



Wordt er
zuinig genoeg gestookt?

Wordt er zuinig genoeg gestookt?

Uit de praktijk blijkt dat bij nog veel stookinstallaties onnodig veel energie verloren gaat door niet goed afgestelde branders en door onvoldoende restwarmtebenutting. Het schoorsteenverlies kan sterk worden verminderd door een optimale branderafstelling (brandstof/luchtverhouding) en door toepassing van een economiser en/of rookgascondensator. Daarnaast zijn er nog andere maatregelen te benoemen die kunnen bijdragen aan energiebesparing.

Deze publicatie van het Stoomplatform heeft als doel om de gebruiker van stoomketelinstallaties duidelijk te maken wat stoken is en welke maatregelen kunnen worden getroffen om dit te optimaliseren.

Inhoud

1. **Wat is stoken?** 4
2. **Verbranding als chemisch proces** 5
3. **Meest voorkomende stookverliezen** 6
4. **Verbrandingsoptimalisatie aardgas stoken nader beschouwd** 12
5. **Brandstofbesparing met magneten (feit of fictie)** 17

1. Wat is stoken?

Stoken is het verbranden van brandbare stoffen, zoals bijvoorbeeld olie, gas, kolen of biomassa, waarbij energie in de vorm van warmte vrijkomt. Verbranding in fysische zin vindt plaats, wanneer er aan een brandstof bij de juiste ontstekings temperatuur voldoende lucht (lees: zuurstof) wordt toegevoerd. Lucht, bij een luchtdruk op zeeniveau, bestaat voor ca. 78 volume-% uit stikstof (N_2) en voor ca. 21 volume-% uit zuurstof (O_2). De stikstof (N_2) neemt niet effectief deel aan het verbrandingsproces en moet als ballast worden

beschouwd en verlaat opgewarmd de schoorsteen. Feitelijk levert de stikstofcomponent ook nog een ongewenst bijproduct in de rookgassen. Met name bij hoge temperaturen ($>1600^\circ C$) in de verbrandingsruimte reageren de in de verbrandingslucht aanwezige stikstof en zuurstof met elkaar en vormen stikstofmonoxide (NO) en stikstofdioxide (NO_2); beter bekend onder de verzamelnaam NOx. Stikstofoxiden (NO_x) zijn ongewenst, omdat zij de oorzaak zijn van smogvorming en bijdragen aan verzuring van het milieu.

2. Verbranding als chemisch proces

Koolstofatomen (C), waterstofatomen (H) en zwavelatomen (S)* uit de brandstof worden gebonden aan zuurstofatomen (O) uit de lucht. Hierbij worden kooldioxide (CO₂), waterdamp (H₂O) en zwaveldioxide (SO₂) gevormd, volgens de reactievergelijkingen:

koolstof (C) + zuurstof (O₂) → kooldioxide (CO₂) + warmte

waterstof (2H₂) + zuurstof (O₂) → water (2H₂O) + warmte

zwavel (S)* + zuurstof (O₂) → zwaveldioxide (SO₂) + warmte

Opmerking

de zwavelcomponent (S) is niet significant in aardgas, maar bijvoorbeeld wel in aardolie, steenkolen en biogassen aanwezig.

Indien er bij het stoken juist voldoende lucht (lees: zuurstof) wordt toegevoerd om de brandstof volledig gemengd met de zuurstof uit de lucht geheel te verbranden, spreekt men van een stoichiometrische**

verbranding. In dat geval is het koolzuurgehalte (CO₂) in de verbrandingsgassen maximaal en het zuurstofgehalte (O₂) gelijk aan nul. Er wordt daarbij geen koolmonoxide (CO) gevormd.

**Stoïchiometrie (Grieks: stoïchion = element (aire stof); metron = maat).

Stoïchiometrische verbranding is een ideale verbranding, die vrijwel alleen onder laboratoriumomstandigheden is te realiseren. In de praktijk wordt over het algemeen een overmaat aan lucht toegevoerd om er zeker van te zijn, dat onder alle omstandigheden toch een volledige verbranding wordt verkregen. In de meeste gevallen blijkt deze overmaat te groot en veroorzaakt dan een onnodig hoge rookgashoeveelheid, hetgeen resulteert in grotere schoorsteenverliezen, welke leiden tot een verslechtering van het stookrendement.

3. Meest voorkomende stookverliezen

De warmte van de rookgassen, die bij het stoken vrijkomt, wordt in de industrie zowel op directe- als op indirecte wijze benut:

- directe benutting vindt plaats bij drogers en procesfornuizen;
- indirecte benutting vindt plaats via stoom, heet water of thermische olie.

Bij het stoken zelf, maar ook door het niet benutten van restwarmte treden verliezen op. De belangrijkste verliezen zijn:

- schoorsteenverliezen;
- ventilatieverliezen;
- piek- en onderbelastingsverliezen.

3.1 Schoorsteenverliezen

De energie, die na warmte-uitwisseling in de stoomketel, nog in de verbrandingsgassen aanwezig is en via de schoorsteen naar de atmosfeer wordt afgevoerd, wordt het schoorsteenverlies genoemd. De mate van dit verlies is afhankelijk van:

- de temperatuur van de afgevoerde verbrandingsgassen;
- de temperatuur van de toegevoerde verbrandingslucht;
- de hoeveelheid verbrandingsgas dat per m³ verstoekt aardgas de schoorsteen verlaat;
- de hoeveelheid nog brandbare of onverbrande bestanddelen in de verbrandingsgassen.

Deze verliezen treden respectievelijk op bij:

- hoge rookgastemperatuur;
- lage verbrandingsluchttemperatuur;
- overmaats stoken d.w.z. als er te veel verbrandingslucht wordt toegevoerd;
- ondermaats stoken, d.w.z. als te weinig verbrandingslucht wordt toegevoerd.

