (%)	Hours of Operation
Alzeta Laboratory	245	Conventional	16	11	57	0	82.8	NA
		Fiber	10	10	10	10	83.3	500**
York-Shipley Boiler Test Bay	588	Conventional	15	10	--	--	85.0	NA
		Fiber	10	10	--	--	85.8	1,000
Vandenberg AFB California	392	Conventional	55	240	--	--	81.0	NA
		Fiber	10	0	--	--	82.3	850
Peter Paul Cadbury York, PA	588	Conventional	20	400	--	--	83.2	NA
		Fiber	7	35	20	--	83.2	3,450
Hall Chemical Company Wickliffe, OH	980 Ohio Special	Conventional	7	1,000	80	--	82.7	NA
		Fiber	13	35	18	--	83.7	4,000

*All results at high fire conditions, emissions corrected to 0% O₂
 **On segmented burner

Fig 21 Driftresultat från Alzeta-brännare installerade i cylindriska pannor.

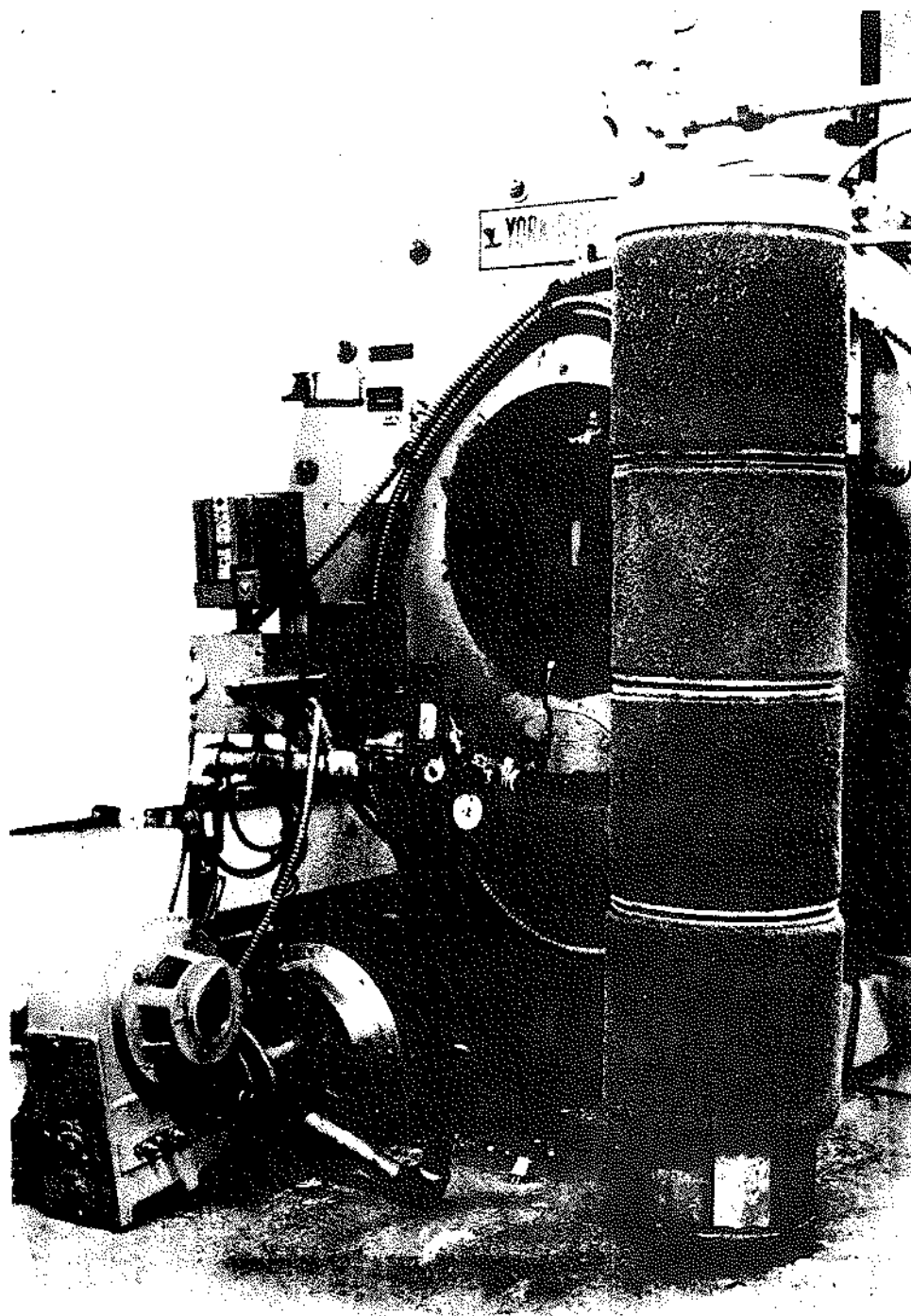


Fig 22 4-segments Alzeta pyrocore-brännare

7. DIREKTORKNING MED LÅG- NO_x -BRÄNNARE

I vissa tillämpningar ställs extrema krav på låga kväveoxidhalter med hänsyn till produktkvalitet.

Ett sådant exempel är direktorkning av foder och livsmedel med varma och torra avgaser från en naturgasbrännare. Om NO_x -halten i avgasen kan hållas på mycket låg nivå förhindras bl a bildning av aromatiska kolväten och nitrosaminer.

För detta ändamål finns idag framme några olika låg- NO_x -brännare med ungefär samma konstruktionsprincip. Två av dem är västtyska SINOX I och den engelska Urquhart-brännaren. Principen förklaras enklast utifrån nedanstående principschema för SINOX I figur 23.

