
Rapport SGC 076

LÅG-NO_x-TEKNIK FÖR GASDRIVNA PROCESSER – DAGSLÄGE

Mikael Näslund
Inst. för Värme- och kraftteknik, LTH

Oktober 1996



Rapport SGC 076

LÅG-NO_x-TEKNIK FÖR GASDRIVNA PROCESSER – DAGSLÄGE

Mikael Näslund
Inst. för Värme- och kraftteknik, LTH

Oktober 1996

SGC:s FÖRORD

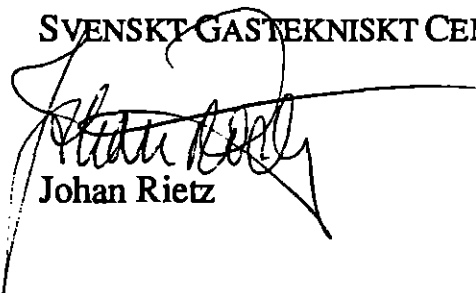
FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat e dyl i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns i slutet på denna rapport.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har f n följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Malmö Energi AB, Lunds Energi AB och Helsingborg Energi AB.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Sammanfattning

Kväveoxidemissionerna, NO_x , från gasförbränning är nästan alltid lägre än vid motsvarande förbränning av andra bränslen. Med ett gasformigt bränsle ges också goda möjligheter att genom konstruktiva åtgärder på brännaren erhålla en låg NO_x -bildning. Denna rapport innehåller en kartläggning av tekniska lösningar för låg NO_x -bildning i olika processer. Alla effektstorlekar omfattas av kartläggningen. Med låg- NO_x -teknik menas förbränningsteknik där man medvetet strävar efter så låg NO_x -bildning som möjligt.

Mycket låga NO_x -utsläpp är möjliga vid gasförbränning i samband med byggnadsuppvärmning. Det låga temperaturkravet och användning av brännare där allt bränsle och förbränningsluft blandas före flammen ger möjlighet till emissioner på mindre än $10 \text{ mg/MJ}_{\text{bränsle}}$. Atmosfärsbrännaren har utvecklats under de senaste åren och kan idag ge NO_x -emissioner på mindre än 20 mg/MJ . Katalytisk förbränning kan sänka NO_x -bildningen till nära nollnivå. Den låga NO_x -bildningen har inte förhindrat höga verkningsgrader i dessa applikationer, snarare tvärtom.

I stora pannor där olika former av fläktgasbrännare används kan man inte få lika låga nivåer som vid pannor speciellt för småhusuppvärmning. Här återfinns anläggningar som omfattas av NO_x -avgifter. Nivåer under 25 mg/MJ är dock möjliga att få med kommersiell teknik. Med ytförbränning i tex fiberbrännare kan lägre värden fås men låga yteffekter och höga priser gör användning i såväl avgiftsbelagda som icke avgiftsbelagda pannor olönsam idag.

I industriprocesser skiftar temperaturkraven och som en följd därav NO_x -bildningen vid förbränningen. Processer med låga temperaturkrav som torkning och luftvärmning kan ge lika låga emissioner som vid byggnadsuppvärmning. I högtemperaturprocesser där luftförvärmning utnyttjas för hög verkningsgrad stiger NO_x -bildningen kraftigt, även då verkningsgradshöjningen tagits i beaktande. Med hjälp av stegförbränning och olika former av avgasrecirkulation kan NO_x -bildningen sänkas till ca 50 mg/MJ med nyutvecklad teknik även vid mycket hög luftförvärmning. I de flesta processer som är aktuella i Sverige kan NO_x -emissionerna hållas under 100 mg/MJ med modern beprövad teknik.

Gasturbiner uppvisar idag låga NO_x -emissioner vid användning av sk torr låg- NO_x -teknik, med ett stort luftöverskott och ofta stegförbränning. NO_x -

emissionerna understiger då 50 mg/MJ. Inga verkningsgradssänkningar anges följa av denna teknik. Katalytisk förbränning i gasturbiner kan i framtiden sänka NO_x-emissionerna till mindre än 5 mg/MJ.

Förbränningsmotorer hör till de besvärligaste applikationerna avseende NO_x-emissioner. Om ingen katalytisk rening används är magerdrift den vanligaste reduktionsmetoden. NO_x-halter under 150 mg/MJ klaras av många motorer. Det finns också exempel på motorer med NO_x-halter strax under 100 mg/MJ. Dock kan metanemissionerna vara betydande, ca 4% av tillfört bränsle, vid magerdrift, vilket bör uppmärksammas noga. I små anläggningar kan Stirlingmotorn vara intressant i framtiden. NO_x-halter kring 10 mg/MJ är där möjliga att uppnå.

Summary

The emissions of nitric oxides, NO_x , from gas combustion is almost always lower than if other fuels would have been used. The possibilities to further reduce the NO_x formation are also favoured by a gaseous fuel. In this report a survey is presented of the state of the art regarding low NO_x equipment for different processes. All different gas inputs are dealt with in the survey. Low NO_x technology is defined as a combustion technology where lowest possible NO_x formation is strived for.

Very low NO_x emissions are possible in burners for space heating. Low system temperatures and the utilization of premix burners make it possible to obtain 10 mg/MJ_{fuel} or less of NO_x emissions. The atmospheric burner has been further developed and emissions of 20 mg/MJ or less are possible. Using catalytic burners may reduce the emissions close to zero. The low NO_x emissions of today's burners have not prevented high efficiencies, rather the contrary.

In large boilers for hot water or steam generation a NO_x fee is in force in Sweden. Here, fan assisted burners of different designs are used. The NO_x levels are not as low as in smaller boilers for space heating. Emissions of 25 mg/MJ or less are possible. Surface combustion, e.g. in fibre burners, can give lower values. Low heat loads and high prices do not make the use of such burners profitable even in boilers with NO_x fees.

The different temperature requirements in industrial processes greatly affect the NO_x formation. Processes with low temperatures such as drying and air heating can give NO_x emissions as low as in space heating. In high temperature processes where air preheating is used to raise the efficiency the NO_x formation is increasing rapidly, even if the efficiency gain is taken into account. By means of staged combustion and different ways of flue gas recirculation it is possible to reduce the NO_x formation to 50 mg/MJ also when high air preheating is used. Most of the processes of interest in Sweden can show emissions less than 100 mg/MJ with modern available technology.

Modern gas turbines have relatively low NO_x emissions when dry low NO_x combustion chambers are used, i.e. utilizing a high excess air ratio and often staged combustion. The NO_x emissions are less than 50 mg/MJ. The efficiency is not re-

duced due to this combustion technique. Catalytic combustion may in the future reduce the emissions to 5 mg/MJ.

Internal combustion engines belong to the most difficult devices regarding NO_x reduction. If catalytic flue gas cleaning is not used lean-burn is the most used reduction method. NO_x emissions of 150 mg/MJ or less are obtained in many engines. There is also examples of engines with emissions slightly below 100 mg/MJ. However, the methane emissions may be considerable, approximately 4% of the fuel input, if lean-burn is used. This ought to be paid careful attention. In small units the Stirling engine is an interesting alternative in the future. NO_x emissions around 10 mg/MJ are possible to obtain.

Innehåll

Sammanfattning	1
Summary	3
1 Inledning	7
1.1 Enheter	7
1.2 Aktuella NO _x -reducerande åtgärder	8
1.3 Bakgrund och förutsättningar i Sverige	9
2 Byggnadsuppvärmning	12
2.1 Atmosfärsbrännare	13
2.1.1 NO _x -reduktion genom höjd primärluftmängd	13
2.1.2 Några olika brännare	15
2.1.3 Lågemitterande atmosfärsbrännare i vägghärdar	16
2.1.4 Sammanställning av atmosfärsbrännare med låga NO _x -halter	17
2.2 Brännare med fullständig förblandning	18
2.3 Pulsbrännare	18
2.4 Katalytiska brännare	20
2.5 Sammanfattande ord	21
3 Brännare för ång- och hetvattenpannor	22
3.1 Fläktgasbrännare	22
3.1.1 Några olika brännare	23
3.1.2 Brännare sammanbyggda med pannan	25

3.1.3	Förändras värmeöverföringen i samband med NO _x -reduktion? . . .	26
3.2	Fiberbrännare	27
3.2.1	Metallfiberbrännare	27
3.2.2	Keramfiberbrännare	29
3.2.3	Andra ytförbränningstekniker	30
3.2.4	Kommentarer	31
3.3	Drifterfarenheter, kostnader och framtids- utsikter	31
3.4	Sammanfattande ord	32
4	NO_x-reduktion i industriella processer	33
4.1	Värmeugnar	33
4.1.1	Ugnsp parametrar som påverkar NO _x -bildningen	34
4.1.2	Låg-NO _x -brännare	40
4.1.3	Sammanställning av brännare	41
4.2	Varmluftsgenerering	43
4.3	Andra NO _x -reducerande åtgärder	43
4.3.1	Syrgasanrikning	43
4.3.2	Oscillerande, pulsad förbränning	44
4.3.3	Ändrad processutformning	46
4.4	Sammanfattande ord	46
5	Gasturbiner	48
5.1	Låg-NO _x -teknik i Solar Turbines SoLoNO _x	48
5.2	Exempel på gasturbiner med torr NO _x - reduktion	50
6	Förbränningsmotorer	53
6.1	Ottomotorer	53
6.2	Stirlingmotorer	54
7	Slutsatser	56
	Referenser	58

1

Inledning

Föreliggande studie har utförts på uppdrag av Svenskt Gastekniskt Center, SGC. Uppdraget, som avsåg dagsläget för låg- NO_x -teknik för gasdrivna processer är begränsat till NO_x -reducerande åtgärder i samband med förbränningen och rapporten innehåller således inget om katalytisk rening etc. Alla effektstorlekar omfattas av studien. Med dagsläge avses situationen för kommersiellt eller nära nog kommersiellt tillgänglig teknik och inte en sammanfattande bild av tekniken i befintliga anläggningar. Nivåerna från befintliga installationer är alltså högre än dagsläget för tekniken. Tyngdpunkten i beskrivningen av låg- NO_x -teknik och forskning har lagts på de produkter och utvecklingsarbete som uppvisar de lägsta NO_x -emissionerna.

Underlaget för rapporten har inhämtats från kontakter med tillverkare samt publicerat material i tidskrifter och från konferenser. De senare källorna har främst använts för att bedöma och förutsäga nutida och framtida utvecklingslinjer.

1.1 Enheter

NO_x -emissioner anges i många olika enheter, t ex ppm, mg/kWh och mg/MJ där MJ avser tillförd energi. Så långt det är möjligt har enheten mg/MJ använts. Angivna emissioner har ibland räknats om till denna enhet men ibland finns inte tillräcklig information för en korrekt omräkning. I dessa fall har emissionerna angetts med de i referenserna angivna enheterna. I de fall särskilda enheter används närmast som en standard inom en bransch har även dessa angetts. I bilaga 1 finns ett enkelt schema för omräkning mellan olika enheter vid förbränning av dansk naturgas [1]. Omräkningar för andra energigaserna kan göras med ekvationer i [2].

1.2 Aktuella NO_x-reducerande åtgärder

Redan en konvertering till gas från annat bränsle innebär ofta en reduktion av NO_x-utsläppen. I en sammanställning över resultaten från 10 svenska anläggningar framgår att NO_x-emissionerna sänktes med 50–75% vid övergång från eldningsolja till naturgas och i ett fall gasol [3]. De högre reduktionerna erhöles då tung eldningsolja ersattes. Endast brännarna byttes vid konverteringarna. Ett gasformigt bränsle ger goda möjligheter att kontrollera förbränningen och därför också de processer som styr NO_x-bildningen.

Vid naturgasförbränning bildas NO_x antingen som termisk NO_x eller som prompt NO_x. Termisk NO_x är kraftigt temperaturberoende och är den del som genom sk primära åtgärder är möjlig att påverka genom den konstruktiva utformningen av brännaren och processen. Prompt NO_x bildas i flamfronten och är svårare att kontrollera. De primära metoder som används i de produkter och processer som redovisas i rapporten är:

- tvåstegsförbränning (stegförbränning)
- högt luftöverskott
- avgasrecirkulation
- radikalt omarbetade processer

Alla metoderna syftar till att sänka temperaturen, uppehållstiden och/eller syrekonzentrationen. Användning av rent syre reducerar NO_x-bildningen kraftigt eftersom inget kväve tillförs processen med oxidanten. Vid tvåstegsförbränning förbränns bränslet understökiometriskt i det första steget. I det andra steget förbränns bränslet fullständigt. Genom att värmeöverföring sker från zonen för det första steget sänks den maximala temperaturen i processen. Ett kraftigt luftöverskott sänker flamtemperaturen och NO_x-bildningen. Metoden lämpar sig bäst där det höga luftöverskottet inte ökar avgasförlusten. Avgasrecirkulation sker genom att avgaser blandas in i förbränningszonen och sänker den maximala temperaturen vid förbränningen. Inblandning av avgaser kan antingen ske externt (avgaser tas från avgasutloppet och förs till brännaren) eller internt (flödesfältet i eldstaden eller brännkammaren utformas så att avgaser direkt blandas in i flammen). NO_x-sänkning genom radikalt omarbetade processer innebär att värmen överförs på ett nytt sätt, vilket innebär att temperaturen kan sänkas kraftigt. Denna metod för NO_x-reduktion är oftare ett resultat av en förenklad process snarare än en målsättning att enbart sänka NO_x-bildningen.

1.3 Bakgrund och förutsättningar i Sverige

Sedan 1984 har de svenska kväveoxidutsläppen, räknat som NO_2 , minskat enligt tabell 1.1 [4]. Enligt den sk Sofiaöverenskommelsen eller kväveprotokollet, som ingår i FNs konvention om gränsöverskridande luftföroreningar (1979) skall kväveoxidutsläppen minska med 30% från 1980 till 1998. Detta innebär att med 1980 års utsläpp som bas skulle de svenska kväveoxidutsläppen senast 1998 understiga 317 000 ton/år.

Tabell 1.1: Svenska kväveoxidutsläpp sedan 1980

År	NO_2 (1000 ton)
1980	453
1989	418
1990	411
1991	410
1992	403
1993	399
1994	393

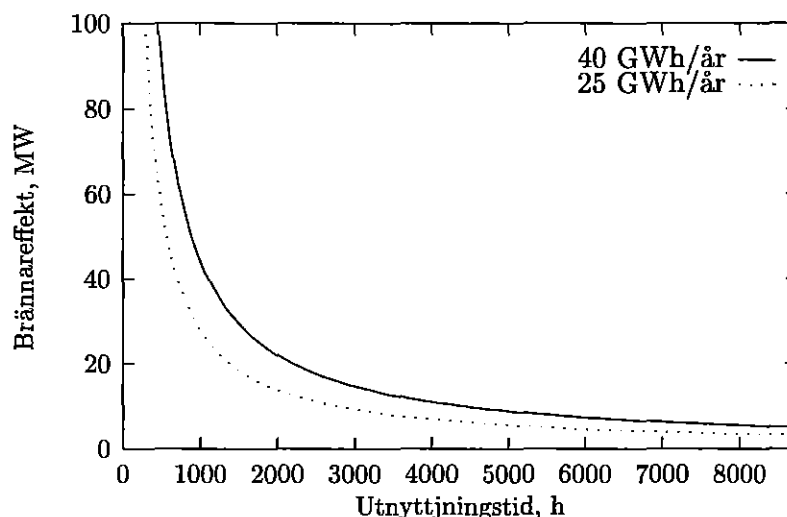
Fördelningen mellan olika svenska kväveoxidutsläpp ges i tabell 1.2 [4]. Denna rapport behandlar teknik som omfattar punkterna förbränning av olja och gas samt industriprocesser. Naturgas används även inom vägtrafik i Sverige och då främst till stadsbussar i t ex Malmö, Lund och Göteborg.

Tabell 1.2: Svenska kväveoxidutsläpp 1994

Källa	NO_x (NO_2) 1000 ton
Vägtrafik	166
Sjöfart	70
Flygtrafik	8
Spårbunden trafik	1
Arbetsmaskiner	78
Förbränning av olja och gas	20
Förbränning av kol och koks	5
Förbränning av övriga fasta bränslen	16
Industriprocesser	27

Den 1 januari 1992 infördes en miljöavgift på kväveoxider om 40 kr/kg (räknat som NO_2). De inbetalda avgifterna återbetalas till de avgiftsskyldiga i proportion till deras andel av den totala nyttiggjorda energin. Detta innebär att de som producerar energi med NO_x -utsläpp under medelvärdet får en återbetalning som är

större än inbetalningen. Avgiften gällde tidigare pannor och gasturbiner för energiproduktion med en bränsleeffekt överstigande 10 MW och årlig energiproduktion på minst 50 GWh. 1 januari 1996 togs effektgränsen bort och gränsen för den årliga energiproduktionen sänktes till 40 GWh nyttiggjord energi. Stationära förbränningsmotorer omfattas nu också av avgiftssystemet. Energigränsen sänks ytterligare den 1 januari 1997, till 25 GWh/år. I figur 1.1 visas brännareffekter som funktion av den årliga utnyttjandetiden där den årliga energiproduktionen uppgår till 25 respektive 40 GWh. Verkningsgraden är antagen till 90%.



Figur 1.1: Effektgränser för kväveoxidavgifter vid olika årliga utnyttjandetider för energigränserna från 1 januari 1996 (40 GWh/år) och 1 januari 1997 (25 GWh/år).

Under NO_x -avgiftens första år var utsläppen från de avgiftspliktiga pannorna i genomsnitt 113 mg/MJ (nyttiggjord energi). Sedan introduktionen av NO_x -avgiften har emissionerna minskat som framgår av tabell 1.3 [6]. Verkningsgraden 87% har antagits av Naturvårdsverket vid omvandlingen mellan tillförd och nyttig energi. Det framgår också att samtidigt som de totala utsläppen minskat så har energianvändningen ökat. Vid slutet av 1980-talet uppskattades utsläppen från de berörda pannorna till ca 25 000 ton/år, vilket innebär att NO_x -utsläppen halverats sedan dess. Motsvarande sänkningar av NO_x -emissionerna har man inte noterat utomlands.

Avseende gränsvärden för NO_x gäller följande som en följd av EU-direktiv som implementerats i svensk lagstiftning [7]. För nya anläggningar överstigande 50 MW gäller 95 mg/MJ som gränsvärde vid gasformigt bränsle. Gränsvärdet för fasta bränslen är 220–250 mg/MJ och för flytande bränslen 125–130 mg/MJ. De riktlinjer som används i Sverige är dock strängare, vilket framgår av tabell 1.4. NO_x -värden är årsmedelvärden.

I tabell 1.5 visas antalet pannor som kommer att omfattas av de förändrade utsläppsreglerna 1 januari 1996 och 1 januari 1997 [5]. Totalt rör det sig om ca

Tabell 1.3: Årliga utsläpp av NO_x från avgiftsbelagda pannor sedan avgiftens införande

År	Avgiftspliktigt utsläpp (ton)	Nyttiggjord energi (GWh)	NO _x Nyttig energi (mg/MJ)	NO _x tillförd energi (mg/MJ)
1992	15 305	37 465	113	99
1993	13 333	41 158	89	78
1994	13 025	45 193	81	70
1995	12 517	46 626	75	65

Tabell 1.4: Svenska riktlinjer för NO_x-utsläpp

Anläggning	NO _x (mg/MJ)
Nya anläggningar	
Årligt utsläpp <300 ton NO _x (NO ₂)	100–200
Årligt utsläpp >300 ton NO _x	50–100
Koleldad <500 MW	50
Anläggningar >500 MW	30
Befintliga anläggningar	
Årligt utsläpp <600 ton NO _x	100–200
Årligt utsläpp >600 ton NO _x	50–100

500 pannor som tillkommer i avgiftssystemet under 1996 och 1997. Majoriteten av dessa pannor är oljeeldade.

Tabell 1.5: Pannor för energiproduktion som inte omfattats av avgiftssystemet före 1 januari 1996 och som tillkommer under 1996 och 1997

Energiproduktion/Effekt	Antal
>40 GWh/år, >10 MW	226
25–40 GWh/år, >10MW	72
>25 GWh/år, 1–10 MW	207
Summa	505

2

Byggnadsuppvärmning

De lägsta NO_x -utsläppen finner man i gaspannor och liknande utrustning för byggnadsuppvärmning. Tillsammans med möjligheten till mycket höga verkningsgrader, tex med hjälp av avgaskondensering kan de totala emissionerna, NO_x , oförbränt och CO_2 , vid naturgasförbränning hållas mycket nära de minsta möjliga.