Het schoorsteenverlies kan voor het stoken van aardgas aan de hand van de luchtvermaat en het temperatuurverschil tussen verbrandingsgas en verbrandingslucht worden berekend met de formule van Siegert:

$$\text{schoorsteenverlies} = (0,677 * (21 - O_2\%) + 0,00914) * (T_{\text{Afgas}} - T_{\text{Lucht}})$$

In figuur 1. is een grafische weergave van deze formule is te zien. Hierbij kunnen de volgende vuistregels worden gehanteerd:

- verlaging van 2 vol.% O₂ in de verbrandingsgassen vermindert het schoorsteenverlies met ca. 1%
- verlaging van de verbrandingsgastemperatuur met ca. 20 °C geeft ca. 1% minder schoorsteenverlies
- verhogen van de verbrandingsluchttemperatuur met ca. 20 °C geeft ca. 1% minder schoorsteenverlies

Bovenstaande effecten resulteren allen in een besparing op het brandstofverbruik van de ketel.

3.1.1. Ondermaats stoken

Bij ondermaats stoken treedt onvolledige verbranding op. In de verbrandingsgassen wordt bij onvolledige verbranding van de koolstof, koolmonoxide (CO) gevormd volgens: $2C + O_2 \rightarrow 2CO + 10,2 \text{ MJ/kg C}$.

Koolmonoxidevorming is ongewenst omdat:

- koolmonoxide giftig is;
- koolmonoxide explosief kan reageren;
- koolmonoxide ruim 60% minder warmte afgeeft, als wanneer koolstof met zuurstof bij verbranding geheel wordt omgezet in CO₂ volgens: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 33,8 \text{ MJ/kg C}$;
- koolmonoxidevorming kan resulteren in roeten → ketelvervuiling → verslechterde warmteoverdracht → groter schoorsteenverlies → met lager stookrendement als gevolg.

Een correcte afstelling van de brander over het gehele regelbereik is dus van groot belang.

(Onvolledige verbranding met bovenstaande gevolgen kan ook optreden bij een beschadigde branderkop, waardoor een slechte brandstof/luchtmenging plaatsvindt. In de verbrandingsgassen wordt dan zowel O_2 als CO gemeten).

3.1.2 Overmaats stoken

Bij overmaats stoken verlaat een deel (de overmaat) van de in de verbrandingslucht aanwezige zuurstof, samen met de bijbehorende hoeveelheid stikstof, met een hoge temperatuur de schoorsteen.

Een eerste bezuinigingsmaatregel, die al belangrijke besparingen kan opleveren, is het optimaliseren van de standaardinstelling van de brandstof/luchtverhouding van de brander. Bij stookinstallaties is het wettelijk verplicht (Activiteitenbesluit/Activiteitenregeling) om het zuurstofgehalte periodiek te (laten) controleren en de brandstof/luchtverhouding zo nodig te laten aanpassen. Meestal gebeurt dit door het branderonderhoudsbedrijf. Het kan lonend zijn om dit bijvoorbeeld 2x/jaar te laten doen, als blijkt dat de verbrandingsluchttemperatuur gedurende het jaar sterk fluctueert (zomer/winter) en er geen correctieregeling actief is. Zoals gezegd wordt het stookrendement mede bepaald door de verhouding brandstof/lucht. Bij de meeste installaties staat deze verhouding op een vaste waarde ingesteld. De optimale afstelling is echter afhankelijk van de temperatuur van de verbrandingslucht en de verbrandingswaarde van de brandstof. Bij fluctuerende verbrandingsluchttemperaturen of verbrandingswaarden van de brandstof (bijvoorbeeld biogas) kan een automatische correctieregeling van de luchtvermaat rendabel zijn.

Deze correctieregeling meet continu het zuurstofgehalte in de verbrandingsgassen met behulp van een elektrochemische cel, op basis waarvan de brandstof/luchtverhouding via een regelsysteem automatisch zodanig wordt aangepast, dat het stoichiometrisch stoken zo dicht mogelijk wordt benaderd.

De brandstofbesparing bedraagt in veel gevallen 1 tot 2%. In paragraaf 4 van deze publicatie komt deze regeling uitgebreid aan de orde.

3.1.3 Verlaging van de rookgastemperatuur

Een belangrijke manier van energiebesparing kan worden bereikt door de hete verbrandingsgassen indirect langs luchtvoorwarmers (luvo's), voedingwatervoorwarmers (ofwel economisers = eco's) of indien mogelijk direct langs een product te leiden voordat ze de ketel verlaten.

De verbrandingsgassen die de ketel verlaten dienen bij vollastbedrijf in principe een temperatuur te bezitten die niet hoger ligt dan 30 tot 40°C boven de verzadigde stoomtemperatuur in die ketel (zie stoomtabel).

