VÄRMEFORSK
STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Emission vid byte av gaskvalitet

Mikael Näslund

GASTEKNIK 271

EMISSIONER VID BYTE AV GASKVALITET

Mikael Näslund
Inst. för värme- och kraftteknik, LTH
september 1986

Denna rapport utgör slutrapportering av projekt G5-509 från VÄRMEFORSK via Energigasinstitutet vid LTH till Institutionen för värme- och kraftteknik, LTH.

SAMMANFATTNING

En studie om emissionerna, främst kväveoxider NO_x, förändras om gaskvaliteten förändras har genomförts. Det finns tecken på att NO_x-emissionerna kan öka markant vid användandet av reserv- eller spetslastgaser. Europeiska undersökningar visar att CO-emissionerna fördubblas vid små ökningar, 2-4 %, av Wobbeindex.

NO_x-reducerande metoder som kan användas vid industriell gasanvändning har kortfattat studerats och det tycks som om eventuella problem med flamstabilitet vid förändrat Wobbeindex relativt enkelt kan övervinnas.

Begreppet gaskvalitet gäller i denna studie gasens sammansättning inom en och samma gasfamilj. I första hand studeras vad som händer vid förändrat Wobbeindex. Studien koncentreras till naturgas och studerar inte vad som kan hända med emissionerna då man byter mellan t ex biogas och naturgas.

De utbytbarhetsteorier som under åren utvecklats har studerats och några olika typer redovisas. De tar ingen hänsyn till emissioner för bedömandet av utbytbarhet. Ofullständig förbränning som resulterar i ökad CO-halt är dock en vanlig begränsning av utbytbarheten.

Dagens atmosfäriska brännare kan fås att emittera lägre NO_x-halter med hjälp av brännarinsatser och bafflar som styr sekundärluften. Det har under studiens genomförande inte gått att klarlägga deras inverkan på flamstabiliteten i händelse av förändrad gaskvalitet. Det visas att i framtiden kan atmosfärsbrännare ha både stor flexibilitet i fråga om gaskvalitet och förmåga att producera låga NO_x-halter samtidigt som verkningsgraden är hög.

SUMMARY

The study addresses the question if and to what extent emissions, mainly NO_x, are dependent on the gas quality. An american investigation e.g. indicates a sharp increase in NO_x emissions when natural gas is substituted for typical peak shaving gases. According to european investigations CO emissions could be doubled if the Wobbe number is increased 2-4 %.

NO_x reduction methods suitable for industrial gas burners are briefly studied. Flame stability problems seem to be easily avoided if the Wobbe number is varied.

Different interchangeability methods are examined. Generally they do not consider emissions as a restriction. However incomplete combustion is a common interchangeability restriction.

Lower NO_x emissions from atmospheric burners could be obtained with burner inserts or secondary air baffles. In the future atmospheric burners seem to be capable of managing both low NO_x emissions and changes in gas quality.

INNEHALLSFÖRTECKNING

		sid
1.	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Metodik	1
1.3	Avgränsningar	
2.	Studier av emissioner vid förbränning av olika gaser	2
2.1	NO_x	2
2.2	PAH (polyaromatiska kolväten)	3
2.3	Genomförda undersökningar	3
2.4	Emissionsförändringar i industriella processer	8
3.	Flamstabilitet	11
3.1	Stabilitetsdiagram	11
3.2	Lyft	15
3.3	Nedslag	17
3.4	Rökgasrecirkulation	18
4.	Ett urval av utbytbarhetsteorier	20
4.1	Wobbeindex	22
4.2	Weaver	24
4.3	Delbourg	27
4.4	Holmqvist	29
4.5	Dutton	30
4.6	Gasapparaternas toleranser	34
4.7	Vad menas med gaskvalitet?	36
5.	NO_x-reducerande åtgärder för gasbrännare	37
5.1	Dalhuisenbrännaren	40
6.	Slutsatser	43
7.	Referenser	44

1. INLEDNING

1.1 SYFTE

Syftet med denna rapport är att redovisa resultatet av en förstudie, som bedrivits med avsikt att, huvudsakligen på grundval av litteraturstudier, verifiera eller avfärda hypotesen att byte av gaskvalitet inom tillåtna utbytbarhetsgränser kan ge upphov till förändringar av emissionerna från gasapparater.

1.2 METODIK

Litteraturstudier och sökningar i databaser ligger till grund för studien. I samband härmed har ett besök gjorts på Institute of Gas Technologys bibliotek i Chicago. De klassiska utbytbarhetsteorierna och även litteratur rörande flamstabilitet har studerats. Litteraturstudierna har inriktats mot såväl klassiska som moderna utbytbarhetsteorier. Vidare har det studerats hur NO_x-reducerande åtgärder kan påverka flamstabiliteten vid förändrad gaskvalitet.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Studien är främst inriktad på atmosfärsbrännare. Motiven till denna avgränsning är att den undersökning som behandlat emissioner vid olika gaser huvudsakligen omfattat atmosfärsbrännare. Vidare behandlas atmosfärsbrännare i de allra flesta utbytbarhetsteorierna och flamstabiliteten är också relativt väl undersökt för atmosfärsbrännare. Den känslighet för varierande gaskvalitet som kan finnas i samband med låg-NO_x-teknologi för brännare diskuteras i korthet.

2. STUDIER AV EMISSIONER VID FÖRBRÄNNING AV OLIKA GASER

Studien syftar till att söka besvara frågan om emissionerna vid naturgasförbränning kan ändras om en annan gas används. Studien begränsas till gaser som anses utbytbara och alltså inte kräver någon justering av den gasanvändande utrustningen. De undersökningar som har studerat denna fråga tycks inskränka sig till en enda, ref 1. Ref 2 redovisar kortfattat resultat rörande CO-emissioner vid förändrat Wobbeindex.

Senare kapitel beskriver flamstabilitet och olika utbytbarhetsteorier. Emissionsbegränsande åtgärder, främst gällande NO_x, studeras och jämförs med parametrar som påverkar flamstabiliteten. Emissionsbegränsande åtgärder påverkan på brännares flexibilitet diskuteras och om de gränser man sätter för utbytbara gaser kan påverkas.

I studiens inledningsskede gjordes en litteratursökning i syfte att leta rapporter som behandlar problemet. De sökord som användes var Natural gas, Interchangeability, Pollution, Emission och Nitrogen Oxide. Databaserna som genomsöktes var Energy, Energyline, Compendex, Pascal, Chemical Abstracts, Chemical Engineering Abstracts och NTIS. Ingen relevant litteratur kunde finnas med hjälp av sökorden. En rapport nämnde att emissionsförändringar upptäcktes då naturgas ersattes med konstgjorda gaser (ref 3). Vid ett besök på Institute of Gas Technologys bibliotek i Chicago erhölls rapporter av intresse för studien.

De emissioner vi kan studera i samband med naturgasförbränning är NO_x, PAH och CO.

2.1 NO_x

I en översikt över NO_x- reducerande åtgärder (ref 4) nämns att endast i enstaka fall berörs även andra förbränningsfenomen som verkningsgrad, flamstabilitet, sot och CO. En mer fullständig bild av NO_x-reduktionens påverkan på andra faktorer efterlyses. I korthet kan NO_x-bildningen vid naturgasförbränning minskas enligt nedanstående fyra sätt. Närmare beskrivning av NO_x-bildning och -begränsning finns i nyss nämnda ref (4).

- sänkning av flamtemperaturen
- minskad uppehållstid vid höga temperaturer
- minskad N_2-koncentration
- minskad O_2-koncentration

Någon eller några av metoderna utnyttjas vid minskat luftöverskott, tvåstegsförbränning, rökgasrecirkulation, vatteninjektion och minskad luftförvärmning samt katalytisk förbränning.

2.2 PAH (Polyaromatiska kolväten) ref (5)

I samband med ofullständig förbränning kan PAH (polyaromatiska kolväten) bildas. PAH består av enbart kol- och väteatomer i form av flera ihopkopplade bensenringar. Emissionerna av PAH vid förbränning av naturgas är mycket små. Många olika varianter av PAH är eller misstänks vara cancerframkallande.

En minskning av PAH riskerar att höja NO_x-bildningen. Eftersom PAH är oförbränt material utgör hög flamtemperatur och lång uppehållstid metoder att hålla PAH-bildningen på en låg nivå, åtgärder som står i ett motsatsförhållande till de ovan angivna metoderna för minskning av NO_x-bildningen. Det är osäkert om det finns ett samband mellan PAH-bildning och CO-emissioner.

2.3 GENOMFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

Sedan slutet av 1970-talet har ett flertal arbeten med inriktning mot utbytbarhetsproblematik och emissioner genomförts i USA, se ref (1)(6)(7)(8)(9)(10). Man har bl a gjort mätningar på olika hushållsapparater, studerat utbytbarhetsmetoder och utvecklat nya testgaser som är lämpliga för de i framtiden förmodade gasleveranserna i USA.

De mätningar som är relevanta för denna studie redovisas i rapporten "Effect of Fuel Gas Composition on Appliance Performance" av J.C Griffiths m fl (ref 1), vilken ingår i ett projekt rörande gasapparaters driftflexibilitet.Projektet startades 1977 av American National Standards Institute Accredited Standards Committee Z21 som skapade en grupp med mål att utveckla medel så att tillfredsställande drift garanterades vid användandet av gaser inom ett bestämt kvalitetsområde. Området inom vilket gaskvaliteten varierar definieras av de olika gaser som förväntas bli levererade till de amerikanska gaskonsumenterna inom överskådlig framtid. Stora delar av detta arbete finns redovisat i ref 1. Mätningarna genomfördes 1981-82 vid American Gas

Association Laboratories och utgjorde en del av ett projekt rörande förbränningsmodellering förlagt till Science Applications Inc. (SAI). Finansiering av projektet erhölls från GRI.

Fyra olika testgaser fick representera den spännvidd av gaser som utgörs av de ca 200 olika gaser som levereras till de amerikanska konsumenterna. De fyra gaserna var en referensgas och tre testgaser för lyft, nedslag respektive gula toppar. Testgaserna är nyutvecklade och skiljer sig från IGUs testgaser. Testgaserna valdes i första hand för bedömning av flamstabilitet och fullständig förbränning och inte för att primärt avgöra eventuella emissionsförändringar. Andra mätningar som utfördes innefattade verkningsgrad och brännartemperatur.

Testgasernas sammansättning i vol-% i ref 1 var

<u>referensgas</u>

metan, CH_4	83,4
propan, C_3H_8	8,6
kväve, N_2	8,0

övre värmevärde, $H_{\ddot{o}} = 39{,}63$ MJ/m^3
relativ densitet $d_v = 0{,}672$
Wobbeindex $W_{\ddot{o}} = 48{,}28$ MJ/m^3

<u>testgas för lyft</u>

metan, CH_4	81,1
propan, C_3H_8	5,5
kväve, N_2	13,4

övre värmevärde, $H_{\ddot{o}} = 35{,}80$ MJ/m^3
relativ densitet, $d_v = 0{,}664$
Wobbeindex, $W_{\ddot{o}} = 43{,}92$ MJ/m^3

<u>testgas för gula toppar</u>

metan, CH_4	91,2
propan, C_3h_8	8,8

övre värmevärde, $H_{\ddot{o}} = 42{,}76$ MJ/m^3
relativ densitet, $d_v = 0{,}641$
Wobbeindex, $W_{\ddot{o}} = 53{,}34$ MJ/m^3

testgas för nedslag

metan, CH_4	34
propan, C_3H_8	19
propylen, C_3H_6	10
luft	37

övre värmevärde, $H_{\ddot{o}} = 39,52$ MJ/m^3
relativ densitet, $d_v = 0,995$
Wobbeindex, $W_{\ddot{o}} = 39,55$ MJ/m^3

En alternativ gasblandning för test av nedslag föreslogs också i rapporten och dess sammansättning är:

propan, C_3H_8	49,6 %
luft	50,4 %

övre värmevärde, $H_{\ddot{o}} = 46,86$ MJ/m^3
relativ densitet, $d_v = 1,264$
Wobbeindex $W_{\ddot{o}} = 41,57$ MJ/m^3

