



Be sure. **testo**

Guía práctica Análisis de gases de la combustión industrial

Guía para la medición de emisiones y procesos

3ª edición revisada

Derechos de autor, garantía y responsabilidades

La información recogida en esta guía práctica está protegida por derechos de autor. Todos los derechos pertenecen exclusivamente a Testo SE & Co. KGaA. Tanto el contenido como las ilustraciones no pueden ser reproducidos, modificados ni utilizados con fines comerciales para otro propósito diferente el expresado aquí sin el previo consentimiento de Testo SE & Co. KGaA.

La información de esta guía práctica ha sido recopilada con el máximo rigor. No obstante, la información proporcionada no es vinculante y Testo SE & Co. KGaA se reserva el derecho a efectuar modificaciones o ampliaciones. Por tanto, Testo SE & Co. KGaA no garantiza la exactitud ni exhaustividad de las informaciones ofrecidas. Queda excluida cualquier responsabilidad por daños, ya sean directos o indirectos, que deriven del uso de esta cartilla práctica, siempre que estos no hayan sido por dolo o imprudencia temeraria.

Testo SE & Co. KGaA, enero de 2018

Prólogo

Estimada lectora:

Estimado lector:

El cálculo de la concentración de gases de combustión permite la supervisión de los valores límite de emisiones requerida legalmente promoviendo la protección del medio ambiente. Generalmente, las concentraciones de gases presentes en el proceso o, por otra parte, las matrices de gases brindan una información excelente sobre la calidad del proceso influyendo de forma notable sobre la calidad del producto.

La cartilla práctica contiene los fundamentos con respecto a los procesos comunes de combustión con un enfoque especial a su aprovechamiento en las aplicaciones industriales. Del mismo modo se describen los métodos de medición disponibles, las particularidades enlazadas con

las tareas de medición, los parámetros de medición de gases indicados, las concentraciones y su significado dentro del proceso. La cartilla es una referencia de consulta útil para el uso de analizadores portátiles de gases en la industria con base en las experiencias de los usuarios globales de los analizadores de Testo.

Cualquier comentario o propuesta de mejora serán bienvenidas en todo momento.

¡Disfrute de la lectura!



Prof. Burkart Knospe,
Presidente de la junta directiva

Índice

Prólogo	1
1. El proceso de combustión	5
1.1 Energía y combustión	5
1.2 Sistemas de combustión	8
1.3 Combustibles	10
1.4 Aire de combustión, factor lambda, dilución, valor de referencia	11
1.4.1 Combustión ideal, coeficiente de razón de aire, balance de sustancias	11
1.4.2 Determinación del factor lambda	14
1.4.3 Requerimiento del aire de combustión	16
1.4.4 Volumen del gas, efecto de dilución, valor de referencia	16
1.5 Gases de combustión	19
1.6 Valor calorífico, poder calorífico, grado de eficiencia	23
1.7 Punto de rocío, condensado	26
2. Análisis de gases en gases de combustión industriales	29
2.1 Optimización de la combustión	31
2.2 Control de procesos	34
2.2.1 Instalación de combustión de proceso	34
2.2.2 Instalaciones de combustión industriales	35
2.2.3 Tratamiento térmico superficial	36
2.2.4 Mediciones de seguridad	37
2.3 Control de emisiones	38
2.3.1 Fundamentos legales en Alemania	39
2.3.2 Prescripciones en Alemania (BImSchV y Regulación TA Luft)	41
2.3.3 Situación en EE.UU.	48
2.3.4 Procedimiento para la limpieza de los gases de combustión	50
3. Tecnología del análisis de gases	54
3.1 Conceptos de la tecnología del análisis de gases	54
3.1.1 Concentración, condiciones normalizadas	54
3.1.2 Acondicionamiento de las pruebas, condensado, calefacción	60
3.1.3 Sensibilidad de interferencia	62
3.1.4 Calibración	64
3.2 Analizadores de gases	65
3.2.1 Conceptos y uso	65
3.2.2 Principios de medición	70

4. Aplicaciones del análisis de gases en la industria	79
4.1 Generación de energía	80
4.1.1 Instalaciones de combustión de sólidos	80
4.1.2 Combustiones de gas	82
4.1.3 Turbinas de gas	84
4.1.4 Combustiones de gasóleo	86
4.1.5 Centrales termoeléctricas de carbón	88
4.1.6 Plantas de cogeneración	91
4.1.7 Plantas de ciclo combinado	93
4.2 Eliminación de desechos	94
4.2.1 Incineración de desechos	94
4.2.2 Combustión latente de desechos	96
4.2.3 Postcombustión térmica	98
4.3 Industria de piedras/tierras	100
4.3.1 Producción de cemento	100
4.3.2 Producción de cerámica/porcelana	102
4.3.3 Fabricación de ladrillos	104
4.3.4 Producción de vidrio	106
4.3.5 Producción de cal	109
4.4 Industria de metales/menas	111
4.4.1 Plantas de sinterización	111
4.4.2 Producción de hierro	113
4.4.3 Producción de acero	115
4.4.4 Hornos de coque	117
4.4.5 Producción de aluminio	119
4.4.6 Tratamiento de la superficie	121
4.5 Industria química	123
4.5.1 Instalación de combustión de proceso	123
4.5.2 Refinerías	124
4.5.3 Mediciones de antorcha	126
4.5.4 Combustión de residuos	127
4.6 Otros	129
4.6.1 Instalaciones para cremación	129
4.6.2 Bancos de pruebas de motor	130
5. Vista general de los analizadores industriales de gases de combustión de Testo	131
5.1 La empresa	131
5.2 Características típicas de los instrumentos	133
5.3 Resumen de los analizadores de gases	135
5.4 Resumen de los accesorios	139
Direcciones	143
Índice alfabético	144

1. El proceso de combustión

1. El proceso de combustión

1.1 Energía y combustión

Energía

Del griego "fuerza influyente" y se define como la capacidad que tiene un material, un cuerpo o un sistema de producir trabajo. La energía puede clasificarse en distintas formas de energía dependiendo del área donde aparezca.