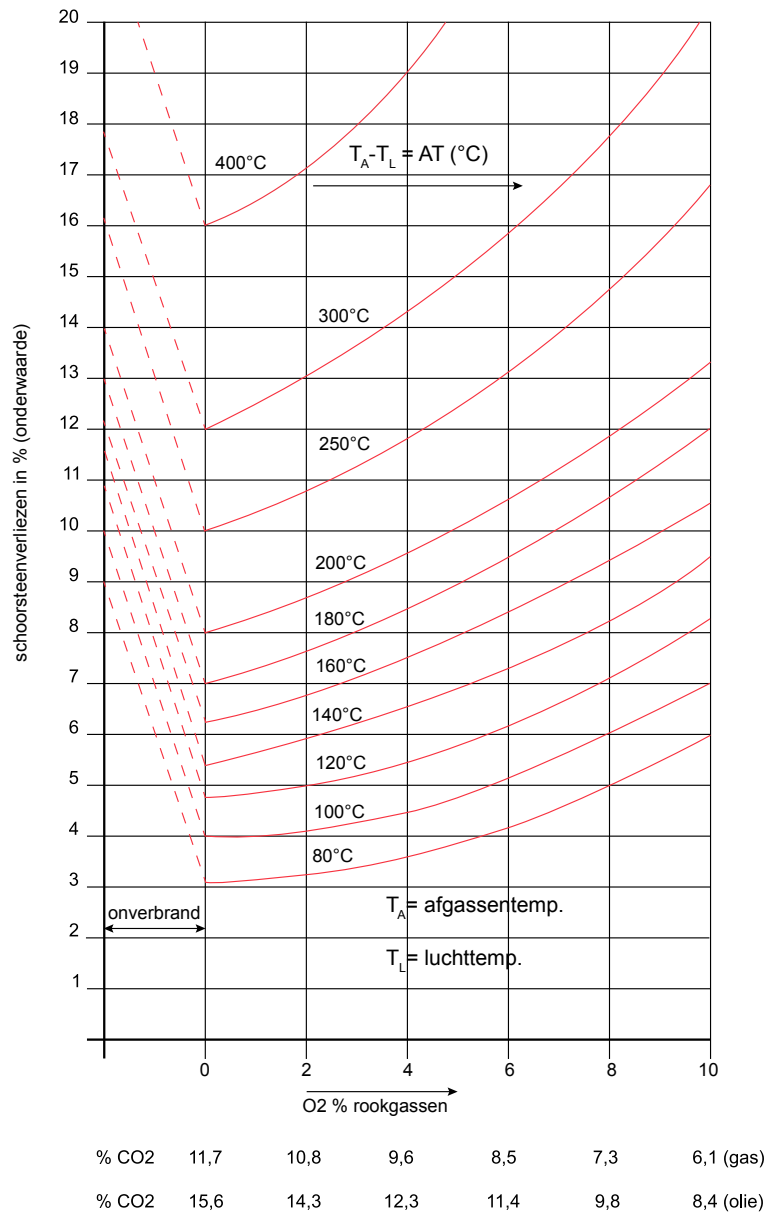
De mate van verdere afkoeling van verbrandingsgassen wordt bepaald door de gestookte brandstof.

Bij het verstoken van aardgas en het gebruik van corrosiebestendig materiaal kunnen de rookgassen tot een temperatuur van ca. 50°C, en soms zelfs nog lager, worden afgekoeld. Daarbij treedt condensatie van de in de verbrandingsgassen aanwezige waterdamp op.

Bij het verstoken van zwavelhoudende brandstoffen worden in de verbrandingsgassen zwaveloxiden gevormd, die tezamen met het gecondenseerde water het sterk corrosieve zwavelzuur (H_2SO_4) vormen. Hierdoor worden de mogelijkheden van warmteterugwinning sterk beperkt. Het zwavelzuurdauwpunt wordt mede bepaald door het zwavelgehalte (S) van de brandstof en de overmaat aan zuurstof (O_2).

Wanneer het zuurstofgehalte in de rookgassen wordt verlaagd van 2% tot 1%, dan neemt het zwavelzuurdauwpunt met maar liefst 10-15% af en worden daarmee de schoorsteenverliezen verlaagd. Het zwavelzuurdauwpunt van oliegestookte ketels ligt tussen de 130°C – 170°C.

Verlaging van de verbrandingsgastemperatuur van 200°C naar 150°C met behulp van een voorwarmer levert een brandstofbesparing van 2,2%. In een volcontinuubedrijf kan met een installatie van netto 8,5 Mega-Watt thermisch (MW_{th}), ofwel een capaciteit van 12 – 13 ton stoom per uur (gasverbruik: ca. 1.100 Nm^3/h), op die wijze bij een aardgasgestookte ketel ruim € 40.000 per jaar worden bespaard, indien wordt gerekend met een aardgasprijs van € 0,20/ Nm^3 . De benodigde investering wordt dan binnen ca. 1 - 2 jaar terugverdient.



Invloed op rookgastemperatuur en luchtvermaat op schoorsteenverliezen.

In een volgende publicatie “Restwarmtegebruik bij stoomketels” zal hier meer uitgebreid aandacht aan worden besteed.

3.1.4 Verhoging van de verbrandingslucht-temperatuur

De schoorsteenverliezen zijn sterk afhankelijk van het verschil in temperatuur tussen de aangezogen verbrandingslucht en de afgevoerde verbrandingsgassen. Vaak wordt de lucht ter hoogte van de ketelhuisvloer- of zelfs rechtstreeks van buiten aangezogen. De lucht

Aan verbrandingsluchtvoorverwarming door warmte-uitwisseling met de rookgassen of een ander verwarmingsmedium middels een warmtewisselaar (Luvo), kleeft een nadeel. Door de substantiële temperatuurverhoging van de verbrandingslucht (tot wel boven de 100°C) stijgt ook de vlamtemperatuur, met als gevolg dat de NO_x-emissie zal stijgen! Hierdoor kan de situatie ontstaan dat niet meer aan de wettelijke emissie-eis wordt voldaan, die voor alle met aardgas gestookte branderinstallaties op ketels m.i.v. 2017: <70 mg NO_x/m³ rookgassen (3% O₂) bedraagt.

boven in het ketelhuis is doorgaans ca. 10°C warmer dan die van beneden. Met een geringe investering kan door een eenvoudig aanzuigkanaal aan te sluiten op de aanzuigopening van de ventilator de verbrandingslucht onderdaks worden aangezogen.

Eventueel kan ook worden overwogen om de warme koellucht van nabijgelegen persluchtcompressoren door de verbrandingsluchtventilator te laten aanzuigen.

3.2 Ventilatieverliezen

De warmteafgifte van een brander kan op verschillende manieren worden geregeld. De klassieke manier is de aan/uit of hoog/laag regeling (een veel toegepaste uitvoering bij kleinere installaties). Bij de aan/uit regeling gaat echter energie verloren omdat de rookgaszijdige inhoud van het toestel na elke regelstop moet worden geventileerd (gespoeld), voordat de brander automatisch mag worden ontstoken. Het doel van dit ventileren is, om eventuele brandbare restgassen uit de verbrandingsruimte te verdrijven en daarmee een explosieve ontsteking tijdens de start van de brander te voorkomen.

Omdat dit spoelen tijdens bedrijf plaatsvindt, terwijl de ketel op druk en temperatuur is, gaat hiermee warmte verloren. De spoellucht neemt warmte op van de hete keteldelen en verlaat opgewarmd de schoorsteen. Het verlies dat hiermee gepaard gaat, is afhankelijk van het aantal regelstops.