Dessa testgaser skiljer sig i sammansättningen från IGUs testgaser, vilka har följande sammansättning i vol-% av varje gaskomponent:

referensgas, G20

metan, CH_4	100

Wobbeindex, $W_{\ddot{o}} = 53,46$ MJ/m^3
relativ densitet, $d_v = 0,555$

testgas för lyft, G25

metan, CH_4	86
kväve, N_2	14

Wobbeindex, $W_{\ddot{o}} = 43,74$ MJ/m^3
relativ densitet, $d_v = 0,612$

testgas för ofullständig förbränning, G21

metan, CH_4	87
propan, C_3H_8	13

Wobbeindex, $W_{\ddot{o}} = 57,74$ MJ/m^3
relativ densitet $d_v = 0,684$

testgas för nedslag, G22

metan, CH_4	65
väte, H_2	35

Wobbeindex, W_o = 48,90 MJ/m^3
relativ densitet, d_v = 0.385

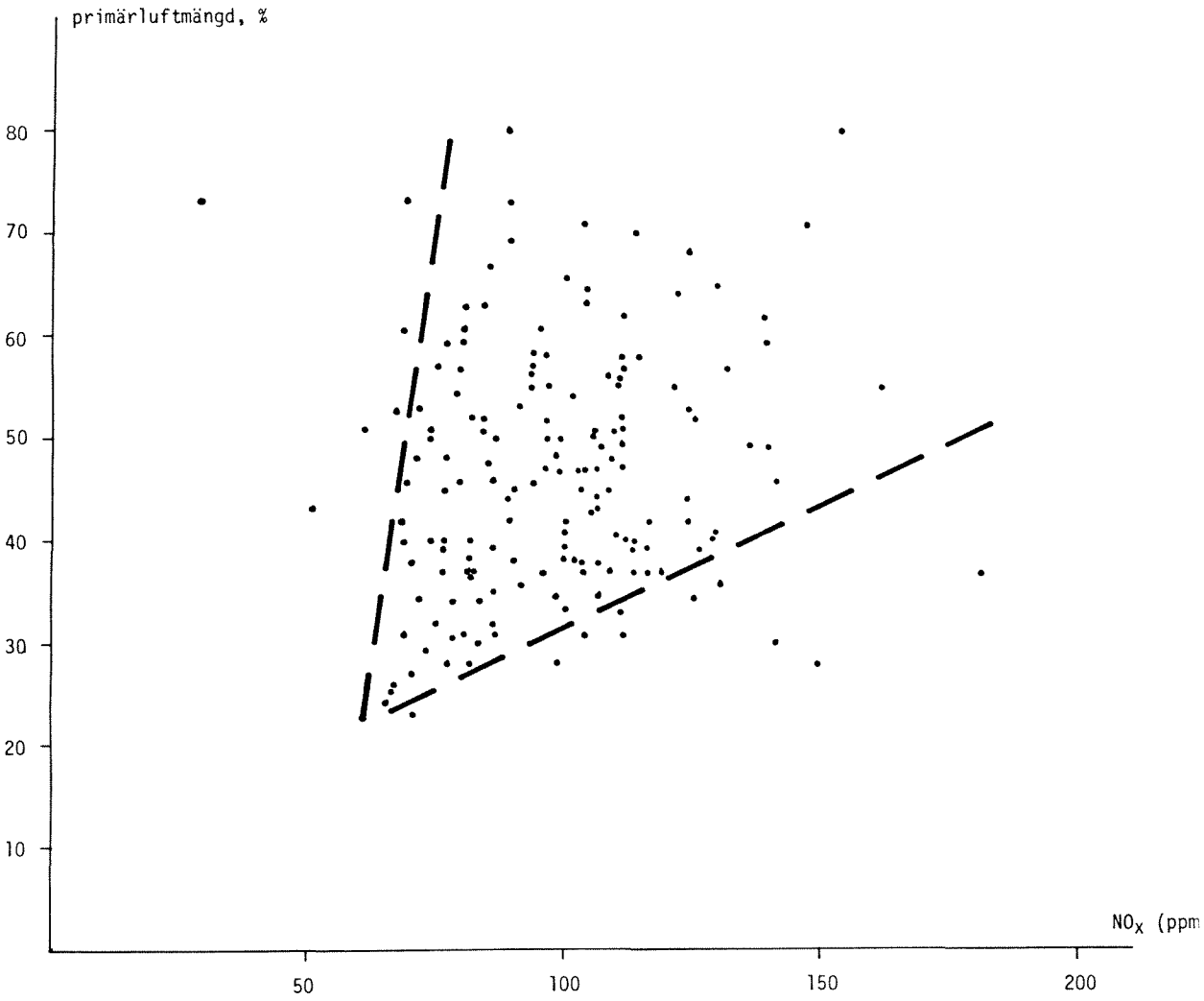
Samtidigt med framtagandet av testgaser simulerade man reserv- och spetslastgaser bestående av en propan/luft-blandning utspädd med naturgas. Dessa motsvarar de reserv- och spetslastgaser som idag används i USA.

I proven ingick hushållsapparater med främst atmosfärsbrännare. Man gjorde mätningar på värmepannor, gasspisar och varmvattenberedare. I gasapparaterna fanns atmosfärsbrännare av vanlig typ och av IR-typ, fläktgasbrännare och pulsbrännare.

Av störst intresse är NO_x-bildningen vid oförändrad mekanisk inställning av primärluftmängden, dvs primärluftmängden beror endast på variationer i Wobbeindex (se sid 15). I jämförelse med referensgasen kunde man ofta finna att testgasen för gula toppar gav upp till 15 % högre NO_x-halter. NO_x-halterna vid förbränning av testgas för lyft avvek ±% från resultatet med referensgasen. Större skillnader fick man vid användandet av reserv- eller spetslastgaser och testgas för nedslag. Här observerades NO_x-halter som var upp till 50 % högre än med referensgasen. I de två första fallen, testgaser för gula toppar och lyft, är skillnaderna alltför små för att dra någon bestämd slutsats om förändrade emissioner. Betydligt klarare framgår det att markanta ökningar av NO_x-emissionerna kan uppträda vid användandet av reserv- eller spetslastgaser.

De fall som visade markant höjda NO_x-halter vid användning av reserv- eller spetslastgasen och testgas för nedslag innefattar dels olika inställningar av primärluftmängden dels olika typer av gasapparater. I samband med NO_x-studier (ref 9) refereras till denna undersökning, vilket pekar på mätningarnas kvalitet och centrala roll. I Ref 9 menar man att en tänkbar förklaring till förhöjda NO_x-emissioner vid användandet av testgas för nedslag och simulerade reserv- och spetslastgaser är den högre relativa densiteten jämfört med referensgasens. Den högre relativa densiteten (0,995 mot de övriga gasernas 0,64-0,66) ger försämrad blandning av gas/luftblandningen. Som följd av den försämrade blandningen skulle temperaturtoppar i flamman kunna uppstå med åtföljande högre NO_x-bildning. Det ligger då nära till hands att misstänka att en ren propan-luftblandning (d_v = 1,264) kan ge ytterligare höjningar av NO_x-halterna. En fortsättning av denna studie kan inriktas mot en mer inträngande undersökning av NO_x-emissionerna vid spetslastgaser men de

övriga emissionerna får inte heller glömmas bort i detta sammanhang. Gaser med höga H_2-halter visade inga tecken på ökade NO_x-halter.



Figur 1 NO_x-emissionerna, enligt ref 1, som funktion av primärluftmängden.

Om samtliga NO_x-mätningar där primärluftmängden kunde ändras enligt ref 1 plottas, figur 15, kan man se en svag tendens till ökad NO_x-bildning vid högre primärluftmängd. Om man studerar de i mätningarna ingående brännartyperna och brännarbelastningarna kan man inte finna någon tendens att en viss brännartyp eller brännarbelastning skulle ge en högre NO_x-bildning. Pannor, spisar och varmvattenberedare har jämförts var för sig. Inte heller någon av brännarna som uppvisade gula toppar vid någon testgas, det enda oönskade fenomen som upptäcktes, vid rimlig inställning av primärluftmängden uppvisade några kännetecken rörande

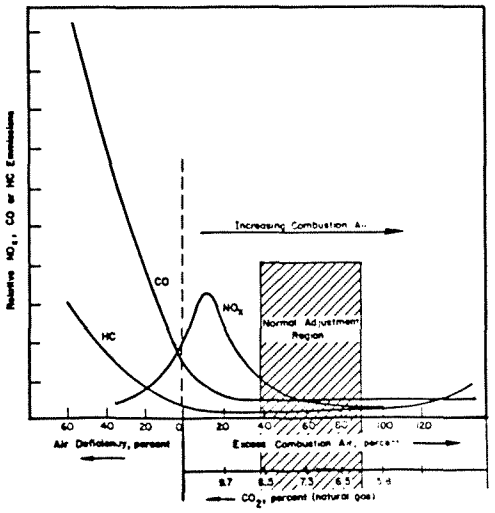
NO_x-bildningen. En liknande plottning av CO-halten i rökgaserna visade inte på något samband mellan primärluftmängd och CO-halt. Inga mätningar av PAH hade gjorts.

Det sägs i ref 2 att CO-emissionerna fördubblas då Wobbeindex ökar med 2-4 %. Detta skall man ha funnit i Storbritannien och Nederländerna. CO-emissionerna är kopplade till krav på fullständig förbränning av gasen.

2.4 EMISSIONSFÖRÄNDRINGAR I INDUSTRIELLA PROCESSER

Vi fortsätter nu diskussionen om emissionsförändringar vid skiftande gaskvalitet utan att ta hjälp av några mätningar och endast försöker utröna om emissionsförändringar kan uppträda i samband med industriell gasanvändning. Om en högre relativ densitet kan höja NO_x-emissionerna från hushållsapparater kan detta även ske i industribrännare.

Diskussionen begränsas till låg-NO_x-brännare och om ett förändrat Wobbeindex kan påverka emissionerna. Industribrännare kan utnyttja sänkt flamtemperatur, lågt luftöverskott, rökgasrecirkulation och tvåstegsförbränning i syfte att minska NO_x-bildningen.



Figur 2 NO_x-bildningen som funktion av luftöverskottet.

Det finns två exempel på brännare,Urquhart CXA och Ruhrgas SINOX-brännare, där mycket låga NO_x-halter erhålls då flamtemperaturen hålls låg som en följd av högt luftöverskott. Luftöverskotten är i dessa fall 80-100 %, dvs nära naturgasens flambarhetsgräns. En förändring av Wobbeindex kommer att medföra ett annat luftbehov. En höjning av Wobbeindex

kommer att minska luftöverskottet (se sid 14) och följaktligen orsaka höjda NO_x-emissioner medan en höjning av Wobbeindex ger motsatt förhållande och risk att flambarhetsgränsen passeras, dvs stabilitetsproblem. Det förefaller alltså som om denna låg-NO_x-metod kan äventyra flamstabiliteten och det är rimligt att någon form av styrning och mätning av luftöverskottet är nödvändigt för att systemet skall fungera med varierande gaskvaliteter.

En brännare som eldas mycket nära det stökiometriska luftbehovet kan komma att emittera större mängder ämnen om gaskvaliteten ändras och vi talar i så fall främst om förändringar av Wobbeindex. Liksom tidigare kommer ett höjt Wobbeindex att minska luftöverskottet och orsaka ofullständig förbränning och kraftigt höjda CO-emissioner. Om vi ser hur NO_x-bildningen beror av luftöverskottet, figur 2, finner vi att ett maximum nås en bit efter det stökiometriska luftbehovet. Detta orsakas av den höga flamtemperaturen i kombination med tillgång på syre. Ett minskat luftöverskott riskerar alltså att ge högre NO_x-halter och även denna NO_x-reducerande metod kan ge förhöjda emissioner vid förändrad gaskvalitet. Det verkar även här att styrning och kontroll av luftöverskottet är nödvändigt för säker drift.

Rökgasrecirkulation behandlas i kapitel 3 och och där visas att flamstabiliteten kan försämras. Diagrammen gäller atmosfärsbrännare men det är inte orimligt att anta att det även gäller andra brännare där rökgasrecirkulation används.

Tvåstegsförbränning tycks vid en hastig blick inte ge upphov till misstankar om förändrade emissioner vid byte av gaskvaliteten. Brännarens temperatur kan tänkas minska vilket skulle vara en indikation på minskad risk för nedslag, dock ett litet problem vid naturgaseldning.

En del industriprocesser kräver hög temperatur, exempelvis glassmältning, och detta omöjliggör låg-NO_x-teknologi vid brännarkonstruktionen. I stället har man tvingats till åtgärder gällande brännarplacering och ugnskonstruktion i syfte att minska NO_x-bildningen. Sådana konstruktioner synes inte direkt påverkas av gaskvaliteten. Frågan kan dock bli om flamformen förändras vid en annan gaskvalitet och om flamformen har någon betydelse för de låga emissionerna?