De modo simplificado se habla de seis categorías:

- Energía mecánica (flujo de agua, coche en movimiento, muelle espiral)
- Energía térmica (agua en ebullición, llama de gas)
- Energía química (reacciones químicas, combustión, explosión)
- Energía eléctrica (batería del coche, corriente eléctrica)
- Energía electromagnética (luz, radiación térmica)
- Energía nuclear (fisión nuclear)

Las distintas formas de energía pueden transformarse entre sí teniendo en cuenta que la suma de todas las energías sigue siendo la misma en un sistema idealmente cerrado (principio

de conservación de la energía). Esto es válido realmente haciendo referencia al universo como sistema. Sin embargo, en la práctica se presentan pérdidas durante la transformación de la energía que influyen en el grado de eficiencia del proceso de transformación. Las fuentes de energía presentes en la naturaleza (carbón, gas natural, petróleo, radiación solar, fuerza del agua, entre otras) se denominan energías primarias y las formas derivadas de la transformación (electricidad, calor, entre otras) se denominan energías secundarias. Las fuentes de energía mencionadas no solo se diferencian por la forma de aparición, sino también en su contenido energético. Generalmente, por motivos de comparación se indica la cantidad de energía que podría liberarse en caso de una combustión completa de cierta cantidad de la fuente de energía. La tabla 1 proporciona algunos ejemplos.

La unidad de medida de la energía es el julio (J).

1. El proceso de combustión

Fuente de energía	Contenido de energía [MJ]
1 kg Lignito	9,0
1 kg Madera	14,7
1 kg Hulla	29,3
1 m ³ Gas natural	31,7
1 kg Petróleo	42,6
1 kg Gasóleo, ligero	42,7
1 kg Gasolina	43,5
Como comparación 1 kWh	3,6

Tabla 1: Contenido de energía de diversos combustibles

Conversiones de las unidades de energía:

1 erg	10 ⁻⁷ J
1 cal	4,184 J
1 Btu	1055,06 J
Btu:	British thermal unit

Combustión

Es la transformación de la energía química primaria contenida en los combustibles sólidos tales como el carbón o la madera en energía térmica secundaria mediante el proceso de la oxidación. Es decir, la combustión es el concepto técnico referente a la energía para la reacción del oxígeno con los componentes inflamables de los combustibles sólidos durante la

cual se libera energía.

Las combustiones transcurren bajo temperaturas elevadas (hasta más de 1000 °C) y emisión de calor. El oxígeno necesario se suministra como para del aire de combustión. Al mismo tiempo se genera un volumen considerable de gases de combustión así como cierta cantidad de sustancias residuales dependiendo del tipo de combustible sólido (ceniza, escoria).

Oxidación

Denominación para todas las reacciones químicas en donde se combina una sustancia con oxígeno. La oxidación se efectúa bajo la emisión de energía y es muy importante en la técnica (combustión) y en la biología (respiración).

Efecto invernadero

En principio, el efecto invernadero es un fenómeno natural y un requisito para la vida en el planeta tierra. Sin este efecto, la temperatura global promedio sobre el suelo sería de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y no de $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ como en la actualidad; ¡el planeta tierra sería inhabitable! La causa de este fenómeno natural es el contenido de vapor del aire próximo al suelo que deja pasar la radiación solar, pero que a su vez impide la fuga de la radiación térmica de onda larga producida en el suelo; esta radiación se refleja nuevamente hacia la superficie terrestre. Este principio también es la base del balance térmico de los invernaderos. Sin embargo, este fenómeno natural se incrementa notablemente provocando un aumento lento de la temperatura terrestre que influye sobre las condiciones climáticas debido a la combustión excesiva de combustibles fósiles (emisión de dióxido de carbono) y la liberación de sustancias provenientes del sector químico y la agricultura (CFC, metano, entre otros).

Encontrará más información sobre el tema Combustión en el capítulo 1.4.

1. El proceso de combustión

1.2 Sistemas de combustión

Los sistemas de combustión son mecanismos para la generación de calor mediante la ignición de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Estos se requieren en diversos campos, por ejemplo

- con fines de calefacción (centrales térmicas y calefacciones de edificios),
- para generar energía eléctrica
- para generar vapor o agua caliente (aplicación en la industria de procesos)
- para la producción de ciertos materiales (aplicación en la industria de cemento, vidrio o cerámica)
- para el tratamiento térmico de la superficie de piezas de trabajo metálicas
- para la incineración de residuos y materiales desechados (basura, neumáticos viejos y similares)

A este respecto encontrará ejemplos de uso más detallados en el capítulo 4.

La incineración se lleva a cabo en una cámara de combustión; las demás partes de la instalación sirven para la alimentación y la distribución del combustible, la entrada de aire de combustión, la transmisión térmica y la expulsión de los gases y los residuos de combustión (ceniza y escoria).

Los combustibles sólidos se incineran en un lecho compacto, un lecho fluidizado o una nube de polvo de combustión. Los combustibles líquidos se introducen junto al aire de combustión en forma de niebla a la cámara de combustión a través de un quemador: los combustibles gaseosos se mezclan directamente en el quemador con el aire de combustión.

Los gases de combustión de los sistemas de combustión contienen los productos reactivos del combustible y el aire de combustión así como sustancias residuales entre las que aparecen polvo, óxidos de azufre y nitrógeno así como monóxido de carbono. En la combustión de carbón es posible que los gases de combustión contengan HCl y HF, y en la combustión de material reciclable que se encuentren las propias sustancias (también HCl y HF, así como diversos hidrocarburos,

metales pesados y similares).

En el marco de la protección medioambiental, los gases de combustión de los sistemas de combustión están sujetos a reglamentaciones estrictas con respecto a los valores límite admisibles en el gas limpio (para la expulsión a la atmósfera) provenientes de las sustancias nocivas como el polvo, óxidos de azufre y nitrógeno así como el monóxido de carbono. Para cumplir con estos valores límite, los sistemas de combustión están equipados con mecanismos de altas dimensiones con el fin de limpiar los gases de combustión tales como filtros de polvo y diversos depuradores de gases de combustión. En Alemania, estos requerimientos están estipulados detalladamente en la BImSchV 13 y 17 así como la Regulación TA Luft. Encontrará más información sobre este respecto en el capítulo 2.3.