Kapitlet beskriver brännare som levereras sammanbyggda med pannan, d v s atmosfärsbrännare, förblandningsbrännare, pulsbrännare och katalytiska brännare. Fläktgasbrännare, som levereras separat och som har ett betydligt större effektområde beskrivs i ett senare kapitel. Detta gäller även strålningsbrännare i form av fiberbrännare. Dessa kan användas i stället för fläktgasbrännare vid lägre effekter och behandlas därför i samma kapitel som fläktgasbrännarna.

En sammanställning av de genomsnittliga NO_x -emissionerna från uppvärmning av småhus samt möjliga framtida reduktioner har gjorts vid Ruhrgas 1995 [8]. Sammanställningen, tabell 2.1, visar att NO_x -emissionerna vid småhusuppvärmning kan sänkas till 10 mg/MJ eller mindre genom användande av främst förblandningsbrännare och infrastrålare. Fläktgasbrännare och atmosfärsbrännare finns inte med bland teknikerna för de allra lägsta NO_x -emissionerna. Dock finns det idag pannor med atmosfärsbrännare med de NO_x -emissioner som anges som mål i tabellen.

Värdena i tabellen är på inget vis svåra att uppnå eftersom markanta sänkningar av NO_x -utsläppen gjorts i nyutvecklade brännare för värmepannor. Detta gäller atmosfärsbrännare, fläktgasbrännare och brännare med fullständig förblandning av bränsle och förbränningsluft. NO_x -halter under 5 mg/MJ (10 ppm) är ofta angivna i försäljningsmaterial. Flera pannor med katalytisk förbränning är under utveckling och resultat från prototyper har presenterats.

Det är uppenbart att låg- NO_x -teknik kan utvecklas utan att några NO_x -avgifter är aktuella. Orsakerna till att låg- NO_x -teknik utvecklats för byggnadsuppvärmning är troligen verkningsgrad och den tyska miljömärkningen "Blå Ängeln".

Tabell 2.1: Utveckling av NO_x-emissioner i pannor mm för småhus sedan 1985 samt möjliga framtida nivåer

Värmeapparat	NO _x -emission		Reduktion (%)	Möjligt mål (mg/MJ)	Åtgärd
	1985 (mg/MJ)	1993 (mg/MJ)			
Panna med atmosfärsbrännare	65–70	11–17	76–83	7–8	A, B, D
Panna med förblandningsbrännare	33	11	67	4–8	B, C
Kondensationspanna	28–64	11	60–83	4–8	B, C
Rumsvärmare	45	25	44	7–10	B, D
Varmvattenberedare	45	30	31	7–10	B, D
Infrastrålare	7	7	0	7	—
Öppen spis/kamin	32	19	39	7–10	B, D

A – Användning av lambdasond

B – Överstökiometrisk förblandningsbrännare

C – Överstökiometrisk förblandningsbrännare och avgasrecirkulation

D – Infrastrålare

Brännare med låga NO_x-emissioner har ofta visat sig ge en pannkonstruktion med hög verkningsgrad (se vidare respektive brännare nedan). Det finns således inget motsatsförhållande mellan verkningsgrad och emissionsbegränsning i uppvärmningstillämpningar. Vidare, och inte minst viktigt, har "Blå Ängeln"-märkningen en stark marknadsföringseffekt och många villagasspannor har idag emissioner långt under gränsvärdena. Kraven för "Blå Ängeln" är 18 mg/MJ (65 mg/kWh) för NO_x och 14 mg/MJ (50 mg/kWh) för CO.

2.1 Atmosfärsbrännare

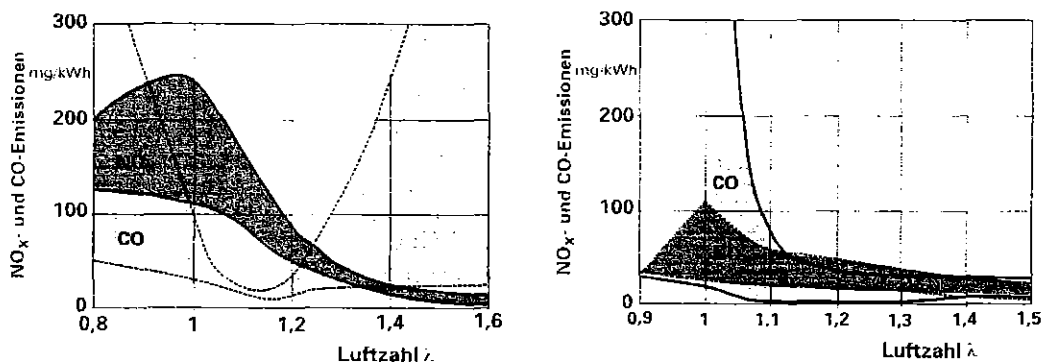
Äldre atmosfärsbrännare som har 40–60% primärluftmängd uppvisar en NO_x-bildning på 50–100 mg/MJ. Primärluftmängden anger hur stor andel av det stökiometriska luftbehovet som sugs med gasströmmen in i brännarens injektor och blandningsrör. Sänkning av NO_x-bildning i atmosfärsbrännare har tidigare åstadkommits med hjälp av olika former av insatser placerade i flaman. Dessa hettades upp och avgav värme i form av värmestrålning till pannans värmeöverförande ytor. Flamtemperaturen sänktes och därigenom kunde NO_x-bildningen reduceras med ca 30%. Tekniken har använts i både Nordamerika och Europa. En närmare beskrivning finns i [9].

2.1.1 NO_x-reduktion genom höjd primärluftmängd

Atmosfärsbrännarens NO_x-bildning kan också sänkas genom en höjd primärluftmängd. De nya atmosfärsbrännarna är konstruerade för en överstökiometrisk

blandning med liten eller ingen sekundärluftmängd. NO_x -nivåer kring 5–10 mg/MJ är då möjliga att nå. Den höga primärluftmängden erhålls genom att utforma inlopps- och utloppsdelarna på annat sätt än tidigare. Ett större antal gasdysor är en metod.

Ruhrgas har undersökt hur de nya atmosfärsbrännarna uppträder i olika drift-situationer [10]. Utgångspunkten var att lufttalsförändringen vid byte mellan energigaserna med olika Wobbeindex¹ i en atmosfärsbrännare blir större ju högre primärluftmängden är. En grundläggande skillnad mellan atmosfärsbrännare med under- respektive överstökiometrisk primärluftmängd är relationen mellan flamhastighet och utströmningshastighet. Vid lufttal överstigande stökiometrisk blandning minskar flamhastigheten medan utströmningshastigheten ökar då lufttalet ökar, d.v.s. risken för flamlyft ökar. I figur 2.1 visas hur emissionerna förändras som följd av förändringar i primärluftmängden enligt den tyska undersökningen.



Figur 2.1: Emissionsbilden hos överstökiometrisk atmosfärsbrännare. I figuren är 100 mg/kWh = 28 mg/MJ.

Diagrammet till vänster i figur 2.1 avser en brännarkonstruktion där flammorna har samma form som i vanliga atmosfärsbrännare. Ett tydligt minimum för CO som även inkluderar oförbrända kolväten kan urskiljas. Till höger ses emissionsbilden för brännare där utströmningshastigheten är så låg att brännarytan glödgas och avger strålningsvärme. Alla emissioner minskar vid högre luftöverskott inom provområdet. Från undersökningen drar författarna slutsatsen att mycket låga NO_x -emissioner kan uppnås med nya atmosfärsbrännare och att deras konstruktiva utformning har stor betydelse för den totala emissionsbilden.

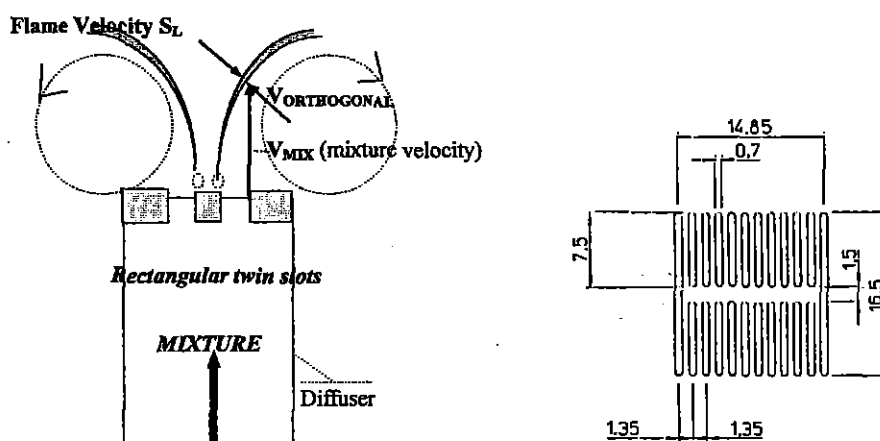
Det har inte varit möjligt att utvärdera hur den nya utformningen av atmosfärs-

¹Wobbeindex definieras som $W = H/\sqrt{d}$ där H är bränslets värmevärde och d dess relativa densitet.

brännare påverkar pannans dellastverkningsgrad, d v s om stilleståndsförlusterna förändras. Dock kan man notera att pannor med de överstökiometriska atmosfärsbrännarna saknar de vanliga öppningarna för sekundärluften. Minskade stilleståndsförluster synes därför rimligt. Pannan Buderus G134 LP, som är avsedd för småhusuppvärmning, anges av tillverkaren ha en "Nutzungsgrad" (DIN 4702, del 8, ung. årsverkningsgrad) på 93%.

2.1.2 Några olika brännare

En tillverkare av överstökiometriska atmosfärsbrännare är det italienska företaget Worgas. Företaget uppger att mer än 1,6 miljoner brännare levererats (december 1995). Flamman i brännaren har en omvänd form (inverted, Butterfly wing) och samlad kring en grupp av slitsar. I figur 2.2 ses dels flammans form dels ett utförande av slitsarna.



Figur 2.2: Bilder av flamform (vänster) och brännaröppningar (höger) i Worgas atmosfärsbrännare med låga NO_x -emissioner

Utströmningen ur brännaren sägs åstadkomma recirkulationszoner där inblandning av avgaser sker till brännaren. Dessa zoner anges i den vänstra bilden. Bandet mellan de två raderna av slitsar i den högra bilden (brännaren ses uppifrån) fungerar som flamhållare och genererar det flödesfält som önskas. Inblandningen gör de yttre delarna av blandningen än magrare, vilket sänker förbränningshastigheten.

Vanligtvis är de överstökiometriska atmosfärsbrännarna utformade på samma sätt som de traditionella (med endast 40–60% primärluftmängd) och med en kon-

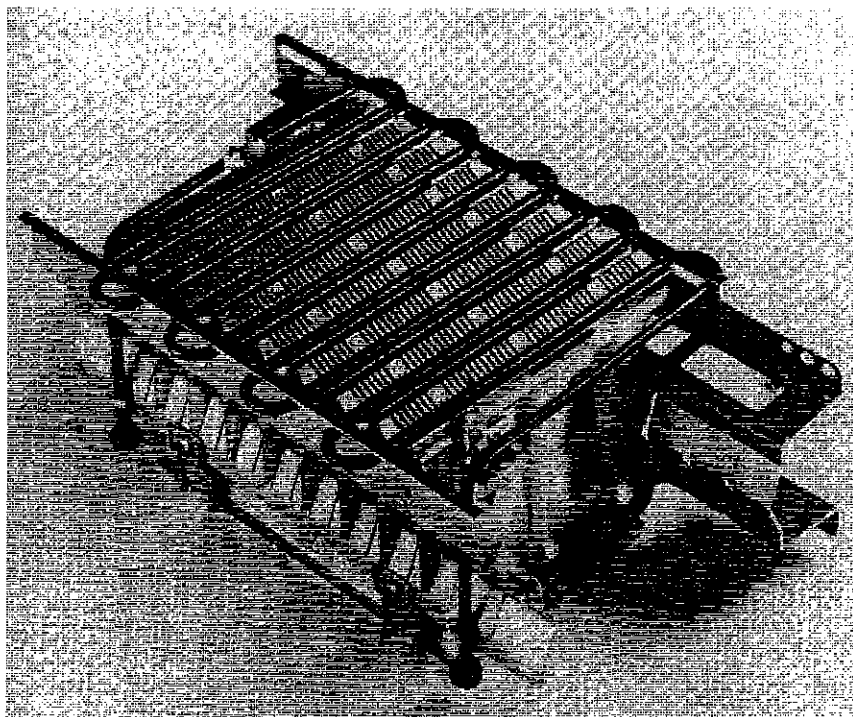
struktion helt i metall. Bray Technologies i Storbritannien har utvecklat tre olika varianter av atmosfärsbrännare [11] med låga NO_x -emissioner. I en brännare fås en överstökiometrisk blandning genom många injektorer och venturirör tillsammans med brännaröppningar med lågt utströmningsmotstånd. Till skillnad från de flesta andra atmosfärsbrännare skapas utloppsdelen av keramiska delar som kan läggas i en rad av valfri storlek. Emissionsvärdena är $<20 \text{ mg/MJ NO}_x$ och $<26 \text{ mg/MJ CO}$. En annan brännare använder en form av tvåstegsförbränning. En understökiometrisk bränsle/luft-blandning strömmar vertikalt ur parallella öppningar. En vertikal vägg separerar de två öppningarna. Flamman stabiliseras vid toppen av den vertikala väggen. Mellan öppningarna för den understökiometriska blandningen och flammen kan ytterligare förbränningsluft sugas in och blandningen kan då bli överstökiometrisk. NO_x -emissionerna är $25\text{--}30 \text{ mg/MJ}$ över ett reglerområde på $25\text{--}100\%$. Även i denna brännare används keramiskt material. En tredje brännare liknar den förstnämnda brännaren och är avsedd för väggpannor (reglerbar effekt) och har samma utseende som vanliga atmosfärsbrännare i dessa. Keramiskt material i brännaröppningen sägs vara lämpligt för att undvika överhettning och möjliggöra en enklare konstruktion än vattenkylda brännare (se nedan).

En väggpanna med överstökiometrisk vattenkyld atmosfärsbrännare tillverkas av Vaillant [12]. Överstökiometrisk primärluftmängd uppnås genom ett ökat antal injektorer och brännaröppningar med lågt utströmningsmotstånd. Kylningen av brännaren sker genom en vattenslinga intill brännarytan. Brännaren är reglerbar i området $40\text{--}100\%$ med bibehållet luftöverskott. NO_x -emissionen anges till 17 mg/MJ . Brännaren visas i figur 2.3.

Andra NO_x -reducerande utformningar av atmosfärsbrännare är "rich-lean" och tvåstegsförbränning. Tokyo Gas har utvecklat en atmosfärsbrännare för varmvattenberedare där japanska önskemål sätter höga krav på reglerbarhet [13, 14]. Metoden som används kallas "rich-lean" och innebär att en överstökiometrisk flamma omges av stabiliserande flammor med understökiometrisk bränsle/luft-blandning. Lufttalet i de överstökiometriska flammorna är $1,7\text{--}1,8$ medan det är ca $0,8$ i de feta flammorna. NO_x -emissionerna uppgår till $14\text{--}27 \text{ mg/MJ}$ ($30\text{--}55 \text{ ppm}$, $0\% \text{ O}_2$) över ett totalt lufttalsområde av $1,4\text{--}1,6$. CO-emissionerna har ett minimum på ca 9 mg/MJ (30 ppm) kring ett lufttal på $1,6$. Vid de totala lufttalen $1,35$ och $1,83$ är CO-halterna 27 mg/MJ (90 ppm) respektive 38 mg/MJ (130 ppm). Här skiljer sig "rich-lean"-brännaren från den traditionella atmosfärsbrännaren som har en konstant fallande CO-halt vid högre lufttal.

2.1.3 Lågemitterande atmosfärsbrännare i väggpannor

Det är endast få atmosfärsbrännare med låga emissioner som har reglerbar effekt. Detta innebär också att atmosfäriska lågemissionsbrännare sällan förekommer i väggpannor. Skälet till att överstökiometriska atmosfärsbrännare sällan är reglerbara beror troligen på risken för antingen flamlyft vid full effekt eller nedslag



Figur 2.3: Överstökiometrisk atmosfärsbrännare med vattenkylning från Vaillant

vid minimieffekt. Tidigare nämndes den större utströmningshastigheten vid överstökiometrisk blandning som ett skäl till Ruhrgas undersökning.

Flamstabiliteten i atmosfärsbrännare beror på flam- och utströmningshastigheten ur brännarmynningen. Värmeöverföringen till brännarmaterialet spelar här en viktig roll. I fläktbrännare och andra brännare där gas och luft har en hög utströmningshastighet stabiliseras flamman som en följd av de recirkulationszoner som uppkommer antingen som en följd av den högre utströmningshastigheten eller skapas av en flamhållare. Vattenkylningen i Vaillants väggpanna är säkerligen ett krav för att brännarens skall kunna ha en effektregering och det är troligt att överstökiometrisk atmosfärsbrännare i framtiden oftast kommer att förekomma i pannor med relativt hög termisk kapacitet. Dessa pannor kan ge en hög verkningsgrad även med en enkel on/off-reglering.

2.1.4 Sammanställning av atmosfärsbrännare med låga NO_x -halter

I tabell 2.2 ges en sammanställning av några villa- och fastighetspannor med atmosfärsbrännare med låga NO_x -emissioner. Gemensamt för alla brännare är att det inte är angivet vilken ytbelastning brännarna har eller hur denna påverkar

NO_x-bildningen. Troligen är ytbelastningen lägre än i gamla atmosfärsbrännare. På den svenska marknaden finns Vaillant VC184/185 och Viessmann Litola.

Tabell 2.2: Villa- och fastighetspannor med atmosfärsbrännare konstruerade för låga NO_x-emissioner

Fabrikat	Modell	Effekt (kW)	NO _x (mg/MJ)	CO	Anm
Bray	–	–	<20	<26	endast brännare
Buderus	G134 LP	9–34	5	1	
Hydrotherm		350–1050	19	4	[15]
Remeha		60–155		–	[15]
Vaillant	VC184/185	9–18	17		
Weishaupt	Thermo Gas	9–34	<18	<14	
Viessmann	Litola	17–88	<10	<2	

2.2 Brännare med fullständig förblandning

Fullständig förblandning av bränsle och förbränningsluft (premix) är en förutsättning för mycket låg NO_x-bildning. I detta avsnitt behandlas förblandningsbrännare där förbränningsluften tillförs med hjälp av en fläkt. Utnyttjas ytförbränning i brännaren, dvs förbränningen sker intill en yta och glödgar denna, kan extremt låga halter bildas. Brännare med ytförbränning har ofta en relativt låg yteffekt ($\text{kW/m}^2_{\text{brännaryta}}$), vilket innebär att de oftast finns enbart för låga brännareffekter. Tekniken innebär att NO_x-halter under 5 mg/MJ kan erhållas. I figur 2.4 visas den sedvanliga uppbyggnaden av förblandningsbrännare. Gas och luft blandas och passerar en eller två oftast perforerade plåtar så att flödet blir jämnt fördelat över brännarytan.

I tabell 2.3 visas en sammanställning över pannor med förblandningsbrännare. Tabellen baseras huvudsakligen på data ur [16]. Exempelen på pannor/brännare med låga emissioner är huvudsakligen hämtade från Tyskland. En genomgång av pannor på bl a den franska marknaden visar att här finns endast ett fåtal fler pannmodeller. Avgränsningen till den tyska marknaden innebär således ingen inskränkning av presentationen av tillgänglig teknik.