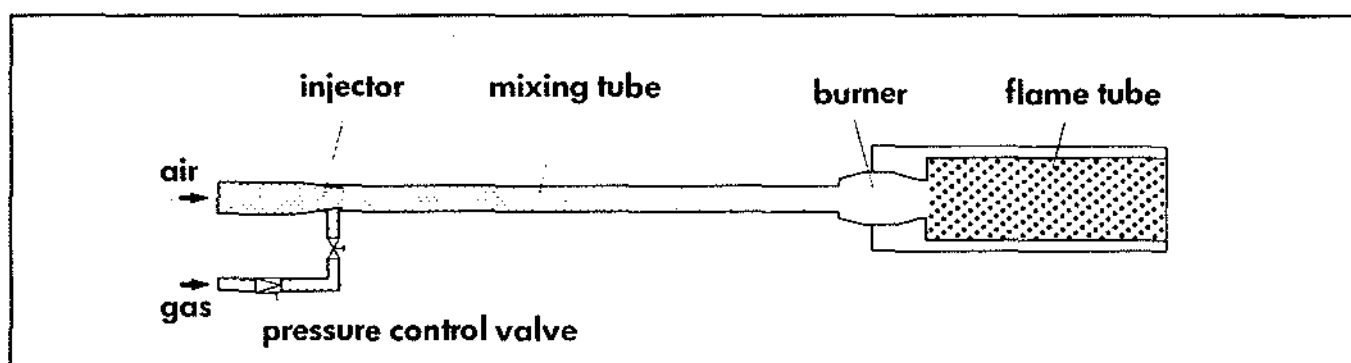


Fig 23 SINOX-I låg- NO_x -brännare

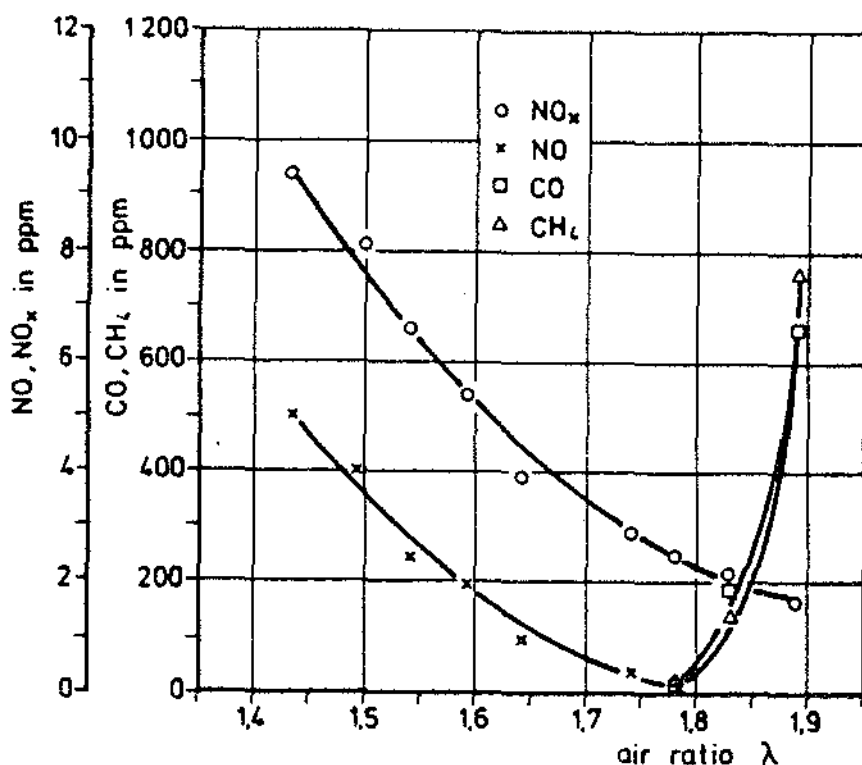


Fig 24 Emissioner från en SINOX-I-brännare vid olika luftöver-skott

NO -, NO_x - concentration in combustion air
 $\text{NO} = 0.2 \text{ ppm}$ $\text{NO}_x = 0.25 \text{ ppm}$
 fuel gas : low-BTU natural gas

1. Gas och luft förblandas i en injektor. Luftmängden anpassas till gasflödet så att ett stort luftöverskott erhålls, $\lambda = 1,6 - 1,8$ är normalt, d v s 60 - 80 % luftöverskott. Vid högre luftinblandning blir flammen instabil och bildning av koloxid och oförbränt ökar dramatiskt. Jmf fig 24.

2. Det är viktigt att den därpå följande blandningszonen har en sådan utformning och storlek att gas/luftblandningen hinner bli homogen.

3. Förbränningen sker slutligen i en förbränningszon i form av ett flammrör.

I fig 25 visas Urquhart's CXA-brännare som bygger på samma princip men som har en något annorlunda konstruktion.

Brännarens dimensioner blir ansevärliga. Som exempel kan nämnas att en 2 MW-brännare blir 6 resp 4 m lång med ovanstående fabrikat av brännare.

Brännarna genererar en avgas som har en temperatur av 1000 - 1300°C och mycket små halter av NO_x och oförbränt. Vid fälttest har ovannämnda brännare gett NO_x -halter i storleksordningen 1-2 mg/MJ. Då är väl att märka att bakgrundshalten i primärluften ofta ligger i samma storleksordning, särskilt i stadsmiljö och i närheten av trafikleder.

I Dalby och Helsingborg har Lantmännen installerat gasbrännare av typ LOI SINOX för direkttorkning av spannmål. Erfarenheterna är följande:

- Investeringskostnaden för en brännare på ca 2 MW var ca 350 000 kr jämfört med en konventionell brännare i samma storlek som kostar ca 50 000 kr. Å andra sidan blir totala anläggningskostnaden för en direkttork klart lägre än vid indirekt torkning.
- NO_x -halten i rökgasen uppmättes till ca 2 ppm och i torkluften till ca 0,1-0,2 ppm. Omgivningsluftens halt var 0,02.
- Någon signifikant ökning av PAM innehållet kunde ej påvisas.

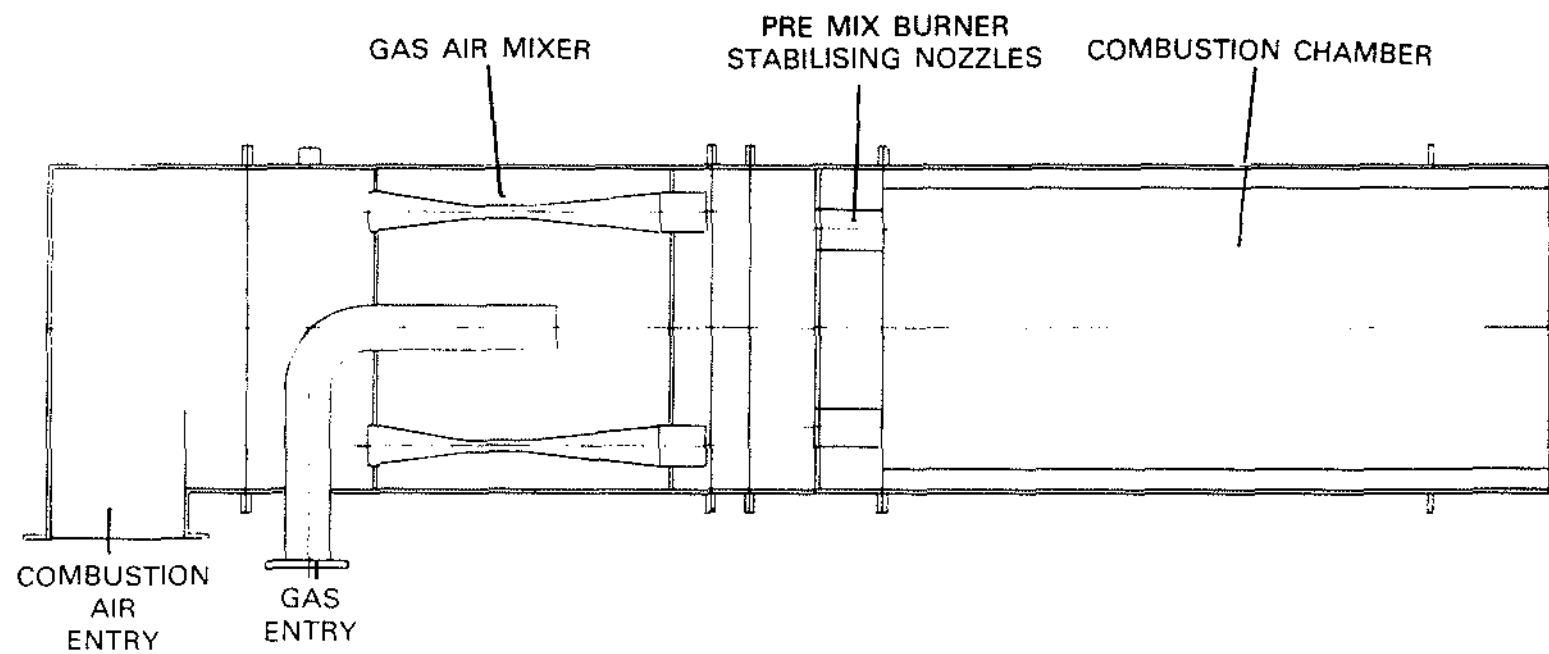


Fig 25 Urquhart CXA låg- NO_x -brännare

8. INDUSTRIELLA PROCESSER

8.1 ALLMÄN ÖVERSIKT

Energianvändningen inom industrin kan delas upp i två typer, dels ång- och hetvattenproduktion, dels direktanvändning i processerna. Ång- och hetvattenproduktion behandlas generellt i avsnitt 3. Direktanvändningen i industriprocesser är däremot svår att diskutera generellt ur NO_x -synpunkt då temperaturnivåer och sättet på vilket energi tillförs skiftar mycket från process till process. Därmed varierar NO_x -emissionerna kraftigt mellan olika industriprocesser.