1. El proceso de combustión

1.3 Combustibles

Los combustibles pueden hallarse en distintas formas y composiciones:

- Los combustibles sólidos (carbón, turba, madera, paja) están compuestos principalmente por carbono (C), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2) y cantidades mínimas de azufre (S), nitrógeno (N_2) y agua (H_2O).
- Los combustibles líquidos se originan del petróleo o su procesamiento haciendo diferencia entre gasóleos extraligeros (EL), ligeros (L), medios (M) y pesados (S).
- Los combustibles gaseosos son una mezcla de gases inflamables (CO , H_2 e hidrocarburos) y no inflamables. Hoy en día se utiliza con frecuencia el gas natural cuyo componente principal es el hidrocarburo metano (CH_4).

El conocimiento de la composición del combustible es la base para ejecutar la combustión de forma óptima y rentable. Una cantidad creciente de sustancias no combustibles (inertes) reduce el valor calorífico o de calefacción y aumenta la suciedad de las superficies de calefacción. Un contenido creciente de agua aumenta el punto de rocío de vapor y consume energía del combustible para la evaporación del agua en los gases de combustión. El azufre contenido en el combustible se incinera convirtiéndose en SO_2 y SO_3 lo que provoca la producción de ácidos sulfurosos agresivos o ácido sulfúrico al enfriarse por debajo del punto de rocío. Para ello consulte el capítulo 1.7

La siguiente tabla muestra la composición de algunos combustibles sólidos.

Combustible	Contenido (contenido de masa en %)			
	Carbono en sustancia seca	Azufre	Cenizas	Agua
Hulla	80-90	1	5	3-10
Lignito blando	60-70	2	5	30-60
Lignito duro	70-80			10-30
Madera (secada al aire)	50	1	1	15
Turba	50-60	1	5	15-30

Tabla 2: Composición de combustibles

En el capítulo 1.6 se encuentran algunas explicaciones sobre el tema Valor calorífico.

1.4 Optimización de la combustión, factor lambda

El aire de combustión suministra el oxígeno necesario para efectuar la combustión. El aire de combustión está compuesto por nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), una pequeña porción de gases nobles y una parte variable de vapor (tabla 3). En algunos casos también se utiliza oxígeno puro o una mezcla de oxígeno/aire para la combustión.

Los componentes fundamentales del aire de combustión (a excepción del oxígeno utilizado en la combustión) también se encuentran en los gases de combustión.

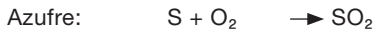
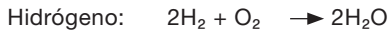
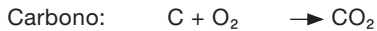
Componente	Contenido en volumen [%]
Nitrógeno	78,07
Oxígeno	20,95
Dióxido de carbono	0,03
Hidrógeno	0,01
Argón	0,93
Neón	0,0018

Tabla 3: Composición del aire puro y seco en la superficie terrestre

1.4.1 Combustión ideal, coeficiente de razón de aire, balance de sustancias

El requerimiento mínimo de oxígeno para una combustión completa (ideal) de los elementos inflamables depende de la composición del combustible: 1 kg de carbono, p. ej. Requiere 2,67 kg de oxígeno para su combustión, por el contrario, 1 kg de hidrógeno 8 kg de oxígeno, pero 1 kg de azufre solo requiere 1 kg de oxígeno. En este caso se habla de proporciones exactas para la combustión ideal o una combustión bajo condiciones estequiométricas.

Las reacciones químicas respectivas son:



En un modelo es posible representar la combustión ideal como se indica en la figura 1:

El oxígeno suministrado es justamente suficiente para incinerar por completo el combustible presente; no hay exceso de oxígeno ni de combustible.

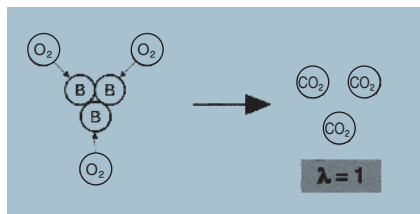


Fig. 1: Modelo de una combustión ideal 11

1. El proceso de combustión

Sin embargo, en la práctica, esta cantidad ideal (mínima) de oxígeno no es suficiente para efectuar una combustión completa debido a una mezcla imperfecta de combustible y oxígeno, es por eso que es necesario aportarle más oxígeno al sistema y, por consiguiente, más aire de combustión de forma contraria a los requerimientos estequiométricos. Esta cantidad de aire adicional se denomina "exceso de aire" y la relación entre la cantidad de aire real y aquella requerida de forma estequiométrica se conoce como factor lambda λ . La fig. 2 muestra la situación en forma de modelo; debido al exceso de aire $\lambda > 1$.

Por consiguiente, el grado de eficiencia máximo de la combustión se consigue donde hay un exceso mínimo de aire u oxígeno, es decir, con $\lambda > 1$ (atmósfera oxidante). El factor lambda o su conocimiento es muy importante para la combustión óptima y la rentabilidad del funcionamiento de la instalación:

- Un exceso de aire innecesariamente alto reduce la temperatura de combustión y aumenta la energía disipada sin utilizar a través del mayor volumen de gases de combustión.
- Si la cantidad de exceso de aire escogida es muy pequeña, además de un bajo rendimiento de utilización del combustible, esto incrementará carga medioambiental nociva producida por los residuos no quemados en los gases de combustión.