2.3 Pulsbrännare

Det har ofta hävdats att bland pulsbrännarens fördelar hör låga emissioner. NO_x-emissionerna hos dagens pulsbrännare är låga men inte anmärkningsvärt låga. Pulsbrännare kan konstrueras för antingen separat bränsle- och lufttillförsel

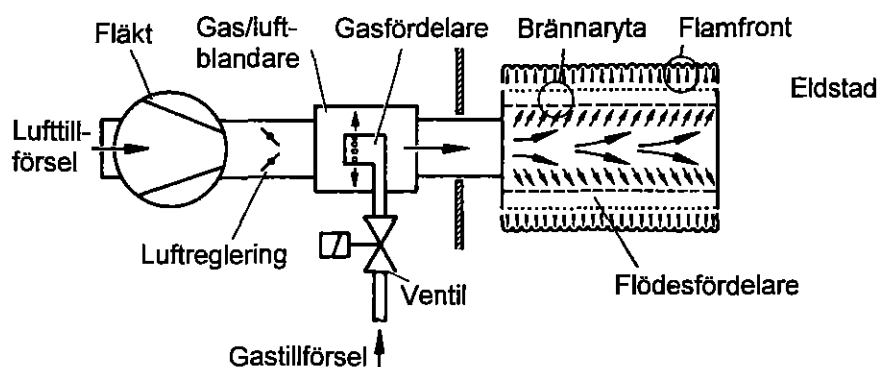
Tabell 2.3: Villa- och fastighetspannor (kondenserande) med förblandningsbrännare med låga NO_x-emissioner

Fabrikat	Modell	Effekt (kW)	NO _x (mg/MJ)	CO	Årsmedel- verkningsgrad (%)	Anm
Benraad	Super HR	20	6	8	106	
Bosch-Junkers	Cerapur	18/24	19	14	103	
	Suprapur	18/24	19	14	103	
Buderus	GB102W	17/25/37	7	11	104	A, C
	GB102WT	18	7	11	104	
	SB 305 UVM	39-110	4	4	107	
Corolla		<700	-	-	-	[15]
DeDietrich	DTG 150	17/23	11	8	101	
Elco Klöckner	Ultron	6-22	7	7	107	
EWFE	Micromat MZC	10/18/23	11	8	101	
	Micromat MZS	18/23	11	8	104	
Fröling	Rendanova	19/24	19	14	103	
GEA-IWS	Intergas IG	11-22	7	11	105	
Hoval	UltraGas condens	12/20	7	3	106	
	TopGas TGC	22	8	6	104	
Hydrotherm	Hydro Pulse	25	6	11	105	B
	Hydro Therme	28	7	7	107	
	Eurotemp Condens	15/20/25	7	7	107	
Paradigma	GB	10/18/23/28	8	12	105	
Remeha	Micron 2	10/18/23/28	8	12	105	
Rohleder	RK Turbo	15/20/25	11	3	105	
Schäfer-Interdomo	Domoplus	20	8	4	106	
Vaillant	Turbomax VGB	17,5/24	8	6	104	
Weishaupt	Thermo Condens	9-24	9	4	108	
Viessmann	Mirola	11/18	4	1	108	C
	Eurola	8-18/22	4	1	108	C
	Vertola	8/14	4	1	103	
	Condensola	22	6	1	106	

A - Säljs även som Nefit Turbo

B - Första kondenserande pannan på den tyska marknaden 1982

C - Säljs i Sverige



Figur 2.4: Principiell uppbyggnad av förblandningsbrännare

eller förblandning. Den svenska oljedrivna Pulsonex uppvisar NO_x -värden på 30 mg/MJ. Detta är i nivå med de bästa oljebrännarna. Nivån kan sänkas ytterligare ca 20% i Pulsonex panna genom avgasrecirkulation [17]. Det franska företaget Auer presenterade under slutet av 1995 en 20 kW kondensationspanna med pulsbrännare. Artiklar om denna panna publicerades redan för flera år sedan, vilket pekar på hur tidsödande arbetet kan vara att utveckla väl fungerande pulsbrännare. I USA har Lennox framgångsrikt tillverkat en varmluftspanna sedan början av 1980-talet med en NO_x -emission på ca 30 mg/MJ. Hydrotherm har sålt en panna för både den nordamerikanska och den europeiska marknaden under många år. Amerikanska State Industries utvecklar idag en ny panna. Sandia National Labs. i USA har utvecklat en beräkningsmodell för gaseldade pulsbrännare [18]. Programmet, kallat SPCDC, kan möjligen öka möjligheten till en mer utbredd tillverkning av pulsbrännare.

Även om de pannor som är försedda med pulsbrännare inte uppvisar extremt låga NO_x -halter visar publicerade resultat från grundläggande forskning att mycket låga emissioner är möjliga att uppnå. Både vid LTH [19], Sandia National Labs. och CSIRO [20] har NO_x -värden under 2,5 mg/MJ (5 ppm) uppmätts i laboratoriebrännare med förblandning. Metoderna som använts är avgasrecirkulation, magerdrift samt åtgärder att placera förbränningszonen i brännkammaren. Laboratoriebrännarna har haft 10–20 kW effekt. Det synes vara fullt möjligt att de uppmätta emissionsnivåerna också skall kunna realiseras i kommersiella produkter i framtiden.

2.4 Katalytiska brännare

Tack vare mycket låg oxidationstemperatur i katalytiska brännare är NO_x -bildningen extremt låg; man kan tala om att en nollnivå är möjlig att uppnå. SGC

stödjer utvecklandet av en katalytisk brännare för gaspannor. Projektet utförs av Katator i Lund och Parca. Laboratieförsök med en prototyp genomförs under våren 1996. Våren 1996 introducerade Viessmann en vägghängd kondensationspanna med katalytisk förbränning, Euro-la-Kat [21]. Brännaren är den sk MatriX-brännaren med ytförbränning som finns i andra av företagets pannor. Ytan har belagts med ett katalytiskt skikt. Brännareffekten är 15 kW och NO_x-emissionerna uppgår till mindre än 3 mg/MJ. Verkningsgraden är inte lägre än för andra kondensationspannor. Utöver de nämnda företagen sker utveckling också hos bl a Buderus och Hoval.

Problem i samband med katalytisk förbränning är katalysatormaterialets värmestålighet, egenskaper då brännaren startas, och fullständig förbränning av bränslet.

2.5 Sammanfattande ord

Genomgången har visat att effektiv byggnadsuppvärmning kan ske med mycket låga emissioner av både NO_x och CO om bästa kommersiellt tillgängliga teknik används. De behandlade brännarna är alla avsedda att byggas samman med pannan till en enhet. Reduktionen av NO_x har skett utan att låg-NO_x-brännare gynnats av ekonomiska styrmedel.

En betydande sänkning av NO_x-emissionerna jämfört med dagens bästa teknik kan endast uppnås med katalytisk förbränning. Katalytisk förbränning kan inte förväntas finnas på marknaden i någon större omfattning förrän tidigast om ca 5 år. Den kan utnyttjas för alla gasbaserade uppvärmningsapparater för byggnader.

Den fortsatta teknikutvecklingen kan inriktas mot att förbättra reglerbarheten hos de berörda brännarna och att öka tåligheten mot förändringar i gaskvaliteten. Dock har dagens bästa teknik avseende lågemitterande brännare ännu ej en dominerande ställning bland tillgängliga pannor för byggnadsuppvärmning. Pannornas livslängd gör också att låg-NO_x-brännare inte blir övervägande bland befintlig utrustning förrän om 10–15 år.

3

Brännare för ång- och hetvattenpannor

I detta kapitel behandlas brännare som levereras separat till pannorna. Brännarna är indelade i fläktgasbrännare och fiberbrännare. Fiberbrännare har idag en begränsad användning men kan i framtiden utgöra ett alternativ till att erhålla låga NO_x -emissioner.

3.1 Fläktgasbrännare

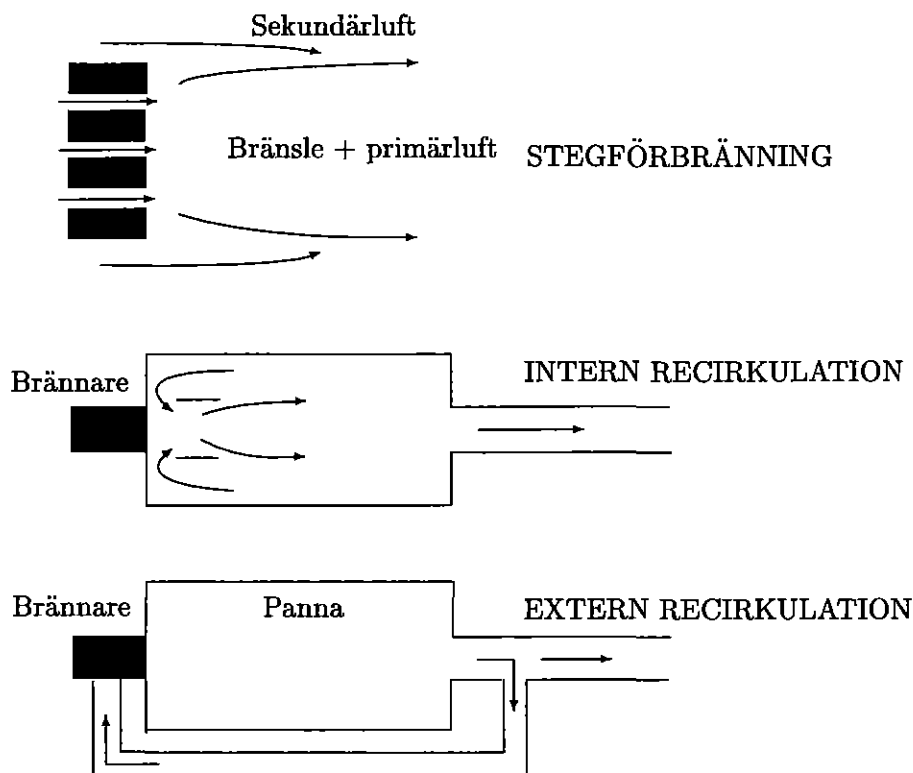
Fläktgasbrännare med låg- NO_x -teknik uppvisar inte så låga emissioner som förblandningsbrännare och överstökiometrisk atmosfärsbrännare.

Fläktgasbrännare används i pannor från små hetvattenpannor till kraftverkspannor. Brännareffekten varierar från ca 10 kW till flera tiotals MW. Fläktgasbrännare används i större värmepannor och levereras oftast separat. Samma brännare kan då bilda olika stora mängder NO_x beroende på strömningsbilden i eldstaden. Enligt [23] är NO_x -emissionerna ca 20% lägre i en 3-stråkspanna än i en 2-stråkspanna. I de fall där brännaren och pannan bildar en enhet kan delarna anpassas till varandra så att NO_x -bildningen hålls låg. De tekniker och brännarkonstruktioner som används för låga NO_x -emissioner i pannor är:

- stegförbränning
- avgasrecirkulation, intern eller extern
- ytförbränning i brännare med fullständig förblandning av bränsle och luft

Avgasrecirkulation i fläktgasbrännare görs internt eller externt. Vid intern avgasrecirkulation söker man utforma brännarens flamhuvud så att avgaser från

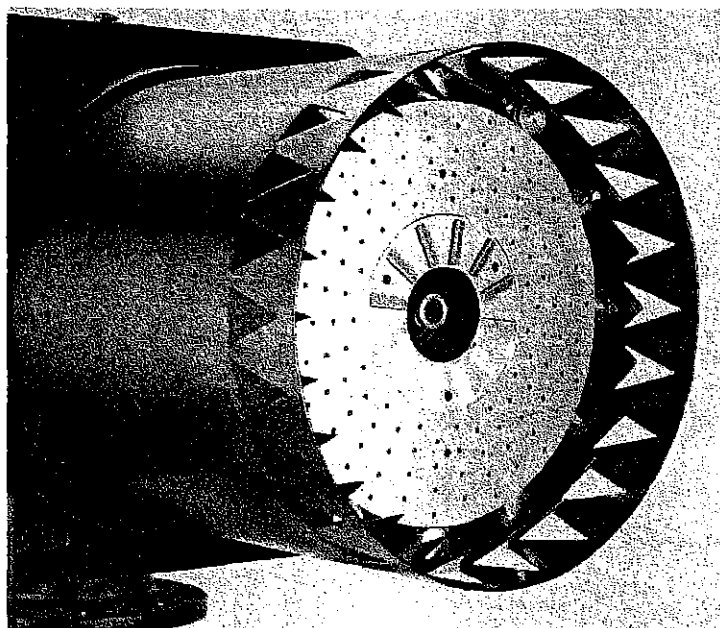
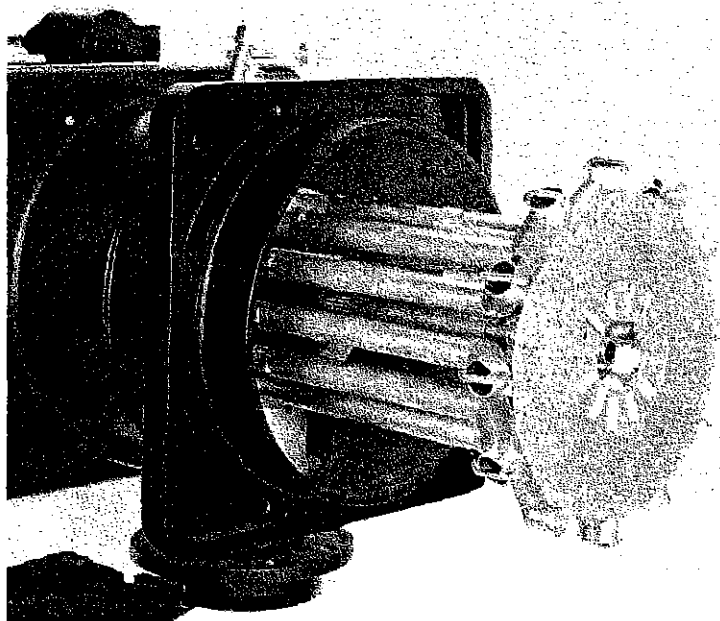
eldstaden kan strömma in i flammen och sänka NO_x -bildningen. Principskisser för de två första teknikerna visas i figur 3.1.



Figur 3.1: Principer för NO_x -reduktion genom stegförbränning och avgasrecirkulation

3.1.1 Några olika brännare

Elco tillverkar fläktgasbrännare med särskilda låg- NO_x -åtgärder i effektområdet 10–40000 kW. I figur 3.2 visas flamhuvudet utan och med flamröret. Den övre bilden visar hur gasdysorna placerats så att gasen tillförs radiellt, tvärs luftströmmen, omedelbart före flamhållaren. Den nedre bilden visar flamröret monterat. De utstansade öppningarna (tekniken benämns Delta) ses tydligt. Här strömmar avgaser från eldstaden in och blandas med bränsle och förbränningsluft. Emissionerna uppgår till 14–29 mg/MJ enligt mätningar från ett flertal installationer. De lägsta värdena återfinns i små pannor medan värdena 22–29 mg/MJ återfinns för brännareffekter överstigande 6 MW. Weishaupt har brännare med likartade prestanda.



Figur 3.2: Utformning av Elcos fläktgasbrännare där avgasrecirkulation används för NO_x -reduktion

Tyska företaget Saacke tillverkar låg- NO_x -brännare för olika slags industripannor. För gaseldning kallas modellerna Teminox. Flerstegsförbränning och intern avgasrecirkulation utnyttjas. Primärluften tillförs i två steg med kraftig rotation. Detta sägs ge en god blandning av gas och luft samt eliminera punktvisa höga temperaturer. Primärluften utgör 70–90% av förbränningsluften vid låga laster och sjunker till 15–30% vid höga laster. Sekundärluften tillsätts också i två steg runt flammen. Detta görs i dysor som ger hög utströmningshastighet. Inblandning av avgaser underlättas därmed. NO_x -emissionerna ligger i området 16–27 mg/MJ (60–100 mg/m³ 3% O₂). Vid oljeeldning är emissionerna ca 25% högre. Vid låga laster stiger NO_x -emissionerna för både olja och gas. Brännarna levereras för olika pannkonstruktioner i effektområdet 420–12800 kW.

En tidig låg- NO_x -brännare, som utvecklades i början av 1980-talet, är Babcock ASR. Stegförbränning och avgasrecirkulation används för NO_x -reduktion. I denna brännare sjunker NO_x -emissionerna vid dellast. Vid 37°C förbränningsluftstemperatur är NO_x -emissionerna 20–30 mg/MJ i intervallet 30–100% last. Vid luftförvärmning stiger NO_x -halterna kraftigt.

I Nederländerna utvecklas idag teknik för att sänka emissionerna i befintliga fläktgasbrännare. Ett flamrör, Cyclonox, utvecklas för att ersätta det befintliga [24]. Tvåstegsförbränning och avgasrecirkulation utnyttjas för emissionsreduktion. I det första steget sätts flödet i stark rotation varvid det skapade undertrycket förbättrar inblandning av avgaser. Sekundärluft fullbordar förbränningen. Tekniken har provats med en brännare (25 kW) i fyra olika pannor. NO_x -emissionerna halverades och uppgick till 14–18 mg/MJ (50–67 mg/m³).

I tabell 3.1 ges en kort sammanställning av de beskrivna brännarna. Tabellen innehåller även några andra brännare som ger en bild av möjliga emissionsnivåer för olika utformningar av fläktgasbrännare. NO_x -nivåer klart under de angivna anges ibland för de olika brännarna. Detta beror ofta på eldstadens utformning och volym som påverkar strömningssbild, värmeöverföring m.m. De i tabellen givna värdena är de högsta värden som leverantören anger.

3.1.2 Brännare sammanbyggda med pannan

Två exempel på amerikanska ångpannor med låg- NO_x -brännare är värda att nämna. I båda fallen är brännaren till skillnad från andra beskrivna brännare i kapitlet integrerad med pannan och båda är idag kommersiellt tillgängliga produkter. Det första exemplet är en mindre ångpanna med pulsbrännare som funnits på marknaden under några år, Fulton Lo NO_x Pulse Combustion Steam Boiler, Pannan finns i tre storlekar, 75–175 kW uteffekt. Fältmätningar har visat NO_x -emissioner på 19–33 mg/MJ [27]. Det andra exemplet är en brännare, Donlee TurboFire, där låga NO_x -halter uppnås genom cyclonförbränning och stegförbränning [28]. Den starka virvelbildningen blandar in avgaser i förbränningszonen och sänker NO_x -bildningen. Till den aktuella

Tabell 3.1: Gasbrännare med låga NO_x-emissioner för ång- och hetvattenpannor

Fabrikat	Modell	Teknik	Effekt (kW)	NO _x (mg/MJ)	CO (mg/MJ)	Anm, Ref
Babcock	ASR	A, B	–	20–30	–	[25]
Elco	Delta	A	10–40 000	14–29	–	Mätdata
Fröling/Giersch	–	C	70–350	18–22	3	[26]
Hamworthy	DF/DFL	A, B	4–90 MW	<30	–	Ångpannor
Körting	–	A, B	1–25 MW	21	–	[26]
Nu-Way	–	–	17–350	14–17	1–8	
Saacke	Teminox	A, B	420–12 000	16–27	<6	
Weishaupt	G1–G7 NA	A	150–1 550	17–22	3–14	
Weishaupt	WG10–WG30	A	14–270	17–22	3–14	

A – Avgasrecirkulation

B – Stegförbränning

C – Ånginsprutning

ångpannan kunde tidigare ånginsprutning användas, vilket dock krävde vattentillgång och sänkte pannans verkningsgrad ca 4%. Genom en tvåstegsförbränning i en cyklon kunde NO_x-emissionerna sänkas till 15–20 mg/MJ. Brännare med cyklonförbränning sägs kräva större utrymme, vilket skulle kunna vara ett problem vid byte från konventionell teknik.

3.1.3 Förändras värmeöverföringen i samband med NO_x-reduktion?

Konvertering av en panna till naturgas från t ex olja innebär en förändrad värmeöverföring både i eldstaden och i det efterföljande avgasstråket. Naturgasflamman lägre strålning innebär att avgastemperaturen vid eldstadens slut är högre än vid oljeeldning. Detta innebär ibland en risk för materialöverhettning. Flammen från en låg-NO_x-brännare är ofta längre än från andra brännare, vilket kan ge problem med att flammen når pannans bakre vägg. Medför låg-NO_x-teknik att värmeöverföringen i pannan på något sätt ändras?

I en holländsk undersökning [29] studerades bl a inflytandet på verkningsgraden då låg-NO_x-brännare användes. Inga märkbara skillnader i verkningsgrader noterades med olika tekniker. Dock skiljer sig förloppen längs avgasstråket. Brännare med extern avgasrecirkulation ger en lägre flamtemperatur. Värmeöverföringen i eldstaden minskar men kompenseras av en förbättrad värmeöverföring senare i pannan tack vare att avgasrecirkulationen medför ett större massflöde längs avgasstråket. Brännare med ytförbränning har en högre värmeöverföring i eldstaden som dock inte kan tas tillvara senare i pannan. Kunskapen om värmeöverföringens eventuella förändring vid användning av låg-NO_x-

teknik är uppenbart inte tillräckligt utredd och vidare arbeten kan förväntas eller bör initieras.

3.2 Fiberbrännare

Under 1980-talet presenterades många rapporter om teknik för ytförbränning i fiberplattor. Två fibermaterial var mest aktuella, keramfibrer (Alzeta, USA) och metallfibrer (Bekaert (Acotech), Belgien). Mycket goda emissionsvärden angavs som fördelar för tekniken. I detta avsnitt är samlat de kända applikationer där dessa material används idag. Fibermaterialet kan användas till både brännare för pannor och brännare för industriprocesser.