Daarnaast veroorzaakt de koude ventilatieluchtstroom thermische spanningen in het ketelmateriaal, hetgeen bij hoge in/uitschakelfrequentie schade aan de thermisch hoog belaste keteldelen kan veroorzaken. Deze nadelen kunnen echter deels worden ondervangen.

3.2.1 Modulerende brander

Het aantal regelstops kan worden teruggebracht door toepassing van een modulerende brander. Een modulerende brander regelt omlaag als er tijdelijk minder behoefte is aan warmte en zal daardoor minder vaak aan/uit worden geschakeld. Hoe groter het terugregelbereik van de modulerende brander, des te minder start/stops en dientengevolge spoelingen (met als gevolg ventilatieverliezen) zullen plaatsvinden bij een sterk wisselende warmtevraag. Bij branderinstallaties van enig formaat is deze standaard modulerend uitgevoerd. De grootte van het terugregelbereik is dus een belangrijk aandachtspunt bij aanschaf van een nieuwe brander als de warmtevraag sterk fluctueert.

3.2.2 Automatische lekdichtheidscontrole gasslot

Bij een gasbrander kan het spoelen na een regelstop onder bepaalde voorwaarden achterwege blijven als de gasveiligheidsafsluiters in de gasstraat van de brander automatisch op lekdichtheid worden gecontroleerd en de lekdichtheidstest voldoet aan de voorschriften. Een automatische lekdichtheidstest is economisch interessant als een ketel meer dan 10 regelstops per etmaal maakt, maar kan niet zonder meer op alle bestaande branderinstallaties worden toegepast.

Gasbranders met CE-markering zijn standaard al van een lekdichtheidscontrole voorzien.

3.3 Toerengeregelde aandrijving verbrandingsluchtventilator

Om bij een modulerende brander de belastingvariaties te kunnen volgen, dient het debiet van de verbrandingslucht te worden geregeld in verhouding met de toegevoerde brandstof.

Dit kan worden bereikt door:

- te smoren, met behulp van een regelklep in de zuig- of pers van de ventilator;
- de aandrijfmotor van de ventilator traploos in toeren te regelen met behulp van een frequentieregelaar.

Omdat het smoorproces gepaard gaat met energiever-nietiging, is onder bepaalde omstandigheden toeren-regeling een energetisch gunstiger alternatief.

Zodra het verbrandingsluchtdebiet terug gaat naar 50% van de oorspronkelijke waarde zal het gevraagde elektrische vermogen theoretisch tot 12,5% afnemen (op basis van de zogenaamde schroefwet). In de praktijk is de winst geringer en zal op ca. 20% van het nominale vermogen uitkomen.

Een bijkomend voordeel is het gereduceerde geluidsniveau van de ventilator in het deellastbedrijf van de brander.

De rentabiliteit van toerenregeling wordt in hoofdzaak bepaald door de frequentie waarmee de belasting beneden de nominale belasting blijft. Voor een terug-verdientijd van 3 – 4 jaar is voor motoren tot ca. 30 kW_e een jaarlijkse afname van tenminste 100.000 kWh nodig, waarbij is verondersteld dat gedurende de helft van de bedrijfstijd het toerental naar 50% gebracht kan worden. Voor grotere motoren zal dezelfde rentabiliteit gemakkelijker worden bereikt.

3.4 Piek- en onderbelastingsverliezen

Piek- en onderbelastingsverliezen ontstaan wanneer de branderinstallatie op de maar weinig voorkomende hoogste vraag (piekvraag) naar warmte is afgesteld. Dit soort energieverliezen komen praktisch overal voor en gaan gepaard met hoge kosten. Vooral wanneer de piekvraag maar van zeer korte

duur is. In veel situaties blijkt dat de installatie slechts één of tweemaal per dag gedurende 5 minuten op vollast draait, terwijl de gemiddelde belasting op 50% of lager ligt.

Een piekvraag veroorzaakt een piekbelasting, bijvoorbeeld als gevolg van plotseling noodzakelijke opwarming van tanks of processen.

Ook komt het voor dat onnodig pieklast ontstaat, bijvoorbeeld als gevolg van een intermitterende regeling. Een berucht voorbeeld in deze situatie is de open/dicht regeling van de watertoevoer (suppletie) naar de ontgasser. Een ontgasservulling van 1 ton water van 10 °C gedurende bijvoorbeeld 6 minuten leidt tot een stoompiek van ca. 1,4 ton/uur.

Soms worden twee ketels in bedrijf gehouden om een paar keer per dag aan de piekvraag te kunnen voldoen, terwijl de gemiddelde belasting van het stoomnet nog geen 60% is van de capaciteit van één ketel. Afgezien van het feit dat twee ketels op lage belasting ook individueel op een lager rendement draaien geldt dat een ketel, ook als deze stand-by staat, gemiddeld 1% stralingsverlies heeft.

Voor een 10 tons ketel vertaalt dit verlies zich omgerekend met een aardgasverbruik tussen de 200 en 250 Nm³/uur, ofwel € 40,- tot € 50,- per dag (bij een gasprijs van € 0,20/Nm³). Over 6.000 stand-by uren gerekend is dit ca. € 250.000,-/jaar. Een goede afstemming tussen het ketelhuis en de productieafdeling kan in dat geval tot grote besparingen leiden.