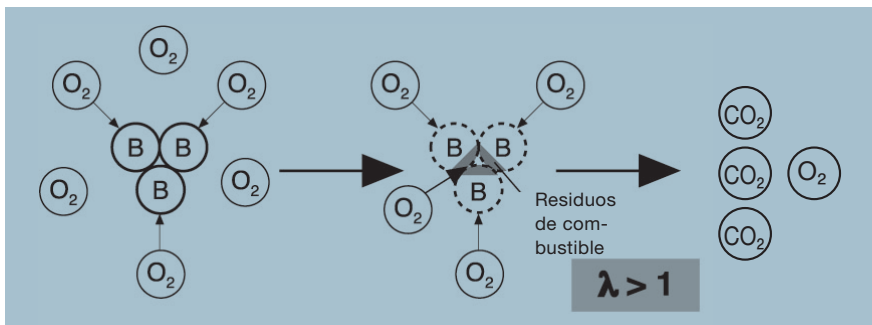


Fig. 2: Modelo de una combustión con exceso de aire

La tabla 4 indica los rangos típicos de la instalación del factor lambda para algunos sistemas de combustión. Principio fundamental: Entre más pequeña sea la superficie de reacción del combustible con respecto a la unidad de medida (combustible de grano grueso), se debe elegir un exceso de aire mayor para una combustión completa. Esto también es válido en sentido contrario y por eso los combustibles sólidos se muelen finamente y los combustibles líquidos se vaporizan. Sin embargo, algunos procesos especiales tales como el tratamiento térmico de la superficie se efectúan deliberadamente donde hay falta de aire con $\lambda < 1$, ya que esto es necesario para garantizar el proceso de refinación deseado.

Instalación de combustión	Rango para λ
Motores de combustión	0,8-1,2
Instalación de combustión de gas	1,1-1,3
Quemador del fuel	1,2-1,5
Quemador de carbón en polvo	1,1-1,3
Caldera para lignito	1,3-1,7
Neón	0,001

Tabla 4: Rangos típicos del factor lambda λ

Atmósfera oxidante

Aquí hay mayor presencia de oxígeno de la necesaria para oxidar las sustancias oxidables en el combustible. Por consiguiente, la oxidación (combustión) puede llevarse a cabo por completo.

En términos sencillos: Oxidación = Acumulación de oxígeno (el CO se oxida para formar CO₂).

Atmósfera reducida

Aquí se encuentra muy poco oxígeno para oxidar todas las sustancias oxidables. Se produce lo contrario de una oxidación: una reducción.

En términos sencillos: Reducción = Eliminación de oxígeno (el SO₂ se reduce a S).

1. El proceso de combustión

1.4.2 Determinación del factor lambda

El factor lambda se puede determinar a partir de las concentraciones de los componentes de los gases de combustión CO , CO_2 y O_2 , las correlaciones se muestran en lo que se denomina diagrama de combustión, figura 3. Si el combustible y el aire se mezclan perfectamente, hay un determinado contenido de CO (en el rango $\lambda < 1$) o un determinado contenido de O_2 (en el rango $\lambda > 1$) para cada contenido de CO_2 . El valor de CO_2 por sí solo no es claro debido a que el transcurso de la curva va más allá del máximo de modo que es necesario una prueba adicional para establecer si además de CO_2 el gas también contiene CO u O_2 . Hoy en día, en el servicio con exceso de aire (es decir, el caso normal) se prefiere generalmente la determinación inequívoca del O_2 . Las curvas son específicas del combustible, es decir, para cada combustible hay un diagrama individual y especialmente

un valor propio para $\text{CO}_{2 \text{ máx.}}$, véase la tabla 7. Las relaciones entre estos numerosos diagramas se resumen con frecuencia en la práctica en forma de un ábaco de fácil manejo ("triángulo de colores", sin representación aquí). Este se puede aplicar a cualquier tipo de combustible.

Para ejecutar el cálculo del factor lambda a partir de los valores medidos del CO_2 u O_2 se aplican aproximadamente las dos fórmulas siguientes:

$$\lambda = \frac{\text{CO}_{2 \text{ máx.}}}{\text{CO}_2} \quad \lambda = 1 + \frac{\text{O}_2}{21 - \text{O}_2}$$

con

$\text{CO}_{2 \text{ máx.}}$: valor de CO_2 máximo específico del combustible (véase tabla 7). A petición, Testo puede prestar el servicio para determinar este valor.

CO_2

y O_2 : valores medidos (o calculados) en los gases de combustión

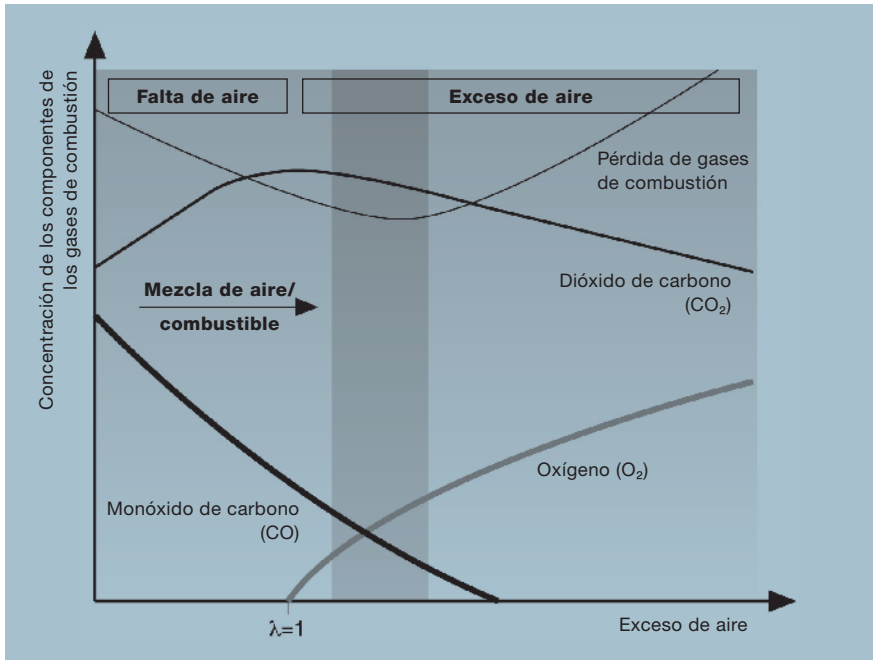


Fig. 3: Diagrama de combustión

En el capítulo 2.1 (Optimización de la combustión) encontrará una representación detallada de las relaciones en el diagrama de combustión.