3.2.1 Metallfiberbrännare

Grundläggande egenskaper hos metallfiberbrännare beskrivs i tex [30] och [31]. De produkter som nämns i avsnittet är de som nämndes av tillverkaren Acotech vid en förfrågan om olika applikationer. Metallfiberbrännaren (MFB) används huvudsakligen av företag i Japan och USA. De olika applikationerna är:

1. Pannor för radiatorsystem, tappvarmvatten eller simbassänger (Raypak, USA)
2. Pannor för industribruk (Parker, USA)
3. Ångpannor (Tokyo Gas, Japan)

Pannan från Raypak [32] är som nämnts avsedd för radiatorsystem, tappvarmvattenproduktion eller uppvärmning av simbassänger. Deras datablad ger inga detaljerade uppgifter men det tycks som om metallfiberbrännaren används som ersättning för atmosfärsbrännare i deras befintliga pannor. Pannorna finns i 5 storlekar från ca 550 kW till 1050 kW. Pannverkningsgraden anges till 90% (driftförutsättningarna är ej givna). NO_x -emissionerna uppges understiga 15 mg/MJ (<30 ppm).

Ångpannan från Parker [33] är en befintlig pannkonstruktion där atmosfärsbrännare ersätts av MFB. Produktprogrammet innehåller en liten ångpanna och en hetvattenpanna.

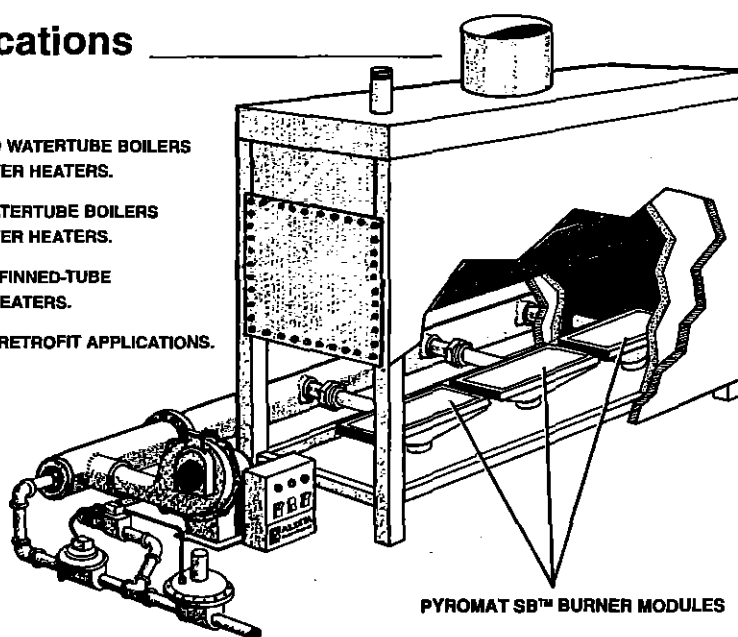
Två japanska ångpannor använder MFB, IHI K-2000E [34] och Samson Super Scrum [35]. Databladerna (på japanska) ger intrycket av att det rör sig om samma grundkonstruktion. Tokyo Gas anges ha utvecklat båda pannorna och därefter gett licenser till de båda tillverkarna. Brännareffekten anges till 1,3 MW med

en verkningsgrad på 96% (driftförutsättningarna är ej givna). Ångtrycket tycks vara ca 10 bar.

Alzeta marknadsför två konstruktioner av metallfiberbrännare, en plan [36] och en cylindrisk [37]. Den plana varianten finns i enheter om 146 kW som monteras i färdiga brännare i området 293 kW–1,3 MW. NO_x-värden under 10 mg/MJ (20 ppm) anges. Nödvändigt gastryck är 35 mbar. Brännaren kan väljas som enstegsbrännare, tvåstegsbrännare eller som modulerande brännare med reglerområdet 2,5:1. Typisk användning är som ersättning för atmosfärsbrännare eller i nykonstruktioner. I figur 3.3 visas hur brännarmodulerna kan monteras i en panna som tidigare varit försedd med atmosfärsbrännare.

Applications

- INCLINED WATERTUBE BOILERS AND WATER HEATERS.
- BENT WATERTUBE BOILERS AND WATER HEATERS.
- COPPER FINNED-TUBE WATER HEATERS.
- NEW OR RETROFIT APPLICATIONS.

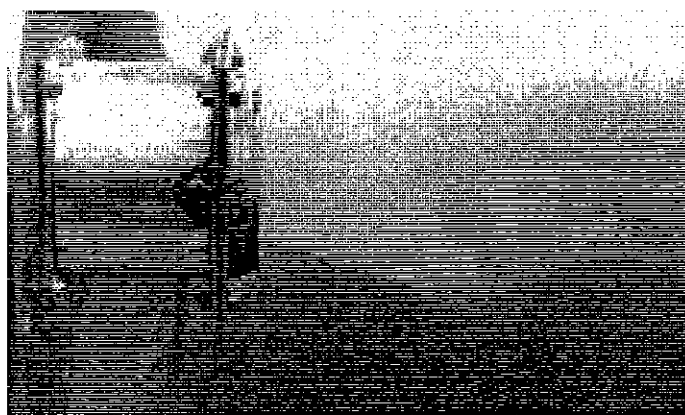


Figur 3.3: Montering av Alzeta Pyromat SB metallfiberbrännarmoduler i en panna som konstruerats för atmosfärsbrännare

Alzeta Pyromat CSB är en cylindrisk brännare som tillverkas i moduler som sätts samman till en komplett brännare. Varje modul kan ha en effekt upp till 4 MW med en sammanlagd effekt på maximalt 36 MW. NO_x-emissionerna understiger 10 mg/MJ (20 ppm). En modul på 4 MW har dimensionerna 760 mm längd och 760 mm diameter. Detta ger en ytbelastning på 2200 kW/m². Brännarens reglerområde är 8:1.

Av exemplen framgår att MFB används i större applikationer, ej i villapannor m.m. Det är vidare oklart hur omfattande användningen är i anläggningsspecifika installationer. Exempelvis erbjuder det brittiska företaget Advanced Combustion Engineering brännare byggda kring metallfiberplattor. Brännarna byggs individuellt för varje installation.

Gasunie Research i Holland har även provat metallfibermaterialet i en sk axialbrännare [38] eller "Bluff-Body"-brännare med förblandning. Brännaren består av ett cylindriskt rör som avslutas med en slät metallfiberplatta vinkelrätt mot strömningsriktningen. Ytbelastningen är mycket hög, 5000–20000 kW/m², och man kan då inte längre tala om ytförbränning utan en diffus blå flamma bildas, se figur 3.4.



Figur 3.4: Axial brännare med metallfiberyta provad av Gasunie Research

För att säkerställa flamstabilitet vid dessa höga ytbelastningar anger Acotech att en liten platta monteras strax före metallfiberplattan och att en kant omger fiberplattan. Detta skapar ett flödesfält som stabiliserar förbränningen. Brännaren ger mycket låga NO_x-värden. Enligt Acotech är NO_x-emissionerna <10 mg/MJ för belastningar mellan 5000 kW/m² och 20000 kW/m², med svagt sjunkande halter med de högre ytbelastningarna.

3.2.2 Keramfiberbrännare

Alzetas keramfiberbrännare har tidigare provats i Sverige. En brännare på 140 kW monterades 1990 i en panna i Svedala. Erfarenheterna av brännaren har varit goda och en liten verkningsgradsökning konstaterades. Det tyska företaget Dreizler marknadsför en brännare [39], Magma, uppbyggd av cylindriska element av Alzetas keramfibrer. Dreizler levererar brännare från 77 kW till ca 5000 kW, vilket innebär att fiberbrännaren kan användas i pannor som kan komma att omfattas av NO_x-avgifter. En mindre studie från Sydkraft Konsult [40] visar dock att den aktuella keramfiberbrännaren inte ger någon ekonomisk fördel jämfört med att använda en konventionell fläktgasbrännare med låg-NO_x-teknik.

Global Environmental Solutions tillverkar keramfiberbrännare för olika applikationer. Värmepannor, spisar och industriprocesser ges som exempel på användningsområden [41]. Fibrerna är tillverkade av kiselkarbid (SiC). Plana,

cylindriska och halvsfäriska utföranden föreslås av tillverkaren. Emissionerna och reglerområdet är beroende av brännarens utformning. Ett exempel är den halvsfäriska brännaren som ger NO_x - och CO-emissioner under 5 mg/MJ med reglerområdet 1:5. Effektområdet anges till 3–300 kW. Plana brännare har NO_x -emissioner <12 mg/MJ. Försök har gjorts av Gasunie Research med fiber-materialet i en atmosfärsbrännare och NO_x -emissionerna rapporteras då vara <15 mg/MJ. Materialet används i förblandningsbrännare för vägghängda kondensationspannor från Schäfer Interdomo med värmeeffekterna 10, 20 och 30 kW. NO_x -emissionerna från dessa pannor är 3–5 mg/MJ medan CO-emissionerna är 2–4 mg/MJ. Inget sägs om andra användare ej heller om priser och livslängd i jämförelse med andra fibermaterial.

I [16] (1994) nämns en kondensationspanna med keramfiberbrännare, Buderus SB 305 UVM, med 6 olika pannor inom effektområdet 39–110 kW. Brännartillverkaren är ej angiven. NO_x -emissionerna anges till 6 mg/MJ och CO till 3 mg/MJ. Pannan tycks vara konstruerad med utgångspunkt från fiberbrännaren. Eldstaden består av en rostfri slät stålcyllinder med den likaså cylindriskt formade brännaren monterad mot ena kortsidan.

3.2.3 Andra ytförbränningstekniker

Flera andra metoder för ytförbränning i porösa skikt används idag kommersiellt eller är under prototypprovning. I en del av dessa brännare är ytbelastningen betydligt högre än för många fiberbrännare.

Eclipse tillverkar en strålningsbrännare, Ultra-Rad, byggd av ett keramiskt skum. GRI har stött utvecklingen av brännaren. Brännaren levereras i enheter om 7,3 kW (150×150 mm yta). Reglerbarheten anges till ca 1:3 och luftöverskottet skall vara minst 20% för att säkerställa flamstabilitet och reglerbarhet. Förbränningsluften måste filtreras så att brännarmaterialet inte blockeras. Yteffekten är låg, ca 325 kW/m², men detta ger istället ett högt strålningsutbyte, ca 60%. Brännarenheterna monteras i rad med anslutning till en gemensam ledning för bränsle och luft. Drifterfarenheterna med materialet har varit mindre goda varför ytan idag består av en metallfiberplatta.

Vid Gastec i Nederländerna pågår ett arbete där brännarytan består av sintrad metall [42]. Brännaren har undersökts i laboratoriemiljö och visat sig ha följande prestanda. Yteffekten kunde varieras mellan 200 kW/m² och 16000 kW/m². Brännaren ger således ett mycket stort reglerområde. Intervallet kunde inte erhållas med alla provade luftöverskott (10–50%). NO_x -emissionerna är låga och ibland mycket låga. Vid 30% luftöverskott är NO_x -emissionerna högst ca 10 mg/MJ över hela belastningsintervallet. Vid 10% luftöverskott stiger emissionerna från 5 mg/MJ vid 200 kW/m² till ca 50 mg/MJ vid 1000 kW/m² för att därefter vara nära nog konstanta vid högre belastning. Det fortsatta arbetet

fokuseras mot studier av brännarens hålstruktur i syfte att ytterligare påverka tryckfall och emissioner.

3.2.4 Kommentarer

Trots stora utvecklingsinsatser och uppmärksamhet har ytförbränning i porösa material inte fått någon större spridning utöver specialapplikationer och en del villapannor. Två problem framstår som de viktigaste, brännarens kostnad och möjligheten till höga brännareffekter. Det senare är ett rent tekniskt problem som hör samman med den stora brännaryta som behövs och att brännaren skall monteras i pannor konstruerade för fläktgasbrännare. Troligen kommer ytförbränning inte att få någon större användning i dagens pannor om inte hög ytbelastning med bibehållande av låga emissioner, ca 10 mg/MJ, kan erhållas.

Först när pannor och brännare med låga yteffekter konstrueras som en enhet finns det reella möjligheter att återfinna dessa brännare i sammanhang där NO_x -avgifter är aktuella. Höga brännareffekter i relativt kompakta pannor kan bara fås med någon form av ytförstoring av brännaren. I brännare med ytförbränning är det viktigt att strålände ytor inte är inom synhåll för varandra och då måste eldstadens form följa brännarens för att undvika överhettning av brännarmaterialet. Ett annat möjligt alternativ är att brännaren har en kontinuerligt ökande eller minskande tvärsnittsarea.

De holländska arbetena med bl a "axiella" brännare och skumbrännare har visat lovande prestanda. Någon av dessa utvecklingar skulle kunna vara bland de tekniker som ger de allra lägsta NO_x -emissionerna i pannor som kommer att omfattas av NO_x -avgifter. Dock finns uppgifter om att utvecklingen har avbrutits p g a livslängdsproblem [22].

3.3 Drifterfarenheter, kostnader och framtidsutsikter

Det finns ganska litet publicerat om drifterfarenheter av låg- NO_x -teknik för pannor. I Holland (Gasunie Research) gjordes en fältstudie av 42 pannor med låg- NO_x -brännare under 1993–1994 [23]. Panneffekterna var i området 1–2,5 MW. Pannorna skulle ha två reduktionstekniker, avgasrecirkulation eller stegförbränning. Brännarna skulle också ha betecknats som låg- NO_x -brännare vid installationen. Vid en första mätning återfanns NO_x -värden i intervallet 11–44 mg/MJ med medelvärdet 15 mg/MJ. CO-halterna understeg i de flesta fallen 15 mg/MJ (50 ppm). Vid den andra mätningen visade ca 10% av installationerna betydligt högre CO-värden, 44–89 mg/MJ. Det antogs att detta berodde på drift i gas/luft-regleringen. Slutsatsen var dock att låga NO_x -värden inte behöver in-

nebära höga CO-halter. En välkonstruerad brännare för dessa pannor kan idag ge ca 20 mg/MJ NO_x utan att lida av besvärande CO-emissioner. Vidare fann man ett samband mellan NO_x-halten och brännareffekt samt det första avgasstråkets yta.

I undersökningen från Gasunie Research uppskattades även brännarkostnaden med olika låg-NO_x-tekniker. Ytförbränning med låga yteffekter medför att brännaren är dubbelt så dyr som en konventionell brännare. Kostnaden skulle kunna reduceras vid höga yteffekter, 2000–20 000 kW/m², så att den blir lika med den konventionella brännarens. Så höga ytbelastningar anges vara förknippade med ca 2% sänkt verkningsgrad och brännare finns idag endast som prototyper. Konventionella tekniker som avgasrecirkulation och stegförbränning ger brännare med 100% respektive 10% högre kostnad. Brännare med kraftigt roterande flöde uppskattas bli något dyrare, 20% än konventionella brännare. Den tidigare nämnda "Bluff-body"-brännaren antas t o m bli något billigare än konventionella brännare. Gemensamt för alla dessa brännare är att de förväntas kunna ge 10–15 mg/MJ NO_x och <15 mg/MJ CO i ett kommersiellt skick.

3.4 Sammanfattande ord

Traditionella brännare är de närmaste åren de enda som kan användas i pannor som omfattas av NO_x-avgifter. Låg-NO_x-brännare till dessa pannor ger 15–25 mg/MJ. Tekniken är beprövad och bör inte ge några problem i normala panninstallationer.

Nackdelar med låg-NO_x-brännare, speciellt vid de allra lägsta NO_x-nivåerna, för olika typer av pannor är brännarens utrymmeskrav och dess reglerbarhet. Särskilt i samband med byte från gamla brännare kan detta vara ett potentiellt problem och kanske orsaka en liten försämring av pannans termiska prestanda. För fiberbrännare är ytbelastningen en begränsande faktor för höga effekter.

4

NO_x-reduktion i industriella processer

En mycket större variation av både processer och förbränningsutrustning återfinns bland industriprocesserna. Ofta är installationerna unika och skiftande NO_x-emissioner kan erhållas i olika installationer med samma brännare. Inga av tillämpningarna som berörs i kapitlet omfattas av NO_x-avgifter.

Beskrivningen av låg-NO_x-teknik för industriprocesser är uppdelad efter olika processer. De processer som behandlats är de som kan få en bredare användning i Sverige.

4.1 Värmeugnar

Industriugnar för värmebehandling, smältning etc har en större individuell utformning än hetvatten- eller ångpannor och förändringar av brännare och annan förbränningsutrustning får inte negativt påverka produktkvaliteten. Individuella lösningar är således vanligare än generella.

Strävan efter att höja verkningsgraden genom förvärmning av förbränningsluften resulterar också i höjd NO_x-bildning. Detta kan ofta inte kompenseras av den förbättrade verkningsgraden. Som exempel kan nämnas prov med en rekupe-rativ brännare i en aluminiumsmältugn i Värnamo [45]. Med den ursprungliga brännaren med kall förbränningsluft uppmättes NO_x-halten till 55 mg/MJ. För den rekuperativa brännaren beräknades den genomsnittliga NO_x-emissionen till 150 mg/MJ. Om man tar hänsyn till verkningsgradsökningen blir höjningen ca 40% jämfört med kalluftbrännaren. Av detta skäl kommer särskild vikt att läggas på NO_x-reducerande åtgärder i samband med luftförvärmning.

4.1.1 Ugnsp parametrar som påverkar NO_x-bildningen

Ett flertal parametrar inverkar på NO_x-bildningen i ugnar. Bland dessa finns bränsle, ugnstemperatur, luftförvärmning, brännarkonstruktion, luftöverskott, brännarens reglerbarhet, brännareffekt, ugnsutformning och syrehalt [46]. Bränslet anges vara en källa till varierande NO_x-bildning för olika gasformiga bränslen i samma brännare. Bränslen med högre förbränningshastighet ger högre NO_x-bildning. Exempelvis ger ett bränsle som innehåller CO och H₂ högre NO_x-emissioner än vad fallet är med naturgas [47, 48].

En viktig faktor för hur mycket NO_x som bildas i ugnen är inblandningen av ugnsatmosfär i flammen. Detta förklarar delvis varför vissa brännare ger lägre NO_x-emissioner redan utan särskilda åtgärder. I den närmast följande texten tydliggörs detta och i många av de sedan följande exemplen på låg-NO_x-brännare används avgasrecirkulation i olika utsträckning.

Några empiriska samband

En genomgång av uppmätta NO_x-halter i olika ugnbrännare har gjorts av Tomeczek [49]. Han utvecklade därefter samband för NO_x-bildningen med olika parametrar. Studien är intressant eftersom sambanden kan användas för en uppskattning av vilka reduktioner som kan uppnås med den brännartyp som används i den aktuella processen.

I brännare med extern avgasrecirkulation kan den möjliga reduktionen uppskattas med recirkulationsgraden r som anger andelen recirkulerad avgas. Förhållandet mellan NO_x vid avgasrecirkulation och utan avgasrecirkulation ($r = 0$) ges av

$$\frac{NO_x}{NO_x(r=0)} = \exp(-Ar) \quad (4.1)$$

Konstanten A har i olika undersökningar bestämts till $A = 4,9$ respektive $A = 9,6$.

Brännare med kraftig rotation av flödet i flammen orsakar att flammen breder ut sig över brännarstenen. Brännartypen har en relativt låg NO_x-bildning, som dock kan sänkas ytterligare. Den starka rotationen skapar ett undertryck vid flammans centrum. Detta orsakar ett inflöde av avgaser till flammen, intern avgasrecirkulation, från ugnsatmosfären. En starkare rotation ökar avgasrecirkulationen och sänker NO_x-bildningen. Andra parametrar som enligt undersökningar påverkar NO_x-bildningen är förbränningsluftens rotation, brännardysans form och gasdysornas placering. Med swirltalet S och luftförvärmningen T_a som parameter kan den möjliga NO_x-förändringen beräknas enligt

$$\frac{NO_x}{NO_x(S=1, T_a=50^\circ\text{C})} = \left(1 + \frac{1,5 \cdot 10^{-8}(T_a - 50)^3}{S}\right) \exp(-(S^{1/3} - 1)) \quad (4.2)$$

Den höga rörelsemängden i flamman hos höghastighetsbrännare medför att avgaser blandas in i flamman och skapar en intern avgasrecirkulation. Luftförvärmning ökar rörelsemängden men också NO_x -bildningen. Används luftens densitet vid brännaröppningen ρ_a , lufthastigheten på samma plats w_a och avgasernas densitet i ugnen ρ_f kan en parameter M skapas

$$M = \rho_a w_a \left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{1/2} \quad (4.3)$$

För flammor utan rotation kan förändringen av NO_x -bildningen uppskattas med hjälp av

$$\frac{NO_x}{NO_x(M_0 = 50 \text{ kg/sm}^2)} = \exp(-A\sqrt{M/M_0 - 1}) \quad (4.4)$$

med $A = 1$ och $M_0 = 79 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$.