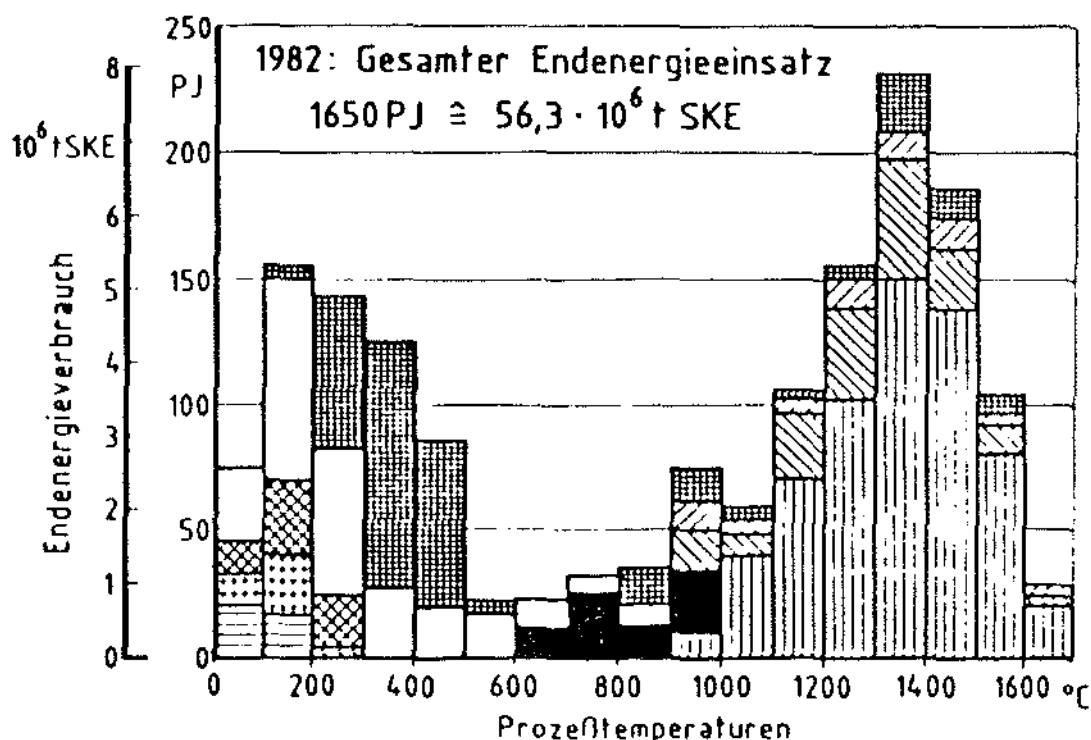


Fig 26 Industriell processenergianvändning i Västtyskland 1983.

I fig 26 ovan visas en sammanställning av energiförbrukningen fördelad på olika branscher och processtemperaturer i Västtyskland. Som synes är temperaturnivåerna som redovisas för textil-, socker- och pappersindustrin mycket måttliga (0-300°). Det gäller i första hand torkningsprocesser av olika slag där naturgas med fördel kan användas med mycket låga NO_x -emissioner som resultat, jmf ovan beskrivna strålningsbrännare och direkttorkningsbrännare.

Inom lätmetallindustrin anges temperaturnivåer mellan 600 och 1000°C vilket i första hand avser olika typer värme-, behandlings- och ugnprocesser. Det är möjligt att med lämplig utformning av dessa processer hålla NO_x-emissionerna låga.

Inom kemiindustrin finns ett brett spektrum av olika processer både låg- och högttemperatur, dock med tonvikt på lågttemperatur. Sakerligen kan man nå stor framgång med primära åtgärder för att minska NO_x-utsläppen även om vissa anläggningar kräver sekundär rening.

De industrigrenar som har mest högttemperaturprocesser är enligt diagrammet järn- och stål-, jord- och sten- samt glas- och keramik-industri. Speciellt glasframställningsprocessen har hamnat i fokus både i Sverige och utomlands vad gäller NO_x-emissioner.

I nedanstående tabell sammanställs olika industriprocesser med hänsyn till temperaturnivå och industribransch.

Process	Temp (°C)	Industribransch
Tvättning, sköljning	20-80	Läder, textil
Värmning (t ex destillation, pastörisering m m)	60-120	Livsmedel
Kokning	70-150	Livsmedel, papper
Torkning	60-500	Livsmedel, papper läder, keramik m m
Värmebehandling/härdning	130-1200	Stål, metall, keramik
Bränning	800-1500	Keramik
Smide, valsning	600-1300	Metall och stål
Smältning	40-1600	Metall, glas

8.2 NO_x-REDUCERANDE ÅTGÄRDER

Vad kan man då göra för att minska NO_x-utsläppen från industriprocesser? En grundregel är att begränsa övertemperaturer i processen i största möjliga utsträckning. D v s man skall med så liten marginal som möjligt överskrida den för den aktuella processen nödvändiga temperaturnivåerna. I många fall är dagens anläggningar konstruerade och dimensionerade så att temperaturen i den värmande flammen eller rökgasen är mycket hög. Detta för att minimera kostnader för värmeöverföringsytor m m. Ombyggnad till låg-NO_x-utförande kan vara mycket kostsamt eller rent av omöjligt. Däremot kan man säkerligen i samband med nybyggnation eller konstruktion hitta betydligt NO_x-effektiva lösningar.

En annan viktig NO_x -begränsande åtgärd är att minska luftförvärmningstemperaturerna. Betydelsen av luftförvärmningar framgår av nedanstående diagram (fig 27). I detta avseende motverkas NO_x -begränsning direkt av energieffektivisering och energibesparing.

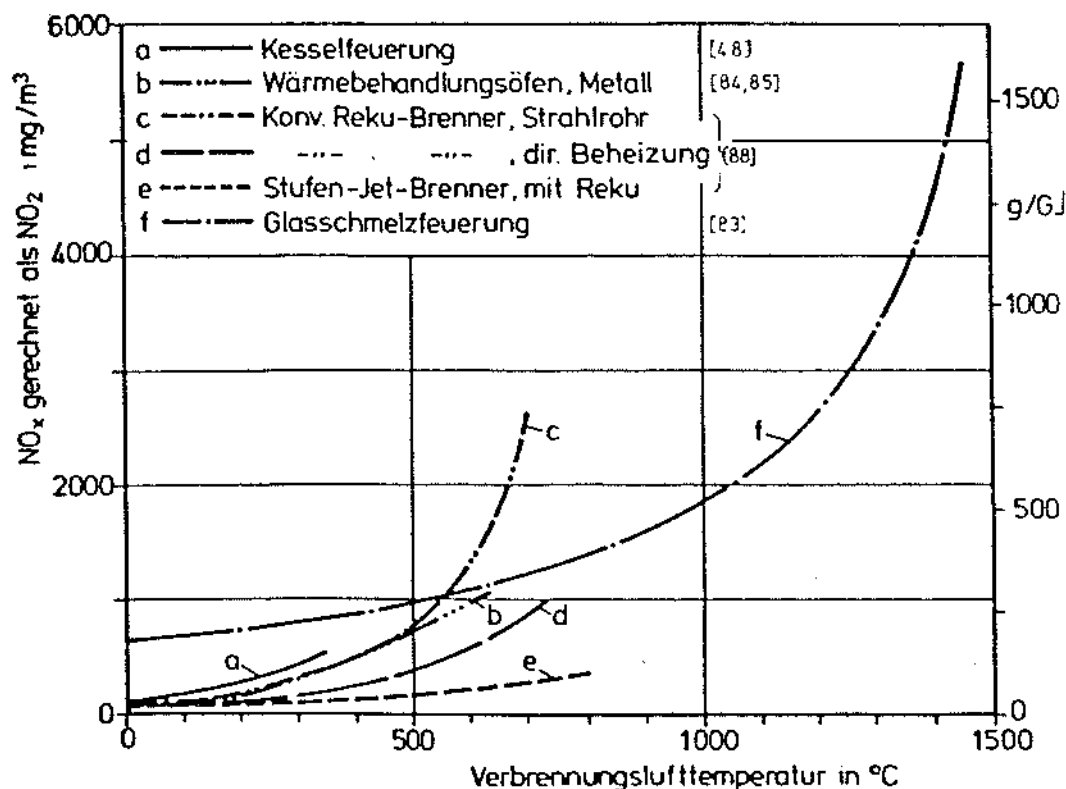


Fig 27 Luftförvärmningens inverkan på NO_x -emissionerna vid industriella processer.