1. El proceso de combustión

1.4.3 Requerimiento del aire de combustión

La necesidad real de aire se calcula

- a partir de los requerimientos mínimos de oxígeno necesarios para una combustión ideal (depende del combustible),
- el exceso de oxígeno deseado y
- la proporción relativa de oxígeno en el aire. En caso de aire seco es de 20,95 % bajo presión atmosférica. En la práctica, sin embargo, el aire ambiente utilizado como aire de combustión nunca está totalmente seco, de modo que la humedad ambiental también debe tenerse en cuenta para calcular la cantidad de aire con el fin de garantizar un proceso exacto.

1.4.4 Volumen del gas, efecto de dilución, valor de referencia

El aire de combustión y la humedad (vapor) aumentan el volumen absoluto del gas.

La figura 4 muestra este comportamiento para la incineración de 1 kg de combustible. En condiciones estequiométricas, es decir, sin exceso de aire, se producen aprox. 10 m³ de gases de combustión en seco y 11,2 m³ en húmedo, mientras que la misma cantidad de combustible, cuando se quema con un 25 % de exceso de aire en estado húmedo, produce un volumen de gases de combustión de 13,9 m³. Esto tiene el mismo efecto que una dilución, lo que reduce las proporciones relativas de los componentes de los gases de combustión. De este modo, por ejemplo, el contenido constante de SO₂ se reduce relativamente de 0,2 (estequiométrico, seco) a 0,18 (estequiométrico, húmedo) o 0,14 (25 exceso de aire, húmedo) y el oxígeno de 4,4 a 4. Para ello consulte la tabla 5.

	Nitrógeno	CO ₂	SO ₂	Agua	Oxígeno
Esteq./seco	82,6	16	0,20	0	0
Esteq./húmedo	74,7	14,4	0,18	10,7	0
25 % EA / seco	82,8	12,7	0,16	0	4,4
25 % EA / húmedo	75,6	11,6	0,14	8,7	4

Tabla 5: Composición relativa de los gases de combustión en % bajo condiciones diferentes (EA = Exceso de aire)

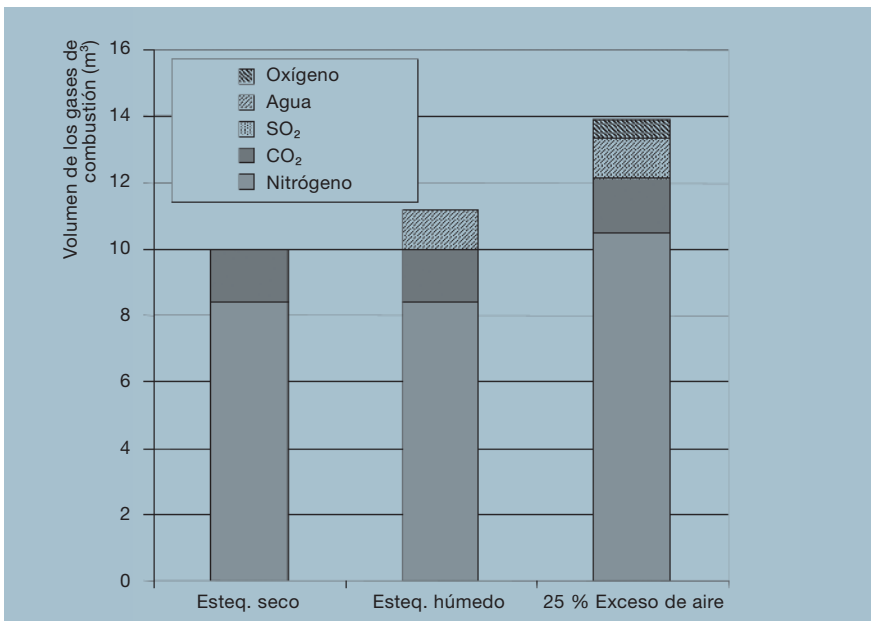


Fig. 4: Efecto de dilución del contenido de humedad y exceso de aire

1. El proceso de combustión

Valores de referencia

A partir de las relaciones explicadas anteriormente se puede concluir que las evaluaciones de las concentraciones solamente se pueden llevar a cabo, por lo general, en combinación con valores de referencia. ¡Solo de este modo los valores medidos brindan información significativa y pueden compararse con otros resultados de medición, sobre todo con las prescripciones legales! En la práctica se utiliza lo siguiente:

- Relación a una determinada dilución por el exceso de aire; una medida es el contenido de oxígeno, la referencia se expresa, por ejemplo, como "valor de referencia 8 % de oxígeno".

Esta referencia con respecto al valor del oxígeno se encuentra generalmente en las prescripciones de la Regulación TA Luft; sin embargo,

se utiliza por fuera de esta Regulación TA Luft: el punto de referencia para una instalación se define en la cercanía del contenido de oxígeno que aparece en estado retraído de la instalación.

- Relación a una determinada dilución por el contenido de humedad del gas; una medida para ello es la temperatura del gas, esta referencia se expresa por ejemplo como "referente a los gases de combustión secos" o "referente al punto de rocío de 4 °C".
- Referencia al estado normalizado de un gas. Esto se refiere a la dependencia del volumen de un gas con respecto a los valores de presión y temperatura actuales, para ello consulte el capítulo 3.1.1

1.5 Gases de combustión y su composición

Los gases de escape generados en los procesos de combustión se denominan gases de combustión.

Su composición depende del tipo de combustible y de las condiciones de combustión, ej. el factor lambda. Muchos de los componentes de los gases de combustión son contaminantes del aire y por tanto deben eliminarse de los gases de combustión conforme a la normativa legal (véase el capítulo 2.3) mediante procedimientos de limpieza extremadamente costosos, antes de liberar el gas a la atmósfera. Los gases de combustión en su composición original se conocen como gases de entrada y como gas limpio una vez que han pasado por las fases de limpieza.