Tvåstegsförbränning är en känd teknik för NO_x -reduktion. Även här ges samband för möjliga reduktioner. För höghastighetsbrännare med lufttillförsel i två steg, där lufttalet i första steget $\lambda_1 = 0,5-1,0$ blir

$$\frac{NO_x(\text{två steg})}{NO_x(\text{ett steg})} = \frac{\lambda_1 - 0,5^2}{0,5} \lambda_1 + B \exp(3,5(\lambda_1 - 0,5)) + C \exp(2(\lambda_1 - 0,5)) \quad (4.5)$$

där

$$B = (0,92 \cdot 10^{-4}(T_{a1} - 20))(1 - \lambda_1) \quad (4.6)$$

$$C = 4,2 \cdot 10^{-4}(T_{a2} - 20)(1 - \lambda_1) \quad (4.7)$$

där T_{a1} och T_{a2} är primär- respektive sekundärluftens temperatur ($^\circ\text{C}$).

För brännare med enstegsförbränning kan inflytandet av förbränningsluftens respektive ugnsatmosfärens temperatur klarläggas på följande sätt. Om förbränningsluftens temperatur betecknas med T_a och ugnsatmosfärens med T_f kan NO_x -bildningen beskrivas med

$$\frac{NO_x}{NO_x(T_a = 25^\circ\text{C}, T_f = 800^\circ\text{C})} = a \exp\left(\frac{-b}{cT_a + dT_f + e}\right) \quad (4.8)$$

där mätdata från två olika undersökningar ger följande värden.

$a = 1220$	$a = 1737$
$b = 6680$	$b = 10600$
$c = 1$	$c = 0,3$
$d = 0,144$	$d = 1$
$e = 800$	$e = 1155$
$T_a < 800^\circ\text{C}$	$T_a < 600^\circ\text{C}$
$T_f = 800\text{--}1200^\circ\text{C}$	$T_f = 800\text{--}1600^\circ\text{C}$

Lufttalet påverkar flamtemperaturen och därmed också NO_x -bildningen. Förändringen kan beskrivas med

$$\frac{NO_x(\lambda)}{NO_{x,max}} = \exp\left(\frac{-K(\lambda - \lambda_{max})^2}{\lambda}\right) \quad (4.9)$$

där

$$\lambda_{max} = 1,1 + 0,2 \cdot 10^{-9}(T_a - 20)^3 \quad (4.10)$$

där T_a är lufttemperaturen och $K = 6$ utifrån mätdata. Man har funnit att vid tvåstegsförbränning och stor flamutbredning har bl a placeringen och antalet sekundärluftdysor inflytande på inblandningen av sekundärluft i avgaserna och då också NO_x -reduktionen. En effektiv diameter d_e kan beräknas med antalet sekundärluftdysor N , dysdiametern, d_n , diametern D_n för cirkeln som bildas av dysorna och densiteten för luften i sekundärdysan ρ_n och avgasdensiteten ρ_f som

$$d_e = N^{1/2} D_n (\rho_n / \rho_f)^{1/2} \quad (4.11)$$

och vidare en parameter Z som definieras som

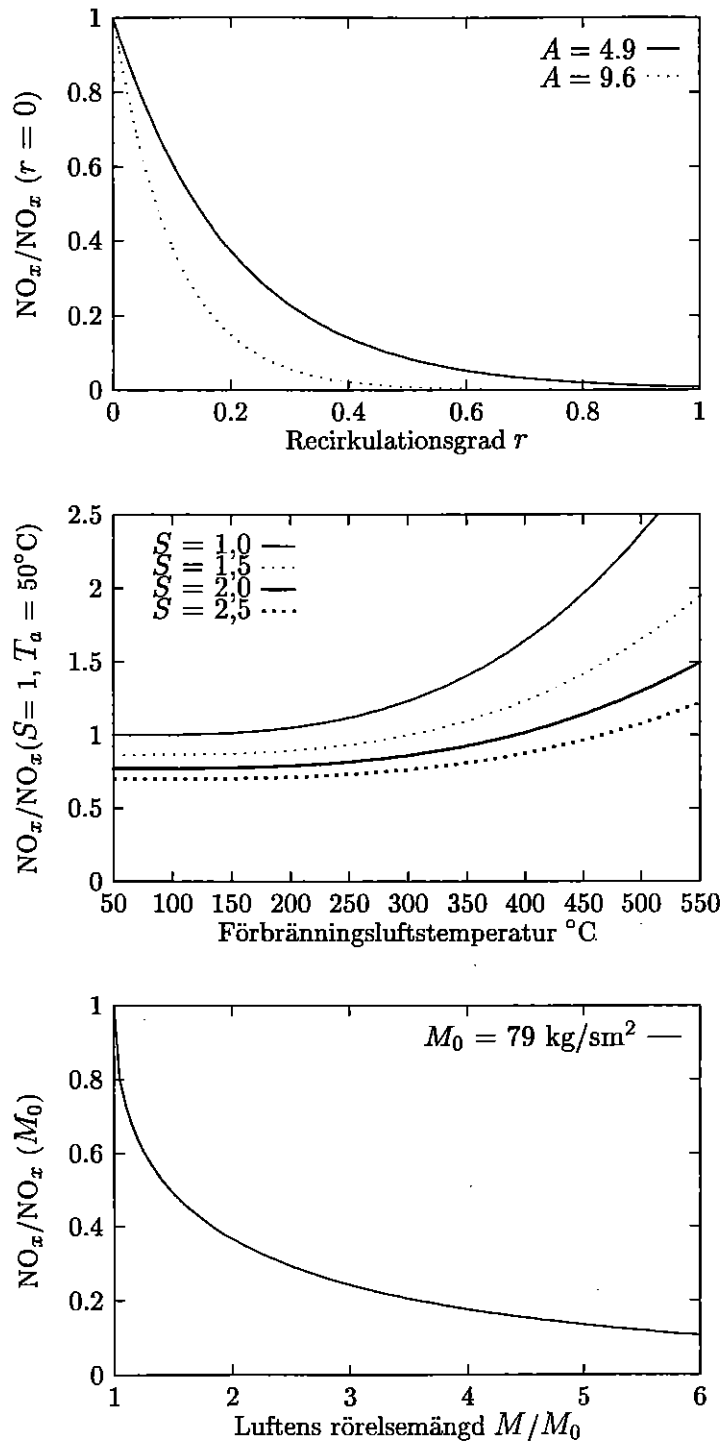
$$Z = \frac{d_e}{\pi D_n / N} = \frac{N^{3/2} d_n}{\pi D_n} \left(\frac{\rho_n}{\rho_f}\right)^{1/2} \quad (4.12)$$

NO_x -bildningen beräknas enligt

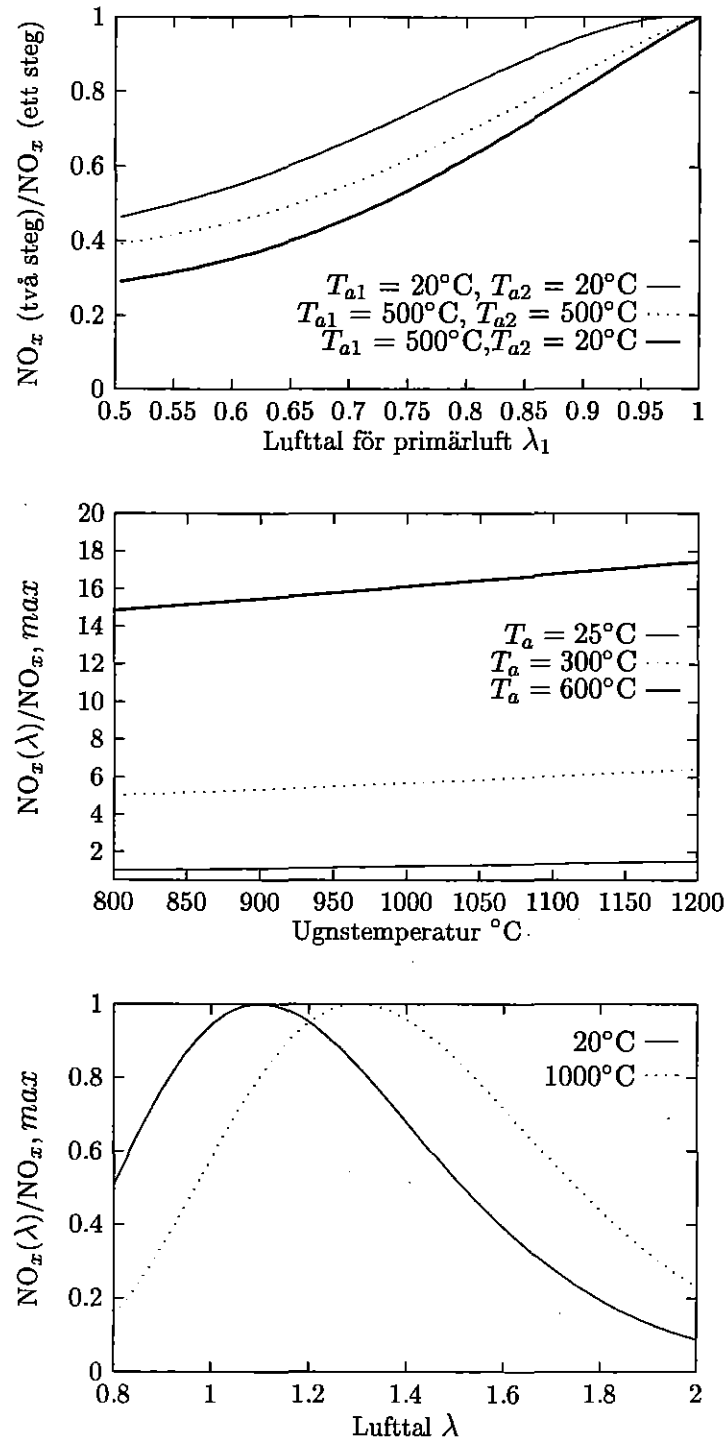
$$\frac{NO_x}{NO_x(\text{ett steg})} = \exp(-0,4/Z) \quad (4.13)$$

I figurerna 4.1–4.3 illustreras NO_x -bildningen enligt de samband som presenterats.

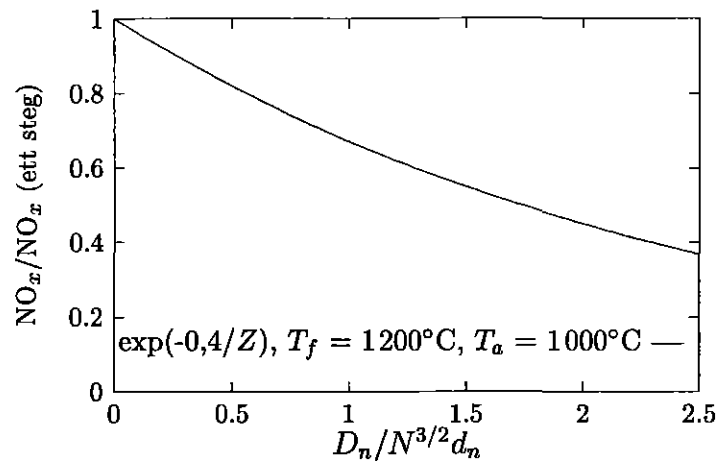
Det skall återigen noteras att de presenterade ekvationerna inte är härledda ur fysikaliska samband utan bestämda utifrån mätvärden. Sambanden har i begränsad omfattning en fysisk grund och kan därför inte enkelt förbättras.



Figur 4.1: Möjlig NO_x -reduktion vid avgasrecirkulation (överst), swirl (mitten) och i höghastighetsbrännare. Se texten på sidan 34 för förklaringar av parametrar



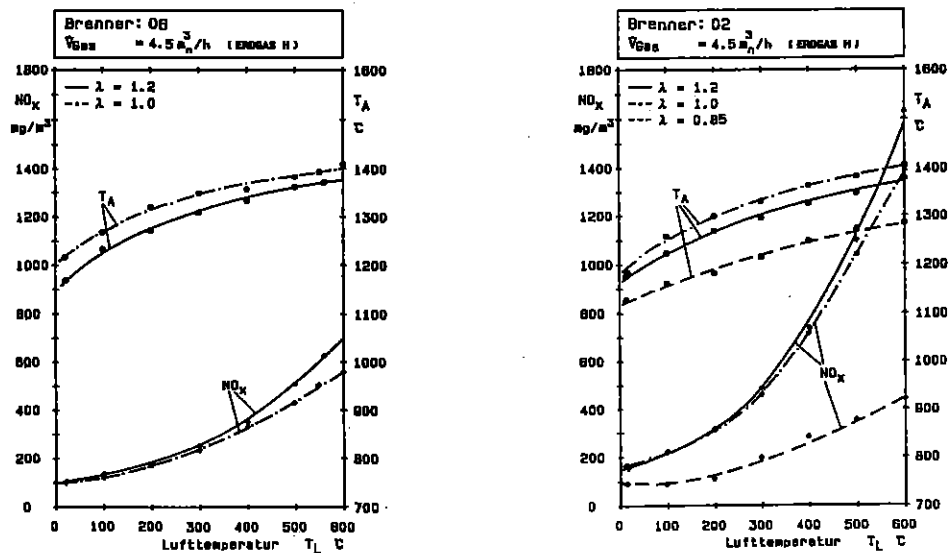
Figur 4.2: Möjlig NO_x-reduktion vid tvåstegsförbränning (överst), varierande ugnstemperatur (mitten) och variation av luftöverskottet



Figur 4.3: Möjlig NO_x -reduktion genom tvåstegsförbränning och antalet dysor

Några laboratorieprov med låg- NO_x -teknik

Strävandena att höja verkningsgraden i ugnar med hjälp av luftförvärmning höjer som tidigare nämnts NO_x -emissionerna. I figur 4.4, ur en tysk doktorsavhandling av Flamme, visas hur NO_x -emissionerna påverkas av luftförvärmningen i två brännare [50].



Figur 4.4: NO_x -bildningens beroende av luftförvärmning (mätdata)

Som framgår av bilderna höjs NO_x -emissionerna kraftigt vid ökad luftförvärmning. Den maximala NO_x -reduktionen som uppmättes visas i tabell 4.1. Med ter-

misk NO_x -reduktion menas effekter av ändrad temperatur som följd av ändrat luftöverskott.

Tabell 4.1: Maximalt uppnådda NO_x -reduktioner i laboratorieförsök med brännare för ugnar

Reduktionsmetod	Reduktion (%)
Tvåstegstillförsel av luft (Kall sekundärbränningsluft)	90
Tvåstegs bränsletillförsel	70
Avgasrecirkulation	86
Termisk NO_x -reduktion	55

Översatt till absoluta värden så kunde NO_x -emissionerna sänkas till ca 75 mg/MJ vid tvåstegs bränsletillförsel vid en luftförvärmning på 400°C. Vid tvåstegs lufttillförsel kunde NO_x -emissionerna sänkas till ca 50 respektive 70 mg/MJ då sekundärluftens temperatur var 20°C och 440–500°C. Primärlufttemperaturen var då 500°C. Med avgasrecirkulation varierade NO_x -halterna från ca 15 mg/MJ vid 27°C förbränningslufttemperatur till 40–45 mg/MJ vid 540°C lufttemperatur. Med avgasrecirkulation och tvåstegs lufttillförsel kunde NO_x -halten sänkas till 40 mg/MJ med 440–500°C sekundärlufttemperatur. Flamme har fortsatt arbetet vid Gas Wärme Institut i Essen och presenterat en mängd data av grundläggande karaktär rörande högtemperaturprocesser.

4.1.2 Låg- NO_x -brännare

I Tyskland är gränsvärdet för värmeprocesser (TA-Luft) 500 mg/m³ eller ca 125 mg/MJ. Flera brännare med värmeåtervinning klarar detta gränsvärde. Som tidigare visats i det refererade arbetet från Gas Wärme Institut kunde NO_x -emissionerna sänkas betydligt under detta gränsvärde. Nya konstruktioner har nyligen introducerats på marknaden eller presenterats på konferenser eller i tidskrifter. Konstruktionerna ger jämfört med tidigare teknik mycket låga NO_x -emissioner. I detta avsnitt beskrivs huvudsakligen de nya teknikerna.

Rekuperativa brännare

Det amerikanska företaget Hauck introducerade under hösten 1995 den rekupe-
rativa brännaren StAR HE (Staged Air Recirculation High Efficiency) på den amerikanska marknaden [51]–[53]. NO_x -emissionerna anges till 15–25 mg/MJ (25–45 ppm, O_2 -halt ej angiven) vid 450°C lufttemperatur och över hela lastområdet. I brännaren används stegförbränning och intern avgasrecirkulation. Idag finns en 600 kW brännare för smidesugnar. Brännare med högre effekter planeras för aluminiumsmältning (ca 4–6 MW). Enligt uppgift är brännaren upp till ca 4 gånger dyrare än en vanlig brännare utan värmeåtervinning från Hauck.

Regenerativa brännare

En extrem form av avgasrecirkulation utnyttjas i den sk Flox-tekniken (Flame-Less Oxidation) [54]. En stor del av ugnsatmosfären blandas in i bränsle/luftblandningen som en följd av dysornas placering och dimensionering. Detta minskar de maximala temperaturerna i flammen. Brännaren arbetar som en vanlig höghastighetsbrännare upp till ugnstemperaturer omkring 850°C. Därefter används andra luftdysor och inblandningen av ugnsatmosfär i flammen ökar drastiskt. Tekniken används i olika brännare, med och utan förvärmning av förbränningsluften. Som ett exempel på NO_x-emissionerna kan tas en regenerativ utformning där emissionerna är ca 16 mg/MJ (30 ppm, 2% O₂) vid 900°C ugnstemperatur och ca 750°C luftförvärmning och sedan stiger till ca 55 mg/MJ (100 ppm, 2% O₂) vid 1300°C ugnstemperatur och 1000°C lufttemperatur.

En teknik som påminner om Flox används av North American i deras regenerativa brännare TwinBed II. Tekniken som används kallas LNI (Low NO_x Injection), är utvecklad av Tokyo Gas. Brännaren arbetar i två lägen. Det första är när ugnsatmosfärens temperatur är lägre än bränslets självantändningstemperatur och det andra driftläget används över självantändningstemperaturen. Under självantändningstemperaturen fungerar brännaren som en vanlig regenerativ brännare utan några särskilda åtgärder att minska NO_x-bildningen. När temperaturen är högre än självantändningstemperaturen växlas bränsletillförseln till dysor vid sidan av brännaröppningen. Detta ger en stegvis inblandning av bränsle samt en ökad inblandning av ugnsatmosfär i förbränningszonen. NO_x-emissionerna stiger med ökande ugnstemperatur. Exempelvis är emissionerna 55 mg/MJ (100 ppm 3% O₂) vid 1300°C ugnstemperatur. Brännaren jämförs med regenerativa brännare med extern avgasrecirkulation, som ger betydligt högre NO_x-värden samt sänkt verkningsgrad. Sammantaget kan sägas att brännaren uppvisar klara likheter med Flox-tekniken både avseende funktion och prestanda.

4.1.3 Sammanställning av brännare

I tabell 4.2 ges en sammanställning av de beskrivna brännarnas egenskaper. Några andra brännare är medtagna för jämförelse. Tabellen är inte komplett utan visar endast ett axplock av låg-NO_x-brännare för högtemperaturprocesser. Vid en jämförelse med data från Flammes undersökningar visar det sig att de låg-NO_x-brännare som funnits några år på marknaden ger högre NO_x-halter. Däremot finns det en överensstämmelse mellan de lägsta NO_x-halterna i Flammes undersökning och de bästa låg-NO_x-brännarna som idag befinner sig i prototyp- eller fältförsökstadiet.