Andra NO_x -reducerande åtgärder som kan vara tillämpliga även inom industriprocesser är t ex:

- direkttorkning med förblandade låg- NO_x -brännare
- stegvis förbränning med rökgasrecirkulation
- rökgasrening med sekundära metoder, katalytiska eller icke-katalytiska

Det senare kan bli en nödvändighet på befintliga anläggningar där primära åtgärder är omöjliga eller mycket kostsamma att genomföra. Nedanstående diagram ger exempel på olika åtgärders reduktionspotential.

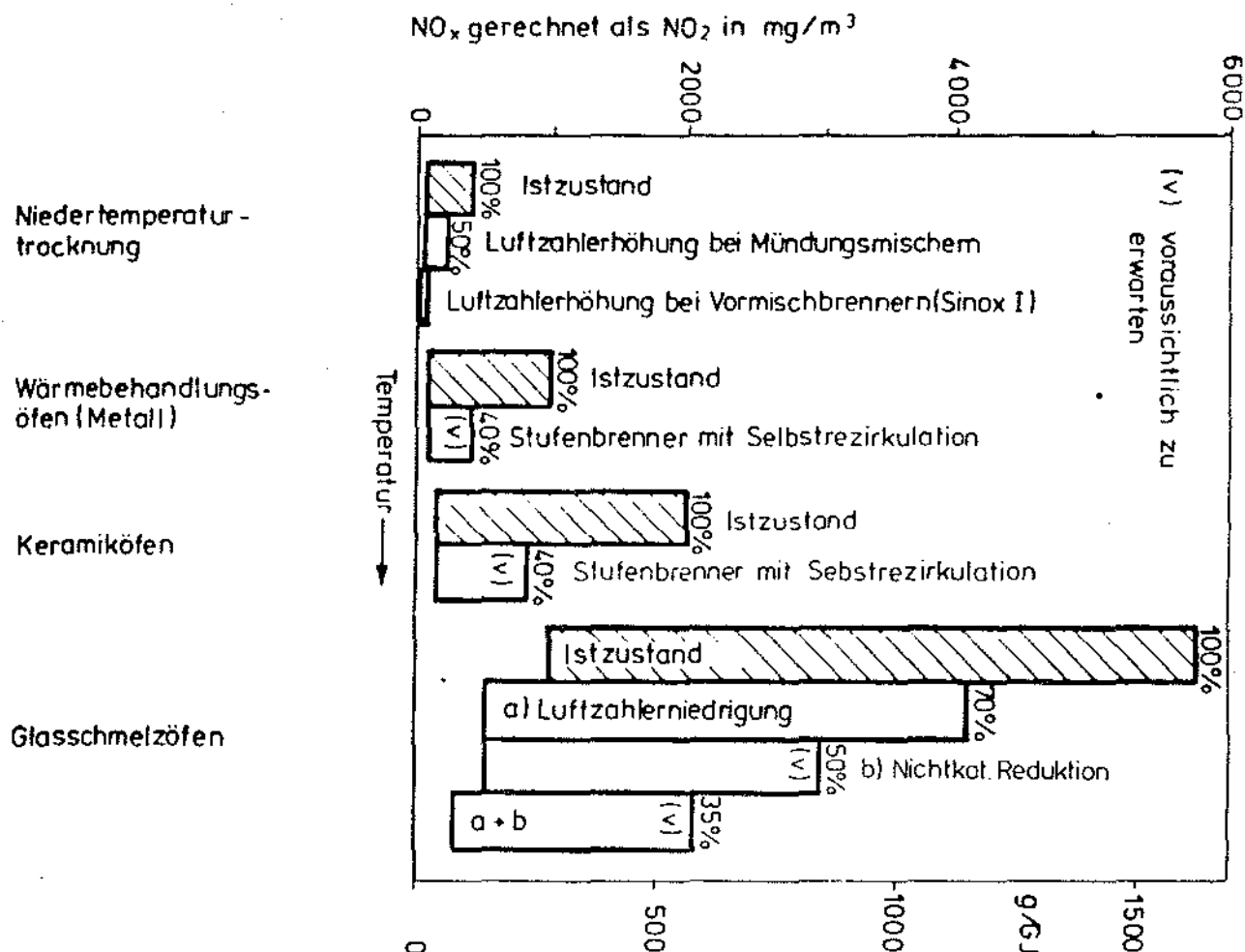


Fig 28 Nuläge och möjlig reducering av emissioner för några industri-processer.

8.3 GLASSMÄLTNING

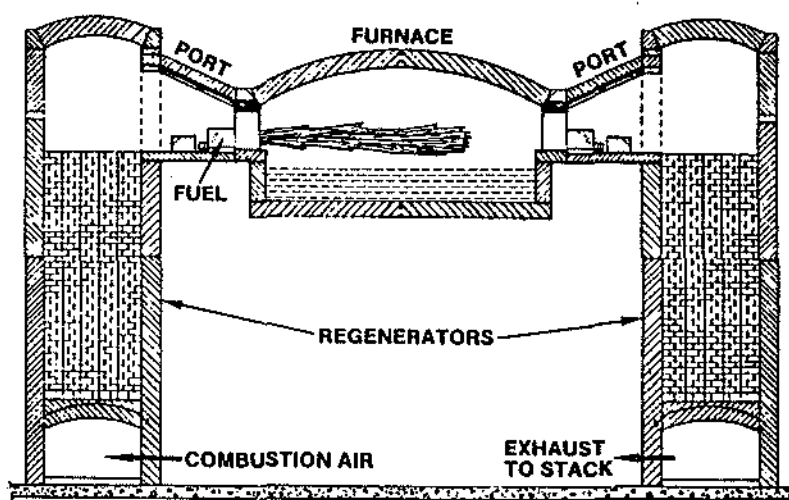
Som ett konkret exempel väljer vi glassmältningsprocessen. Principen för en konventionell glassmältningsprocess framgår av fig 29. Via regenerativa brännare tillförs välförvärmad förbränningsluft som tillsammans med bränslet, vilket ofta är naturgas, förbränns i flamma ovanför glassmältan. Värmeöverföring via strålning dominerar. Utgående rökgaser avser konvektiv värme till den regenerativa brännaren. Denna teknik resulterar ofta i NO_x-emissioner i storleksordningen 1000 mg/MJ. Stora resurser satsas inte minst i USA för att reducera NO_x-bildningen vid denna process.

Följande resultat har konstaterats:

- Minskad gas/luftblandning orsakar lång lysande låga, förbättrar strålningsöverföring och sänker flamtemperaturen och minskar därmed NO_x-bildningen.

- Minskad luftförvärmning minskar NO_x -bildning men ökar energikostnaden
- Minskat luftöverskott minskar NO_x -bildning och ökar energieffektiviteten
- Rökgasrecirkulation ger begränsat resultat
- Stegvis förbränning ger bra NO_x -reduktion i vissa ugnar

Arbetet pågår i Kalifornien med fullskaleförsök. Målsättningen är att komma ned i NO_x -emissioner på ca 500 mg/MJ. Vill man komma längre är man hänvisad till helt nya typer av processer (se avsnitt 8.2 del A) eller sekundär rökgasrening.



