

Rapporto tecnico

Rif. (Reparto/Anno/N. seriale)

E-LIV / 2007 / 11

Oggetto/Titolo

Calcolo della portata
dei gas di scarico

Autori

G. Krüger

Luogo

Offenbach

Data

2007-06-22

Reparto

E-LIV / EE23

Tel.

3250

Firma

Progetto

Livorno Ferraris

Firma di approvazione dal reparto interessato
(per contenuto, trattamento, distribuzione)

Firma per approvazione esterna da
Reparto Vendite & Marketing (non
richiesto per documenti di approvazione)

Classe di protezione

Classificazione di esportazione *)

AL:

ECCN:

Codice di progetto	UA o DCC	Codice del contenuto	N. ident. doc.	UNID
ITL351	BP01	CFE	10001	440402891

Indice*)

Pagine di testo: 6 Appendici: 2

Goods labeled with "AL # N" are subject to European or German export authorization when being exported out of the EU. Goods labeled with "ECCN # N" are subject to US reexport authorization. Even without a label, or with label "AL.N" or "ECCN.N", authorization may be required due to the final whereabouts and purpose for which the goods are to be used.

Il presente documento descrive i vantaggi tecnici del metodo di calcolo della portata dei gas di scarico rispetto al metodo di misura diretta degli stessi, per la centrale a ciclo combinato di Livorno Ferraris, Italia.

*) Nei rapporti tecnici aggiungere parole chiave (max. 12) alla fine dell'indice ed inserire la classificazione di esportazione

Distribuzione (aggiungere "f.i.o." se viene distribuito solo l'indice per scopi)		Indice	Vers.	Data	Pagine	Iniziali degli autori	Iniziali per approvazione
PG E-LIV Siemens S.p.A. EIP	Sig. Ehlers Sig. Molinaro Sig. Clematide	A		2007-08-27	4,5,6 generale	Kr	Eh
		B		2007-09-10		Kr	Eh

Siemens AG · Power Generation

Transmittal, reproduction, dissemination and/or editing of this document as well as utilization of its contents and communication thereof to others without express authorization are prohibited. Offenders will be held liable for payment of damages. All rights created by patent grant or registration of a utility model or design patent are reserved.

Protection class:

Table of Contents

1	Indicazioni generali	3
2	Applicabilità	3
3	Scopo	4
4	Procedura di calcolo.....	4
5	Vantaggio del calcolo rispetto al metodo di misurazione diretta	5
6	Conclusione	6

Allegati:

- Lista impianti (centrali elettriche) in cui è stata utilizzato il procedimento di misura tramite calcolo in Inglese
- Documento “Determinazione del flusso volumetrico del gas di scarico secco (velocità) dal consumo di combustibile e dalla misurazione dell'ossigeno secco per un processo di combustione a condizioni standard” in Inglese

Protection class:

-

1 Indicazioni generali

Nel presente documento si fa riferimento al Decreto Autorizzativo del Ministero Attività Produttive N °55/03/2004, relativo alla realizzazione ed esercizio della centrale elettrica di Livorno Ferraris, proprietà E.ON Italia Produzione (EIP). All'articolo 2, punto "Prescrizioni della Regione Piemonte (deliberazione n. 23-12379 del 26 aprile 2004)", viene richiesta una misurazione continua del flusso di gas di scarico.

Tuttavia la misura diretta al camino della portata dei gas di scarico necessita l'utilizzo di un sistema complesso ed inaccurato, e risulta di conseguenza in significativi errori di misura.

Una valutazione molto più precisa rispetto alla misura diretta è ottenuta con il calcolo della portata dei gas di scarico per mezzo dell'analisi di combustione.

Siemens ha già realizzato questa soluzione in numerosi progetti di centrali elettriche nel mondo. Si allega una lista di referenze per i sopracitati progetti.

Inoltre in diversi altri impianti (centrali elettriche) realizzati di recente in Italia è stato già approvato ed utilizzato il sistema ora proposto per Livorno Ferraris.