Ett annat område där vidare studier kan vara av intresse är direkttorkning av såväl livsmedel och foder som papper, tryck och lacker. Vid byte till en gas där innehållet av t ex tungmetaller är större kan begränsningar krävas. Detta bör främst gälla direkttorkning av livsmedel och foder.

Som en kort sammanfattning av kapitlet kan sägas att mätningar av emissioner vid olika gaskvaliteter är mycket begränsade, endast en funnen rapport redovisar mätningar.

Dessa mätningar tyder på att NO_x-bildningen i hushållsapparater kan öka märkbart om reserv- eller spetslastgaser med hög relativ densitet används. Låg-NO_x-brännares tänkbara emissionsförändringar vid variationer av gaskvaliteten synes kunna klaras med brännarövervakning av typen syrgasmätning i rökgaserna.

3. FLAMSTABILITET

I detta kapitel studeras flamstabilitet och parametrar som berör denna. Kapitlet bygger huvudsakligen på två referenser, Harsha m fl (ref 10) och Harris och South (ref 11). Referenserna belyser i korthet kända fenomen i samband med flamstabilitet.

Indelning av gasbrännare kan göras på flera sätt men en för fortsättningen lämplig indelning är:

- Brännare där gas och luft blandas som i en bunsenbrännare

- Brännare där fläktar används för blandningen av gas och luft.

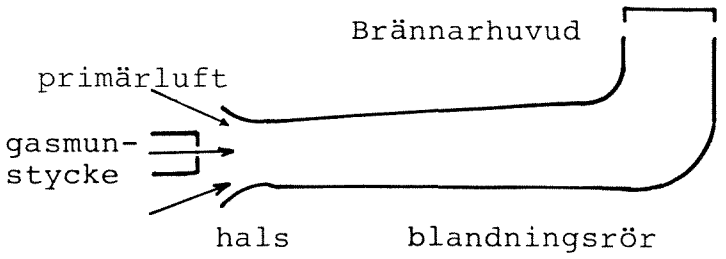
I den första typen av brännare strömmar gas genom ett injektormunstycke och drar då med sig en viss mängd luft, primärluft, in i brännaren. Resterande luftmängd som behövs för fullständig förbränning tillförs vid själva flamman. Vid gastryck understigande ca 350 mbar talar man om atmosfärssystem. Många gasapparater för hushållsbruk innehåller atmosfärsbrännare.

I ref 10 skrivs att publicerad information rörande brännarutformning inskränker sig till atmosfärsbrännare. Riktlinjer för konstruktion gäller främst injektor, hals och dimensioner för brännaröppningar.

Vid kongressen om gaskvalitet i Groningen (ref 12) i april 1986 nämnde A.W Guinee, teknisk chef på Gasunie, att hushållen är de känsligaste abonnenterna med tanke på varierande gaskvalitet. Han motiverade detta med att hushållen inte kan påverka apparatutformningen och att de förväntar sig att apparaten tillsammans med levererad gas skall fungera utan problem. De hittills utvecklade utbytbarhetsteorierna är avsedda för dessa hushållsabonnenter. Studiens syfte är inte att studera brännarkonstruktionens inverkan på flexibiliteten men kunskap om flamstabilitet utnyttjas i kapitlet om emissionsbegränsande åtgärder för gasbrännare.

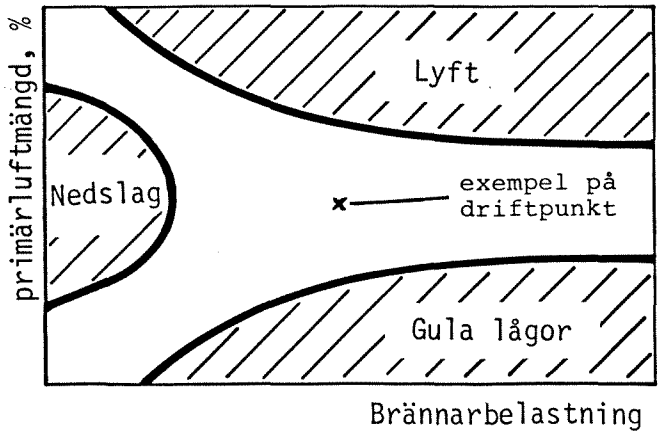
3.1 STABILITETSDIAGRAM

De i fortsättningen visade stabilitetsdiagrammen behandlar atmosfärsbrännare. En sådan brännare ser vi i figur 3 med delarnas namn angivna.



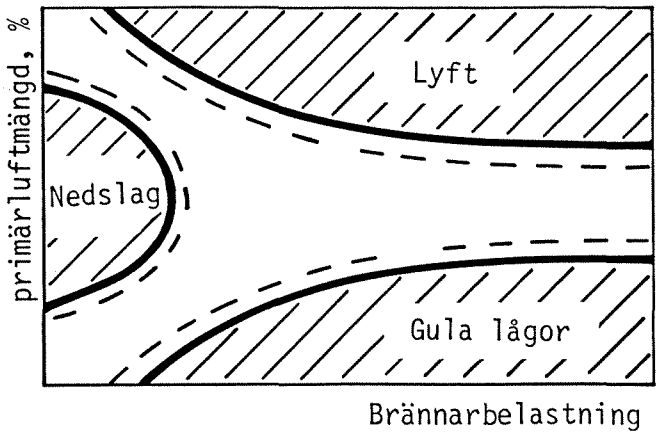
Figur 3 Atmosfärsbrännare med dess namn

I den närmast följande texten studeras stabilitetsdiagram och hur detta kan förändras.



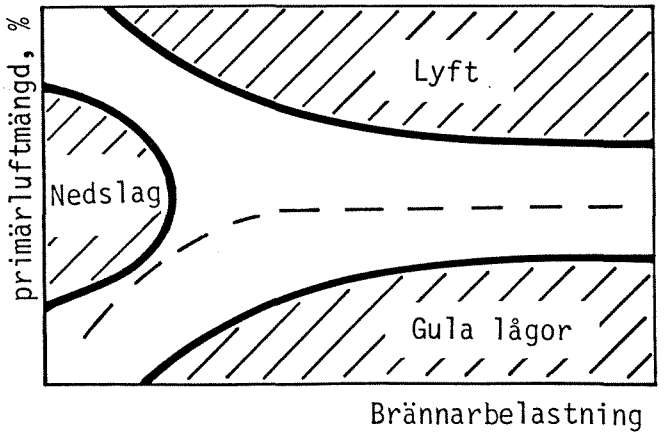
Figur 4 Stabilitetsdiagram för atmosfärisk brännare

På abskissan finns brännarbelastningen och längs ordinatan finns primärluftmängden uttryckt som mängden primärluft i förhållande till det stökiometriska luftbehovet. Gränserna för de oönskade effekterna lyft, gula toppar och nedslag gäller för en specifik gas. Diagrammet konstrueras genom att primärluftmängd och brännarbelastning varieras så att gränserna nås. Gränserna för oönskade förbränningsfenomen kommer att ändras om en annan gas används, se figur 5.



Figur 5 Stabilitetsdiagrammets utseende vid olika gaser

I figur 6 är brännarens driftpunkt markerad och hur denna ändras vid varierande brännarbelastning, den streckade linjen.



Figur 6 Primärluftmängden vid olika brännarbelastningar

Det har presenterats olika ekvationer för beräknandet av primärluftmängden. Ekvationerna gäller för olika brännarvarianter. För en brännare med lågt gastryck och vid maximal brännarbelastning kan primärluftmängden, p, beräknas med hjälp av följande ekvation.

$$p = \sqrt{d_v} * \left(\frac{\sqrt{C * A_p}}{A_j} - 1 \right) \qquad (\%)$$

där

p = primärluftmängden
d_v = gasens relativa densitet
C_v = konstant, dimensionslös
A_p = brännaröppningarnas area
A_j = injektorarea

Kommer primärluftmängden att ändras med en annan gas och i så fall på vilket sätt? Vid insugning av primärluft visar det sig att rörelsemängden före och efter primärlufttillförseln är konstant. Vi skall nu se vilka parametrar som påverkar primärluftmängden.

Utveckling av Bernoullis ekvation och uttryck för bränsleeffekt i samband med härledning av Wobbeindex (se sid 22) ger

$$\dot{V} = K * A * \sqrt{\Delta p / d_v}$$

$\dot{V}$ = volymflödet
K = konstant
Δp = tryckfallet över munstycket

Vidare är massflödet proportionellt mot $V * d_v$ så att

$$\dot{m} \sim \dot{V} * d_v = K * A \sqrt{\Delta p * d_v}$$

Hastigheten genom gasmunstycket blir

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = K * \sqrt{\Delta p / d_v}$$

Rörelsemängden per tidsenhet för gasen vid injektorn är samma som gas/luftblandningens hastighet multiplicerad med massflödet. Då fås

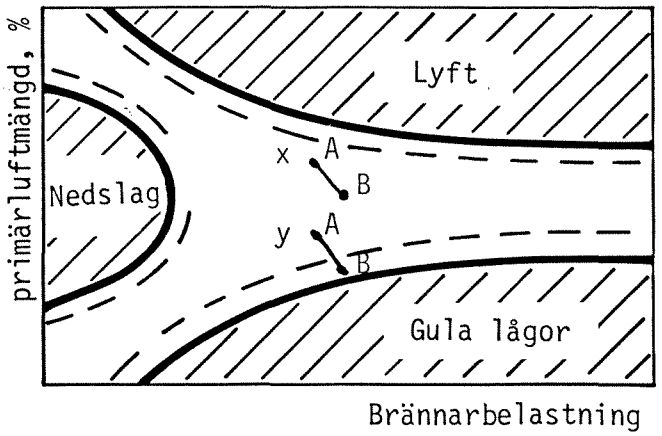
massflödet * hastighet = rörelsemängd/tidsenhet =

$$= K * A \sqrt{\Delta p * d_v} * K \sqrt{\Delta p / d_v} = K^2 * A * \Delta p$$

Eftersom rörelsemängden är oförändrad blir luftmängden som sugs med gasströmmen endast beroende av gasmunstyckets tvärsnittsarea och gasens distributionstryck och inte beroende av gassammansättningen. Det kan vidare visas att det stökiometriska luftbehovet är direkt proportionellt mot gasens Wobbeindex. Om en gas med 10 % högre Wobbeindex än

ursprungsgasen används kommer primärluftmängden att minska vid användning av den nya gasen. Vi antar att primärluftmängden är 50 % med ursprungsgasen. Primärluftmängden kommer då att sjunka till 45,5 % då den nya gasen används.

Hur kommer driftpunkten att ändras om ursprungsgasen ersätts med en gas med högre Wobbeindex. I exemplet ovan sjönk primärluftmängden då gasens Wobbeindex ökade. Eftersom ett ökat Wobbeindex får som följd att brännareffekten höjs förskjuts driftpunkten mot höger i stabilitetsdiagrammet.



Figur 7 Brännarens driftpunkt för två gaser $W_A > W_B$

Antag att brännaren är inställd på punkt x med ursprungsgasen. Av figur 7 framgår det att denna inställning är mindre känslig mot förändringar av Wobbeindex än punkt y.

Lyft och nedslag är två fenomen som speciellt betraktas i utbytbarhetsteorierna. Vid förbränning av naturgas är främst lyft av intresse pga naturgasens låga flamhastighet. Den följande texten ger en bild orsakerna till lyft och nedslag.

3.2 LYFT

Vid lyft överstiger utströmningshastigheten genom brännaröppningen i alla punkter gasens flamhastighet. Flamman kommer att lyfta från brännaren och vara mycket känslig för störningar som lätt släcker flamman.

Parametrar som påverkar benägenheten till lyft är gassammansättningen, brännareffekten, primärluftmängden samt storlek, form, djup och avstånd mellan brännaröppningarna.