Vermindering van dergelijke verliezen kan op de volgende manieren worden bereikt:

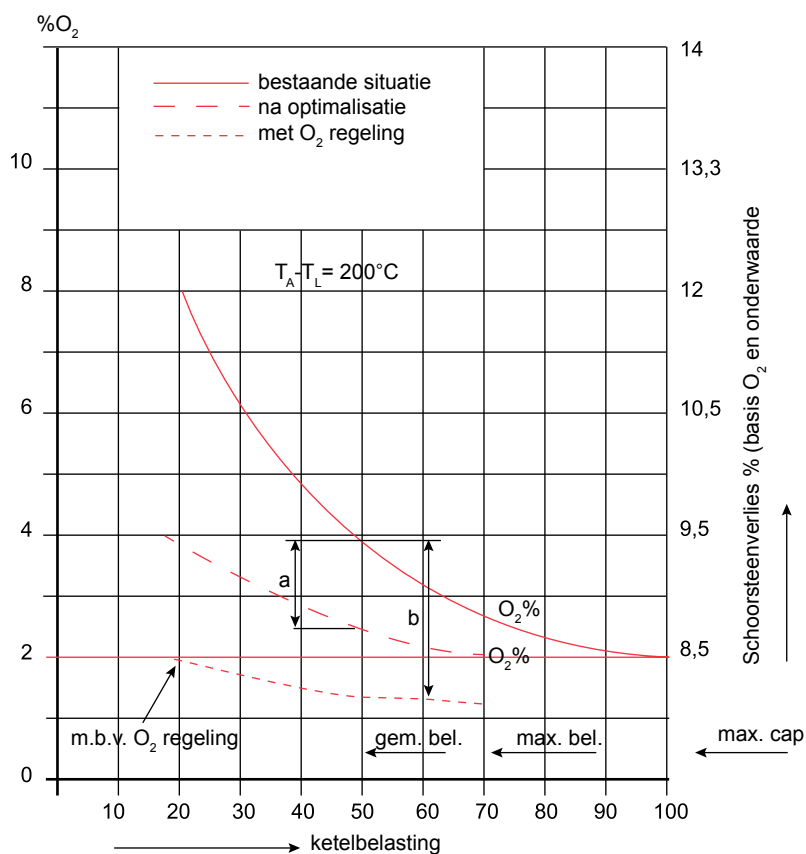
- verbetering van de organisatie van vraag en aanbod in het bedrijf;
- vervanging van de intermitterende regeling door een continue (modulerende) regeling;
- aanpassing van de capaciteit van de stookinstallatie aan de dan ontstane maximale stoomvraag.

Als voorbeeld dient hier een stoomketelinstallatie van 10 ton/uur (10 barg), die op een gemiddelde belasting van 5 ton/uur en een maximale belasting van 7 ton/uur

werkt. De brandstof/luchtverhouding is afgesteld op de maximale capaciteit van 10 ton/uur, dus op 100%. Wanneer de ketel nu wordt afgesteld op een effectieve capaciteit van 7 ton/uur stoom en op de daarbij behorende brandstof/luchtregeling, dan worden de schoorsteenverliezen met 0,8% teruggebracht (afstand a in grafiek 2). Wanneer in die installatie een kleine brander wordt ge-

monteerd, kan in sommige gevallen ook de ventilator door een kleinere worden vervangen (duoblok branders). Het lagere aandrijfvermogen van de ventilator levert dan elektriciteitsbesparing op. De schoorsteenverliezen kunnen met een zuurstofcorrectieregeling verder worden teruggebracht (afstand b in grafiek 2).

Grafiek 2: Optimalisatie branderinstallatie



4. Verbrandingsoptimalisatie aardgas stoken nader beschouwd

Zoals gezegd is voor verbranding zuurstof (O_2) nodig, die aanwezig is in de omgevingslucht (ca. 21 vol.% O_2). Daarnaast is in lucht ca. 78 vol.% stikstof (N_2) aanwezig die niet nuttig deelneemt aan de verbranding en dus als ballast moet worden beschouwd.

Voor het verbranden van 1 m³ Gronings aardgas, dat ca. 81% methaan (CH_4) bevat, is theoretisch 8,5 m³ verbrandingslucht nodig. Bij deze verbranding wordt onder meer kooldioxide (CO_2) en waterdamp (H_2O) gevormd, alsmede warmte geproduceerd. In sterk vereenvoudigde vorm:



Om er zeker van te zijn dat onder alle omstandigheden voldoende verbrandingslucht naar de brander gaat, wordt met een luchtvermaat gewerkt. Deze luchtvermaat moet bij voorkeur zo gering mogelijk zijn, want deze extra hoeveelheid lucht resulteert in een verhoging van de hoeveelheid af te voeren rookgassen, waardoor het schoorsteenverlies stijgt.

Wanneer onvoldoende zuurstof aanwezig is (luchtondermaat), verbrand koolstof (C) door het tekort aan zuurstof (O_2) tot koolmonoxide (CO).

Dit ondermaats stoken kan alleen worden aangetoond door direct het koolmonoxide gehalte (CO) in de rookgassen te meten.

Verbranding waarbij de theoretische hoeveelheid van 8,5 m³/Nm³ aardgas wordt verbruikt noemt stoichiometrische verbranding.

Uit onderzoek is gebleken dat de verbrandingsgassen onder deze ideale verbrandingsomstandigheden als volgt zijn samengesteld:

CO_2 (kooldioxide)	: 0,90 m ³ /Nm ³ aardgas;
N_2 (stikstof)	: 6,54 m ³ /Nm ³ aardgas;
H_2O (waterdamp)	: 1,78 m ³ /Nm ³ aardgas;
Overige componenten	: 0,28 m ³ /Nm ³ aardgas;
Totaal verbrandingsgassen	: 9,50 m ³ /Nm ³ aardgas.

Opgeteld geeft dit dus 9,5 m³ verbrandingsgassen per Nm³ aardgas. Logisch, want 8,5 m³ verbrandingslucht en 1 Nm³ aardgas (zie vuistregel) levert samen ook 9,5 m³ verbrandingsgassen.