2 Applicabilità

Il calcolo in questione sarà applicato al Sistema di Monitoraggio in continuo delle Emissioni (SME) per la centrale EIP di Livorno Ferraris, attualmente in fase di realizzazione da parte di Siemens.

Protection class:

3 Scopo

L'obiettivo della presente specifica tecnica è di indicare il metodo di calcolo per la portata del gas di scarico in continuo per mezzo di un'analisi di combustione.

4 Procedura di calcolo

Il calcolo verrà eseguito all'interno dello SME sulla base dei seguenti dati in ingresso:

- portata di gas naturale misurata dal flow computer della turbina a gas;
- composizione e proprietà del gas naturale ottenute tramite gascromatografo;
- concentrazione di O₂ nel gas secco alla ciminiera misurata dallo SME.

Il risultato del calcolo è la portata dei gas di scarico con l'unità fisica [Nm³/h].

Il calcolo che sarà implementato viene descritto più dettagliatamente nel documento allegato "Determinazione del flusso volumetrico del gas di scarico secco (velocità) a partire dal consumo di combustibile e dalla misura dell'ossigeno secco per un processo di combustione a condizioni standard".

L'inesattezza delle misure sopra indicate è limitata alle seguenti percentuali:

- portata del gas naturale: 0,5 %;
- composizione del gas naturale: 2 %;
- Concentrazione O₂: 1 %.

L'incertezza e l'inesattezza totale della misura è quindi del 3,5% circa.

Protection class:

5 Vantaggio del calcolo rispetto al metodo di misurazione diretta

Tutte le procedure di misurazione per la portata in volume considerano il flusso effettivo del gas di scarico umido generalmente a condizioni operative, mentre la concentrazione delle emissioni (CO , NO_x , SO_2) del gas di scarico secco è rilevata a condizioni standard ($T = 273,15 \text{ K}$, $P = 101,3 \text{ kPa}$). Di conseguenza, la portata in volume misurata deve essere corretta con l'umidità, la temperatura e la pressione del gas di scarico per accertare la portata in massa effettiva.

Mentre la temperatura e la pressione possono essere misurate piuttosto esattamente, la procedura di misura dell'umidità è complessa e particolarmente inaccurata. Gli errori di misura devono essere aggiunti a quelli della misura della portata in volume.

In alternativa, l'umidità potrebbe essere anche calcolata. Tuttavia tale calcolo presenta la stessa accuratezza della valutazione proposta per la portata in volume del gas di scarico (vedere sezione 4).

Procedure standard per la determinazione della portata in volume sono misurazioni ad ultrasuoni ed a pressione differenziale (pressione dinamica). A questo riguardo, la velocità del gas di scarico è misurata attraverso il diametro oppure, in alternativa, in un punto fisso e successivamente convertita per la superficie della sezione trasversale del camino di scarico. Un requisito fondamentale è comunque una ripartizione omogenea del gas di scarico sulla sezione del camino, il che normalmente non è possibile. Inoltre, la ripartizione dipende dalla modalità operativa della centrale elettrica. L'inaccuratezza della misura del flusso stessa si aggirerebbe tra il 10 % ed il 15 %.

Protection class:

La misura dell'umidità viene eseguita normalmente per mezzo del rilevamento della concentrazione di O₂ nel gas di scarico secco ed umido. Essa verrebbe misurata pertanto tramite due procedure di misura diverse. Ne risulta un'inaccuratezza della misurazione almeno del 5 %.

Ricapitolando, l'incertezza e l'inaccuratezza della misura complessiva tramite il metodo di misura diretta sarebbe almeno del 15%, o addirittura in determinate condizioni oltre il 20%. Questo valore potrebbe aumentare ulteriormente se la strumentazione di misura non venisse sottoposta ad intervalli regolari alle operazioni di manutenzione secondo le modalità previste.