A continuación se explican los principales componentes de los gases de combustión.

Nitrógeno (N₂)

Con el 79 % en volumen, el nitrógeno es el principal componente del aire. Este gas incoloro, inodoro y sin sabor se transporta en el aire de combustión pero no tiene un papel directo durante la combustión; pasa como lastre y medio para disipar el calor para luego

devolverse a la atmósfera. Sin embargo, el nitrógeno contribuye en parte, junto con el nitrógeno del combustible, a la formación de óxidos de nitrógeno peligrosos (véase a continuación).

Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro con un ligero sabor ácido que se genera en todos los procesos de combustión y la respiración. Este gas contribuye fundamentalmente al efecto de invernadero debido a su propiedad de filtro para la radiación térmica. Su contenido en el aire ambiente es solo del 0,03 %; el valor referente a la concentración máxima permitida en el lugar de trabajo es del 0,5 %; concentraciones en el aire inhalado superiores al 15 % producen la pérdida de conciencia en las personas.

Vapor de agua (humedad)

El hidrógeno contenido en el combustible se enlaza con oxígeno para convertirse en agua (H₂O). Dependiendo de la temperatura de los gases de combustión (TG) este aparece como humedad del gas de combustión (a TG elevada) o como agua condensada (a TG baja) junto con el agua del combustible y del aire de combustión.

1. El proceso de combustión

Oxígeno (O₂)

El oxígeno no utilizado en caso de exceso de aire en la combustión aparece como parte gaseosa en los gases de combustión y es un factor de medición para determinar la eficacia energética de la combustión. Se usa para determinar los parámetros de combustión y como parámetro de referencia.

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas tóxico incoloro e inodoro. Se genera principalmente como consecuencia de la combustión incompleta de combustibles fósiles (sistemas de combustión), combustibles de motor (vehículos) y otros materiales que contienen carbono. El CO es, en general, representa una gran peligro para las personas ya que se une rápidamente con el oxígeno del aire para formar CO₂. En recintos cerrados, sin embargo, el CO es extremadamente peligroso, ya que las personas que respiran aire con una concentración de solo 700 ppm morirán en pocas horas. La concentración máxima en el lugar de trabajo es 50 ppm.

Óxidos de nitrógeno (NO y NO₂, fórmula molecular NO_x)

En los procesos de combustión, el nitrógeno del combustible y, a temperaturas elevadas, el nitrógeno contenido

en el aire de combustión se une en cierta medida con el oxígeno del aire de combustión para formar monóxido de nitrógeno NO (NO combustible y NO térmico) en primera instancia, que luego se oxida cuando entra en contacto con el oxígeno en el canal de los gases de combustión y posteriormente en la atmósfera, para formar el peligroso dióxido de nitrógeno (NO₂). Ambos óxidos son tóxicos; especialmente el NO₂ es un peligroso veneno para los pulmones y en combinación con la luz solar contribuye a la formación de ozono. Para limpiar los gases de combustión que contienen NO_x se utilizan tecnologías costosas como el proceso SCR. Medidas especiales relacionadas con la combustión tales como el suministro de aire por etapas se emplean para reducir los óxidos de nitrógeno durante la combustión.

Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas tóxico incoloro con un olor penetrante. Se produce como resultado de la oxidación del azufre contenido en el combustible. La concentración máxima en el lugar de trabajo es 5 ppm. En combinación con agua o condensado, se forman ácido sulfuroso (H₂SO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄); los dos están relacionados con los diversos tipos de

daños medioambientales a la vegetación y edificios. Las plantas de desulfuración de los gases de combustión (FGD) se usan para reducir los óxidos de azufre.

Sulfuro de hidrógeno (H₂S)

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico que huele mal incluso en concentraciones mínimas (aprox. 2,5 µg/m³). Es un componente natural que se encuentra en el gas natural y el petróleo y, por consiguiente, está presente en refinerías e instalaciones de procesamiento de gas natural, pero también en tenerías, actividades agrícolas y, además, tras la combustión incompleta en los convertidores catalíticos de vehículos. Para eliminar H₂S de los gases de combustión se usan diversos métodos incluyendo la combustión para formar SO₂, determinados procesos de absorción o, para proporciones más elevadas, la conversión en azufre elemental en una instalación Claus.

Hidrocarburos

(HC o C_xH_y)

Los hidrocarburos son un amplio grupo de compuestos químicos formados exclusivamente por carbono e hidrógeno. Los HC son las sustancias más importantes de la química orgánica; en la naturaleza se encuentran en el petróleo, gas natural o el carbón. Las

emisiones de HC aparecen durante la fabricación de productos hidrocarbonados (p. ej. en refinerías) así como durante su uso y eliminación (disolventes, plásticos, pinturas, combustibles, residuos, etc.). Las combustiones incompletas son una fuente particular de emisiones de HC. Estas también incluyen los incendios forestales y los cigarrillos, por ejemplo. Los HC también contribuyen al efecto invernadero.

Entre los HC se tienen el metano (CH₄), butano (C₄H₁₀) y benceno (C₆H₆) pero también componentes cancerígenos como el benzopireno. Todo el potencial de los gases de combustión en compuestos orgánicos volátiles se denomina HC total. Esta suma se determina generalmente en los gases de combustión.

Cianuro de hidrógeno (HCN)

El cianuro de hidrógeno (también conocido como ácido cianhídrico) es un líquido extremadamente tóxico con un punto de ebullición de 25,6 °C; En los gases de combustión está presente de forma gaseosa. Además puede encontrarse en instalaciones de incineración de desechos.

1. El proceso de combustión

Amoniaco (NH₃)

El amoniaco juega un papel importante en los gases de combustión en combinación con el proceso SCR, para la reducción de los óxidos de nitrógeno. Este se añade a los gases de combustión en cantidades exactamente dosificadas en reactores de óxidos de nitrógeno y desencadena la conversión de los óxidos de nitrógeno en nitrógeno y agua. La parte no utilizada (pérdida de NH₃) se reduce notablemente mediante etapas de limpieza postconectadas y está presente normalmente en los gases limpios por debajo de los 2 mg/m³.