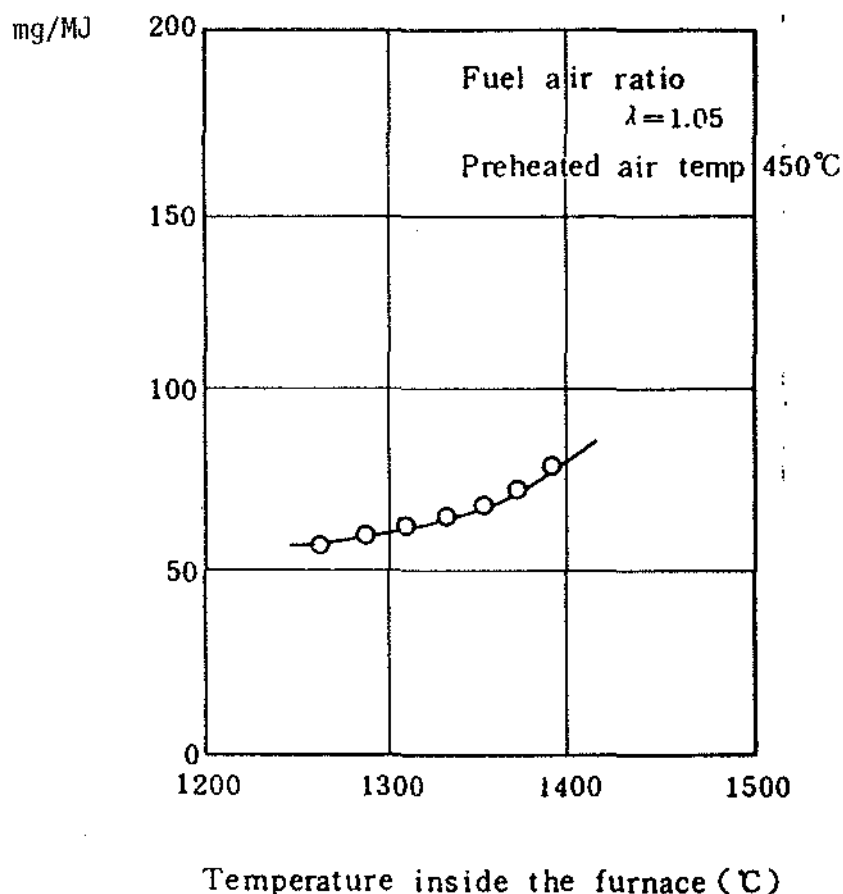


Fig 30 NO_x-emissioner från ugn eldad med lysande naturgasflamma

9. HUSHÅLLSAPPARATER OCH PANNOR I SMÅ EFFEKTER

9.1 ALLMÄNT

För hushållsapparater och pannor i små effekter ligger normalt inte på lika höga NO_x-emissioner som större pannanläggningar och industriinstallationer. Det är ändå viktigt att vara uppmärksam på utsläppen från dessa installationer ur hälsosynpunkt eftersom man ofta av praktiska skäl släpper rökgaserna i eller i närheten där människor vistas. Det är också så att dessa typer av installationer produceras i stort antal (långa serier) och med stor kostnadspress varför många av de åtgärder som föreslagits för större installationer ej är genomförbara i denna skala.

Av ovan nämnda skäl skall ges nedan några exempel på modifieringar i kända utrustningar och helt nya typer av apparater som ger lägre NO_x-emissioner än vad som idag är normalt. I nedanstående tabell redovisas NO_x-emissioner som idag anses normala för några vanliga typer av installationer.

<u>Atmosfärbrännare</u>	NO _x -emission (mg/MJ)
Gasspis	35
Lokalvärmare	60
Genomströmningsvärmare	70
Förrådsberedare	55
IR-strålare	10
<u>Fläktbrännare</u>	
Värmepanna	40

9.2 ATMOSFÄRBRÄNNARE

Atmosfärbrännaren är den vanligaste och mest beprövade typen av brännare i de flesta spisar, vatten och lokalvärmare samt pannor med låg effekt. Främsta orsaken är att det är en billig och driftsäker konstruktion utan rörliga delar. Som framgår av tabellen ovan bildas en del NO_x i denna typ av brännare. Detta beror på att det bildas "heta zoner" i flammen, vilket i sin tur kan bero på dålig inblandning av primärluft i gasen samt dålig kylning av lågan.

Det finns olika vägar att gå för att minska utsläppen. Antingen åtgärdas den befintliga brännaren eller också byter man typ av brännare. Nedan beskrivs några åtgärder som kan göras eller nya atmosfärbrännare som kan utnyttjas.

Brännarinsatser

Genom att montera en insats av stål eller keramiskt material i själva flamzonen (se fig 31) kan NO_x-bildningen minskas med 30-35 %. Brännarinsatserna kan monteras på befintliga brännare. Metoden utvecklades i USA och tillverkas idag kommersiellt också i Västtyskland. Dett uppges bl a från pann-tillverkaren Viessman i Västtyskland att alla deras värmepannor för hushållsbruk nu förses med brännarinsatserna. Insatserna sägs vara mycket billiga ("några få DM per kW brännareffekt").

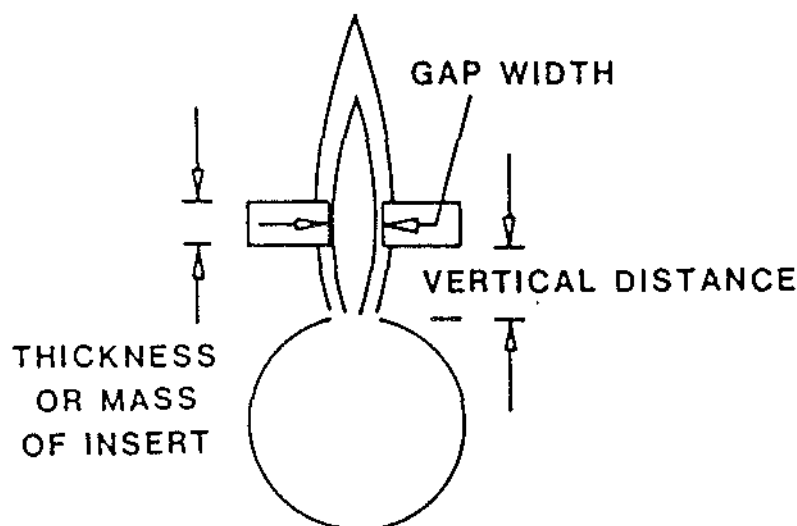


Fig 31 Brännarinsats principutförande

Effekt reglering

Av erfarenhet vet man att de flesta värmeinstallationer är kraftigt överdimensionerade samtidigt som "till/från-reglering" är det enda som står till buds. Vid full effekt ger de flesta atmosfärbrännare mer NO_x än vid dellast. Genom att införa finare reglering kommer brännaren att gå vid dellast större delen av tiden och därmed producera mindre NO_x . Minskningen kan bli upp mot 30 - 35 % allt beroende på förutsättningarna. För hushållsapparater och små pannor kan kostnaden dock vara svår att försvara.

Termomaxbrännaren

Termomaxbrännaren är en ny typ av atmosfärisk brännare som utvecklats av Ruhrgas för olika applikationer, i första hand spisar och värmepannor. Den goda förblandningen med all förbränningsluft, 10-50 % luftöverskott, undvikes lokala temperaturtoppar i flaman. NO_x -bildningen kan sänkas med upp till 90 % jämfört med en normal atmosfärbrännare. I figur 32 jämförs funktionsprincipen för termomaxbrännaren med konventionella atmosfärs- och fläktbrännare.