6 Conclusione

Prendendo in considerazione i vari aspetti, la valutazione del flusso del gas di scarico come descritto nella sezione 4 e nell'allegato è molto più precisa rispetto ad una misurazione continua e diretta. Paragonando l'inaccuratezza totale dei due metodi di misura otteniamo un tasso di errore percentuale appena del 3,5% (metodo a calcolo) contro il 20% (metodo a misurazione).

Di conseguenza si ritiene che il metodo di calcolo sia la soluzione migliore per la valutazione del flusso di gas di scarico.

Attachment 1 to the Technical Report
no. E-LIV / 2007 / 11 “Evaluation of Exhaust Gas Flow”

The calculation of the exhaust gas flow is already realised for the following power plants (extract):

- **Within in the European Community (EC):**
 - Knapsack, Germany
 - Herdecke, Germany
 - Hamm-Uentrop, Germany
 - BASF Ludwigshafen, Germany
 - Dormagen, Germany
 - Köln-Niehl, Germany
 - BASF Antwerpen, Belgium
 - Cottam, England
 - Seabank, England
 - Kårstø, Norway
 - Arrubal, Spain
 - Ribatejo, Portugal
 - Piacenza, Italy

- **Outside the EC:**
 - Tahaddart, Morocco
 - Berrouaghia, Algeria
 - Eskom (Atlantis, Mosselbay), South Africa
 - Taweelah New B, UAE
 - Al Aweer II und III, UAE
 - Deir Ali, UAE
 - Ras Laffan B, Qatar
 - Al Ezzel, Bahrain
 - Marib, Yemen
 - Sumgait, Azerbaijan
 - Songkhla, Thailand
 - Ca Mau, Vietnam
 - Sugan, India

**Attachment 2 to the Technical Report
no. E-LIV / 2007 / 11 “Evaluation of Exhaust Gas Flow”**

**Determination of the Dry Exhaust Gas Volume Flow
(Velocity) from Fuel Consumption and Dry Oxygen
Measurement for a Combustion Process at Standard
Conditions**

Author: Dipl. Ing. (FH) Ch.Dörr
Dept.: Siemens AG, PG L47
Date: 25. Juni 2007
Version: 2.2

1. Definitions, Subscripts, Indices, Physical Properties	3
2. Calculation of the Dry Exhaust Volume per 1 kg Fuel with Stoichiometric Combustion at Standard Conditions (Combustion Equation)	5
3. Calculation of the Factors for Stoichiometric Combustion of 1 kg Fuel in the Combustion Equation.....	5
3.1. <i>Factor of Carbon</i>	5
3.2. <i>Factor of Hydrogen</i>	6
3.3. <i>Factor of Sulfur</i>	8
3.4. <i>Factor of Nitrogen</i>	9
3.5. <i>Factor of Oxygen</i>	10
4. Calculation of the Real Dry Exhaust Volume per 1 kg Fuel at Standard Conditions	12
5. Calculation of the Real Dry Exhaust Volume Flow at Standard Conditions	13
6. Summary	13
7. Example for the Usage of the Flow Calculation.....	14
Annex A	16

1. Definitions, Subscripts, Indices, Physical Properties

Standard conditions: 101.3 kPa (= 1 atm)
 273.15 K (= 0 °C)
 dry gases

Molecular volumes [1]:	N ₂ :	22.403	(Nm ³ /kmole)
	O ₂ :	22.392	(Nm ³ /kmole)
	CO ₂ :	22.261	(Nm ³ /kmole)
	H ₂ O:	21.100	(Nm ³ /kmole)
	SO ₂ :	21.856	(Nm ³ /kmole)
	Air:	22.400	(Nm ³ /kmole)

Molecular weights [1]:	N ₂ :	28.013	(kg/kmole)
	O ₂ :	31.999	(kg/kmole)
	H ₂ :	2.016	(kg/kmole)
	C:	12.011	(kg/kmole)
	S:	32.060	(kg/kmole)