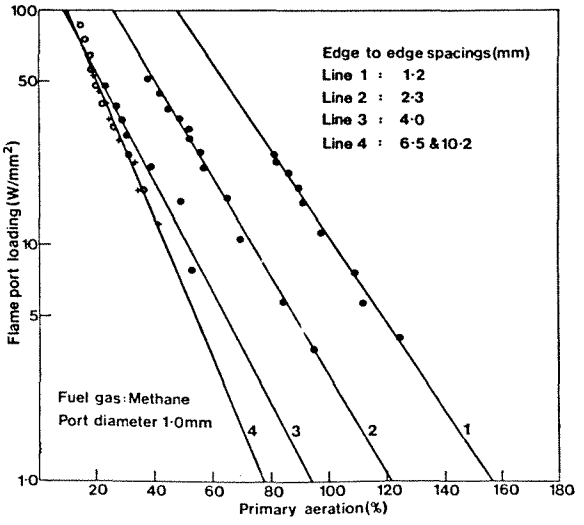
Benägenheten för lyft ökar med små och glest placerade brännaröppningar. Båda faktorerna kan lätt visas och inses. Lewis och von Elbe (ref 13) har angivit en gradient för kritisk gränshastighet som lyder

$$g_B = \frac{4Q}{R^3} \qquad \left(\frac{1}{s} \right)$$

Q = volymflöde genom öppningen vid lyft
R = portdiameter

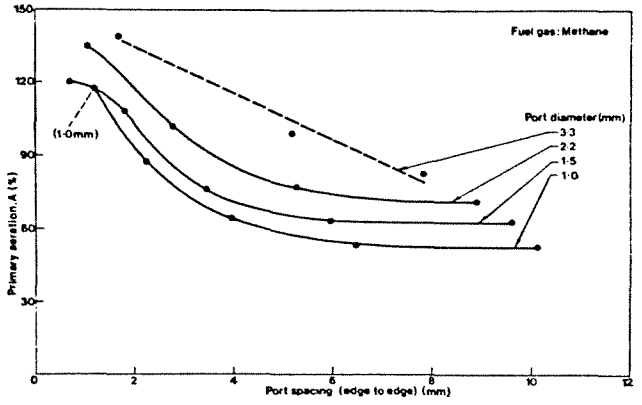
För en given gas är g_B känd och en minskning av R ökar risken för lyft. Det kan lätt inses att närliggande brännaröppningar minskar lyftrisken då interaktion mellan flammorna ökar stabiliteten. En flamma med endast en brännaröppning, t ex en pilotlåga, är självklart känsligare för en tillfällig instabilitet än en flamma omgiven av andra flammor.

Det finns ett motsatsförhållande mellan lyft- och nedslagsrisken vid dimensionering av brännaröppningen då små brännaröppningar minskar risken för nedslag.



Figur 8 Tendensen till lyft vid olika avstånd mellan brännaröppningarna.

Figur 8 är resultatet av mätningar vid British Gas (Watson House) (ref 10) i London och visar stabilitetsgränser med hänsyn till lyft för avståndet mellan brännaröppningarna. Förhållandet kan också illustreras med figur 9 gällande en fast brännareffekt. Vid en ökande brännarbelastning sjunker kurvornas läge i diagrammet.



Figur 9 Tendensen till lyft vid olika storlek på och olika avstånd mellan brännaröppningarna

Risken för lyft påverkas av gassammansättningen och Wobbeindex. Låg flamhastighet ökar risken för lyft.

3.3 NEDSLAG

I de fall då gasens flamhastighet överstiger utströmningshastigheten kan flamman fortsätta ned i brännarmunstycket och släckas.

Nedslag är för hushållsapparater ett mindre problem än lyft vid naturgasdrift. Detta orsakas naturgasens låga flamhastighet. Vätehaltiga gaser har pga den högre flamhastigheten större risk att orsaka nedslag. Naturgasens snäva gränser mellan undre och övre flambarhetsgränsen är också en fördel då man vill undvika nedslag; gas/luftblandningen före brännaröppningen måste ligga innanför flambarhetsgränserna för att nedslag skall kunna inträffa.

Små brännaröppninghar gav som tidigare nämnts en minskad risk för nedslag. Är brännaröppningarna tillräckligt små kommer flamman att strypas vid öppningen så att nedslag förhindras.

Genom att utnyttja det dimensionslösa Peclettalet kan ett mått på strypdiametern erhållas (ref 14)

$$\frac{v * D}{(\lambda/\varrho c_p)} = \text{konstant}$$

där

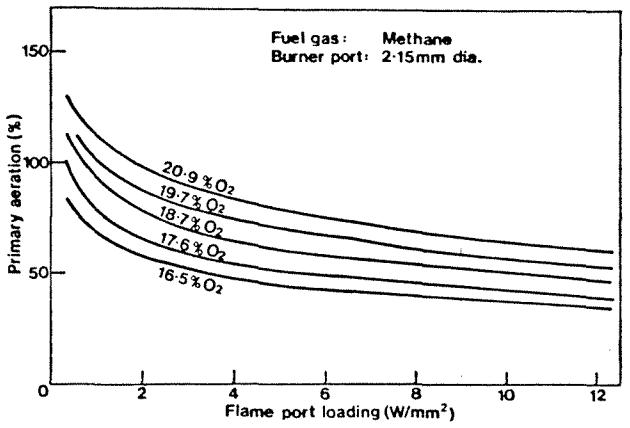
v = flamhastighet
D = strypdiameter
λ = termisk konduktivitet
ϱ = densiteten
c_p = värmekapacitivitet

Ekvationen gäller vid konstant bränslekoncentration och ursprungstemperatur. Alla värden gäller gas/luftblandningen och av ekvationen framgår att strypdiametern är beroende av gassammansättningen och primärluftmängden.

Brännaröppningens geometri och omgivningen kring denna har också betydelse för nedslagsrisken. Det handlar huvudsakligen om värmeavledning och berörs endast kort med ett exempel. Gasens förbränningshastighet förändras med tryck och temperatur, se t ex ref (15), så att högre temperatur höjer flamhastigheten. En högre materialtemperatur kring brännaröppningen kan då öka risken för nedslag.

3.4 RÖKGASRECIRKULATION

Rökgaser som recirkuleras tillbaka till förbränningszonen sänker syrehalten i förbränningsluften. Syrehaltens inverkan på flamstabiliteten illustreras enklast i figur 10. Figuren gäller för minskad syrehalt i primärluften men det har ett likartat utseende om sekundärluften har brist på syre.



Figur 10 Syrehaltens inverkan på flamstabiliteten

Minskad syrehalt ökar risken för lyft eftersom flamhastigheten sänks. En minskning av förbränningsluftens syrehalt kan i olyckliga fall ge upphov till ofullständig förbränning. Kärnlågans längd kommer att öka om primärluften (syrehalten) minskar. Detsamma gäller sekundärflamman och förlängningen av flamman kan orsaka att flamspetsen når eldstadsväggen och kyls av med ofullständig förbränning som följd.

4. ETT URVAL AV UTBYTBARHETSTEORIER

Under de senaste 60 åren har olika utbytbarhetsteorier presenterats. Den första teorin utvecklades av Wobbe i Italien 1926 och resulterade i ett index som är ett mått på brännareffekten. Fram till 1950-talet gjordes de största insatserna inom området i USA. Orsaken till detta kan finnas i det faktum att man i USA har använt naturgas under längre tid än i Europa, där stadsgasen användes senare och varje isolerade gasnät försörjdes med gas från en källa medan det amerikanska naturgasnätet kopplade samman flera olika gaskällor, som med tiden blev allt fler. I tabell 1 ses olika utbytbarhetsteorier som utvecklats under åren.

Wobbe	1926	Italien
AGA	1933	USA
Williem	1938	USA
Knoy	1941	USA
AGA	1946	USA
Weaver	1951	USA
Delbourg	1953	Frankrike
Gilbert & Prigg	1956	Storbritannien
Grumer, Harris & Rowe	1956	USA
Holmqvist	1957	Sverige
Schuster	1957	Västtyskland
Van Krevelen & Chermin	1958	Nederländerna
Harris & Lovelace	1968	Storbritannien
Van der Linden	1969	Nederländerna
Sommer & Joos	1973	Västtyskland
Harris & Wilson	1974	Storbritannien
France	1976	Storbritannien
Dutton	1984	Storbritannien

Tabell 1: Olika utbytbarhetsteorier

En del av teorierna har studerats. De är Wobbe, AGA (1946) (ref 16), Knoy (ref 17), Weaver (ref 18), Delbourg (ref 19), Gilbert & Prigg (ref 20), Holmqvist (ref 21), Harris & Lovelace (ref 22), Van der Linden (ref 23, 24) och Dutton (ref 25). Några av dessa genomgås noggrannare senare i detta kapitel. Mycket kortfattat kan utvecklingen beskrivas på följande sätt. De olika arbetena har resulterat i jämförelsetal eller diagram för avgörande av gasernas inbördes utbytbarhet. De faktorer man då har tagit hänsyn till är:

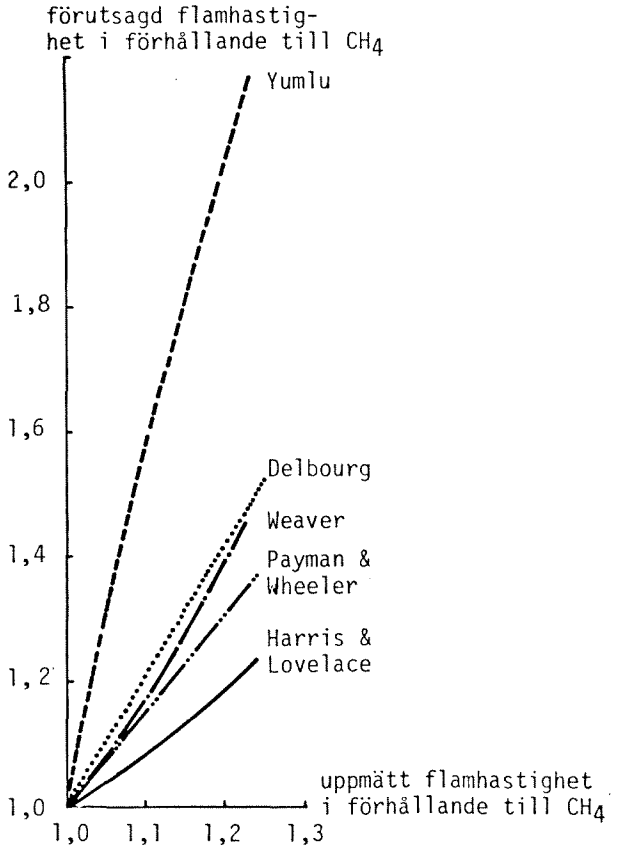
- Brännareffekt
- Gula toppar, sotbildning, ofullständig förbränning
- Flamlyft
- Nedslag

- Flamlyft uppkommer då gas/luftblandningens utströmningshastighet är större än flamhastigheten

- Om flamhastigheten är större än utströmningshastigheten sker nedslag, flamman fortsätter in i brännarmunstycket och släcks

- Gula toppar indikerar oförbrända kolpartiklar i flamman och kan orsaka ofullständig förbränning, dvs ökad CO-halt

Det framgår tydligt att flamhastigheten har inflytande på både nedslag och lyft. Behovet av goda metoder för beräkning av flamhastigheten framgår tydligt om utbytbarhetsteorier med flamhastigheten som parameter skall förfinas. Figur 11 (ref 26) visar hur olika metoder att beräkna flamhastigheten överensstämmer med mätresultat.



Figur 11 Beräknade flamhastigheters överensstämmelse med mätdata enligt ref 26.

Jämförelsetalen har varit i form av enstaka index eller grupper av index. Diagram har presenterats i både två och tre dimensioner.

Jämförelsetal baserade på ett index har bl a presenterats av Wobbe, Knoy (en form av Wobbeindex) och Holmqvist. Wobbeindex är som tidigare nämnts den första utbytbarhetsteorin och ett mått på brännareffekten. Det är också ofta använt som en del i andra utbytbarhetsteorier. Weaver utvecklade sex olika index, varav fyra nyutvecklade, för bl a brännareffekt, flamlyft, nedslag och sotbildning.

Från 1950-talet har ett flertal tvådimensionella diagram utarbetats. Gemensamt för de flesta av dessa är att axlarna representerar Wobbeindex (oförändrat eller med vissa korrektioner) och ett uttryck knutet till flamhastigheten (t ex Delbourgs förbränningspotential och Weaver flame speed factor).I de tvådimensionella diagrammen finns ett begränsat område inom vilket gaser skall ligga för att anses utbytbara. Diagrammen kan ta hänsyn till förbränningseffekter som flamlyft, nedslag, och ofullständig förbränning. Bland de tvådimensionella diagrammen kan nämnas Delbourg (stadsgas och naturgas), Gilbert & Prigg (stadsgas) och Harris & Lovelace (naturgas). Det senaste tillskottet av utbytbarhetsteorier är Duttons, vilket är tredimensionellt. Enligt denna teori omvandlas den gas som skall bedömas till en ekvivalent blandning av metan, propan, kväve och väte. Även Wobbeindex ingår i Duttons utbytbarhetsteori.