Het maximaal haalbare CO_2 -gehalte in de droge verbrandingsgassen bedraagt bij stoichiometrische verbranding:

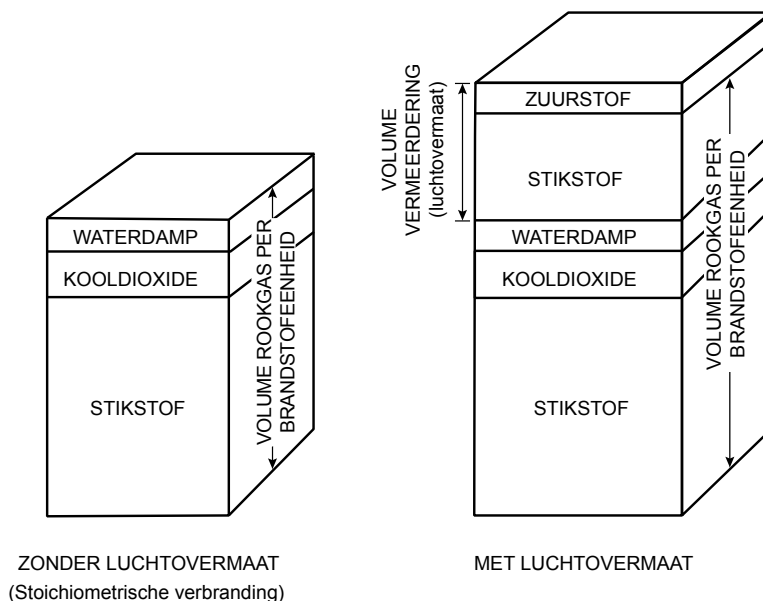
$$0,9/(9,5 - 1,78) * 100\% = 11,6\%.$$

Alle zuurstof is dan verbruikt, er is geen luchtvermaat en er wordt dus ook geen zuurstof in de rookgassen gemeten.

Branders worden zeer zelden of nooit zo afgesteld dat ze met de stoichiometrische verbrandingsluchthoeveelheid werken. De geringste afwijking in de branderinstelling of verbrandingsluchttemperatuur kan een zuurstoftekort veroorzaken, met als gevolg dat een deel van de brandstof onvolledig verbrandt en in de vorm van koolmonoxide (CO) via de schoorsteen naar de atmosfeer zal verdwijnen. Om die reden worden branders met een luchtvermaat afgesteld, zodat een CO-vrije verbranding wordt zeker gesteld.

Van de andere kant, als meer verbrandingslucht dan de theoretische benodigde hoeveelheid wordt toegevoerd, zal weliswaar de verbranding volledig verlopen, maar verlaat het teveel aan zuurstof O_2 , samen met ca. 4x zoveel stikstof N_2 met hoge temperatuur de schoorsteen. Het schoorsteenverlies neemt daarmee toe, waardoor het stookrendement daalt. In de praktijk dient dus voor een gulden middenweg te worden gekozen.

Figuur 1: Rookgasvolumevermeerdering door luchtvermaat (aardgasverbranding)



De luchtvermaat wordt uitgedrukt in de luchtfactor λ . Deze is bij stoichiometrische verbranding 1 (ofwel luchtvermaat = 0%). Bij een luchtfactor $\lambda = 1,1$ bedraagt de luchtvermaat dus 10% (als vuistregel kan dan gemakshalve $10 \text{ m}^3 \text{ lucht/Nm}^3 \text{ aardgas}$ worden gehanteerd).

4.1 Standaard instelling luchtvermaat

Bij stoomketels van enig formaat wordt de belasting (warmte-input) modulerend geregeld, d.w.z. afhankelijk van de stoomvraag (meetwaarde = stoomdruk), zal de brander traploos tussen een minimale en de maximale stand worden geregeld. De verhouding tussen de maximale en minimale stand noemt met het regelbereik van de brander.

Om de verbranding van het aardgas goed te laten verlopen en om het verbrandingsrendement binnen toelaatbare grenzen te houden, is het noodzakelijk om over het gehele regelgebied van de brander gas en lucht in een optimale verhouding te regelen. Hiertoe zijn de gas- en luchtregelklep op enigerlei wijze met elkaar verbonden.

In de praktijk zijn in de basis een 3-tal gas/luchtverhoudingsregelingen tussen de gas- en de luchtregelklep te onderscheiden, te weten op basis van:

- mechanische koppeling
- pneumatische koppeling
- elektronische koppeling

Om een goede menging tussen de verbrandingslucht en het aardgas te verkrijgen, is een bepaalde snelheid van de verbrandingslucht over de brandermond noodzakelijk. Daarom wordt bij lagere belastingen als standaardinstelling een wat hogere luchtvermaat geaccepteerd dan bij een brander op vollast. Deze extra hoeveelheid varieert per brander (fabricaat/type). Voor de meeste branders zijn de volgende standaardinstellingen haalbaar:

- bij 100% belasting een restzuurstofpercentage in de verbrandingsgassen van max. 2 vol.% O_2 ;
- bij 66% belasting 2,0 tot 3,5 vol.% O_2 ;
- bij 33% belasting tot max. 4,5 vol.% O_2 ;
- het zuurstofpercentage op de minimum belastingstand is afhankelijk van de grootte van het terugregelbereik.

4.2 Verbrandingsoptimalisatie middels een zuurstofcorrectieregeling

De luchtvermaat kan op voornoemde belastingstanden verder worden verlaagd door toepassing van een zogenaamde zuurstoftrimregeling, ook wel zuurstofcorrectieregeling genoemd. Hierbij wordt in de schoorsteen continu de zuurstofconcentratie, die een maat is voor de instelling van de gas/luchtverhouding, gemeten. De toepassing van een zuurstofcorrectieregeling is niet nieuw. Al in de jaren 80 van de vorige eeuw was dit een veelvuldig toegepaste besparingsmaatregel, als gevolg van de energiecrisis. Deze techniek bleek destijds echter niet in alle gevallen betrouwbaar en probleemloos te functioneren, waardoor de regelsystemen werden uitgezet en de installaties op een standaardinstelling bleven draaien. Hiermee werd de (dure) investering om zeep geholpen en derhalve niet meer terugverdient. Echter door verbetering en levensduurverlenging van meetsensoren, betrouwbaarheid van elektronica in PLC-toepassingen wordt de techniek tegenwoordig weer omarmd en veelvuldig toegepast.