Expressions used:	M _y :	Molecular weight of component y
	V _{M,y} :	Molecular volume of component y
	m _y :	Mass of component y
	x _y :	Molefraction of component y
	v _{z,y} :	Exhaust volume of component y per kg combusted component z
	g _{sd} :	Dry exhaust gas volume from stoichiometric combustion of 1 kg fuel at standard conditions
	g _d :	Dry exhaust gas volume from combustion of 1 kg fuel at standard conditions with exceeding air
	a _{min,d} :	Minimum dry air required for combustion
	λ:	Excess air coefficient
	Nm ³ :	m ³ at standard conditions
	O _{2,dry} :	Dry oxygen content (% vol.) in exhaust gas
	Density _y :	Density of component y
	Exh,d:	Exhaust gas dry
	\dot{V}_y :	Volume flow of component y
	\dot{m}_y :	Mass flow of component y

Air composition (dry air):	N ₂ :	0.7809
(molefractions) [2]	O ₂ :	0.2095
	Ar:	0.0093
	CO ₂ :	0.0003

Simplifications: molefractions = volumefractions
Molefraction^{"air"} nitrogen = 1 - molefraction^{"air"} oxygen

("air" nitrogen represents the components in air except O₂:

$$X_{\text{air}} = 1.0000;$$

$$X^{\text{"air" nitrogen}} = 0.7905;$$

$$X^{\text{"air" oxygen}} = 0.2095)$$

- Required input data:
- Mass flow (or volume flow, see below) of fuel (gas or oil)
 - Fuel composition (and density) from ultimate fuel analysis (see below)
 - Oxygen concentration of dry exhaust gas (see standard conditions)

A similar method which uses the general equation for combustion of hydrocarbons and the fuel-to-air mass ratio of the engine is outlined in [3]. Please note that the standard conditions in [3] are different (i.e. temperature) from the standard conditions used here, so that the volume factors in the general equation for combustion of hydrocarbons in [3] are different from below calculated factors, which are based on above noted standards !

2. Calculation of the Dry Exhaust Volume per 1 kg Fuel with Stoichiometric Combustion at Standard Conditions (Combustion Equation)

$$g_{sd} = \frac{8.89 * C + 20.96 * H + 3.32 * S + 0.80 * N - 2.64 * O}{100} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \quad (2-1)$$

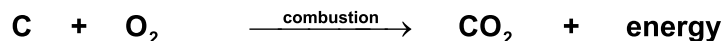
C, H, S, N, O: %-weight (taken from ultimate fuel analysis)

3. Calculation of the Factors for Stoichiometric Combustion of 1 kg Fuel in the Combustion Equation

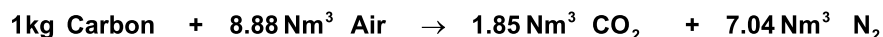
The factors in above shown combustion equation will be explained and calculated in the following (equation 3-1; 3-2; 3-3; 3-4; 3-5) .

3.1. Factor of Carbon

Combustion of carbon with oxygen:



Combustion of 1 kg carbon in air:



Air required for combustion of 1 kg carbon:

$$\frac{1}{M_c} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1\text{kg} * V_{M,\text{air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air}}}{x_{\text{air"oxygen"}}} \right) = v_{C,\text{Air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{12.011} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1\text{kg} * 22.400 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{1}{0.2095} \right) = 8.88 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ Air}$$

Exhaust gas (CO₂) produced by combustion of 1 kg carbon:

$$\frac{1}{M_C} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{M, \text{CO}_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = v_{C, \text{CO}_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{12.011} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.261 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = 1.85 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ CO}_2$$

Nitrogen passing through with combustion of 1 kg carbon in air:

$$\frac{1}{M_C} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{M, \text{air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air} \text{ nitrogen}}}{x_{\text{air} \text{ oxygen}}} \right) = v_{C, \text{N}_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{12.011} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.400 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{0.7905}{0.2095} \right) = 7.04 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ N}_2$$