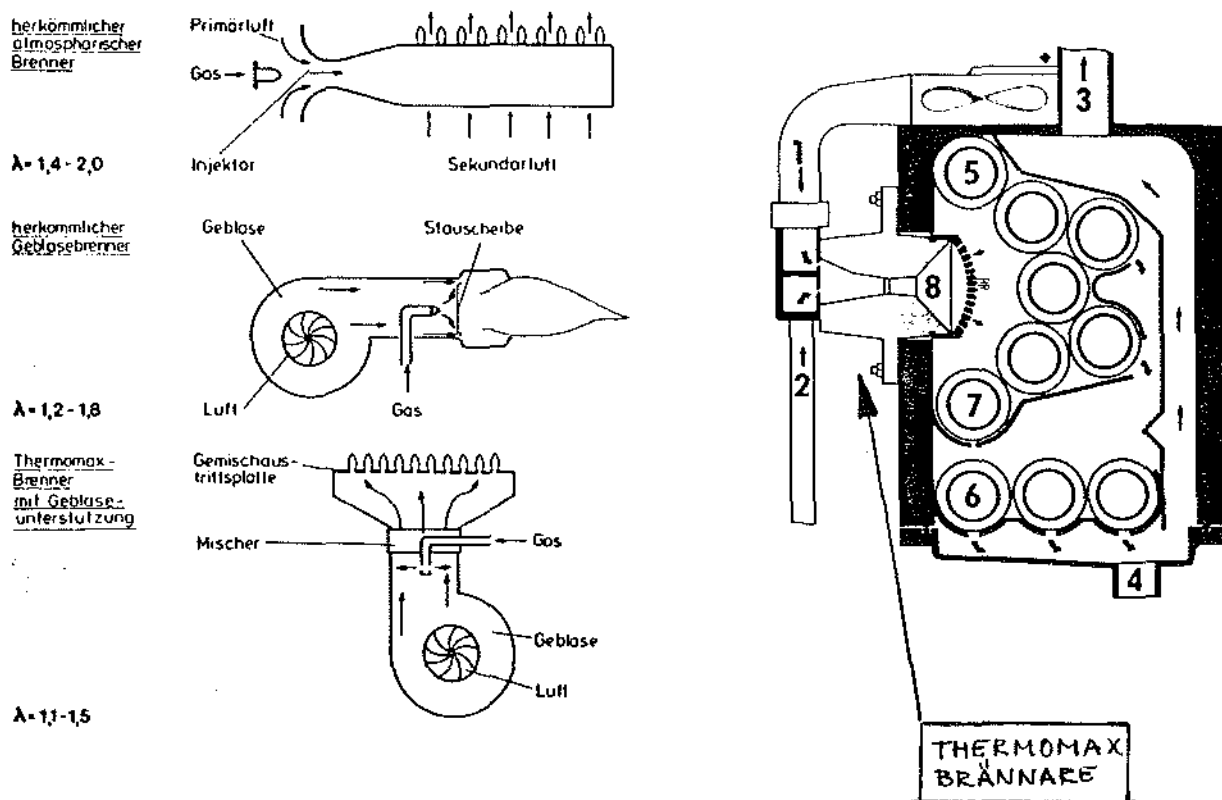


Fig 32 Atmosfärs-, fläkt respektive Thermomaxbrännare.

Strålningsvärmare

Är en typ av atmosfärbrännare som utbredda förbränning och effektiva värmeavgivning ger låga NO_x -halter såväl vid direktvärmning av lokaler som i pannapplikationer. Jmf avsnitt 6. Ca 90 % lägre NO_x -halter kan uppnås.

Katalytiska brännare

Katalytisk förbränning kan ske vid än lägre temperatur och följaktligen minskas NO_x -bildningen ytterligare. Det finns idag ett fåtal applikationer på marknaden, jmf avsnitt 6.

Utvecklingsarbete pågår emellertid och under 1990-talet kan man vänta sig ett genombrott för denna teknik.

NO_x -reduktionen kan förväntas bli ca 95 % jämfört med nuvarande atmosfärbrännare.

9.3 FLÄKTBRÄNNARE

Små fläktbrännare för t ex villapannor ger normalt avsevärt lägre NO_x -halter än motsvarande atmosfärbrännare (30-40 % lägre). Trots detta finns en potential att ytterligare sänka NO_x -emissionerna från småfläktbrännare med upp till 50 %. De åtgärder som kan komma i fråga är i stort sett samma som för "stora" brännare, d v s rökgasrecirkulation (extern och intern), förblandning av gas/luft och stegvis förbränning.

Ett exempel på en låg- NO_x -brännare är den s k SINOX II-brännaren vars principfunktion framgår av fig 33.

I denna brännare som kombinerar extern rökgasrecirkulation och förblandning av luft/bränsle räknar man med NO_x -emissioner som är klart under 10 mg/MJ.

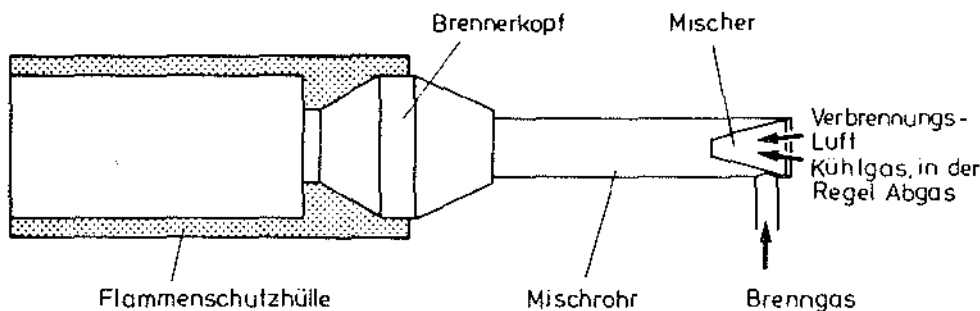


Fig 33 SINOX-II låg- NO_x -brännare för små pannor

En helt annan princip ligger bakom den s k pulsbrännare vars arbetssätt varit känd sedan länge men som först under 1980-talet fått någon större kommersiell användning. Hydrotherm i Västtyskland tillverkar och marknadsför en pulsbrännarpanna, Hydropuls, för villauppvärmning. Även i USA finns pulsbrännarpannor, Lennox Pulse, och arbete pågår också med ett flertal restaurangtillämpningar. Brännarens funktion framgår av fig 34 samt nedanstående beskrivning.

1. Förbränningsluften sugas vid starten in i brännkammaren med en fläkt. Vid drift sugas gas och luft in i brännkammaren av det undertryck som bildas då avgaserna rusar ut ur brännkammaren, se punkt 3.

2. Luft och bränsle blandas i brännkammaren, antänds och förbränns momentant under tryck- och värmeutveckling.

3. Avgaserna lämnar brännkammaren genom en värmeväxlare i form av en kopparslinga nedsänkt i värme vatten. En del sugas tillbaka i brännkammaren så att nästa gas/luftblandning antänds.

4. Förutsatt att returvattnet i värmesystemet har tillräckligt låg temperatur kondenserar vattnet innan rökgasen lämnar pannan. Förbränningsförloppet upprepas med korta mellanrum max 60 - 80 ggr/sekund. Systemet ger en hög totalverkningsgrad och NO_x -halter i storleksordningen 10 mg/MJ.

Orsaken till de låga NO_x -halterna är troligen den goda blandningen mellan luft och bränsle och den korta uppehållstiden i brännkammaren.