Tillverkare	Modell	Effekt (kW)	Metod	NO _x (mg/MJ)	CO (mg/MJ)	T _{luft} (°C)	Anm, status, Ref
REKUPERATIVA BRÄNNARE							
Aichelin	Noxmat	7-160	C	<125	-	-	Kommersiellt tillg.
LBE	Ecomax	15-250	C	<125	-	-	Kommersiellt tillg.
Altex	TCLEB	-	A	<50	<60 ppm	833	Prototyp, [55]
CGRI	-	450	A, C	<20	<20	600	Prototyp, [56]
Eclipse	Thermjet	150-450	C	<20	30 ppm	955	Kommersiellt tillg. Högt λ
Stordy	Lynx	55-410	C	80	-	600	Kommersiellt tillg.
REGENERATIVA BRÄNNARE							
North American	TwinBed II	-	B	55	-	1300	
WG Processtechnik	Regemat	-	B	50	-	1000	
STRÅLNINGSBRÄNNARE							
Selas	K900	396	-	<13	-	-	Flatflammebrännare

A - Intern recirkulation

B - Extrem intern recirkulation

C - Stegförbränning

Tabell 4.2: Exempel på låg-NO_x-brännare för industriugnar

4.2 Varmluftsgenerering

I detta avsnitt behandlas de brännare som används för att värma luft för torkning etc. Oftast används ett mycket högt luftöverskott om NO_x -bildningen skall hållas på en mycket låg nivå. NO_x -emissioner under 5 ppm är fullt möjliga att uppnå. Det höga luftöverskottet sänker flamtemperaturen till nivåer där CO-bildningen riskerar att öka kraftigt. Värmeisolering av flammen krävs för att förhindra detta. Nackdelar med dessa konstruktioner är det höga priset och brännarens storlek, flera meters längd för en brännare på några hundra kW.

Den första mer kända brännaren av denna typ är SINOX-I från LOI i Tyskland. Brännaren utvecklades för direkttorkning av malt där höga NO_x -halter bidrog till bildandet av cancerogena nitrosaminer. En annan brännare av liknande konstruktion utvecklades av Urquhart. Under senare år tycks intresset för direkttorkning av livsmedel ha minskat.

En annan brännarkonstruktion som möjliggör låga NO_x -emissioner är kanalbrännaren. Som exempel på en ny kanalbrännare med mycket låga NO_x -emissioner tas en ny brännare från Eclipse. Brännaren, Eclipse Minnox, utnyttjar främst ett mycket högt luftöverskott, maximalt 80%, och förblandning för att nå NO_x -emissioner på 2–3 mg/MJ (<5 ppm 3% O_2) och CO-emissioner understigande 3–4 mg/MJ (10 ppm) [57]. Brännaren visas i figur 4.5.

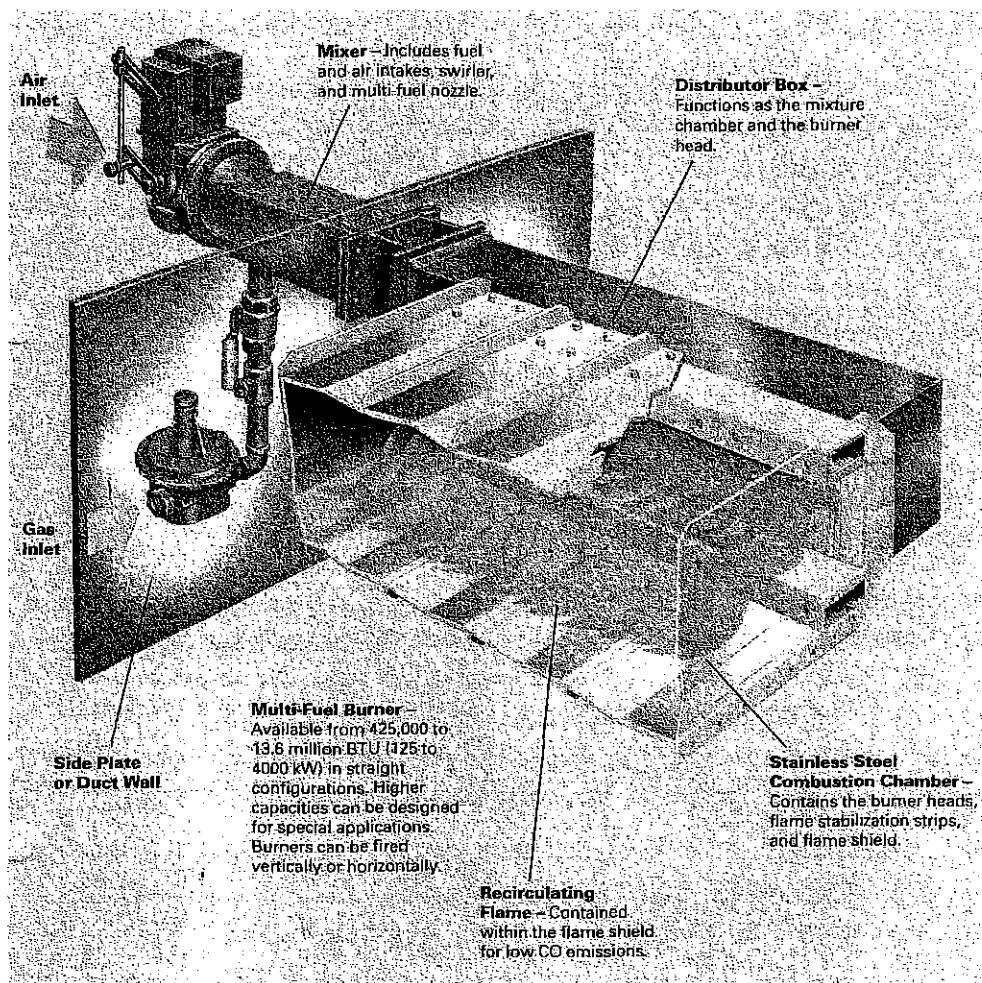
Brännarens låga NO_x -emissioner fås troligen också av att recirkulationszoner skapas av tvärsnittsökningen strax efter brännaröppningen. Avgaser kan då blandas in i flammen. Flammen skyddas från avkylning av omgivande luftströmmar genom de omgivande väggarna. Brännaren levereras i moduler om 125 kW som kan byggas samman till en maximal effekt på 7500 kW. Emissionerna sägs bli fördubblade med gasol som bränsle.

4.3 Andra NO_x -reducerande åtgärder

I de ovan redovisade processerna har metoderna har gått ut på att minska NO_x -bildningen genom att minska temperatur, uppehållstid och syrekonzentration i förbränningszonen. Förbränningen kan också påverkas på andra sätt och helt nya processutformningar kan radikalt sänka NO_x -bildningen.

4.3.1 Syrgasanrikning

Syrgasanrikning av förbränningsluften eller ren syrgas används främst för höjning av verkningsgraden och kapaciteten i högtemperaturprocesser inom metall-, stål- och glasindustrin. SGC har tidigare finansierat en studie som redovisats under 1995 [58]. I rapporten sägs att syrgasanrikning idag är konkurrenskraftig i en del



Figur 4.5: Uppbyggnad av Eclipse Minnox brännare

processer men att billigare metoder att producera ren syrgas samt miljöavgifter kommer att ytterligare öka konkurrenskraften.

Används ren syrgas minskas NO_x -bildningen jämfört med om vanlig luft använts till förbränningen. Trots den högre flamtemperaturen ger frånvaron av kväve en minskad NO_x -bildning. Däremot stiger NO_x -bildningen kraftigt då förbränningsluftens syrgashalt ökar till ett maximum vid ca 60% O_2 för att sedan minska.

4.3.2 Oscillerande, pulsad förbränning

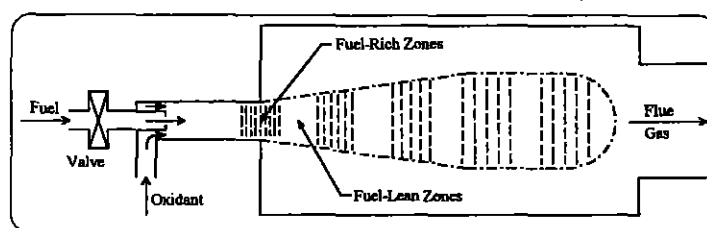
Man har ofta menat att ett oscillerande förbränningsförlopp förbättrar förbränningsprocessen med avseende på emissioner och värmeöverföring. Oscillationerna kan principiellt åstadkommas på två sätt: överlagrade pålagda oscillationer eller

oscillationer genererade som en följd av förbränningen. I det senare fallet handlar det om renodlade pulsbrännare.

Pålagda oscillationer

Det svenska företaget Infrasonik har sedan flera år marknadsfört utrustning för generering av infraljud, 20 Hz, i förbränningszonen. Man har då använt sig av högtalare och användningen har främst varit i samband med fastbränsleeldning. Metoden har också använts vid torkning, dock inte i samband med förbränning.

En ny metod, som är under utprovning, har utvecklats av Air Liquide och Institute of Gas Technology (IGT) [59]. Tekniken, som befinner sig mellan laboratorieförsök och fältförsök, bygger på att bränsle och/eller luft tillförs periodiskt så att områden med fet och mager bränsle/luft-blandning uppträder i flammen, se figur 4.6. Resultatet blir att flammans maximala temperatur sänks. Tekniken skall kunna användas i industriugnar.



Figur 4.6: Bränsle/luft-koncentrationer i en flamma med oscillerande bränsletillförsel

Effekten kan uppnås med t ex en roterande ventil i bränsleledningen. Redovisade försök visar resultat med naturgas/syre- och naturgasluft-brännare. Med enbart syre som oxidationsmedel kan NO_x -reduktioner på maximalt ca 90% uppnås, med ca 1% CO i avgaserna vid ca 0,5 Hz jämfört med förbränning utan oscillationer. Emissionerna ökar sedan med ökande frekvens. Med vanlig luft som oxidationsmedel blir reduktionen mindre, ca 65% (13 mg/MJ). Dock blev andelen oförbränt i avgaserna högt, 1–2%, i experimentuppställningen. Man tror att denna andel minskar i verkliga installationer där uppehållstiden i ugnen är längre.

Pulsbrännare

Liksom vid byggnadsuppvärmning finns endast ett fåtal exempel på pulsbrännare i industriella processer. I Japan används pulsbrännare i några hundra vätskevärmare. I USA har två pulsbrännare utvecklats för torkning. Den första, Bepex

Unison, har aldrig nått marknaden, möjligen beroende på industriföretagens konservatism [60]. Den andra, en pulsbrännare med varierbar arbetsfrekvens som anpassas till torkningsutrymmets egenfrekvens, har utvecklats av Sonotech [61],[62]. Bakom företaget finns de personer som arbetar med pulsbrännare vid Georgia Institute of Technology i Atlanta. För ingen av dessa produkter anges låga NO_x -värden som skäl för arbetet, snarare möjligheten att öka produktiviteten. Dock anges låga NO_x -halter som ett skäl för ett pågående kanadensiskt arbete att utveckla en pulsbrännare för industriella torkningsprocesser. Arbetet genomförs vid företaget Novadyne.

4.3.3 Ändrad processutformning

De beskrivna teknikerna för NO_x -reduktion bygger alla på förbättringar av konventionell teknik. En radikalt ändrad process för värmeöverföring från förbränning till gods kan sänka temperaturerna och därmed NO_x -bildningen. En sådan teknik kan knappast användas i samband med modernisering av processutrustningen utan kräver troligen ett fullständigt utbyte av utrustningen. Detta inskränker användandet av ny teknik enligt detta tillvägagångssätt. Ett exempel på en teknik under denna rubrik är utvecklandet av en kompakt glassmältare i USA. Glaset produceras genom att råvarorna tillsätts och blandas i flamman, vilket ger en kompakt konstruktion med låg processtemperatur. Arbetet redovisades vid ett flertal tillfällen under 1980-talet men några nya resultat har inte noterats under de senaste åren. Möjligen har utvecklingsarbetet avbrutits. En teknik med liknande uppbyggnad är den franska "gas contact process". I denna kan tex gjutsand renas inför återanvändning.

4.4 Sammanfattande ord

Genomgången av kommersiella produkter och forskningsinsatser för industriell gasanvändning har visat att låga NO_x -emissioner är möjliga att erhålla även i högttemperaturprocesser. I många fall finns tillgänglig utrustning med emissioner omkring 100 mg/MJ. Den allra bästa tekniken kan ge betydligt lägre värden. I försäljningsbroschyrer och annan litteratur framgår ofta att strömningsfältet kring flamman noga planerats för att få bästa möjliga NO_x -reduktion. Detta framhålls utöver traditionella NO_x -reducerande åtgärder som stegförbränning, avgasrecirkulation mm. Det förekommer även att man visat hur flödesberäkningsprogram som tex Flow 3D och Fluent använts för att förbättra prestanda i detta avseende.

Även vid hög luftförvärmning, 800–1000°C, kan NO_x -emissionerna hållas på en acceptabel nivå i de flesta processer. Den bästa tekniken ger möjlighet att hålla nivån kring 50 mg/MJ vid mycket höga lufttemperaturer. Dock tycks det som om

kostnaderna kan vara ett problem för denna både energieffektiva och miljövänliga teknik.

Bränslesammansättningen inflytande på emissionerna berörs bara i ett fåtal fall. Naturgas verkar ge de lägsta emissionerna i alla berörda fall. Innehåller bränslegasen komponenter som ökar förbränningshastigheten eller flamtemperaturen, koloxid eller vätgas, eller tyngre kolväten som propan/butan (gasol) kan NO_x -emissionerna öka kraftigt. Det är önskvärt med ytterligare forskning på detta område.

5

Gasturbiner

NO_x -bildningen i gasturbinbrännkammare har tidigare reducerats bland annat som en följd av vatteninsprutning, den sk Chengcykeln¹. Nu har dock sk torra gasturbinbrännkammare för främst gas utvecklats med traditionella NO_x -reducerande åtgärder som magerförbränning och flerstegsförbränning. Man slipper då kravet på hög vattenkvalitet i samband med vatteninsprutningen. Här beskrivs mer ingående den använda tekniken hos Solar Turbines gasturbiner. Därefter följer en sammanställning med exempel på gasturbiner med torr låg- NO_x -teknik.

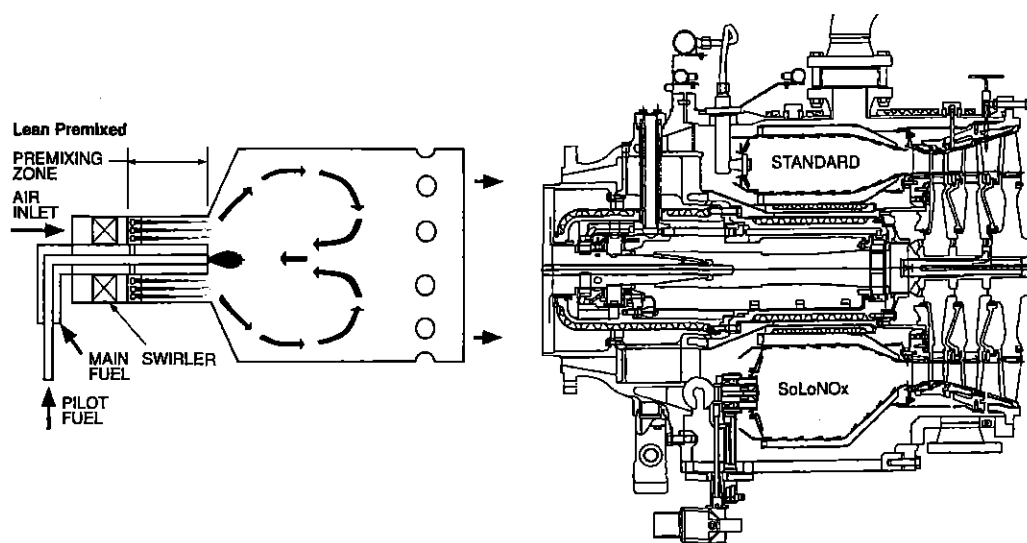
5.1 Låg- NO_x -teknik i Solar Turbines SoLo NO_x

Solar Turbines tillverkar gasturbiner i effektområdet 1–11 MW. Låg- NO_x -versioner finns för effektområdet 3–11 MW, med tillnamnet SoLo NO_x . Den låga NO_x -nivån åstadkoms genom en förblandad mager bränsle/luft-blandning. Företaget garanterar följande emissioner (15% O_2):

- $\text{NO}_x < 25$ ppm (50 mg/MJ)
- $\text{CO} < 50$ ppm
- oförbrända kolväten < 25 ppm

Brännkammarens utformning framgår av figur 5.1 [64]. Bränslet tillförs ett roterande luftflöde, blandas noggrant i en inloppssektion, och når brännkammaren där recirkulationszoner stabiliserar förbränningen. Till skillnad från andra brännkammare från Solar Turbines används en pilotflamma.

¹Chengcykeln innebär att ånga tillsätts i brännkammaren i syfte att öka massflödet genom kraftturbinen.



Figur 5.1: Uppbyggnaden av Solar Turbines låg- NO_x -brännkammare (vänster) och i jämförelse med standardbrännkammare i gasturbinen (höger)

Ytterligare luft tillsätts sedan för att sänka avgastemperaturen vid första turbinsteget. Brännkammaren är cylindrisk och har samma längd som Solar Turbines standardbrännkammare. Däremot har den större diameter, vilket ger en större volym, som är nödvändigt för att hålla CO och oförbrända kolväten på en låg nivå. SoLo NO_x -brännkammaren skall direkt kunna ersätta standardbrännkammaren i befintliga gasturbiner utan inverkan på uteffekt och verkningsgrad. Lastområdet anges till 50–100%. Denna låg- NO_x -teknik anges ha ett smalt lufttalsområde där både NO_x och CO är låga, nära flambärhetsgränsen. Vid dellast ökar CO-emissionerna, vilket Solar säger sig kompensera genom variabla geometrier för luftflödet samt bränsletillförsel genom endast en del av bränsleinjektorerna. Dessa åtgärder är även nödvändiga för att säkerställa flamstabiliteten vid dellast. Reglersystemet är viktigt för de låga NO_x - och CO-emissionerna. Solar Turbines använder temperaturmätning för att kontrollera NO_x -bildningen.

I jämförelse med andra NO_x -reducerande åtgärder hävdar Solar Turbines att den torra låg- NO_x -brännkammaren är den mest kostnadseffektiva metoden [65]. Kostnaden anges till 10% av kostnaden för katalytisk rening och vatteninsprutning, som dock ger något högre NO_x -minskning, 90% i stället för 85%. Enbart vatteninsprutning sänker NO_x -bildningen med ca 70% till en kostnad som är något högre än för den torra brännkammaren SoLo NO_x .

Den första gasturbinen med SoLo NO_x installerades i april 1990 men av de 179 gasturbiner som Solar Turbines anger vara installerade eller under byggande (1 december 1995) med SoLo NO_x är endast 13 st installerade 1993 eller tidigare. Inga gasturbiner av denna typ finns installerade i Skandinavien. I Tyskland finns 44 st.

Flera källor anger tryckoscillationer som ett potentiellt problem i torra låg- NO_x -brännkammare med högt luftöverskott. Vid start används ofta en diffusionsbrännare. Pilotflamma används för flamstabiliteten av flera tillverkare.

5.2 Exempel på gasturbiner med torr NO_x -reduktion

En förfrågan till ca 25 tillverkare av gasturbiner har bildat underlaget för sammanställningen. I tabell 5.1 är svaren sammanfattade. Tabellen har i några fall kompletterats med uppgifter om axeleffekt och verkningsgrad ur [63]. NO_x -emissionerna är angivna i den för industrin vedertagna enheten ppm (15% O_2). 25 ppm motsvarar då 50 mg/MJ. Alla gasturbiner med torr låg- NO_x -teknik har inte tagits med i tabellen. Detta gäller särskilt tillverkare med många modeller.

Tabellen visar att torr låg- NO_x -teknik finns från ca 1 000 kW. I de erhållna svaren sägs ofta att verkningsgraden är oförändrad jämfört med användning av traditionella brännkammare. Några tillverkare som inte finns med i listan anger att de levererar gasturbiner med vatteninsprutning i brännkammaren och då uppnår NO_x -emissioner av samma storleksordning som anges i tabellen.

Ännu lägre NO_x -emissioner är möjliga med katalytisk förbränning. Japanska och amerikanska företag provar idag teknik med målsättningen att nå 1 ppm NO_x med bibehållet låga emissioner av CO och oförbrända kolväten.

Tabellen upptar inga gasturbiner med effekter under 1 000 kW. Turbomeca, som tillverkar små gasturbiner, anger att man utvecklar låg- NO_x -teknik. Två utvecklingsprojekt värda att notera när det gäller små gasturbiner är utveckling av en gasturbin i kerammaterial i Japan och prov av HAT-cykeln (Humid Air Turbine) vid Lunds Tekniska Högskola, LTH.