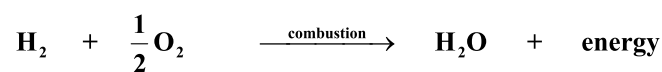
Total produced amount of dry exhaust gas with combustion of 1 kg carbon:

$$1.85 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ CO}_2 + 7.04 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ N}_2 = 8.89 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ gas} \quad (3-1)$$

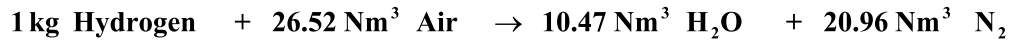
The resulting factor for carbon: $8.89 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$

3.2. Factor of Hydrogen

Combustion of hydrogen with oxygen:



Combustion of 1 kg hydrogen in air:



Air required for combustion of 1 kg hydrogen:

$$\frac{1}{M_{\text{H}_2}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * \frac{V_{\text{M,air}}}{2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air}}}{x_{\text{air"oxygen}}}} \right) = v_{\text{H}_2, \text{Air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{2.016} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * \frac{22.400}{2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{1}{0.2095} \right) = 26.52 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ Air}$$

Exhaust gas (H₂O) produced by combustion of 1 kg hydrogen:

$$\frac{1}{M_{\text{H}_2}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{\text{M,H}_2\text{O}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = v_{\text{H}_2, \text{H}_2\text{O}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{2.016} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 21.100 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = 10.47 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ H}_2\text{O}$$

This volume does not count in the calculation, because the dry exhaust gas volume will be calculated !!

Nitrogen passing through with combustion of 1 kg hydrogen in air:

$$\frac{1}{M_{\text{H}_2}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * \frac{V_{\text{M,air}}}{2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air"nitrogen}}}{x_{\text{air"oxygen}}}} \right) = v_{\text{H}_2, \text{N}_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{2.016} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * \frac{22.400}{2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{0.7905}{0.2095} \right) = 20.96 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ N}_2$$

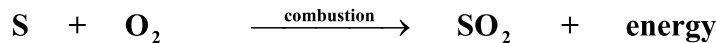
Total produced amount of dry exhaust gas with combustion of 1 kg hydrogen:

$$20.96 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{N}_2 = 20.96 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{gas} \quad (3-2)$$

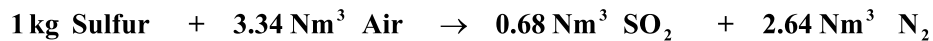
The resulting factor for hydrogen: $20.96 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$

3.3. Factor of Sulfur

Combustion of sulfur with oxygen:



Combustion of 1 kg sulfur in air:



Air required for combustion of 1 kg sulfur:

$$\frac{1}{M_s} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{\text{M,air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air}}}{x_{\text{air"oxygen"}}} \right) = v_{\text{S,Air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{32.060} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.400 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{1}{0.2095} \right) = 3.34 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ Air}$$

Exhaust gas (SO₂) produced by combustion of 1 kg sulfur:

$$\frac{1}{M_s} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{\text{M,SO}_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = v_{\text{S,SO}_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{32.060} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 21.856 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = 0.68 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ SO}_2$$

Nitrogen passing through with combustion of 1 kg sulfur in air:

$$\frac{1}{M_s} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{M,\text{air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air"nitrogen}}}{x_{\text{air"oxygen}}} \right) = v_{S,N_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{32.060} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.400 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{0.7905}{0.2095} \right) = 2.64 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) N_2$$

Total produced amount of dry exhaust gas with combustion of 1 kg sulfur:

$$0.68 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{SO}_2 + 2.64 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) N_2 = 3.32 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{gas} \quad (3-3)$$

The resulting factor for sulfur: $3.32 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$