Onderstaand volgt een toelichting op het werkingsprincipe. Tijdens het inregelen wordt bij vooraf bepaalde belastingstanden een zuurstofsetpoint vastgelegd. Een verschil van gemeten waarde en setpoint leidt tot een aanpassing van de luchtklepstand en/of toeren van een frequentiereguleerde ventilatormotor, indien deze wordt toegepast. De zuurstofsensoren meet de gevolgen van externe invloeden op de gas/luchtverhouding, waardoor de regeling in staat is hiervoor te compenseren.

Voorwaarde om een dergelijke toepassing op een bestaande installatie te implementeren is, dat de gas/luchtverhoudingsregeling van de brander elektronisch is uitgevoerd. Zowel de gas- als de luchtregelklep worden hierbij elk middels een separaat signaal vanuit de gas/luchtverhoudingsregelaar ieder middels een eigen servomotor aangestuurd. Ter controle of de juiste kleppositie is bereikt, wordt deze door een potentiometer in de klep teruggekoppeld naar de regelaar. De elektronische regeling biedt mogelijkheden die

door andere gas/luchtverhoudingsregelingen (mechanische- of pneumatische-) niet of lastig gerealiseerd kunnen worden. Het systeem is namelijk eenvoudig uit te breiden met een extra meetsignaal, een extra klep (t.b.v. een extra brandstof of t.b.v. rookgasrecirculatie). Ook het aansturen van een toerengeregelde ventilator is eenvoudiger. De elektronische regeling leent zich goed voor monitoring, het besturen op afstand en communicatie met andere apparatuur.

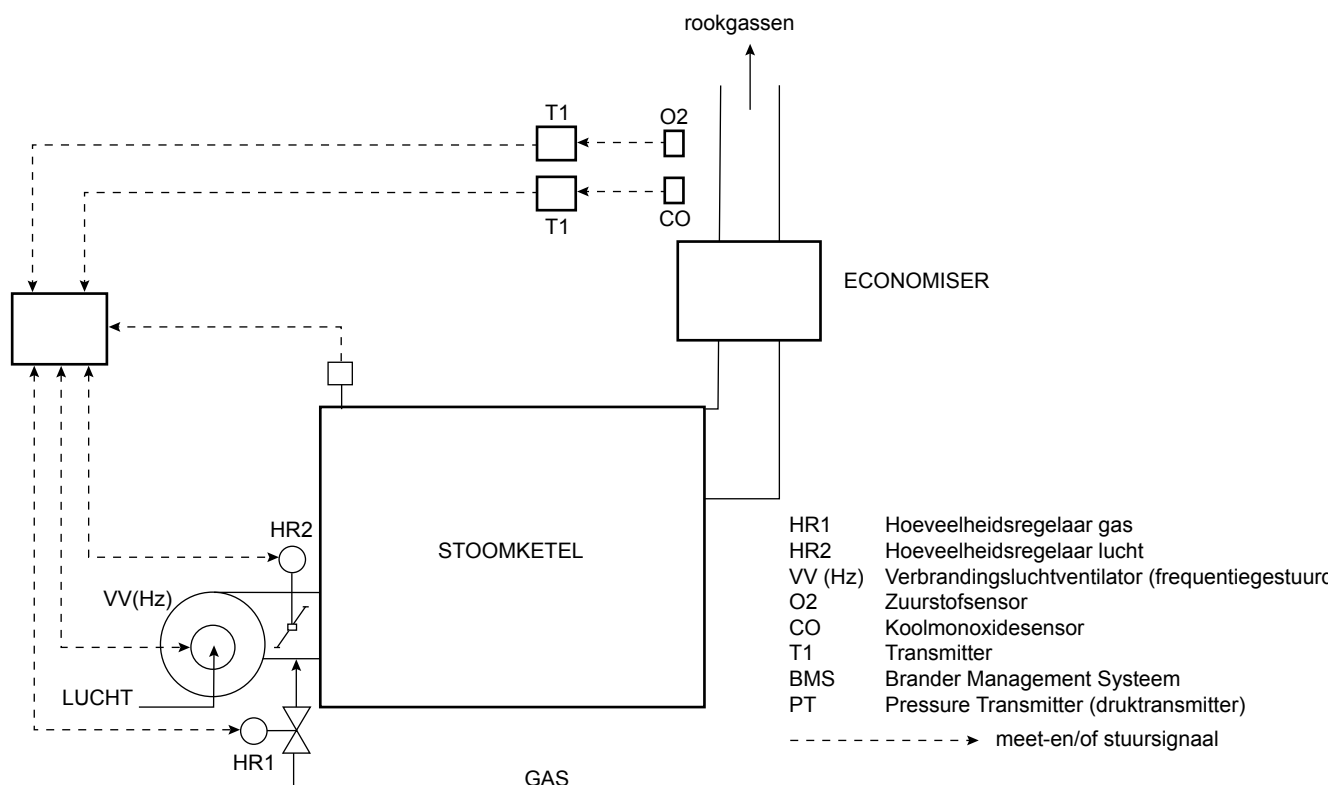
Door alleen het zuurstofgehalte in de verbrandingsgassen te meten, geeft dit nog geen algehele zekerheid over de volledigheid waarmee de verbranding plaatsvindt. Nabij het stoichiometrisch punt kan, ondanks dat er nog een zeker percentage zuurstof in de verbrandingsgassen wordt gemeten, er al onvolledige verbranding plaatsvinden. Door aanvullend ook het gehalte aan on(volledig) verbrande brandstof (in de vorm van koolmonoxide = CO) te meten kan met meer zekerheid de kwaliteit van de verbranding worden vastgesteld.

Waar, bij uitsluitend zuurstofmeting in de rookgassen, het setpoint van de regelaar >1 vol.% zuurstof staat ingesteld, kan bij een regeling met een additionele CO-meting op <1 vol.% zuurstof worden gestuurd, waarbij de luchthoeveelheid wordt gecorrigeerd, op het moment dat een CO-toename in de verbrandingsgassen wordt gemeten.

Voor het meten van zowel het zuurstofgehalte (O₂) als het onverbrand (CO) zijn verschillende sensoren leverbaar. Zowel de O₂ sensor als de CO sensor worden op een eigen transmitter aangesloten en gekoppeld aan de regelaar.