I det japanska arbetet är målsättningen att uppnå en verkningsgrad på 42% i en helt keramisk gasturbin [74, 75]. Tre typer utvecklas parallellt och de är avsedda för kraftvärmekopplingar eller mobila kraftanläggningar. Projektet som leds av japanska NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) beräknas vara avslutat 1998. Målsättningen med verkningsgraden anses vara fullt möjlig att uppnå och man har idag erhållit 29,2% vid reducerat varvtal. Man strävar efter att begränsa NO_x -emissionerna till <70 ppm vid en inloppstemperatur på 1310°C. Förblandad mager bränsle/luft-blandning skall utnyttjas för detta. Inloppstemperaturen för gasturbinerna i tabell 5.1 är alla åtminstone 100°C lägre än i den keramiska gasturbinen.

I HAT-projektet vid LTH befuktas förbränningsluften. Detta höjer främst verkningsgraden men även en kraftig NO_x -reduktion förväntas. Målsättningen är att NO_x -emissionerna sänks till 1/10 av de med dagens bästa teknik för naturgaseldade gasturbiner, d v s till 1–1,5 ppm. Detta är en NO_x -nivå av samma stor-

leksordning som vid katalytisk förbränning. Gasturbinen i projektet har 600 kW axeleffekt och levereras av Volvo Aero Turbines.

Tabell 5.1: Sammanställning av gasturbiner med torr låg-NO_x-brännkammare och naturgasdrift

Tillverkare	Modell	Axeffekt (kW)	Verkningsgrad (%)	Reduktions- metod	NO _x (ppm, 15% O ₂)	CO	Ref	Anm
ABB	GT35	16900	33,0	A, B	<25	–	[67]	
	GT26	240000	37,8	A, B	<25	–	[67]	
Cooper Rolls/ Rolls Royce	Coberra 2000	14580	28,2	A, B, C	30	30	[70]	75–100% last
	Coberra 6000	27210	35,7	A, B, C	25	25	[71]	75–100% last
European Gas Turbines	Typhoon	4560	30,4	A, B	40	–	[72]	
	Tempest	7800	33,0	A, B	40	–	[72]	
General Electric	LM 1600	13000	35,7	–	<25	<25		
	LM 2500	22000	35,5	–	<25	<25		
	LM 5000	32000	36,6	–	<25	<25		
	LM 6000	40600	38,9	–	<25	<25		
Hitachi	–	80000		A, B, C	<40	–	[68]	
MAN/Siemens	THM1304	9250	28,6	A, B	<15	<5	[69]	
Nuovo Pignone	PGT-5	5220	26,9	A, B	20	8	[73]	Prototyp
	PGT-10	9930	31,3	A, B	33–37	5	[73]	Prototyp
Siemens	V84.2	103000		A, B	7	<10		
Solar Turbines	Mars 100S	11185	34,0	A, B	25	25	[66]	
	Mars 90S	9695	33,1	A, B	25	25	[66]	
	Taurus 70S	6635	33,0	A, B	25	25	[66]	
	Taurus 60S	5190	32,0	A, B	25	25	[66]	
	Centaur 50S	4235	29,2	A, B	25	25	[66]	
	Centaur 40S	3505	28,0	A, B	25	25	[66]	

A – mager

B – premix, förblandning

C – två- eller flerstegsförbränning

6

Förbränningsmotorer

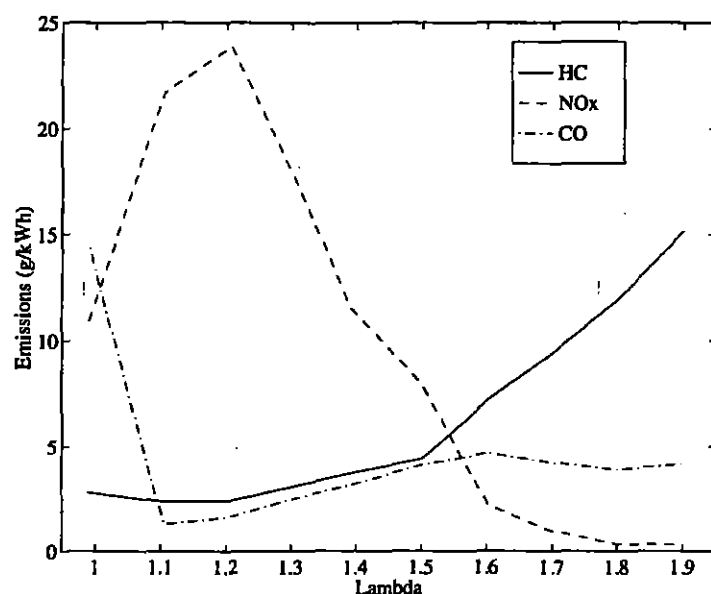
Förbränningsmotorer av olika slag används där mekanisk kraft efterfrågas, till el-generatorer, kompressorer, värmepumpar m m. Då katalytisk rening inte används är magerdrift den vanligaste reduktionsmetoden. I detta kapitel behandlas Otto- och Stirlingmotorn. Tack vare kontinuerlig förbränning är potentialen högre hos Stirlingmotorn att sänka NO_x -emissionerna.

6.1 Ottomotorer

För naturgasdrift med sänkta NO_x -emissioner är magerdrift i ottomotorer den dominerande tekniken. Figur 6.1 visar hur emissionsbilden ser ut vid varierande luftöverskott. En positiv effekt av ökat luftöverskott är att motorns verkningsgrad ökar. Andra aktuella reduktionstekniker är avgasrecirkulation (EGR) och skikt-laddning av bränsle/luft-blandningen. Skikt-laddning kan göras med hjälp av en förkammare eller åstadkommas direkt i förbränningsrummet.

Figuren visar tydligt en kontinuerligt fallande NO_x -bildning vid ökande luftöverskott. Det maximala lufttalet bestäms av den ökande andelen oförbränt vid höga luftöverskott, bl a som en följd av motorns cykel till cykel-variationer. Tre arbeten från LTH som behandlat naturgasdrift i ottomotorer är [76],[77],[78], där speciellt det andra arbetet berört cykel till cykel-variationer. Skikt-laddning i förbränningsrummet är studerat i det tredje arbetet. Cykel till cykel-variationerna påverkas i hög grad av strömningsförloppet kring tändstiftet under förbränningsens tidigaste skede. Magergränsen, d v s det högsta möjliga lufttalet påverkas då av förbränningsrummets geometriska utformning.

Enligt tyska TA-Luft är gränsvärdena 150–160 mg/MJ (500 mg/Nm³, 5 % O₂) NO_x , 200 mg/MJ (650 mg/Nm³, 5% O₂) CO och 150 mg/Nm³ (5% O₂) oförbränt räknat som C₃H₈. Dagens ottomotorer som levereras med magerdrift klarar dessa gränser. Mager teknik är idag en mogen reduktionsteknik. I Danmark



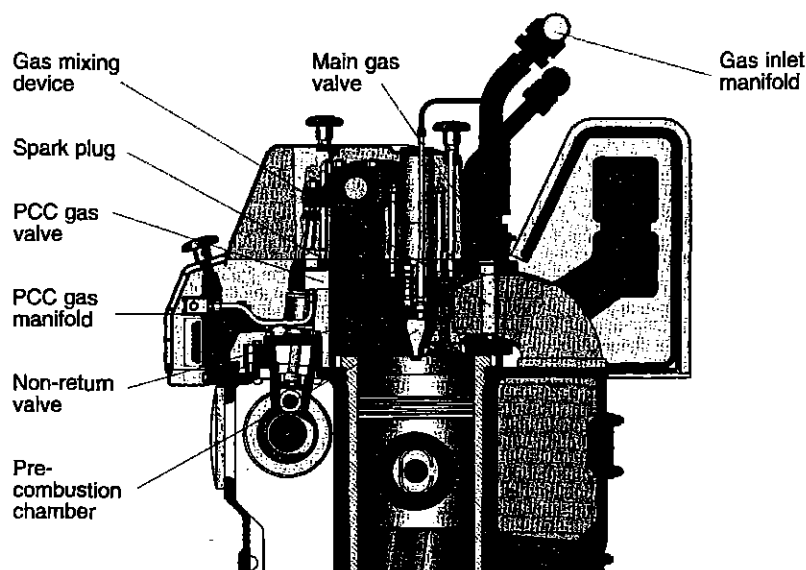
Figur 6.1: Emissionsbilden som funktion av lufttalet 'Lambda' i naturgasdrivna ottomotorer

har man genomfört mätningar av utsläppen av oförbränt i flertalet av de existerande kraftvärmeinstallationerna [79]. Metan, som är en växthusgas, uppgår till mer än 90% av de oförbrända kolvätena. Utifrån mätningarna uppskattades att utsläppen i genomsnitt är 4% av tillförd gasmängd. En allmän men inte helt entydig tendens var att motorer med hög elverkningsgrad uppvisade högre utsläpp av oförbränt. En klar tendens är att de största och nyaste motorerna uppvisade de största utsläppen.

Ett exempel på ottomotorer där man lyckats sänka NO_x -nivån avsevärt är Wärtsiläs gasmotorer. Lufttalet är mycket högt, $\lambda = 2\text{--}2,3$, och ett tändstift är då inte tillräckligt för att antända bränsle/luftblandningen. I stället antänds en stökiometrisk blandning i en förkammare som sedan strömmar ut i förbränningsrummet och antänder den magra blandningen. Tidigare Wärtsilämotorer hade NO_x -emissioner i området 150–200 mg/MJ [22] men idag klarar Wärtsiläs motorer (>1 MW) NO_x -nivåer på 90 mg/MJ och målet är 50 mg/MJ för en planerad installation i Göteborg [80]. Ett tvärsnitt av motorn visas i figur 6.2.

6.2 Stirlingmotorer

Stirlingmotorer har länge betraktats som ett intressant alternativ till Otto- eller Dieselcykeln. Något riktigt kommersiellt genombrott har Stirlingmotorn ännu



Figur 6.2: Tvärsnitt av Wärtsiläs naturgasmotor med magerdrift

inte fått och likheter med utveckling av bränsleceller kan lätt urskiljas. Stirlingmotorers stora miljöfördel gentemot den traditionella förbränningsmotorn är den kontinuerliga förbränningen. Låga emissioner utan utnyttjande av katalytisk rening är fullt möjligt. Nackdelarna är låg mekanisk verkningsgrad och hög vikt. Det senare är dock mindre problematiskt i stationära installationer. Många av dagens Stirlingmotorer har sin grund i svenska utvecklingsinsatser, tex motorn V 160.

Vid avdelningen för förbränningsmotorer vid LTH har Stirlingmotorrelaterad forskning genomförts de senaste åren och ett nytt arbete planeras under 1996. I båda fallen rör det sig om försök att sänka NO_x -bildningen. I en simulerad brännkammare gjordes försök med bl a extern avgasrecirkulation [81]. I detta arbete studerades två brännkammare varav en passar motorn V 160. Emissionerna studerades som funktion av lufttal, avgasrecirkulation, brännarbelastning och inloppstemperatur. NO_x -emissioner under 10 mg/MJ mättes i olika driftsituationer. En relativt hög förvärmning av förbränningsluften, ca 500°C, användes vid dessa tillfällen. Både avgasrecirkulation och högt luftöverskott utnyttjades för emissionsreduktionen. Under 1996 kommer arbete att inledas med katalytisk förbränning i Stirlingmotorers brännkammare.

7

Slutsatser

Under de senaste 10 åren har kraftiga sänkningar av NO_x -emissionerna från gaseldade processer uppnåtts. Detta gäller inom i stort alla processer. Lågtemperaturprocesser inom **byggnadsuppvärmning** kan idag fås att emittera endast 5–10 mg/MJ. Samtidigt har verkningsgraden ökat. Med tanke på värmepannornas livslängd kan det dock ta lång tid innan brännare med så låga emissioner är dominerande bland de installerade pannorna, ca 10–15 år. Några påtagliga extra kostnader är inte förknippade med den nuvarande låg- NO_x -tekniken, utom för fläktgasbrännare, och den kan därför snabbt bli dominerande i nya installationer om den görs allmänt känd. Dagens bästa låg- NO_x -teknik är så effektiv att endast katalytisk förbränning kan ge någon ytterligare påtaglig reduktion.

NO_x -avgifter finns bland de tillämpningar där fläktgasbrännare används. Från den 1 januari 1997 sänks den nuvarande årliga energiproduktionsgränsen för NO_x -avgiften (40 kr/kg) från 40 GWh till 25 GWh. Här finns ekonomiska skäl att använda låg- NO_x -teknik. Konventionella fläktgasbrännare med NO_x -reduktion kan idag ge 15–20 mg/MJ NO_x . Användning av förblandningsbrännare med porösa ytskikt och hög ytbelastning kan bli ett attraktivt alternativ om enkla och kostnadseffektiva brännare kan förverkligas. NO_x -utsläppen för dessa är 10–15 mg/MJ men ännu lägre värden har erhållits vid laboratorieprov. Laboratorieresultaten är idag delvis nedslående varför denna teknik inte tycks bli aktuell i en nära framtid.

Bland **industriprocesserna** är temperaturerna ofta högre och behovet att utnyttja luftförvärmning för acceptabel verkningsgrad kan orsaka mycket höga NO_x -utsläpp om inga åtgärder vidtas. Med modern teknik behöver dock inte luftförvärmning innebära förhöjda NO_x -utsläpp. Nivåer kring 50 mg/MJ eller lägre är möjliga att uppnå i flertalet processer med bästa tillgängliga teknik. Här tycks det som om flertalet låg- NO_x -brännare är betydligt dyrare, vilket försvårar spridningen. Dessutom är inga NO_x -avgifter aktuella för processerna i Sverige. I torkningsprocesser kan NO_x -nivåer av samma storleksordning uppnås som vid byggnadsuppvärmning.

Låg- NO_x -teknik i **gasturbiner** innebär idag huvudsakligen utnyttjande av högt luftöverskott och ibland även stegförbränning, "torr" låg- NO_x -teknik. NO_x -nivåerna är då 50 mg/MJ eller mindre; 15 mg/MJ är det lägsta angivna värdet. Det är ungefär samma NO_x -emissioner som fås med vatteninsprutning eller katalytisk rening. Tekniken finns tillgänglig från de minsta till de största gasturbinerna och får betraktas som väl etablerad teknik.

Förbränningsmotorer hör till de besvärligaste applikationerna avseende NO_x -emissioner. Om ingen katalytisk rening används är magerdrift den vanligaste reduktionsmetoden. NO_x -halter under 150 mg/MJ klaras av många motorer. Det finns också exempel på motorer med NO_x -halter strax under 100 mg/MJ. Dock kan metanemissionerna vara betydande, ca 4% av tillfört bränsle vid magerdrift, vilket bör uppmärksammas noga. I små anläggningar kan Stirlingmotorn vara intressant i framtiden. NO_x -halter kring 10 mg/MJ är där möjliga att uppnå.

Genom att i grunden **förändra processer** kan NO_x -bildningen påverkas, bl a genom en integrering av förbränning och process. Dock kan man förutse att bara ett fåtal processer och installationer kan bli aktuella för så omfattande arbeten.

Referenser

- [1] de Wit, Jan; Madsen, Ole H.; Pedersen, Per; *Reduktion af NO_x-emission fra naturgasfyrede industrikedler*, Nordisk Gasteknisk Center, juli 1993
- [2] Näslund, Mikael; *Energigasteknik*, Svenska Gasföreningen, Stockholm 1995
- [3] *Konvertering till gas – mindre miljöbelastning, högre energieffektivitet*, SGC infoblad nr 4, januari 1992
- [4] *Värt att veta om kväveoxidaugifter 1996*, Naturvårdsverket 1995
- [5] *Morot och piska för bättre miljö*, SOU 1993:118, Miljö- och naturresursdepartementet 1993
- [6] *Miljöavgifter på utsläpp av kväveoxider vid energiproduktion 1995*, PM Naturvårdsverket, Miljötillsynsavdelningen, 1996-05-02
- [7] Bohlin, Ann et al.; *Energi och miljö – Miljökonsekvenser vid användning av naturgas, biobränsle, olja och kol*, ÅF-Energikonsult, december 1995
- [8] Joos, L.; *Technischer Stand der Schadstoffreduzierung bei den haushaltlichen Gasgeräten*, Gas Erdgas, 135(1995), Nr 5, pp270-274
- [9] deWerth, D.; Sheridan, R.D.; *Burner Flame Inserts for Lower NO_x Emission*, 1984 Int. Gas Research Conf., 10-13 september 1984, Washington D.C., USA
- [10] Hüppelshäuser, H.; Nitschke-Kowsky, P.; *Einfluß unterschiedlicher Gasbeschaffenheiten auf das Brennverhalten emissionsarmer atmosphärischer Brenner unter Praxisbedingungen*, gwf/Gas-Erdgas, 136(1995), Nr 10, pp517-521
- [11] Hargreaves, K.J.A.; Dutton, I.; Twist, T.H.; *Application of low emission technologies to advanced burners for residential water heating*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6-9 november 1995, Cannes Frankrike
- [12] Vaillant, K.-E.; Schulz, H.; *Moderne Gerätetechnik für schadstoffarme Gasheizung und Warmwasserbereitung mit hohem Nutzungsgrad*, Gas Wärme International, 44(1995) Heft 3, mars

- [13] Itoh, K.; *Development of a new concept water heater*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes Frankrike
- [14] Homma, R. et al.; *Two-dimensional reactive flow calculation of rich-lean combustion*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes Frankrike
- [15] Großhans, D.; *ISH und Energie- und Umwelttechnik 1995*, gwf/Gas-Erdgas, 136(1995), Nr 9
- [16] Jannemann, Theo B.; *Kompendium Gas-Brennwerttechnik*, Vulkan-Verlag, Essen 1994
- [17] Personlig kommunikation med Jan Nilsson, Pulsonex
- [18] Barr, P.; Keller, J.; Kezerle, J.; *SPCDC: A User Friendly Computational Tool for the Design and Refinement of Practical Pulse Combustion Systems*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes Frankrike
- [19] Lindholm, Annika; *Time resolved measurements of flow fields and heat release in pulse combustors*, licentiatrapport maj 1995, värme- och kraftteknik LTH, ISRN LUTMDN/TMVK-7021-SE
- [20] Kommunikation med Ian Pearson, CSIRO Melbourne Australien
- [21] Hofbauer, P.; Bornscheuer, W.; Dzubiella, M.; *Der Matrix-Katbrenner — schadgasfrei durch katalytisch unterstützte Verbrennung*, Gas Wärme International, vol 44, Heft 10 (1995), oktober
- [22] Information från Bent Karll, Danskt Gastekniskt Center
- [23] Aptroot, R.; Verheij, V.A.; Overdiep, J.J.; *Low NO_x Power Burners for the Dutch Boiler Market above 250 kW*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes Frankrike
- [24] Ogink, R.; Graat, J.; *Cyclonox – de universale branderkop*, GAS (NL), november 1994
- [25] *Der ASR-Brenner – Die neue Formel zur NO_x-Minderung bei Öl- und Gasverbrennung* Deutsche Babcock Mitteilung Nr. 165, 1985
- [26] Großhans, D.; *Intherm 1994 — Rückblick an die 23. Internationale Fachmesse für Heizungs-, Klima- und Feuerungstechnik in Stuttgart*, gwf/Gas-Erdgas, 135(1994), Nr 9, pp504–511
- [27] deFrees, J.; O'Neil, R.; *Monitoring and analysis of a pulse combustion steam boiler*, 1992 Int. Gas Research Conf., 16–19 november 1992, Orlando, Florida USA