De hittills nämnda teorierna utgår alla från gassammansättningen utan hänsyn tagen till olika brännarparametrar. Det godkända området är bestämt av de känsligaste apparaterna i systemet eller med hjälp av provbrännare. En metod där både gas- och brännarparametrar ingår har utvecklats av van der Linden. Utbytbarhetsteorin framställs i ett tvådimensionellt diagram.

4.1 WOBBEINDEX

Beräkning av Wobbeindex eller Wobbetalet är den äldsta metoden att avgöra utbytbarheten mellan två gaser. Till skillnad från andra metoder har Wobbeindex inte ett empiriskt ursprung utan kan härledas med utgångspunkt från Bernoullis ekvation. Utbytbarheten avgörs endast genom jämförelse av brännareffekten med de två gaserna. Den godtagbara förändringen av gasens Wobbeindex skiljer sig mellan olika länder. Detta beror på att apparatpopulationen kan vara olika känslig för variationer i gaskvaliteten och att man accepterar olika former av förändrade förbränningsfenomen i form av t ex lyft- och nedslagstendenser. En acceptabel variation av Wobbeindex brukar vara ca ±5 %.

Härledningen av Wobbeindex är följande:
Bernoullis ekvation ger

$$v^2 = \frac{2 * \Delta p}{\varrho_g}$$

där

v = gasens utströmningshastighet
Δp = tryckfallet över munstycket
ϱ_g = gasdensiteten

Bränsleeffekten blir

$$Q = A * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\varrho_g}} * H$$

där

A = munstycksarean
H = gasens värmevärde

sätt $d_v = \frac{\varrho_g}{\varrho_l}$

d_v = gasens relativa densitet i förhållande till luft

detta ger

$$Q = A * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\varrho_l}} * \frac{H}{\sqrt{d_v}}$$

där

$$W = \frac{H}{\sqrt{d_v}}$$

W = gasens Wobbeindex

Som vi kan se är Wobbeindex tryckberoende och i de fall där skillnaden i Wobbeindex är alltför stor kan utbytesgasen ändå användas om gastrycket ändras. Det kan då hända att andra parametrar ändras, t ex primärluftmängden, som negativt kan påverka flamstabiliteten. Det utvidgade Wobbeindex, $\sqrt{\Delta p} * W$, kan då användas för att avgöra utbytbarheten.

4.2 WEAVER

Den amerikanska gasindustrin startade 1927 ett arbete kring gasers utbytbarhet kallat "Mixed gas research". Resultat presenterades fortlöpande fram till 1933 och då hade en stor mängd data redovisats. AGA arbetade vidare och 1946 presenterades en serie index för bedömande av gasers utbytbarhet. Weaver utnyttjade en del av AGAs resultat och index för utvecklandet av en serie egna index, totalt sex stycken varav fyra var nyutvecklade. De sex index Weaver ställde upp gällde effekt, primärluftmängd, lyft, nedslag, gula toppar och ofullständig förbränning. Weaver valde att behålla effekt- och primärluftindex oförändrade från AGA Research Bulletin 36 (ref 16). Dessa index kan också härledas teoretiskt.

Effektindex, J_H, tecknas som

$$J_H = \frac{H * \sqrt{d_{v,a}}}{H_a * \sqrt{d_v}}$$

där

H, H_a är värmevärdet för respektive gas

d_v , $d_{v,a}$ är relativa densiteten för respektive gas

Notera att detta index är likställt med kvoten av Wobbeindex för de två gaserna men ordet Wobbeindex används inte. Av någon anledning används Wobbeindex i övrigt inte i amerikanska metoder. En förklaring som givits säger att Wobbeindex endast betraktar brännareffekten och inte några förbränningsfenomen.

Index för primärluftmängd skrivs (se även kapitel om flamstabilitet)

$$J_A = \frac{A * \sqrt{d_{v,a}}}{A_a * \sqrt{d_v}}$$

där

A, A_a är det stökiometriska luftbehovet för respektive gas
d_v, $d_{v,a}$ är gasernas relativa densitet

Dessa två index härör från AGAs undersökningar och de följande utvecklade Weaver själv med hjälp av teori och AGAs mätresultat. Weavers index för lyft innehåller dels det ovan nämnda index för primärluftmängd, dels "Weaver flame speed factor", av Holmqvist kallad tändhastighetsfaktor. Gaserna är helt utbytbara med hänsyn till lyft då $J_L = 1$.

$$J_L = J_A * \frac{S}{S_a} * \frac{100 - Q}{100 - Q_a}$$

där

S, S_a = tändhastighetsfaktorn
Q, Q_a = andelen syre i gaserna

Tändhastighetsfaktorn, S, skrivs som

$$S = \frac{aF_a + bF_b + cF_c + ...}{A + 5Z - 18,8Q + 1}$$

a, b, c ... = andelarna av varje brännbar delkomponent i gasen

F_a, F_b, F_c , ... = tändhastighetsfaktorn för varje delkomponent i gasen, se nedanstående tabell

A = stökiometriska luftbehovet för gasblandningen

Z = totala andelen inerta gaser i gasblandningen

Q = liksom tidigare syrgashalten i gasen

Metan	148
Etan	301
Propan	398
Butan	513
Etylen	454
Propylen	674
Acetylen	776
Bensen	920
Koloxid	61
Väte	339

Tabell 2 Tändhastighetsfaktorn för olika gaser

Harris (ref 22) menar att det är fel att alla inerta gaser behandlas lika. Detta nämns i samband med tänkbara förbättringar av det utbytbarhetsdiagram Harris utvecklade i Storbritannien under 1960-talet. Diagrammet är uppbyggt på samma sätt som Delbourgs diagram men med Weavers tändhastighetsfaktor på abskissan och ett oförändrat Wobbeindex på ordinatan. De inerta gasernas inverkan på den maximala flamhastigheten står i proportion till gaskomponenternas värmekapacitivitet. Inte heller det sätt att mäta den maximala flamhastigheten som Weaver använder är helt korrekt enligt Harris.

För nedslag utvecklades ett index innehållande index för primärluft och tändhastighetsfaktorn. Då Weavers index för nedslag är lika med noll anses gaserna helt utbytbara då man betraktar risken för nedslag. Index för nedslag uttrycks som

$$J_F = \frac{S}{S_a} - 1,4J_A + 0,4$$

med tidigare använda beteckningar

De två sista indexen gäller tendensen till gula toppar och ofullständig förbränning. Index för gula toppar är något mer komplicerat och har följande utseende:

$$J_Y = J_A + \frac{N - N_a}{110} - 1$$

J_A är index för primärluftmängd och N och N_a betecknar det antal atomer i 100 molekyler av gasen som lätt frigörs under förbränningen och bestäms som antalet kolatomer i kolväten minus en kolatom per metanmolekyl. Då J_Y är lika med noll finns ingen skillnad mellan gaserna.

Det avslutande indexet gäller ofullständig förbränning och anger utbytesgasens relativa benägenhet att bilda koloxid. Samma koloxidbildning fås med de två gaserna då $J_I = 0$. Index för ofullständig förbränning skrivs som

$$J_I = J_A - 0,366 * \frac{R}{R_a} - 0,634$$

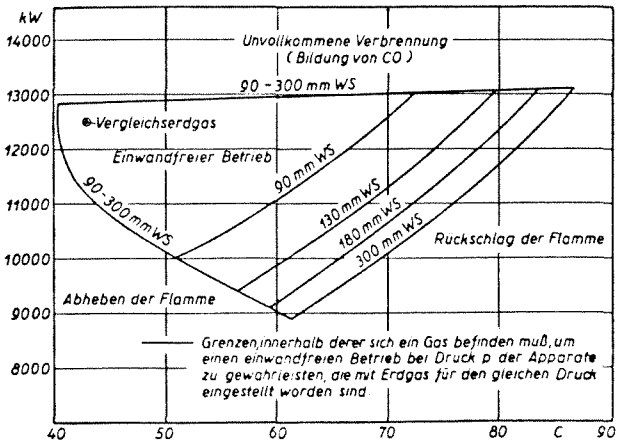
R och R_a betecknar förhållandet mellan antalet väteatomer i gasen och kolatomerna i kolvätena.

4.3 DELBOURG-DIAGRAMMET

Delbourgdiagrammet konstruerades ursprungligen 1951 för att avgöra utbytbarheten mellan stadsgaser, men en senare version anpassades för naturgas. Det är den första tvådimensionella metoden om man inte räknar metoder med en serie index som flerdimensionella.

Delbourg bestämde det acceptabla området genom att mäta toleransen hos olika franska gasapparater med olika flerkomponentgaser. Gränsen för varje kriterium, ofullständig förbränning, lyft och nedslag, bestämdes av den känsligaste gasapparaten. Från dessa undersökningar utvecklades en referensapparat, "bruleur controleur", för att att definiera det område inom vilket gaserna anses utbytbara.

I figur 12 kan vi se att Delbourgdiagrammet är tryckberoende



Figur 12 Delbourgdiagrammet

Axlarna i diagrammet representerar ett modifierat Wobbeindex och en förbränningspotential. Det modifierade Wobbeindex definieras som:

$$W' = W * k_1 * k_2$$

där

$$k_1 = 1 - \frac{12,5(CO + 4O_2 - 0,5CO_2)}{H_u}$$

och

$$k_2 = 1 + 5,8*10^{-6}*H_u^* + 0,131*10^{-9}*H_u^{*2} - \\ - 1,22*10^{-15}H_u^{*3} + ...$$

$H_u^* = H_u$ för kolväten högre än CH_4

Konstanterna i k_1 och k_2 är beroende på vilka enheter man använder och de här givna ekvationerna gäller då värmevärdet uttrycks i kcal/m^3.

För gaser som huvudsakligen består av metan, CH_4, är dessa korrektionsfaktorer oviktiga, dvs

$$W' = W$$

Förbränningspotentialen, C, är ett uttryck för flamhastigheten och skrivs med de gaskomponenter som är aktuella i naturgas som

$$C = K_1 * K_2 \frac{0,3CH_4 + 0,75C_2H_6 + 0,95C_3H_8 + C_4H_{10} + 1,15C_5H_{12}}{\sqrt{d_v}}$$

K_1 och K_2 är empiriskt framtagna koefficienter som är funktioner av syrehalten och det modifierade Wobbeindexet. För de flesta naturgaser är K_1 och K_2 lika med 1,0.

Sambandet mellan förbränningspotentialen och flamhastigheten tycks kortfattat vara att ju lägre flamhastighet eller ju större andel CH_4 desto lägre förbränningspotential.

Utöver diagrammet utvecklade Delbourg också index för sotbildning och gula toppar. Index för sotbildning gäller stadsgas och index för gula toppar gäller naturgas.

Index för sotbildning

$$I_{CH} = \frac{(1,0 + 0,01H_2 + 0,01CO) * \sum bC_nH_m}{\sqrt{d_v}}$$

b = empiriskt bestämd koefficient för sotbildning för olika kolväten

Index för gula toppar

$$I_J = \frac{(1,0 - \frac{100*O_2}{H_u}) * \sum jC_nH_m}{\sqrt{d_v}}$$

j = empiriskt bestämd koefficient för gula toppar för olika kolväten

En gas anses helt utbytbar om index för sotbildning eller gula toppar ej överstiger index för referensgasen.

Kritik mot Delbourgs metod att bedöma gasers inbördes utbytbarhet (diagram + index) har menat att systemet är alltför restriktivt och utformat kring franska utrustningar med mycket begränsad flexibilitet och att diagrammet är tryckberoende.