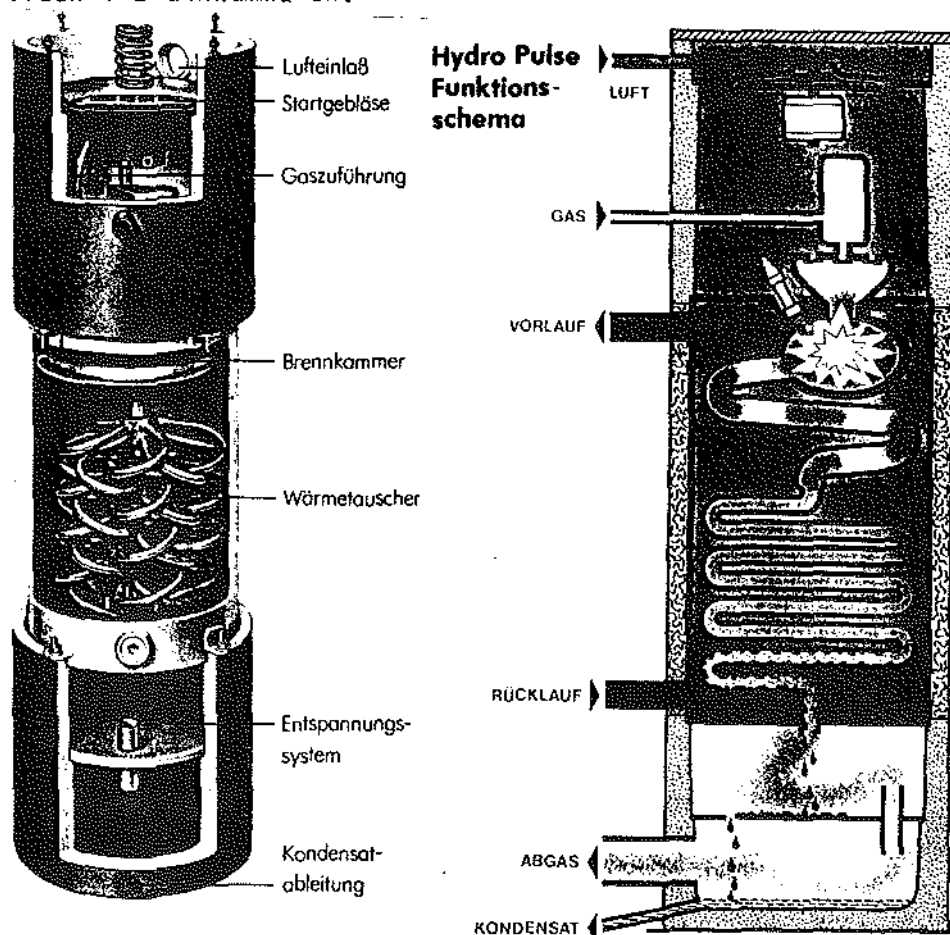


Fig 34

Hydrotherm
pulsbrännare

Idag har mycket litet gjorts för att minska NO_x -emissionerna från villapannor och hushållsapparater. Av ovanstående beskrivning framgår att det dock finns goda möjligheter att minska utsläppen, dels i befintliga apparater men framför allt vid installation av en ny generation av utrustningar. I nedanstående diagram fig 35 sammanfattas de olika metodernas förväntade eller dokumenterade NO_x -reducerande effekt.

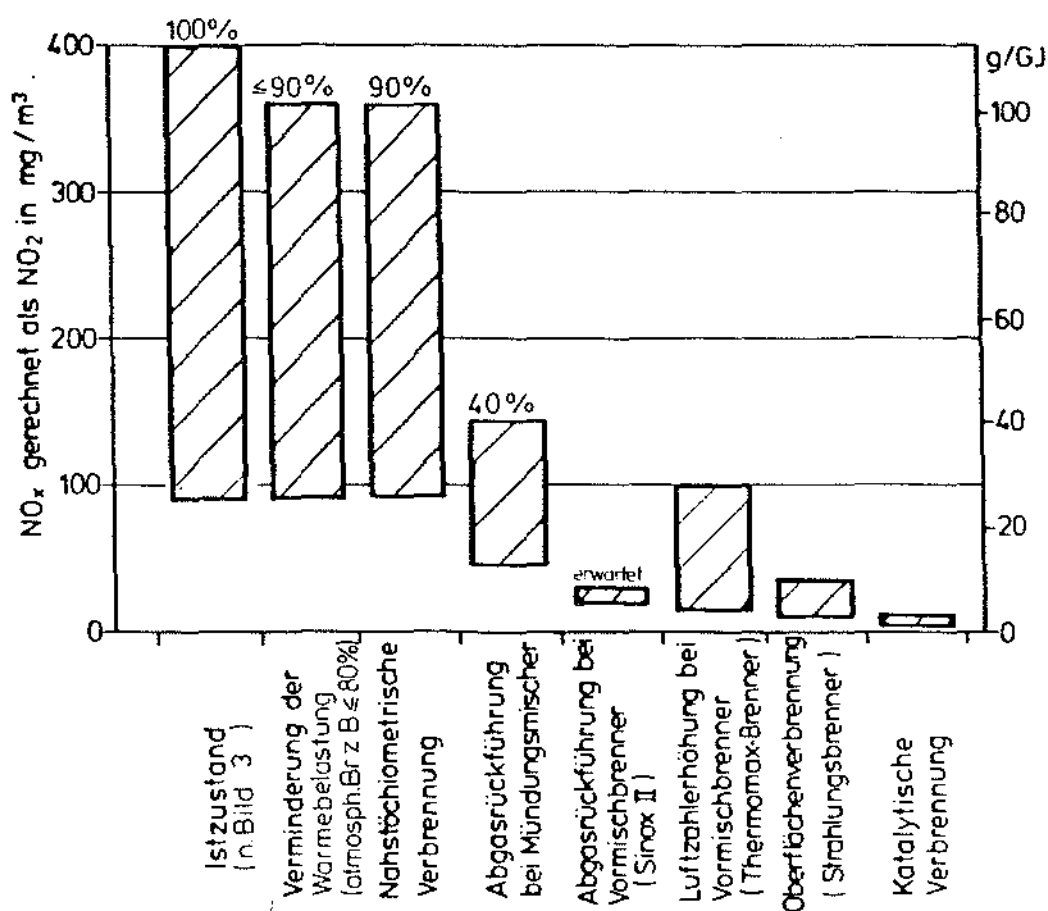


Fig 35 NO_x -reduktion vid olika typer av hushållsinstallationer och små pannor.

10. SLUTSATSER

Av ovanstående beskrivning framgår ganska klart att naturgas ger låga NO_x -emissioner jämfört med andra bränslen, detta beror på i första hand på följande grundläggande faktorer:

A Naturgasen är "ren", d v s saknar nästan helt föroreningar i form av tungmetaller, svavel och bränslebundet kväve. Det senare utgör en god förutsättning för låga NO_x -utsläpp.

B Naturgasen är gasformig vilket ger goda möjligheter att optimera förbränningsprocessen för att minimera NO_x -bildningen och därmed med primära åtgärder uppfylla gällande och förväntade miljökrav.

Primära åtgärder kostar utvecklingsresurser och ibland verkningsgrad men investeringen blir ofta rimlig.

Sekundära åtgärder däremot är investeringsintensiva och har ganska höga driftkostnader samt åldras.

Utvecklingen på gasbrännarområdet visar att redan idag ligger konventionella brännare för ång- och hetvattenpannor på ca 50 mg/MJ. Värden på 10-20 mg/MJ borde inte vara orimligt med nya låg- NO_x -brännare.

Gasturbiner klarar idag 100 mg/MJ med t ex genom vatteninsprutning. Genom nya typer av brännkammrar kan värden under 50 mg/MJ vid maxlast vara uppnåeligt.

Störst problem finns på motorsidan, där primäråtgärder kan ge reduktion ned till ca 100 mg/MJ för mindre och medelstora fyra taks gasmotorer. Stora motorer, speciellt tvåtaks dieslar är hänvisade till sekundära metoder för minskning av NO_x -emissionerna.

Även vissa konventionella industriprocesser som t ex glas-smältning kan ge höga NO_x -emissioner. Ett intensivt arbete pågår för att utveckla nya låg- NO_x -processer.

För hushållsapparater och småpannor finns idag ny teknik framme med goda NO_x -egenskaper. När denna kommer att utnyttjas i större skala beror i första hand på om man kan producera dessa utrustningar i stor skala till konkurrenskraftiga priser.