3.4. Factor of Nitrogen

Nitrogen in fuel just passes the combustion unaffected:

$$1 \text{ kg N} \rightarrow 0.80 \text{ Nm}^3 N_2$$

Exhaust gas (N₂) produced by 1 kg nitrogen:

$$\frac{1}{M_{N_2}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{M,N_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = v_{N_2,N_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{28.013} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.403 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = 0.80 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) N_2$$

Total produced amount of dry exhaust gas with 1 kg nitrogen:

$$0.80 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{N}_2 = 0.80 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{gas} \quad (3-4)$$

The resulting factor for nitrogen: $0.80 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$

3.5. Factor of Oxygen

Oxygen in fuel will be used for combustion and reduces the amount of air needed:



1 kg oxygen in fuel reduces the air amount needed:

$$1 \text{ kg Oxygen} - 3.34 \text{ Nm}^3 \text{ Air} \rightarrow - 2.64 \text{ Nm}^3 \text{ N}_2$$

Reduction of required air for combustion of 1 kg oxygen from fuel:

$$\frac{1}{M_{\text{O}_2}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{\text{M,air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air}}}{x_{\text{air"oxygen"}}} \right) = v_{\text{O}_2, \text{Air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{31.999} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.400 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{1}{0.2095} \right) = 3.34 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{ Air}$$

Oxygen volume produced by 1 kg oxygen (will be used for combustion):

$$\frac{1}{M_{O_2}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{M,O_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = v_{O_2,O_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{31.999} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.392 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) = 0.70 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) O_2$$

Reduction of passing nitrogen volume caused by reduction of required air:

$$\frac{1}{M_{O_2}} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * V_{M,\text{air}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{x_{\text{air"nitrogen}}}{x_{\text{air"oxygen}}} \right) = v_{O_2,N_2} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$\frac{1}{31.999} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right) * 1 \text{ kg} * 22.400 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} \right) * \left(\frac{0.7905}{0.2095} \right) = 2.64 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) N_2$$

Total reduced amount of dry exhaust gas with combustion of 1 kg oxygen from fuel:

$$0.70 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) O_2 - 3.34 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{Air} = -2.64 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) N_2 = -2.64 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) \text{gas} \quad (3-5)$$

The resulting factor for oxygen: $-2.64 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$

4. Calculation of the Real Dry Exhaust Volume per 1 kg Fuel at Standard Conditions

$$g_d = g_{sd} * \frac{21}{21 - O_{2,dry}} \left(\frac{Nm^3}{kg} \right) \quad (4-1)$$

The dry exhaust volume for combustion with exceeding air is given in [6] with the following equations:

$$g_d = g_{sd} + (\lambda - 1) * a_{min,d} \quad (4-2)$$

$$\lambda = 1 + \frac{g_{sd}}{a_{min,d}} * \frac{O_{2,dry}}{21 - O_{2,dry}} \quad (4-3)$$

Inserting equation (4-3) in (4-2) equals (4-1) after some conversions

$$g_d = g_{sd} + \left(\left(1 + \frac{g_{sd}}{a_{min,d}} * \frac{O_{2,dry}}{21 - O_{2,dry}} \right) - 1 \right) * a_{min,d} \quad (4-4)$$

$$= g_{sd} + \frac{g_{sd} * O_{2,dry}}{21 - O_{2,dry}} \quad (4-5)$$

$$= g_{sd} * \left(1 + \frac{O_{2,dry}}{21 - O_{2,dry}} \right) \quad (4-6)$$

$$= g_{sd} * \left(\frac{21 - O_{2,dry} + O_{2,dry}}{21 - O_{2,dry}} \right) \quad (4-7)$$

$$= g_{sd} * \left(\frac{21}{21 - O_{2,dry}} \right) \quad \text{see (4-1)}$$

5. Calculation of the Real Dry Exhaust Volume Flow at Standard Conditions

$$\dot{V}_{\text{Exh,d}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right) = g_d \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) * \dot{V}_{\text{Fuel}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right) * \text{densit}_{\text{Fuel}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \right)$$
$$\dot{V}_{\text{Exh,d}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right) = g_d \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) * \dot{m}_{\text{Fuel}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \quad (5-1)$$