4.4 HOLMQVIST

Ett svenskt kriterium för avgörande om två gaser kan sägas vara utbytbara utvecklades av Rudolf Holmqvist vid Stockholms gasverk på 50-talet. Kriteriet på utbytbarhet gäller kärnlågans längd. Ett motiv till valet av kärnlågans längd som ett utbytbarhetskriterium är att om kärnlågan når en kall yta så drabbas man av ofullständig förbränning. En typisk applikation där detta kan ske är gasspisar. C_k definieras med hjälp av två faktorer, brännarens sugfaktor C och kärnlängdsfaktorn F. De definieras som

$$C = \frac{x}{\sqrt{d_v}}$$

där

x = förhållandet mellan luft- och gasmängderna
d_v = gasens relativa densitet

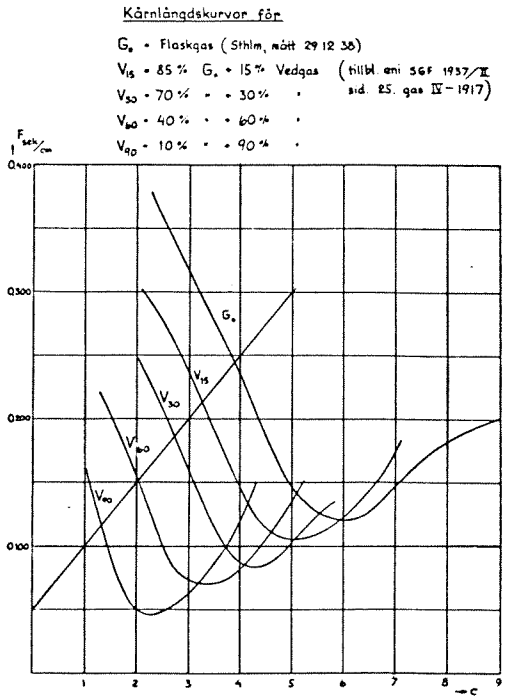
och

$$F = \frac{z}{u_k \sqrt{d_v}}$$

där

z = luftmängden i förhållande till gasmängden
u_k = tändhastigheten

Holmqvist skapade ett diagram med F som funktion av C, figur 13.



Figur 13 Kärnlängdsfaktorn F som funktion av sugfaktorn C.

Den punkt på gaskurvan som skär den diagonala linjen A kallas C_k. Varje gas kommer att få ett eget C_k som med Holmqvists egna ord är "ett tal så beskaffat att kännedom om dettas värde för två olika gaser medger bedömning av hur brännare som inreglerats för den ena av dessa, böra omregleras för att passa den andra med avseende på förhållandet mellan luft och gasmängder".

4.5 DUTTON

Vid British Gas forskningsstation Watson House har man under de senaste åren sökt utarbeta en ny metod för bedömning av gasers utbytbarhet. 1984 presenterades den senaste versionen och metoden kallas i fortsättningen för Duttonteorin efter den person som lett utvecklingsarbetet.

Idag kan man lättare än tidigare bestämma gasens sammansättning och detta utnyttjas i teorin där den undersökta gasen omvandlas till en ekvivalent gas bestående av fyra komponenter, metan, propan, kväve och väte. Den ekvivalenta gasblandningens värmevärde, relativa densitet,

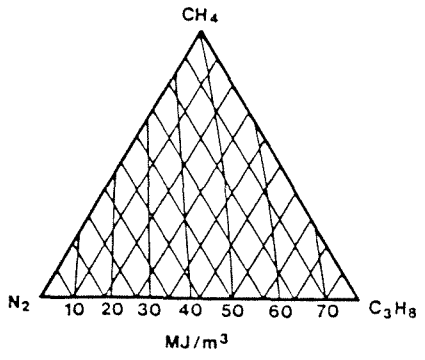
teoretiska luftbehov och maximala flamhastighet överensstämmer nästan exakt med ursprungsgasens motsvarande egenskaper.

Mängden ekvivalent metan och propan erhålls då alla kolväteandelar i ursprungsgasen multipliceras med koefficienterna i tabell 4. Andelen inerta ämnen uttryckta i form av ekvivalent kväve och andelen väte fullbordar den ekvivalenta gasblandningen.

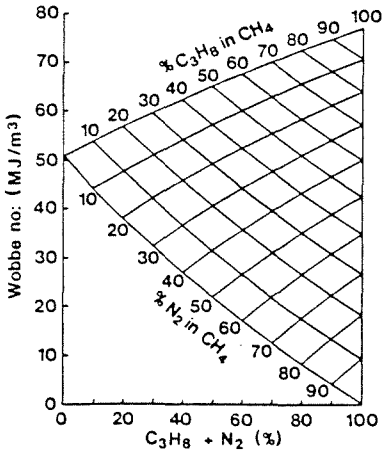
	ekvivalent mängd	
Gas	CH_4	C_3H_8
metan	1,0	
etan	0,5	0,5
propan		1,0
butan	-0,5	1,5
pentan	-1,0	2,0
hexan	-1,5	2,5
propen		1,0
buten	-0,5	1,5

Tabell 4 Omräkningsfaktorer vid beräkning av en fyrkomponentsblandning enligt Duttons utbytbarhetsteori

Eftersom antalet komponenter i gasblandningen reducerats till fyra kan gasblandningen representeras av en punkt i ett tredimensionellt diagram, en tetraeder. Om gasen inte innehåller något väte (detta gäller de flesta naturgaser) kan diagrammet reduceras till två dimensioner och få ett utseende som i figur 14.



Figur 14 gasblandningar bestående av metan, propan och kväve

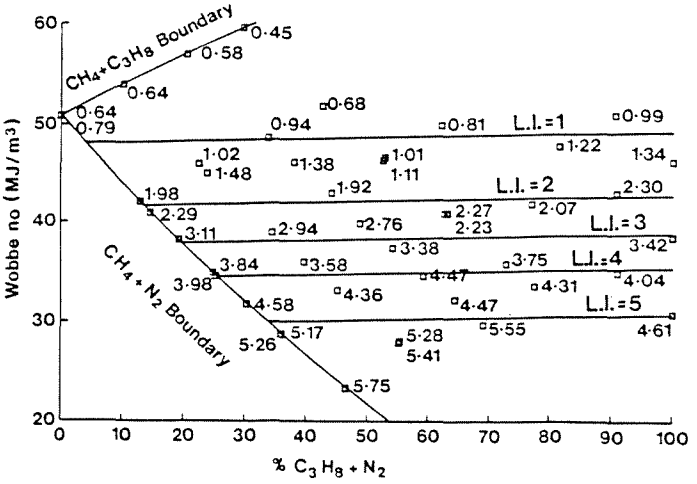


Figur 15 Figur 14 i förvrängd form med horisontellt konstant Wobbeindex

Figur 14 visar gasblandningar bestående av metan, propan och kväve där de nästan lodräta linjerna representerar konstant Wobbeindex. Om diagrammet förvrängs något och samtidigt vrids så att konstant Wobbeindex representeras av horisontella räta linjer fås figur 15. Ett tredimensionellt diagram erhålls då väteinnehållet representeras av en axel riktad ut från papperet. För naturgas och andra vätefria gaser kan axeln för väteinnehållet uteslutas.

Prov med ett stort antal gaser och spisar har givit index för lyft, ofullständig förbränning, sot och nedslag gällande för varje enskild gas.

Ett exempel på diagram med införda index visas i figur 16. Det visar index för lyft från experiment med gaser utan väteinnehåll. Utifrån provresultaten har ekvationer skapats för beräkning av index för gasblandningar.



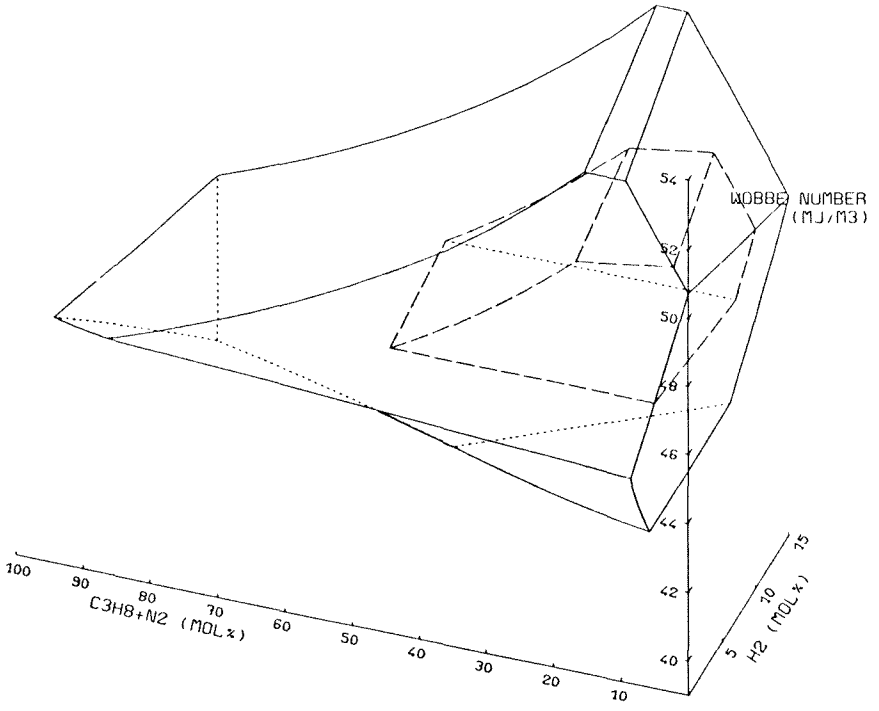
Figur 16 Lyftindex för olika gasblandningar

Index för lyft har följande utseende

$$LI = 3,25 - 2,41\arctan((0,122 + 0,0009H_2)*$$
$$*(WN - 36,8 - 0,0119PN + (0,775 - 0,118PN^{1/3})H_2))$$

där
LI = lyftindex
H_2 = andelen väte i gasen i procent
PN = andelen propan + kväve i gasen i procent
WN = gasens Wobbeindex

Då man bestämt gränsindex för lyft, nedslag och ofullständig förbränning kan ett tredimensionellt utbytbarhetsdiagram skapas med hjälp av diagram av den typ som ses i figur 16.



Figur 17 Utbytbarhetsdiagram enligt Dutton

Det är idag naturligt att utnyttja datorer och ett datorprogram är utvecklat med gassammansättningen som indata.

4.6 GASAPPARATERNAS TOLERANSER

Den godtagbara variationen av gaskvaliteten skiljer sig mellan olika länder. Känsligheten i apparatpopulationen är skiftande och det kan också tänkas att olika grad av förändrad flamstabilitet godtas. Inom IGU (Internationella Gasunionen) har man sökt kartlägga olika länders kriterier för utbytbarhet. Tabell 5 är tagen ur ref 2.

Tabell 5 Utbytbarhetskriterier i olika länder

LAND	KRITERIUM FÖR BEDÖMNING AV GAS	GRUND FÖR KRITERIET
Australien	innanför testgas-gränser	testgaser (ej IGU)
Österrike	-	IGU testgaser
Belgien	<u>Naturgas H :</u> Wobbeindex ±7,25 % Förbränningspot., C<65 Index för gula lågor $I_J < \frac{(170 - C)}{0,71}$ Daggpunkt för kolväten <4°C (49-66,2 bar) Syrehalt <0,5 vol-% <u>NATURGAS L:</u> Wobbeindex ±4,7% C<45 I_J<139 Daggpunkt för kolväten <0°C (66.2 bar) Syrehalt <0,5 vol-%	IGU testgaser
Kanada	Gasens värmevärde	Laboratorietest på utrustningar
Tjeckoslovakien	Gaskvalitetsnormer	IGU testgaser
Danmark	Innanför testgas-gränser	IGU testgaser, laboratorieprov och fältprov
Östtyskland	Wobbeindex och densitet	IGU testgaser

Irland	Riktlinjer utvecklas för närvarande	-
Frankrike	Varierande metoder och kriterier Wobbeindex 48,5 - 56,2 MJ/m^3	IGU testgaser, laboratorieprov, statistik över apparater och erfarenheter från fältet
Ungern	-	IGU testgaser, laboratorieprov, fälterfarenheter
Italien	Delbourgdiagrammet	
Japan	Wobbeindex	Testgaser (ej IGU)
Nederländerna	Wobbeindex 43,46-44,41 MJ/m^3	Testgaser (ej IGU)
Polen	Wobbeindex ±5% värmevärde < fastställt värde C_5 < 12 g/m^3 H_2O < 2 $g/100m^3$ S_2totalt < 4$g/100m^3$	Testgaser, IGU och andra
Spanien	Gasen skall vara utbytbar	Testbrännare - kärnlågans längd - flamstabilitet Laboratorieprov
Storbritannien	Wobbeindex 47,3 - 51,2 MJ/m^3 (-3% - +5%) värmevärde < angivet värde H_2 < 10% omättade kolväten < 4% LPG + luft < 17,5%	

Under våren gjordes en snabb kontroll av om det finns några fastställda gränser i Sverige. Det tycks inte finnas några officiellt fastställda gränser, vilket är förståeligt eftersom bara en gaskvalitet distribueras idag. I de länder där egna testgaser har utvecklats visar det sig att de nya testgaserna skärper kraven på den distribuerade gasen jämfört med IGUs testgaser (ref 2).