REFERENSER

1. Länsstyrelsens Naturvårdsenhet i Malmöhuslän - Mätrapporter
2. 15th World Gas Conference Lausanne 1982
3. Gas-Wärme International 1986/4
4. Massnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emission von Gasbrennern JOOS, MENZER gwf-gas/erdgas 126 (1985)
5. Umwelt chance - Erdgas
Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und umweltfreundlichen energieverbrauch (ASUE) i Västtyskland.
6. Modern Applications of Natural Gas in Industri Sept 1985.
Speciellt: Avancerad naturgasanvändning med hänsyn tagen till process och miljökraven, Dipl ing Th Holle Ruhrgas AG, Essen.
7. Naturgas - Hälsa Miljö
"State-of-the-Art"-rapport, september -84 speciellt: kap 8 och 10
8. D.O - Underlagsrapporter
Speciellt: Bildning och begränsning av NO_x vid naturgasförbränning
9. Babcock Mittellung nr 165
Die neue Formel zur NO_x-Minderung bei Öl und Gas-verbrennung.
10. The use of the Low NO_x burners for direct drying of milkpowder, A N Bogstra Nederlandse Gasunie, oktober 1986.
11. Gasturbinen glänzen, Betrieb und Energi 2/87
12. Avgaser från gaseldade Gasturbiner, Leif Andersson ASEA/Stal.
13. "Magerbetrieb - Leanox regelung" - beskrivning av Jenbacher's princip.
14. Motor - möglichenheiten ur Betriebs und Energie 2/87.
15. The Application of Emissions Reduction Procedure to Existing Engine Installations.
16. Intervju med Aldo Lohuis Gasunie Holland
17. International Gas-research conference 1984 - Field evaluation of the fibre burner in fire tube boilers. Krill/Kesselring
18. International Gas-Research conference 1986 - Metallic fibre surfacecombustion radiant gas-burners, Shirvill
19. Fibretube boiler fire-burners Development program 1982-86, March -87. GRI.

20. Broschyrer Alzeta - Pyrocore.
21. Direkttorkning med naturgas i Helsingborg och Dalby - FUD-rapport, Swedegas 1987.
22. NO_x-control for glass-melting tanks, Donald Flemming IGT 1985.
23. Development of highly Luminous gas burner and its application to save energy in steel industry, Hander Tomita, Tokyo Gas Co, Japan
24. NO_x-Minderung durch Abgasrückführung Praxismessungen en SMW erdgas kesseln Berge, Brummer, Rostek.
25. Stickoxid-Minderung durch Abgasrückführung ARF - System Weishaupt.

BILAGOR

- Bilaga 1 NO_x-emissioner från olika typer av anläggningar -
Världsgaskonferensen 1982.
- Bilaga 2 NO_x-emissioner uppmätta på naturgaseldade
pannanläggningar i Malmöhuslän 1985-86.
- Bilaga 3 NO_x-emissioner uppmätta på naturgaseldade
industriprocesser i Malmöhuslän 1985-86.



NO_x-EMISSIONER FRÅN OLIKA TYPER AV ANLÄGGNINGAR
(VÄRLDSGASKONFERENSEN 1982)

NO_x EMISSIONS

	Fuel	Number of observations	Average capacity MW	Average emission mg/MJ
1. Power station	natural gas	113	434	138
	fuel-oil	12	309	150
	coal	1	105	300
2. Industrial boilers	natural gas	82	47	85
	fuel-oil	5	64	127
	coal	4	77	295
3. Cylindrical boilers	natural gas	61	4,5	44
	light f o	27	2,0	48
	heavy f o	14	7,2	124
4. Gas engines	natural gas	34	0,94	1 375
	fuel oil			
5. Gasturbines	natural gas	58	24	134
	fuel-oil	2	36,5	400 (?)
6. Gasturb + waste heat boiler	natural gas	10	55	119
7. Reformers	natural gas	5	158	48
8. Furnaces	natural gas	10		135
9. Refinery	asphalt/ other	19		200
10. Kilns	natural gas	31	+ 1,1	67
	fuel-oil	2	+ 0,75	140
11. Glass furnaces	natural gas	6	+ 3,0	974
12. Dryers	natural gas	30	15	157
	fuel-oil	2	10,5	95
13. Incinerators	-	13	-	170

Bilaga 2.1

NO_x-EMISSIONER UPPMÄTTA PÅ NATURGASELDADE PANNANLÄGGNINGAR I MALMÖHUS LÄN 1985-86.
(KÄLLA: LÄNSTYRELSEN I MALMÖHUS LÄN)

Mätdatum	Panna Fabrikat	Typ	Effekt MW	Brännare Fabrikat	Typ	NO _x -halt mg/MJ	Kommentarer
8601	Generator	HA 20	26,1	Petro R15G	Rotation	31,5	
	SMV		11,6	Petro R15G	Rotationsbr.	27,9	
	SMV		16,6	D.O	D.O	45,0	
	Götaverken	Steamblock	5,1	Elco	UD 4	50,6	
8512		Vattenrör	ca 12,0			90,0	
		Vattenrör	ca 6,0			75,0	
		Vattenrör	ca 12,0			55,0	
8510	SMN P 66		14	Petro PP16 2st		40	2 brännare
	Kymmene P78		12	Petro PF 16G 2st		60	4 brännare
8702	Clayton Steam Generator		3,1			45-50	
8509	Generator	Heto 13P	2,3	Elco	UD-III	20-29	Driftprov 0,8-1,8 MW, ca 300°C
8605	Generator	Eckrohr HA14	ca 6	Dunphy (2st)	TG 415 YML	60-70	
8511	Generator	Tubox TD 125	ca 7	Dunphy	TG 425 YMP	35	
8511	Generator	Tubox	ca 8	Dunphy	TG 530 ZML	30	

NO_x-EMISSIONER UPPMÄTTA PÅ NATURGASELDADE INDUSTRIPROCESSER
I MALMÖHUS LÄN 1985-86 (KÄLLA: LÄNSTYRELSEN I MALMÖHUS LÄN)

Mättnings- datum	Process Typ	Effekt MW	NO _x -halt mg/MJ	Kommentarer
1986 08	Tunnelugn (1 350°C)	4,3	41	NO _x vid Eo 4 122 mg/MJ
	Tunnelugn (1 350°C)	4,3	41	NO _x vid Eo 4 209 mg/MJ
1986 04	Roterugn	-	35	
1985 05	Roterugn	-	35	
	Roterugn	-	48	
	Spraytork		105	
	Torkugn 2, 3, 4		240	
	Torkugn 5, 7, 8		165	
	Torkugn 7		230	
	Torkugn 8		225	
	Torkugn 9		105	
	Rullugn		85	
	Flashtork		30	
	Rullugn		45	
1986 08	Specialtegelugn 1		372	
	Specialtegelugn 2		160	
	Svampverk		54	
	Pulververk (bandugn)		22	
	Indunstare (850°C)	9,2	120	Olja 320 mg/MJ
	Tork (700-900°C)	12,8	100	Olja 130 mg/MJ
	Tork (180-300°C)	5,6	130	Olja 290 mg/MJ

Bilaga 2.2

NO_x-EMISSIONER UPPMÄTTA PÅ NATURGASELDADE PANNANLÄGGNINGAR I MALMÖHUS LÄN 1985-86.
(KÄLLA: LÄNSTYRELSEN I MALMÖHUS LÄN)

Mätdatum	Panna Fabrikat	Typ	Effekt MW	Brännare Fabrikat	Typ	NO _x -halt mg/MJ	Kommentarer
8604	SMV	Vattenrör	ca 5	Credfeld 4st	Combi register 375	60-55	Driftprov 3,5-2 MW, Kombibr.
8511	Generator	Eckrohr	ca 30	Credfeld 4st	D 0	60	Kombibrännare (NG/Eo5)
8511	Generator	Eckrohr HB22P	ca 40	Credfeld 4st	Combi register 375	60	Kombibrännare (NG/Eo5)
8605	Generator	Tubox TD160	ca 6	Dunphy	TG 415 YML	40	
	Bassöe	Varmvatten	0,8	Dunphy	TG22 2MLC	39	
	Generator	HA 15	5,0	Dunphy	TG420 YML	28	
	Generator	H 15	5,0	Dunphy	TG420 YML	30	
	Generator		10,0	Weisshaupt		64	
	Generator	Tubox				30	
		Hetoljepanna				35	