6. Summary

This calculation can be used for each fuel type. The factor g_{sd} is specific for the fuel type and must be calculated for each fuel type (oil and gas) separately. Normally the quality of a fuel type is very constant during the year, so that g_{sd} need to be calculated only one time with an average annual fuel composition. With this ultimate factors for g_{sd} the accuracy of the calculated dry exhaust gas volume flow caused by differences in a nearly constant fuel composition over a year will be within +/- 2 percent. A good indicator for the accuracy is the net heating value of the fuel. 1 % difference in the net heating value causes around 1 % difference in the calculated dry exhaust gas volume flow.

7. Example for the Usage of the Flow Calculation

Average fuel composition: C: 73.02 %-weight
(typical natural gas type H) H: 23.32 %-weight
S: 0.00 %-weight
N: 2.24 %-weight
O: 1.42 %-weight

Fuel density (at 0 °C): 0.79108 kg/Nm³

Fuel consumption (at 0 °C): 17.000 Nm³/s measured

(The fuel consumption is measured as volume flow. The fuel volume flow is measured at the standard conditions).

O_{2,dry}: 14.00 %- Vol measured

Calculation of g_{sd} using the combustion equation (2-1)

$$g_{sd} = \left(\frac{8.89 * 73.02 + 20.96 * 23.32 + 3.32 * 0.00 + 0.80 * 2.24 - 2.64 * 1.42}{100} \right) \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$g_{sd} = 11.36 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

$$g_{sd} = 11.36 * 0.79108 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \right) = 8.987 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \right)$$

(This calculation will be carried out one time with the ultimate fuel analysis and used as constant factor for further calculation in an emissions PC or the DCS).

Calculation of g_d using equation (4-1)

$$g_d = 8.987 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right) * \frac{21}{21 - 14.00}$$

$$g_d = 26.961 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right)$$

(This calculation will be carried out continuously with the oxygen measurement)

Calculation of dry exhaust gas volume flow using equation (5-1)

$$\dot{V}_{\text{Exh,d}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right) = 26.961 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3} \right) * 17.000 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right)$$

$$\dot{V}_{\text{Exh,d}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right) = 458.3 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right)$$

(This calculation will be carried out continuously with the actual fuel flow)

This method is an easy and very effective way to calculate the dry exhaust gas volume flow with only two continuous measurements as input values. Both values are normally measured very accurate. The fuel consumption is an important indicator for the efficiency of the combustion process, the oxygen dry concentration the reference value for normalization of the pollutant concentrations in the gaseous emissions. Due to the fact that all gaseous pollutants are normally measured at dry standard the calculated dry exhaust gas volume flow can be directly taken to calculate the emission rates.

Annex A

Bibliography:

- | | | |
|-----|------------------|---|
| [1] | DIN 1871 | "Gasförmige Brennstoffe und sonstige Gase"
German Standards, Beuth Verlag Berlin, Cologne,
May 1980 |
| [2] | ISO 6976-1983 | "Natural gas - Calculation of calorific value, density and
relative density"
International Organization for Standardization, Geneva,
Switzerland, 1983 |
| [3] | ASME B133.9-1994 | "Measurement of Exhaust Emissions from Stationary Gas
Turbine Engines"
The American Society of Mechanical Engineers, New York,
June 1994 |
| [4] | 40 CFR, Part 60 | "Method 19 - Determination of Sulfur Dioxide Removal
Efficiency and Particular Matter, Sulfur Dioxide, and Nitrogen
Dioxide Emission Rate"
US Federal Register, Title 40, Part 60, Appendix A, Method 19 |
| [5] | 40 CFR, Part 60 | "Standard of Performance for New Stationary Sources,
Subpart GG - Gas Turbines"
US Federal Register, Title 40, Part 60 |
| [6] | R. Günther | "Verbrennung und Feuerungen"
Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1974 |