4.7 VAD MENAS MED GASKVALITET?

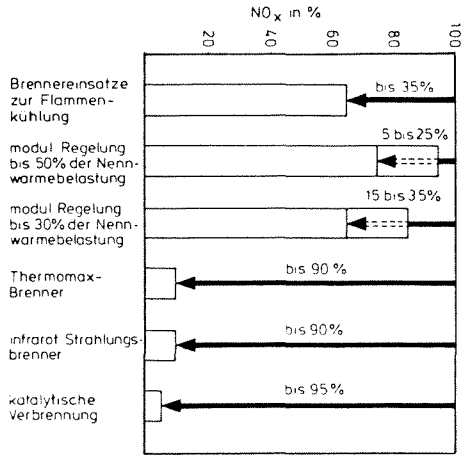
Vilka gränser skall anses som rimliga för en variation av den levererade gaskvaliteten? Den gas som idag levereras i Sverige kommer endast från en källa och har i det närmaste konstant kvalitet. Propan/luft-blandning kan levereras i nödfall och skall då ha en kvalitet som skall likna naturgasens. Kvalitetsvariationer kan uppkomma om ett flertal källor levererar gas. Vi kan också tala om varierande gaskvalitet om vi menar att gasen ersätts med annan gas t ex biogas, avfallsgas, propan, SNG (Substitute Natural Gas).

De "klassiska" utbytbarhetsteorierna bedömer utbytbarhet mellan gaser tillhörande samma gasfamilj. Den första gasfamiljen innehåller stadsgas och den andra gasfamiljen innehåller naturgas i två klasser, klass L och H. Uppenbara förändringar av emissionerna vid övergång till en tillverkad gas kan vara att man får helt nya emitterade ämnen pga att dessa ingår i den tillverkade gasen och inte i ursprungsgasen. Eftersom de studerade utbytbarhetsteorierna behandlar byte inom en gasfamilj är det en lämplig avgränsning att inledningsvis hålla sig till eventuella förändringar vid byte mellan olika naturgaser, men även till SNG och Propan/luft-blandning. Den förändring av gaskvaliteten som då kan vara lämplig att begränsa sig till är då den förändring som är att betrakta som möjlig utifrån den utbytbarhetsteori som man använder sig av. De gränser man accepterar är ofta en variation av Wobbeindex på ±5 % och i nödfall kan gränsen tänjas till ±10 % variation av Wobbeindex. I den amerikanska undersökningen som det refererades till i kapitel 2 använder man sig av olika testgaser, vilka förväntas motsvara framtida naturgasleveranser i USA och som sinsemellan anses utbytbara.

5. EMISSIONSBEGRÄNSANDE ÅTGÄRDER FÖR GASBRÄNNARE

Om emissionerna från gasbrännare skall minimeras finner vi ett motsatsförhållande mellan låg CO- och PAH-bildning och NO_x-bildning. CO och PAH är resultatet av ofullständig förbränning och undviks med hög temperatur och lång uppehållstid. Detta är dock grunden för höga NO_x-halter. Då det mest talas om NO_x i samband med emissioner från naturgasförbränning har metoder att sänka NO_x varit de som helt dominerat litteraturen. Det kommer fortsättningsvis i kapitlet att redogöras för olika NO_x-reducerande åtgärder men emissioner av andra ämnen som CO och PAH skall inte förbises.

I ref 27 redogörs för olika åtgärder att minska NO_x-emissionerna från hushållsapparater. Det bör påpekas att författaren kommer från Ruhrgas, vilket kan ha påverkat urvalet av metoder. De åtgärder och möjliga reduktioner som kan användas för atmosfäriska brännare anges i figur 18.

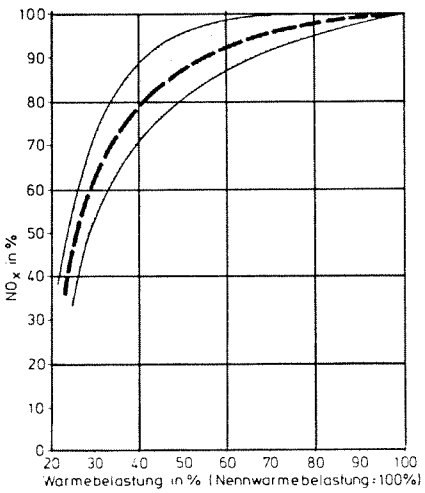


Figur 18 Möjliga NO_x-reduktioner för atmosfärsbrännare enligt ref 27.

Förutom de i kapitel 2 nämnda metoderna kan reglerbara brännare och katalytisk förbränning användas. Brännarinsatserna beskrivs senare i detta kapitel. Thermomaxbrännaren är utvecklad av Ruhrgas (ref 28) och i den blandas gasen med en överstökiometrisk primärluftmängd, ca 20 % luftöverskott. Man undviker med detta temperaturtoppar och höga NO_x-emissioner tack vare noggrann blandning av gas och luft. Brännaren kan användas till spisar, pannor och varmvattenberedare. Den höga primärluftmängden är inte möjlig att uppnå med enbart gastrycket utan en fläkt är nödvändig. Ruhrgas rekommenderar att fläkten placeras efter Thermomaxbrännaren. Brännaren kan ställas in enligt

SRG-metoden (Sommers-Ruhrgas), vilket innebär att brännaren blir mycket flexibel då olika delar av brännaren anpassas till olika gaser.

En modulerande gasbrännare har bieffekten att ge lägre NO_x-emissioner vid dellast. Figur 19 visar dellastens inflytande på NO_x-emisserna.



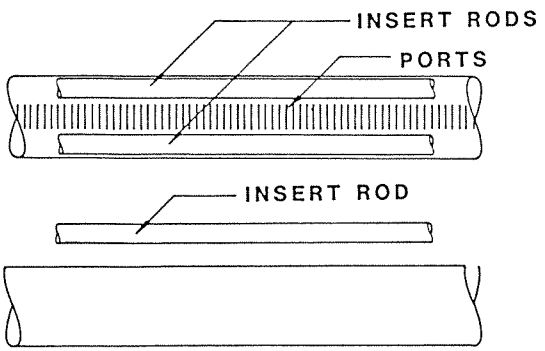
Figur 19 NO_x-emissionen som funktion av brännareffekten för en modulerande brännare monterad i en kondenserande gaspanna enligt ref 27.

Reglerområdet begränsas nedåt av risken för nedslag och för dellast finns finns gränser angivna i ref 10. Dellastens inverkan på NO_x-emissionerna antyder att en låg brännarbelastning minskar dessa. Det framgår inte av ref 27 om den årliga minskningen av NO_x-emissionerna är ett resultat av både lägre NO_x-bildning och förbättrad verkningsgrad. Mätningar i ref 29 visar att NO_x-bildningen i en atmosfärsbrännare är större vid högre brännarbelastning och ref 30 anger att en låg brännarbelastning har en del i låga NO_x-emissioner men det handlar i detta senare fall om en fläktgasbrännare. I ett stabilitetsdiagram framgår det att en låg brännarbelastning ökar risken för nedslag.

Ref 31 omnämner misslyckade försök att utnyttja rökgasrecirkulation vid spisbrännare. Rökgasrecirkulation kan utnyttjas i hushållsapparater om fläktgasbrännare används, se ref 32 där en japansk kondensationspanna beskrivs. De amerikanska mätningar som beskrivs i ref 8 visar inga tecken på att man skulle ha undersökt brännarflexibiliteten då någon av åtgärderna använts; man redogör endast för NO_x-mätningar.

En NO_x-reducerande metod för redan befintliga brännare är insatser av keramer eller stål. De monteras ovanför brännaren (ref 33). Utvecklingsarbetet har finansierats av Gas Research Institute (GRI) i USA och har haft som mål att hårda regler om NO_x-emissioner (Kalifornien) även skall kunna uppfyllas med nuvarande apparater.

Insatserna, som monteras i flamman och värms av denna, sänker flamtemperaturen och följaktligen också NO_x-bildningen. Värmen som lagrats i insatserna sänds ut till omgivningen i form av värmestrålning. I figur 20 ses en brännare med monterad insats.



Figur 20 Brännare med monterad insats för lägre NO_x-bildning.

NO_x-reduktionen uppgår i bästa fall till över 50 %. Vid vissa brännartyper uppnås endast ca 30 % reduktion men dessa brännare sägs redan från början ge lägre NO_x-emissioner. I vissa applikationer sägs CO-emissionerna kunna stiga.

Det som kan vara av större intresse för denna studie är om insatserna kan påverka flamstabiliteten och ändra brännarens flexibilitet i fråga om gaskvaliteter.

Av de olika sätt att minska NO_x-bildningen vid gasförbränning i atmosfärsbrännare är det tveksamt om små primärluftmängder och modulerande brännare kan användas om syftet är att skapa en flexibel och ren brännare. Båda metoderna ger små reduktioner av NO_x-halten och dessutom är sambandet svagt mellan NO_x-bildning och primärluftmängd. Låga primärluftmängder ökar dessutom risken för gula toppar om en ersättningsgas med högre Wobbeindex används. Risken för nedslag ökar då en modulerande brännare används. Brännarinsatser av keramer eller stål placeras i flamman och

sänker dess temperatur och NO_x-bildningen. Det framgår ej om insatserna påverkar brännarens flexibilitet. Med enbart insatserna kan man idag klara de kaliforniska kraven på NO_x-emissioner.

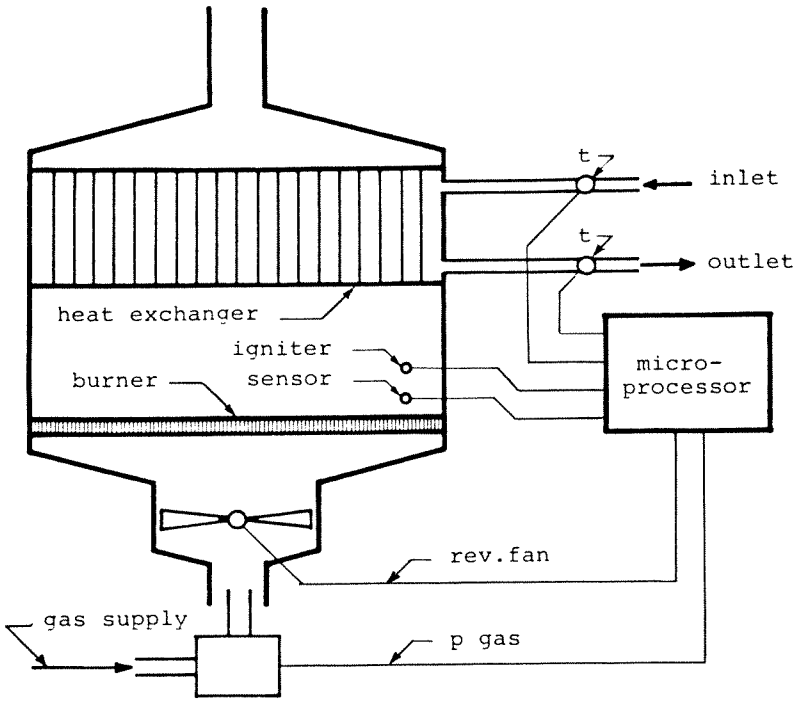
Det synes av ovanstående resonemang att atmosfärsbrännare av konventionell typ inte är speciellt lämpade som låg-NO_x-brännare. Den av Ruhrgas utvecklade Thermomaxbrännaren har låga NO_x-emissioner och inställd enligt SRG-metoden (Sommers-Ruhrgas) är flexibiliteten stor. Jämfört med konventionella atmosfärsbrännare kan Thermomaxbrännaren ge högre verkningsgrad tack vare ett lägre luftöverskott.

5.1 DALHUISENBRÄNNAREN

Finns det nu någon brännare som samtidigt ger låga emissioner och är okänslig mot förändringar i gaskvaliteten? Utan att metodiskt ha sökt efter en sådan brännare har jag tidigare funnit ett exempel (ref 34). Brännaren finns på ett prototypstadium och har utvecklats vid VEG-Gasinstituut i Nederländerna. Bakgrunden till arbetet är att den levererade gasen i Nederländerna kommer att förändras inom 10-15 år.