De regelingen zijn doorgaans zelf-lerend (adaptief) en zelf-controlerend. Als op CO wordt gestuurd, dan zal bij een eerste instelling op verschillende belastingstanden een zuurstofpercentage van bijvoorbeeld 0,5 vol.% O₂ worden ingesteld. De luchtvermaat wordt daarna stapsgewijs verkleind, totdat het CO-gehalte oploopt (bijvoorbeeld tot 100 ppm). Deze setpoints zijn door de brandertehnicus vrij te kiezen via een beveiligde toegang in het besturingssysteem.

Figuur 2: Voorbeeld branderoptimalisatie met zuurstof correctieregeling



Vervolgens wordt de luchtvermaat stapsgewijs bijgestuurd totdat weer een CO-vrije verbranding wordt verkregen. Deze instellingen worden opgeslagen in de regelaar (brandermanagementsysteem). De O₂ sensor dient ter controle van de CO-sensor. Op het moment dat nagenoeg stoichiometrisch wordt gestookt en er nog geen CO wordt gemeten, zal dit als een fout worden gemeld en wordt de CO sensor buiten werking gesteld. De installatie kan dan ten alle tijde, buiten de regeling om, op basis van de standaardinstellingen door blijven draaien.

4.3 Zuurstofcorrectieregeling in relatie tot veranderende gaskwaliteit

De komende jaren gaat Nederland steeds meer aardgas van buiten ons land importeren. Daarnaast begint de productie van biogas op gang te komen. Deze “nieuwe gassen” hebben over het algemeen een andere samenstelling en door de diversiteit van het aanbod kan de gassamenstelling meer variëren, dan het tot nu toe in Nederland gebruikelijke aardgas. Om

economische redenen is de Nederlandse overheid op termijn (2020) voornemens om de bandbreedte, waarbinnen de aardgaskwaliteit van het laagcalorische net (Slochteren kwaliteit) op dit moment wordt gestuurd (o.a. door bijmenging met stikstof), te verruimen. Deze wisselingen in samenstelling, meestal aangeduid als “gaskwaliteit” en de daarmee samenhangende verandering in verbrandingsgedrag, kunnen ervoor zorgen dat installaties bij gasleveranciers en eindgebruikers aangepast moeten worden. Samenstellingsvariaties kunnen, zonder deze aanpassingen, mogelijk tot problemen leiden, zoals CO-vorming en instabiele verbranding bij branders.

Naast de grootte van deze variaties in gassamenstelling is ook de snelheid van de variatie in de tijd in de gassamenstelling van belang. Snelle variaties kunnen leiden tot instabiliteit, tenzij de procesregelingen van de gasverbruiksapparatuur de variatiesnelheid kunnen volgen.

Voor een groot aantal installaties geldt dan ook, dat als er géén maatregelen worden getroffen, het gemiddelde energetische en/of economische rendement zal

worden verlaagd wanneer de gaskwaliteit varieert. Bijvoorbeeld in de vorm van een hogere energierekening, capaciteitsverlies, storingen, uitval of zelfs mogelijke schade aan de installatie.

Een branderinstallatie uitgerust met een zuurstofcorrectieregeling is in staat om de negatieve effecten van een niet al te snel fluctuerende gassamenstelling op te kunnen vangen. Voor snel fluctuerende gassamenstellingen reageert de traditionele zuurstofcorrectieregeling te traag. Dit als gevolg van de dode tijd tussen het verbranden van het gas op een bepaald moment in de

tijd en de reactie van de regeling daarop nadat deze verbranding door de sensor(en) in de schoorsteen wordt gemeten. Een feed forward regeling zou hier uitkomst kunnen bieden. Dit betekent dat de gaskwaliteit voor de installatie continu dient te worden gemeten en dat het meetsignaal als input dient te worden gebruikt voor de correctieregeling. Een dergelijke regeling is op dit moment nog niet in de handel verkrijgbaar, maar is wel in ontwikkeling. DNV GL (voormalig Gasunie Research) werkt hieraan en is voornemens om op korte termijn met partners uit de gaswereld een pilot te starten.

5. Brandstofbesparing met magneten (feit of fictie)

Sinds enkele jaren zijn er leveranciers van magneet-systemen die een brandstofbesparing claimen van tenminste 5%, wanneer een dergelijk systeem in de brandstofleiding van een stooktoestel wordt geïnstalleerd.

Het werkingsprincipe is niet exact duidelijk. De één stelt dat door het extreme magneetveld de brandstofmoleculen een extra sturing in de veldrichting krijgen, de ander beweert dat door het opgewekte magneetveld er clustering van verontreinigingen op nanoschaal in de brandstof plaatsvindt, wat zou leiden tot een meer optimale verbranding. Hoe dit uiteindelijk tot een energiebesparing leidt kan door de leveranciers niet eenduidig worden onderbouwd en beargumenteerd.

In 2014 is door een onafhankelijke instantie een genormeerde vergelijkingsmeting aan een stoomketelinstallatie bij een conservenfabriek in Nederland uitge-

voerd. Hierbij is onder vergelijkbare condities voor- en na installatie van de magneten in de aardgasleiding naar de brander het aardgasverbruik en de hoeveelheid geproduceerde stoom gedurende een periode van 90 minuten bij maximale branderbelasting gemeten. Daarbij werden de keteldruk en het waterniveau in de ketel op een constant niveau gehouden en was de spui-inrichting gesloten. Zodoende kon in beide situaties op directe wijze het specifieke aardgasverbruik in Nm³/ton stoom worden vastgesteld. Daarnaast is in beide gevallen ter controle op basis van de samenstelling van de rookgassen en het verschil tussen rookgastemperatuur en verbrandingsluchttemperatuur op indirecte wijze de hoeveelheid geproduceerde stoom berekend.

De metingen hebben geen besparing aangetoond. Sommige veelbelovende besparende maatregelen blijken uiteindelijk te mooi om waar te zijn.