Haluros de hidrógeno (HCl, HF)

Los haluros de hidrógeno HCl y HF se producen al quemar carbón y/o sustancias residuales formando ácidos agresivos al combinarse con la humedad. La mayoría de estas sustancias se lava de los gases de combustión en las instalaciones limpiadoras de gases de combustión (lavadores).

Contaminantes sólidos (polvo, hollín)

Los contaminantes sólidos en los gases de combustión provienen de los componentes no inflamables de los combustibles sólidos y líquidos. Estos son, por ejemplo, los óxidos de silicio, aluminio, calcio, entre otros en el carbón y los sulfatos de diversas sustancias en gasóleos pesados. El efecto nocivo del polvo sobre las personas se genera debido a la acumulación de sustancias tóxicas y cancerígenas en las partículas de polvo.

1.6 Valor calorífico, poder calorífico, grado de eficiencia, pérdida de gases de combustión

Valor calorífico, poder calorífico

El valor calorífico (anteriormente denominado poder calorífico) es un valor característico del combustible y describe la energía liberada durante la combustión completa en relación a la cantidad de combustible aportada. Por otra parte, el poder calorífico (anteriormente denominado como XXX) es la energía liberada menos el calor de evaporación del vapor de agua generado durante la combustión a 25 °C, en este sentido también en relación con la cantidad de combustible aportada.

El poder calorífico se ubica generalmente por debajo del valor calorífico.

Caldera de condensación

Las calderas de condensación son calderas de calefacción que, además del calor de evaporación, también hacen uso del calor de condensación de los gases de combustión generados reenfriando el gas a la temperatura apropiada. En relación al poder calorífico neto, estas calderas pueden alcanzar una eficacia de combustión de 107. Sin embargo, el condensado generado y con un alto contenido de contaminantes debe eliminarse de

forma ecológica.

Grado de eficiencia de una combustión

El grado de eficiencia es un parámetro calculado mientras la instalación está funcionando de forma constante, a partir de los valores de potencia. El grado de eficiencia (siempre inferior al 100 %) es la relación entre la energía total suministrada desde la cámara de combustión y la energía necesaria o utilizada para la ejecución del proceso (calentamiento, fusión, sinterizado, etc.). El grado de eficiencia se compone de varias partes:

- El grado de eficiencia de la combustión describe la parte de la potencia total suministrada (energía por unidad de tiempo) disponible en la cámara de combustión para usarse después de la combustión. Por esta razón es un parámetro importante con respecto a la calidad de la combustión.
- El grado de eficiencia de la caldera, en función de su diseño, describe la calidad de la caldera y de su funcionamiento basándose en la relación entre la energía suministrada y la energía disponible en la caldera.
- El grado de eficiencia total se obtiene multiplicando el grado de eficiencia de la combustión y de la caldera.

1. El proceso de combustión

Balance energético de una instalación de combustión

En el estado de funcionamiento estacionario, la suma de todas las energías suministradas a la instalación debe ser igual a la suma de las energías emitidas por la instalación; véase la tabla 6.

Energía suministrada	Energía emitida
Poder calorífico y energía sensible del combustible	Calor sensible y energía químicamente ligada de los gases de combustión (pérdida de gases de combustión)
Calor sensible del aire de combustión	Calor sensible y poder calorífico de los residuos de combustible en cenizas y escoria
Equivalente térmico de la energía mecánica transformada en la instalación	Pérdidas superficiales debido a la conducción del calor
Calor aportado con el producto	Calor disipado con el producto
	Pérdidas por convección debido a las fugas en la caldera

Tabla 6: Contribuciones para el balance energético

La parte principal de la pérdida son las pérdidas de los gases de combustión. Este depende de la diferencia entre la temperatura de los gases de combustión y la temperatura del aire de combustión, de la concentración de O_2 o CO_2 en los gases de combustión y de factores específicos del combustible (tabla 7). En las calderas de condensación, estas pérdidas de los gases de combustión se reducen de dos formas, haciendo uso del calor de condensación y mediante la baja temperatura resultante de los gases de combustión.

Las pérdidas de los gases de combustión pueden calcularse usando las siguientes fórmulas:

$$qA = \left[(TG - TA) \times \left[\frac{A2}{(21 - O_2) + B} \right] \right] - KK$$

- TG: Temperatura del gas de combustión
- TA: Temperatura del aire de combustión
- A2, B: Factores específicos del combustible (véase la tabla)
- 21: Contenido de oxígeno en el aire
- O_2 : Concentración medida de O_2
- KK: Parámetro que al no alcanzar el punto de rocío emite el parámetro qA como valor negativo. Necesario para la medición en calderas de condensación.

Para los combustibles sólidos, los factores A2 y B son iguales a cero. La fórmula se simplifica luego usando el factor f para obtener lo que se denomina como la fórmula de Siegert

$$q_A = f \times \frac{TG - TA}{CO_2}$$

Los factores específicos del combustible empleados en las fórmulas se indican a continuación.

Combustible	A2	B	f	CO ₂ máx
Gasóleo para calefacción	0,68	0,007	-	15,4
Gas natural	0,65	0,009	-	11,9
Gas licuado	0,63	0,008	-	13,9
Coque, madera	0	0	0,74	20,0
Briqueta	0	0	0,75	19,3
Lignito	0	0	0,90	19,2
Hulla	0	0	0,60	18,5
Gas de coque	0,60	0,011	-	-
Gas ciudad	0,63	0,011	-	11,6
Gas patrón	0	0	-	13,0
Turba	50-60	1	5	15-30

Tabla 7: Factores específicos del combustible

Nota

Testo puede prestar el servicio para calcular el factor específico del combustible CO₂ máx.