Oberoende av gaskvalitet bibehålls brännareffekten konstant. Det kan uppnås genom att både luft- och gastillförsel steglöst kan varieras. En mikroprocessor styr detta med hjälp av en fläkt och reglering av gastrycket. Förbränningsluften tillförs gasen på samma sätt som i en vanlig atmosfärsbrännare med den skillnaden att luftmängden styrs av en fläkt Detta förfaringssätt ökar risken för nedslag (gas/luftblandningen är inom flambarhetsgränserna) och flamlyft (hög andel primärluft som sänker flamhastigheten). Brännarutformningen blir avgörande för att varken nedslag eller lyft inträffar. I detta fall undviks problemet med en keramisk brännare. Keramens låga termiska konduktivitet får brännarens undersida att förbli kall även vid drift, ca 65°C, medan ovansidan är varm. Nedslag förhindras av undersidans låga temperatur och ovansidans höga temperatur förhindrar flamlyft.

Brännaren möjliggör drift med lågt luftöverskott, <10%. Följden blir att rökgasförlusten blir låg och att vattenångans daggpunkt i rökgaserna hålls nära den maximala. Det senare är en fördel i en kondenserande gaspanna. En figur på hur brännaren kan placeras i en panna visas i figur 21.



Figur 21 Dalhuisenbrännaren monterad i en panna.

Brännaren har provats med olika gassammansättningar och gaser med varierande Wobbeindex. Resultaten är genomgående positiva med lågt luftöverskott och låga CO-emissioner. Redovisningen av NO_x-emissioner (tabell 5) är begränsad men då förbränningstemperaturen är låg och mängden tillgängligt syre är mycket liten är det rimligt att NO_x-emissionerna i övriga driftfall inte avviker mycket mycket från resultatet i tabell 5. Tabell 5 visar storleken på emissionerna vid varierande brännareffekter.

Flue-gas compositions at different heat inputs with CH_4 + N_2 mixtures with a Wobbe number of 41.5 MJ/m³st (gas overpressure varies).

Heat input (kW)	7.20	3.84	3.47	2.70
n air	1.040	1.093	1.070	1.012
CO_2 (%)	11.18	10.60	10.62	11.49
CO (ppm)	44	27	72	250
NO (ppm)	13	8	7	8
NO_2 (ppm)	3	4	4	4
NO_x (ppm)	16	12	11	12
CH_4 (ppm)	1.2	0.2	16.4	30.8
C_2 + C_3 comp. (ppm)	0.1	0.0	1.2	3.6
C_4 and higher (ppm)	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabell 5 Emissioner från Dalhuisenbrännaren vid varierande brännareffekter

Det är uppenbart att en brännare för hushållsbruk med låga emissioner och stor flexibilitet vid användandet av

varierande gaskvaliteter är möjlig att konstruera. Denna styrning kräver mätning av syrehalten i rökgaserna och effekten. Frågan är då om detta också är möjligt med den enkla atmosförsbrännaren? Kräver en önskad brännare kringutrustning i form av sensorer och elektronik?

6. SLUTSATSER

Enligt en amerikansk undersökning kan NO_x-bildningen öka med 50 % i hushållsapparater då en reserv- eller spetslastgas används. En tänkbar förklaring till de ökade NO_x-emissionerna som framlagts är spetslastgasens högre densitet, vilket skulle försämra blandningen av gas och luft. Några uppgifter om låg-NO_x-brännares flexibilitet har inte upptäckts.

En kort och schematisk genomgång av NO_x-reducerande metoder som kan användas inom industrin visar att det tycks vara lätt att undvika tänkbara stabilitetsproblem genom brännarövervakning av typen syrgasmätning i rökgaserna.

De utbytbarhetsteorier som utvecklats fram till idag tar inte hänsyn till andra emissioner än koloxid, som endast är en indirekt följd av ofullständig förbränning.

Idag klarar flertalet atmosfärsbrännare, enligt amerikanska studier, de gasblandningar som kan anses rimliga i det amerikanska naturgasnätet. De NO_x-reducerande åtgärderna inskränker sig till montering av brännarinsatser och bafflar. Åtgärderna sänker flamtemperaturen respektive förhindrar att sekundärluften når de hetaste punkterna i flamman med lägre NO_x-bildning som följd.

De problem som kan studeras i en fortsättningsstudie är främst den ökade NO_x-emissionerna vid spetslastgaser och orsaker till ökningen. Studierna kan då också omfatta industribrännare.

6. REFERENSER

(1) EFFECT OF FUEL GAS COMPOSITION ON APPLIANCE PERFORMANCE
R.B. Edelman, P.T Harsha, J.C. Griffiths, Science Application Inc.
dec 1982, PB83-188656

(2) INTERCHANGEABILITY - THE CURRENT SITUATION
A.H. Curran
Report of Committee E - Domestic and Collective Utilisation of Gases IGU/E-85, World Gas Conference 1985, Mnchen

(3) RETROFITTING INDUSTRIAL FURNACES TO USE LOW- AND MEDIUM Btu GASES
R.T. Waibel
New Fuels and Advances in Combustion Technologies, Symposium Papers
Institute of Gas Technology, juni 1979

(4) BILDNING OCH BEGRÄNSNING AV NOX VID NATURGASFÖRBRÄNNING
Hans Edner Göran Holmstedt, Svante Wallin
Lund Reports on Atomic Physics LRAP - 36, 1984

(5) BILDNING OCH BEGRÄNSNING AV PAH VID NATURGASFÖRBRÄNNING
Bjarne Noren
Inst. för värme och kraftteknik LTH, 1984

(6) QUALITY SPECIFICATIONS OF PIPELINE NATURAL GAS. REVIEW OF THE U.S. SITUATION
G.F. Steinmetz, Baltimore Gas and Electric Co.
Gas Quality, Elsevier, Amsterdam 1986

(7) PERFORMANCE MODELING OF ADVANCED GAS BURNER SYSTEMS
R.B. Edelman,P.T. Harsha, Science Application Inc.
juli 1983, PB84-198472

(8) EMISSIONS FROM RESIDENTIAL GAS-FIRED APPLIANCES
J.T. Cole, T.S. Zawacki, Institute of Gas Technology, Chicago
feb 1985, PB85-174928

(9) BURNER TECHNOLOGY BULLETIN: CONTROL OF NOX EMISSIONS FROM RESIDENTIAL GAS APPLIANCES
M.J. Murphy et al., Battelle , Columbus, Ohio
april 1985, GRI-85/0132, PB86-103892

(10) EFFICIENT UTILIZATION OF ALTERNATATE FUELS DEVELOPMENT OF MODELS FOR THE PREDICTION OF INTERCHANGEABILITY, DESIGN AND PERFORMANCE OF GAS BURNER-COMUSTER SYSTEMS
P.T. Harsha, R.B. Edelman, D.H. France, Science Application Inc.
april 1980, PB80-218282

(11) FLAME STABILITY - PRINCIPLES AND PRACTICE
J.A. Harris, R. South, British Gas
Gas Engineering and Management, maj 1978

(12) INTERNATIONAL CONGRESS ON GAS QUALITY - CLOSING PERSPECTIVE AND DISCUSSION
A.W. Guinee, Nederlandse Gasunie
stencil, International Congress on Gas Quality, Groningen 1986

(13) COMBUSTION, FLAMES AND EXPLOSIONS OF GASES
B. Lewis, G. von Elbe
Academic Press, 1961

(14) FLAME QUENCHING
A.E Potter, NASA Lewis Research Center
Progress in Combustion Science and Technology, vol 1 , Pergamon Press 1960

(15) EFFECTS OF TEMPERATURE AND PRESSURE ON BURNING VELOCITY
Toshio Iijima, Tokai University, Tadao Takeno, University of Tokyo
Combustion and Flame 65: 35-43 (1986)

(16) INTERCHANGEABILITY OF OTHER FUEL GASES WITH NATURAL GAS
American Gas Association Testing Laboratories
Research Bulletin number 36, 1946

(17) COMBUSTION EXPERIMENTS WITH LIQUIFIED PETROLEUM GASES
Frank Knoy
GAS (Los Angeles), juni 1941

(18) FORMULAS AND GRAPHS FOR REPRESENTING THE INTERCHANGEABILITY OF FUEL GASES
Elmer R. Weaver
Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 46, No. 3, mars 1951

(19) DIE AUSTAUSCHBARKEIT DER GASE
P. Delbourg, Gaz de France
Gaswärme, 1958, nr 10

(20) THE PREDICTION OF THE COMBUSTION CHARACTERISTICS OF TOWN GAS
M.G. Gilbert, J.A. Prigg, London Research Station, Gas Council
Transactions - Institution of Gas Engineers, 106, 1956, sid 530-89

(21) INTERNATIONELL BEARBETNING AV FRAGOR ANGAENDE GASERS UTBYTBARHET
Rudolf Holmqvist, Stockholms Gasverk
Svenska Gasverksföreningens Årsbok 1957

(22) COMBUSTION CHARACTERISTICS OF NATURAL GAS AND MANUFACTURED SUBSTITUTES
J.A. Harris, D.E Lovelace, Gas Council
Institution of Gas Engineers Journal, mars 1968

(23) EIN NUES VERBRENNUNGSDIAGRAM UND SEIN GEBRAUCH IN DER MODERNEN GASTECHNIK
A. van der Linden, VEG-Gasinstituut, Nederländerna
Gas Wärme International, Band 18, Nr 4, april 1969

(24) EIN NUES VERBRENNUNGSDIAGRAM UND SEIN GEBRAUCH IN DER MODERNEN GASTECHNIK
A. van der Linden, VEG-Gasinstituut, Nederländerna
Gas Wärme International, Band 18, Nr 5, maj 1969

(25) A NEW DIMENSION TO GAS INTERCHANGEABILITY
B.C. Dutton, British Gas,
The Institution of Gas Engineers Communication 1246, november 1984

(26) LAMINAR BURNING VELOCITIES OF MULTICOMPONENT FUEL-GAS SYSTEMS
D.H. France, R. Pritchard, University of Salford, Storbritannien
Journal of the Institute of Fuel, mars 1977

(27) STAND DER NOX-EMISSIONEN UND DER MINDERUNGSMASSNAHMEN BEI GASFEUERUNGEN IM HuK-BEREICH
L. Joos, Ruhrgas AG, Dorsten
Gas Wärme International, Band 35 (1986) Heft 4, maj/juni, 187-195

(28) ENTWICKLUNG DES THERMOMAX-GASHERDES
H. Panek, D. Hanselmann, Ruhrgas AG, Dorsten
gwf-gas/erdgas, 124 (1983), Heft 10/11, 519-530

(29) NOX-BILDUNG IN BUNSENFLAMMEN
E. Boschan, A. Meggyes, Budapest
Gas Wärme International, Band 35 (1986) Heft 5, juli, 297-303

(30) FAN ASSISTED ROOM HEATER WITH A LOW NOX AND CO LEVEL
Y. Moriya et al., Matshushita Housing Products, Japan
Preprints of the 1984 International Gas Research Conference

(31) DEVELOPMENT OF ADVANCED RESIDENTIAL COOKTOP BURNER WITH LOW NOX EMISSIONS
D.W. deWerth, American Gas Association Labs, Cleveland, Ohio
november 1985, GRI-83/0080, PB84-198480

(32) COMPACT CONDENSING HEATING BOILER WITH HIGH EFFICIENCY
A. Kegasa, T. Otsuka, Osaka Gas, Japan
Preprints of the 1984 International Gas Research Conference

(33) BURNER FLAME INSERTS FOR LOWER NOX EMISSIONS
D.W. deWerth, R. Sheridan, American Gas Association Laboratories
F.R. Kurzynske, Gas Research Institute, USA
Preprints of the 1984 International Gas Research Conference

(34) THE USE OF SOLID STATE PHYSICS IN NEWLY DEVELOPED DOMESTIC GAS APPLIANCES
A.M. Buijserd, VEG-Gasinstituut, Nederländerna
IGU/E10-85, World Gas Conference, Munchen 1985

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk Forskning och utveckling. Stiftelsens forskningsprogram är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem. Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Värmeverksföreningen
- Övrig industri

Värmeforsk samarbetar med Närings- och teknikutvecklingsverket (NUTEK).

STIFTELSEN FÖR VÄRMETEKNISK FORSKNING

Box 1765 · 111 87 Stockholm
Tek: 08-7900600 · Fax 08-796 00 37