- [28] Chojnacki, D. et al.; *Developments in ultra-low NO_x burner/boilers*, 1992 Int Gas Research Conf., 16–19 november 1992, Orlando, Florida USA
- [29] Bogstra, A.N.; Overdiep, J.J.; *Low-NO_x-technieken voor ketelbranders tot 10 MW: een vergelijking*, GAS (NL), Nr 1, 1992
- [30] Shirvill, L.; *Metallic fibre surface-combustion radiant gas burners*, 1986 Int. Gas Research Conf., Toronto Kanada
- [31] Shirvill, L.; *Strålningskarakteristika hos brännare med ytförbränning*, Energigasinstitutet vid LTH Symposiedokumentation "Gasbaserad IR-teknik för industriellt bruk", Malmö 9 december 1987
- [32] *Type H, W, P Low NO_x finned Copper tube Boiler*, Informationsblad från Raypak, USA, maj 1993
- [33] Informationsblad från Parker Boiler Co., Los Angeles, USA, odaterad
- [34] Informationsblad om pannan IHI K-2000 PE, Tokyo Gas, 1995(?)
- [35] Informationsblad om pannan Samson Super Scrum, maj 1995
- [36] Informationsblad om Alzeta Pyromat SB Low NO_x Boiler, Alzeta Corp., Santa Clara, Kalifornien, USA, odaterad
- [37] Informationsblad om Alzeta Pyromat CSB, Alzeta Corp., Santa Clara, Kalifornien, USA, odaterad
- [38] *Bekitherm AC200 P2 Axial Metal Fibre Burner*, Acotech, Zwegegern Belgien, 1993
- [39] Informationsblad från Dreizler, Spaichingen, Tyskland 1994
- [40] Carlsson, Per; *"Större" keramisk fiberbrännare*, Arbetsrapport Sydkraft Konsult, september 1995
- [41] *GES Radiant Burner Products*, datablad från Environmental Solutions, San Clemente, Kalifornien USA, odaterad
- [42] Polman, E.; Der Kinderen, J.; Martens, J.; *Een brander met perspectief*, GAS (NL), februari 1995
- [43] Beesteheerde, J. et al.; *Low NO_x Ceramic Foam Burner for Domestic and Industrial Utilisation*, 1992 Int. Gas Research Conf., 16–19 november 1992, Orlando, Florida USA
- [44] Schaap, Paul; *Keramische schuimbrander binnenkort op de markt*, Gas (NL), mars 1996
- [45] Hall, Ola, *Rekuperativ aluminiumsmältugn – Installation och utvärdering av degelugn vid Värnamo Pressgjuteri*, SGC Rapport 047, oktober 1993

- [46] Finke, Harry P.; *International Experience in low-NO_x burners*, AISE Convention, Memphis TN, April 25 1994
- [47] Rixen, K.; Andrejewski, G.; *Emissionsarme Brenner in der Metallindustrie*, Gas Wärme International, 41(1992) Heft 10, Oktober
- [48] Hoffmann, G.W.; *Einfluß der Brenngasart und Brenngasbelastung auf die NO_x-Bildung in Wärmöfen*, Gas Wärme International, 42(1993) Heft 12, Dezember
- [49] Tomeczek, J.; *Der Einfluß der Brennerparameter auf das NO_x-Minderungspotential gasbeheizter Industrieöfen*, Gas Wärme International, 42(1993) Heft 12, Dezember pp563–570
- [50] Flamme, Michael; *Minimierung der Stickstoffbildung bei der Verbrennung von Erdgas mit starker Luftvorwärmung in Hochtemperaturprocessen*, Diss., Ruhr Universität Bochum 1989
- [51] Syska, A.J., et al.; *Low-NO_x High Performance Industrial Burner*, 1992 Int. Gas Research Conf., 16–19 november 1992, Orlando, Florida USA
- [52] *High-Performance Low-NO_x Industrial Burner*, GRI Tech Profile, september 1995
- [53] Kommunikation med Ed Moore, Hauck Manufacturing Company, Lebanon, Pennsylvania, USA
- [54] Wüning, J.A; Wüning, J.G.; *Regenerative Burner using Flameless Oxidation*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes Frankrike
- [55] Kelly, J.T.; Nickeson, R.; Lingras, A.; *High air preheat temperature low-NO_x burner*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes, Frankrike
- [56] Kommunikation med H. Tikiryan, Canadian Gas Research Center (CGRI), Toronto, Kanada
- [57] *Minnox Burners — Low-Emission air heating burner systems*, Informationsblad från Eclipse Combustion, september 1995
- [58] Gunnarsson, Ingemar; *Energigas och oxyfuelteknik*, Rapport SGC 068, december 1995
- [59] Ruiz, R. et al.; *Oscillating combustion: An innovative NO_x emissions control approach*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes, Frankrike
- [60] Ozer, R.; *Pulse Combustion Drying*, Workshop in Pulsating Combustion and its Applications, 2–5 augusti 1993, Lund

- [61] Zinn, B.T. et al.; *Applications of pulse combustion in industrial and incineration processes*, 1992 Int. Gas Research Conf., 16–19 november 1992, Orlando, Florida USA
- [62] Ma, Z. et al.; *Improving the performance of fluid heaters with a tunable pulse combustor*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes, Frankrike
- [63] Gas Turbine World 1993-94 Handbook
- [64] Rawlins, D.C.; *SoLoNO_x Combustion System Update*, Solar Turbines, San Diego, Kalifornien, 1995
- [65] *A clear view from Solar Turbines*, Informationsblad från Solar Turbines, 1993
- [66] *Gas turbine systems for compression and mechanical drive applications*, Solar Turbines, 1994
- [67] Svensson, Bo; *Dry low-NO_x-teknik för gasturbiner i Kombi- och mottryckskraftverk*, ABB Tidning, Nr 5 1993
- [68] Kuroda, M; Ishibashi, Y.; *Development of a Low-NO_x Combustor*, Hitachi Review, vol 38 (1989), No 3
- [69] Bauermeister, K.J.; Schetter, B.; Mohr, K.D.; *A 9.25 MW Industrial Gas Turbine with extreme low dry low NO_x and CO emissions*, ASME Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhib., Cincinnati OH., May 1993, 93-GT-307
- [70] *Industrial RB211 DLE — Emissions goals achieved*, Informationsblad, Rolls Royce, Coventry, juni 1994
- [71] *Low Emission Coberra Gas Turbines*, Informationsblad, Cooper Rolls, Mount Vernon OH, USA, 1992
- [72] Ashmore, Colin; *The wet route to low NO_x performance*, Electricity Int. J., 1995
- [73] Bonciani, L.; *Development and Operation of a Dry Low-NO_x Combustor for a 10 MW Gas Turbine*, 1995 Int. Gas Research Conf., 6–9 november 1995, Cannes Frankrike,
- [74] Murayama, T.; Nagata, K.; Abe, H.; *Current status of 300 kW Industrial Gas Turbine R&D in Japan*, ASME Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, June 5–8 1995, 95-GT-455
- [75] Ogiwara, H.; Kishi, S., *A Ceramic Gas Turbine Achieves the World-Highest Efficiency – 29.2% by a 300 kW Unit*, odaterat manuskript (1995)

- [76] Olsson, Krister; *On Combustion Chambers for Natural Gas Engines*, lic.rapport, värme- och kraftteknik LTH, ISRN LUTMDN/TMVK-7020-SE, maj 1995
- [77] Johansson, Bengt; *On Cycle to Cycle Variations in Spark Ignition Engines — The Effects of Fluid Flow and Gas Composition in the Vicinity of the Spark Plug on Early Combustion*, diss., värme- och kraftteknik LTH, ISRN LUTMDN/TMVK-1010-SE, december 1995
- [78] Egnell, Rolf; *Impact of Combustion Chamber Geometry on Charge Stratification in a CNG Fueled Direct Injection Otto Engine*, lic.rapport, värme- och kraftteknik LTH, ISRN LUTMDN/TMVK-7016-SE, december 1994
- [79] Nielsen, Malene; *UHC/metan-emission fra gasmotorbaserede kraftvarmeanstallationer*, Dansk Gasteknisk Center, 1996
- [80] Stenhede, Thomas; *Gasmotorer för kraft- och värmeproduktion*, SGC seminarium, 21 maj 1996, Helsingborg
- [81] Nilsson, Johan; *A Study on a Low Emission Combustor — Lean Premix Prevaporize Concept*, lic.rapport, värme- och kraftteknik LTH, ISRN LUTMDN/TMVK-7014-SE, november 1993

Bilaga 1

Nedanstående tabell [1] gäller för omräkning av emissioner vid förbränning av den danska naturgas som distribueras i Sverige.

Ämne	ppm $\rightarrow$ mg/m ³	ppm $\rightarrow$ mg/MJ	mg/MJ $\rightarrow$ ppm	ppm $\rightarrow$ ppm $x\%$ O ₂ $\rightarrow$ $y\%$ O ₂
Koloxid, CO	ppm $\cdot$ 1,25	ppm $\frac{6,2}{21-O_2}$	mg $\frac{21-O_2}{6,2}$	–
Kväveoxider, NO _x som NO ₂	ppm $\cdot$ 2,07	ppm $\frac{10,2}{21-O_2}$	mg $\frac{21-O_2}{10,2}$	ppm $\frac{21-O_2(y)}{21O(x)}$
Kolväten, C _n H _m som CH ₄	ppm $\cdot$ 0,72	ppm $\frac{3,6}{21-O_2}$	mg $\frac{21-O_2}{3,6}$	–
Kolväten, C _n H _m som C ₄ H ₁₀	ppm $\cdot$ 2,71	ppm $\frac{13,4}{21-O_2}$	mg $\frac{21-O_2}{13,4}$	–

Gäller vid:

$$H_u = 39,179 \text{ MJ/Nm}^3 \approx 10,879 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$\text{CO}_{2,max} = 12,12\%$$

96-12-18

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
001	Systemoptimering vad avser ledningstryck	Apr 91	Stefan Grudén TUMAB	100
002	Mikrokraftvärmeverk för växthus. Utvärdering	Apr 91	Roy Ericsson Kjessler & Mannerstråle AB	100
004	Krav på material vid kringfyllnad av PE-gasledningar	Apr 91	Jan Molin VBB VIAK	50
005	Teknikstatus och marknadsläge för gasbaserad minikraftvärme	Apr 91	Per-Arne Persson SGC	150
006	Keramisk fiberbrännare - Utvärdering av en demo-anläggning	Jan 93	R Brodin, P Carlsson Sydkraft Konsult AB	100
007	Gas-IR teknik inom industrin. Användnings- områden, översiktlig marknadsanalys	Aug 91	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	100
009	Läcksökning av gasledningar. Metoder och instrument	Dec 91	Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
010	Konvertering av aluminiumsmältugnar. Förstudie	Sep 91	Ola Hall, Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
011	Integrerad naturgasanvändning i tvätterier. Konvertering av torktumlare	Sep 91	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	100
012	Odöranter och gasolkondensats påverkan på gasrörssystem av polyeten	Okt 91	Stefan Grudén, F. Varmedal TUMAB	100
013	Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare	Okt 91	Michael Johansson Drifttekniska Instit. vid LTH	150
014	Modern gasteknik i galvaniseringsindustri	Nov 91	John Danelius Vattenfall Energisystem AB	100
015	Naturgasdrivna truckar	Dec 91	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100
016	Mätning av energiförbrukning och emissioner före o efter övergång till naturgas	Mar 92	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	50
017	Analys och förslag till handlingsprogram för området industriell vätskevärmning	Dec 91	Rolf Christensen AF-Energikonsult Syd AB	100
018	Skärning med acetylen och naturgas. En jämförelse.	Apr 92	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100

96-12-18

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
019	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Glostorp, Malmö. Uppföljningsprojekt	Maj 92	Fallsvik J, Haglund H m fl SGI och Malmö Energi AB	100
020	Emissionsdestruktion. Analys och förslag till handlingsprogram	Jun 92	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
021	Ny läggningsteknik för PE-ledningar. Förstudie	Jun 92	Ove Ribberström Ove Ribberström Projekt. AB	150
022	Katalog över gastekniska FUD-projekt i Sverige. Utgåva 4	Aug 92	Svenskt Gastekniskt Center	150
023	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Lillhagen, Göteborg. Uppföljningsproj.	Aug 92	Nils Granstrand m fl Göteborg Energi AB	150
024	Stumsvetsning och elektromuffsvetsning av PE-ledningar. Kostnadsaspekter.	Aug 92	Stefan Grudén TUMAB	150
025	Papperstorkning med gas-IR. Sammanfattning av ett antal FUD-projekt	Sep 92	Per-Arne Persson Svenskt Gastekniskt Center	100
026	Koldioxidgödsling i växthus med hjälp av naturgas. Handbok och tillämpn.exempel	Aug 92	Stig Arne Molén m fl	150
027	Decentraliserad användning av gas för vätskevärmning. Två praktikfall	Okt 92	Rolf Christensen AF-Energikonsult	150
028	Stora gasledningar av PE. Teknisk och ekonomisk studie.	Okt 92	Lars-Erik Andersson, Åke Carlsson, Sydkraft Konsult	150
029	Catalogue of Gas Techn Research and Development Projects in Sweden (På engelska)	Sep 92	Swedish Gas Technology Center	150
030	Pulsationspanna. Utvärdering av en demo-anläggning	Nov 92	Per Carlsson, Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	150
031	Detektion av dräneringsrör. Testmätning med magnetisk gradiometri	Nov 92	Carl-Axel Triumf Triumf Geophysics AB	100
032	Systemverkn.grad efter konvertering av vattenburen elvärme t gasvärme i småhus	Jan 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem AB	150
033	Energiuppföljning av gaseldad panncentral i kvarteret Malörten, Trelleborg	Jan 93	Theodor Blom Sydkraft AB	150
034	Utvärdering av propanexponerade PEM-rör	Maj 93	Hans Leijström Studsvik AB	150

96-12-18

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
035	Hemmatankning av naturgasdriven personbil. Demonstrationsprojekt	Jun 93	Tove Ekeborg Vattenfall Energisystem	150
036	Gaseldade genomströmningsberedare för tappvarmvatten i småhus. Litteraturstudie	Jun 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem	150
037	Verifiering av dimensioneringsmetoder för distributionsledningar. Litt studie.	Jun 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
038	NOx-reduktion genom reburning med naturgas. Fullskaleförsök vid SYSAV i Malmö	Aug 93	Jan Bergström Miljökonsulterna	150
039	Pulserande förbränning för torkändamål	Sep 93	Sten Hermodsson Lunds Tekniska Högskola	150
040	Organisationer med koppling till gasteknisk utvecklingsverksamhet	Feb 94	Jörgen Thunell SGC	150
041	Fältsortering av fyllnadsmassor vid läggning av PE-rör med lägningsbox.	Nov 93	Göran Lustig Elektro Sandberg Kraft AB	150
042	Deponigasens påverkan på polyetenrör.	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
043	Gasanvändning inom plastindustrin, handlingsplan	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
044	PA 11 som material ledningar för gasdistribution.	Dec 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
045	Metoder att höja verkningsgraden vid avgaskondensering	Dec 93	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	150
046	Gasanvändning i målerier	Dec 93	Charlotte Rehn et al Sydkraft Konsult AB	150
047	Rekuperativ aluminiumsmältugn. Utvärdering av degelugn på Värnamo Pressgjuteri.	Okt 93	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
048	Konvertering av dieseldrivna reservkraftverk till gasdrift och kraftvärmeprod	Jan 94	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult AB	150
049	Utvecklad teknik för gasinstallationer i småhus	Feb 94	P Kastensson, S Ivarsson Sydgas AB	150
050	Korrosion i flexibla rostfria insatsrör (Finns även i engelsk upplaga)	Dec 93	Ulf Nilsson m fl LTH	150

96-12-18

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
051	Nordiska Degelugnsprojektet. Pilot- och fältförsök med gasanvändning.	Nov 93	Eva-Maria Svensson Glafo	150
052	Nordic Gas Technology R&D Workshop. April 20, 1994. Proceedings.(På engelska)	Jun 94	Jörgen Thunell, Editor Swedish Gas Center	150
053	Tryckhöjande utrustning för gas vid metallbearbetning -- En förstudie av GT-PAK	Apr 94	Mårten Wörnö MGT Teknik AB	150
054	NOx-reduktion genom injicering av naturgas i kombination med ureainsprutning	Sep 94	Bent Karll, DGC P Å Gustafsson, Miljökons.	100
055	Trevägs-katalysatorer för stationära gasmotorer.	Okt 94	Torbjörn Karlelid m fl Sydkraft Konsult AB	150
056	Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålar	Nov 94	Johansson, M m fl Lunds Tekniska Högskola	150
057	Läckagedetekteringssystem i storskaliga gasinstallationer	Dec 94	Fredrik A Silversand	150
058	Demonstration av låg-NOx-brännare i växthus	Feb 95	B Karll, B T Nielsen Dansk Gasteknisk Center	150
059	Marknadspotential naturgaseldade industriella IR-strålar	Apr 95	Rolf Christensen Enerkon RC	150
060	Rekommendationer vid val av flexibla insatsrör av rostfritt i villaskorstenar	Maj 95	L Hedeén, G Björklund Sydgas AB	50
061	Polyamidrör för distribution av gasol i gasfas. Kunskapssammanställning	Jul 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
062	PE-rörs tålighet mot yttre påverkan. Sammanställning av utförda praktiska försök	Aug 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
063	Naturgas på hjul. Förutsättningar för en storskalig satsning på NGV i Sverige	Aug 95	Naturgasbolagens NGV- grupp	150
064	Energieffektivisering av större gaseldade pannanläggningar. Handbok	Aug 95	Lars Frederiksen Dansk Gasteknisk Center	200
065	Förbättra miljön med gasdrivna fordon	Aug 95	Göteborgs Energi m fl	150
066	Konvertering av oljeeldade panncentraler till naturgas. Handbok.	Nov 95	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	150

96-12-18

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
067	Naturgasmodellen. Manual för SMHI:s program för beräkn av skorstenshöjder	Dec 95	Tingnert B, SKKB Thunell J, SGC	150
068	Energigas och oxyfuelteknik	Dec 95	Ingemar Gunnarsson Energi-Analys AB	150
069	CO2-gödsling med avgaser från gasmotor med katalysator	Dec 95	Bent Karll Dansk Gasteknisk Center	150
070	Utvärdering av naturgasförbränning i porösa bäddar	Mar 96	Henric Larsson Lunds Tekniska Högskola	150
071	Utvärdering av naturgasdrivna IR-boostar i ugn för pulverlackering	Nov 95	Ole H Madsen Asger N Myken	150
072	Sammanställning av emissionsdata från naturgas-, biogas- o motorgasdrivna fordon	Jun 96	Hans-Åke Maltesson Svenskt Gastekniskt Center AB	150
073	Livslängdsbestämning för PE-rör för gasdistribution (EVOPE-projektet)	Jul 96	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	100
074	Gasblandningar för fordonsdrift. Idéstudie.	Aug 96	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
075	Gasbranschens miljöhandbok	Sep 96	Jörgen Thunell Svenskt Gastekniskt Center	500
076	Låg-NOx-teknik för gasdrivna processer - dagsläge	Okt 96	Mikael Näslund, LTH	150
077	Karakterisering av emissioner från naturgasdrivna lastbilar inom LB 50-projektet	Dec 96	K-E Egebäck Roger Westerholm	150
078	Uppvärmning med gas i svenska småhus - erfarenheter och framtida teknikval	Nov 96	Mikael Näslund, LTH	150
079	Handledn. för inst av gaseldade IR-värmare. Rådgivning, analys och genomförande	Jan 97	Pär Dalin, DITAB	150
A01	Fordonstankstation Naturgas. Parallellkoppling av 4 st Fuel Makers	Feb 95	Per Carlsson Göteborg Energi	50
A02	Uppföljning av gaseldade luftvärmare vid Arlövs Sockerraffinaderi	Jul 95	Rolf Christensen Enercon RC	50
A03	Gasanvändning för färjedrift. Förstudie (Endast för internt bruk)	Jul 95	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult	0

96-12-18

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
A04	Bussbuller. Förslag till mätprogram	Jun 95	Ingemar Carlsson Ecotrans Teknik AB	50
A05	Värmning av vätskor med naturgas - Bakgrund till faktablad	Okt 95	Rolf Christensen Enerkon RC	50
A06	Isbildning i naturgasbussar och CNG-system (Endast för internt bruk)	Nov 95	Volvo Aero Turbines Sydgas, SGC	0
A07	Större keramisk fiberbrännare. Förstudie	Jan 96	Per Carlsson Sydkraft Konsult	50
A08	Reduktion av dioxin, furan- och klorfenoler vid avfallsförbränning	Maj 96	H Palmén, M Lampinen et al Helsingfors Tekniska Högskola	50
A09	Naturgas/mikrovågsteknik för sintring av keramer	Maj 96	Anders Röstin, KTH	50
A10	NOx-reduktion genom naturgasinjektion o reburning. Demoprojekt på Knudmoseverket	Apr 96	Jan Flensted Poulsen Völund R & D Center	50
A11	Direktorkning av socker med naturgas (Endast för internt bruk)	Jul 96	Rolf Christensen	0



Svenskt Gastekniskt Center AB

S-205 09 MALMÖ
Telefon: 040-24 43 10
Telefax: 040-24 43 14

KFS AB, LUND