1. El proceso de combustión

1.7 Punto de rocío, condensado

Punto de rocío

El punto de rocío o temperatura del punto de rocío de un gas se refiere a la temperatura a la que la humedad contenida en el gas cambia del estado gaseoso al estado líquido; véase la figura 5. Esta transición se conoce como condensación y el líquido producido, se denomina condensado. La humedad aparece en estado líquido por debajo del punto de rocío y en estado gaseoso por encima del punto de rocío; un ejemplo de esto es la formación y evaporación de la niebla o el rocío en función de la temperatura. El contenido de humedad determina la temperatura del punto de rocío: El aire con un 30 % de contenido de humedad tiene un punto de rocío de

alrededor de los 70 °C, mientras que el punto de rocío del aire seco con un contenido de humedad de solo el 5 % es aproximadamente de 35 °C.

Nota:

Si se ejecuta una medición con un instrumento sin preparación del gas, la temperatura del punto de rocío del gas corresponde aproximadamente a la temperatura ambiente, es decir, 25 °C, por ejemplo. Si estos valores medidos se comparan luego con aquellos valores obtenidos gracias a la preparación del gas, es decir, la temperatura del punto de rocío de 5 °C, se podrá observar una discrepancia del valor medido de aproximadamente 3 % debido a la diferencia en el contenido de humedad.

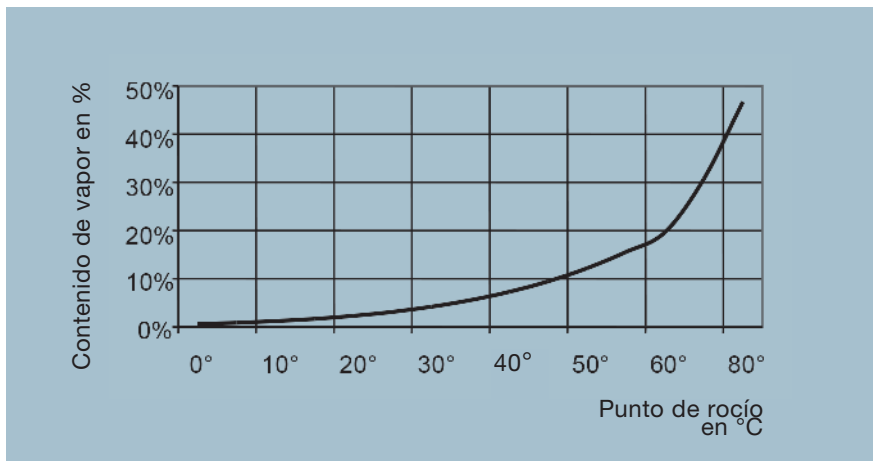


Fig. 5: Contenido de vapor en función del punto de rocío (presión del aire 1013 mbar)

Conductos calentables, refrigerador para el gas a medir

Los gases de combustión con una humedad de 8 % tienen un punto de rocío de aprox. 40 °C produciendo condensado por debajo de esta temperatura. Esto tiene dos consecuencias importantes para toda la instalación y también para la tecnología de medición:

- Si los gases de combustión contienen óxidos de azufre, al combinarse con el vapor condensado a una temperatura de 40 °C (por ejemplo en conductos sin calefacción) se convertirán en ácido sulfuroso (H_2SO_3) o ácido sulfúrico (H_2SO_4) los cuales son bastante corrosivos y pueden provocar daños considerables en las partes de la instalación con las que haya contacto. Por esta razón la temperatura de los gases de combustión en la instalación hasta el lavador de gases de combustión se mantiene por encima del punto de rocío (en el ejemplo por encima de 40 °C).

Lo mismo aplica para las partes de los instrumentos de medición con flujo de gases de combustión y, principalmente, para las partes del mecanismo de extracción de muestras

tales como sondas y tubos flexibles. Por este motivo se utilizan sondas y conductos para el gas a medir calentables cuya temperatura puede mantenerse por encima del punto de rocío del gas. ¡El incumplimiento de esta medida provoca daños de los instrumentos de medición y mediciones erróneas!

- Otras alternativa para evitar la formación de condensado es el método patentado y desarrollado por Testo que consiste en combinar una velocidad de flujo del gas muy elevada con una superficie provista con una recubrimiento especial de los conductos para el gas a medir. De este modo no es necesaria la calefacción de los conductos, un aspecto muy importante para los dispositivos móviles ya que así se reduce el consumo eléctrico. En los gases de combustión refrigerados, dependiendo de la temperatura de refrigeración, hace falta vapor lo que tiene como consecuencia que los demás componentes del gas que permanecen inmodificables como el CO tengan una proporción de gases de combustión relativamente alta; los respectivos valores medidos son más altos en comparación con aquellos de los gases de combustión húmedos. Por consiguiente, el

1. El proceso de combustión

respectivo gas a medir debe tener las mismas temperaturas y el mismo contenido de humedad para lograr valores medidos comparables.

Como consecuencia, en el análisis de gases se utilizan refrigeradores para el gas a medir (también podrían llamarse secadores del gas a medir) antes del analizador los cuales permiten alcanzar una temperatura y un nivel de secado definidos del gas, y mantenerlos en dichos niveles.

Nota

- Refrigerar el gas significa secar el gas.
- En el gas seco, los valores medidos de los componentes del gas están por encima de aquellos en el gas húmedo, en comparación.

Los dispositivos de Testo utilizan el llamado refrigerador Peltier para refrigerar el gas a medir. Su funcionamiento se basa en que los puntos de contacto entre dos metales diferentes se calienten o refrigeren en caso de un flujo de corriente en función de la dirección de la corriente. Este refrigerador puede enfriar el gas a medir con el testo 350 hasta +3 °C y mantener esta temperatura de forma constante.

La desventaja de los refrigeradores de permeabilización disponibles en el mercado es que no pueden mantener el punto de rocío definido, además son propensos al taponamiento mediante partículas de polvo lo que provoca un gasto mayor en piezas de repuesto.



¿Le gustaría leer los otros capítulos también?

[< U clic aquí.](#)

